



João Bastos Primo

Avaliação do desempenho de redes viárias congestionadas - Tráfego, Energia e Segurança



João Bastos Primo

Avaliação do desempenho de redes viárias congestionadas - Tráfego, Energia e Segurança

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Doutora Eloísa Catarina Monteiro de Figueiredo Amaral e Macedo, Investigadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, e coorientação da Professora Doutora Margarida Isabel Cabrita Marques Coelho, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Este trabalho insere-se igualmente no âmbito dos seguintes projetos:

MobiWise (POCI-01-0145-FEDER-016426);
InFLOWence (POCI-01-0145-FEDER-029679);
DICA-VE (POCI-01-0145-FEDER-029463);
UID/EMS/00481/2019-FCT - FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia;
e CENTRO-01-0145-FEDER-022083 - Programa Operacional Regional do Centro (Centro2020), através do Portugal 2020 e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional.

o júri

presidente

Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

arguente

Prof. Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

orientador

Doutora Eloísa Catarina Monteiro de Figueiredo Amaral e Macedo
Investigadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

A realização desta dissertação representa o culminar de uma etapa importante da minha formação académica, e não posso deixar de agradecer a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para que isso fosse possível.

Em primeiro lugar, um agradecimento muito especial à Doutora Eloísa Macedo, que verdadeiramente me orientou ao longo de todo este trabalho, por ter estado sempre disponível para me ajudar e esclarecer todas as dúvidas e pela sua fundamental contribuição, quer na fase de monitorização experimental, quer na criação de um código em Matlab, necessário para este trabalho.

À Doutora Margarida Coelho, pelo acompanhamento de todo o trabalho e pelos importantes conselhos.

Ao Ricardo Tomás deixo também um agradecimento muito especial pela sua enorme colaboração na modelação da rede no VISSIM e pelo tempo e disponibilidade que sempre demonstrou para me ajudar em todas as dificuldades que foram surgindo ao longo das simulações.

Aos restantes colegas do TEMA, Paulo, João, Mónica, Carlos, Behnam, pela ajuda na fase de monitorização experimental.

À PTV Group, na pessoa do Engenheiro Jared Best, pela cedência da licença de utilização do software VISSIM.

À Caetano Auto S.A. pelo empréstimo de viaturas que permitiram a realização deste estudo.

Aos meus amigos e colegas de curso com quem partilhei os últimos cinco anos.

E por último, mas não menos importante, à minha família pelo apoio em todos os momentos.

palavras-chave

Microsimulação, “*rat-running*”, avaliação de desempenho de rede, congestionamento, tempo de viagem, emissões, medidas mitigadoras

resumo

Nas últimas décadas tem-se assistido a um uso intensivo do transporte individual privado, que se destaca pelas suas evidentes vantagens do ponto de vista do utilizador. Tal tendência tem gerado um aumento ao nível de congestionamento, atrasos, acidentes e poluição, principalmente em zonas urbanas, e muitas vezes conduzem à adoção de comportamentos que envolvem algum risco por parte dos condutores. O presente trabalho tem como principal objetivo a análise detalhada de redes viárias em situações de congestionamento e da adoção, por parte dos condutores, de comportamentos inadequados ao tipo de via em que se encontram (como a prática de velocidades excessivas), nomeadamente em situações de atravessamento sistemático de zonas urbanas, aproveitando para isso as potencialidades da microsimulação. A abordagem proposta de avaliação do desempenho de redes viárias assenta em componentes de eficiência em termos de tempos de viagem, ambientais, de ruído e de segurança, e constitui uma ferramenta importante para um processo de planeamento, monitorização, avaliação, definição de estratégia e reorganização, fulcral para uma otimização dos fluxos de tráfego locais. Após a seleção do caso de estudo, foi realizada monitorização experimental por forma a recolher dados tanto de volumes de tráfego, quanto de dinâmica de veículos, para posteriormente, calibrar e validar o modelo de tráfego. As emissões de poluentes foram estimadas usando uma metodologia baseada no conceito de potência específica do veículo (VSP - Vehicle Specific Power). A abordagem de avaliação do desempenho da rede é baseada na atribuição de custos externos relacionados com o tráfego rodoviário a cada segmento da rede. Com recurso aos softwares Matlab e VISSIM (modelo microscópico de simulação de tráfego), desenvolveu-se uma ferramenta que devolve a distribuição ótima de tráfego na rede de forma dinâmica e procurando minimizar externalidades negativas associadas ao tráfego rodoviário. Para além da análise do cenário corrente, foram definidos e simulados cenários alternativos por forma a avaliar o impacto da implementação de possíveis medidas mitigadoras, que visam diminuir o volume de tráfego na via secundária. Os resultados deste estudo mostram que a implementação de uma medida de intervenção/reformulação da rede pode não ser suficiente, e que a adoção de soluções defensivas a nível local pode minimizar as externalidades. Assim, procurando a minimização de custos económicos, é recomendada uma avaliação com recurso a simulação microscópica dos fenómenos de atravessamento sistemático com vista a melhorar o desempenho da rede.

keywords

Microsimulation, "*rat-running*", network performance evaluation, traffic congestion, travel time, emissions, mitigating measures

abstract

In recent decades there has been an intensive use of private individual transport, which stands out for its obvious advantages from the user's point of view. Such a trend has led to an increase in traffic congestion, delays, crashes and pollution, especially in urban areas, and often leads to behaviour that involves some risk from drivers. The main objective of this dissertation is the detailed analysis of road networks in situations of congestion and the use, by drivers, of inadequate behaviour to the type of road they are in (such as the practice of excessive speed), namely in situations of systematic crossing of urban areas, taking advantage of the potential of microsimulation. The proposed approach to road network performance assessment is based on the efficiency in terms of travel times, environmental, noise and safety components and is an important tool for a planning, monitoring, evaluation, strategy and reorganization process, which is central to optimizing local traffic flows. After the selection of the case study, experimental monitoring was performed to collect data on both traffic volumes and vehicle dynamics, to subsequently calibrate and validate the traffic model. Pollutant emissions were estimated using the VSP methodology (Vehicle Specific Power). The network performance assessment approach is based on the allocation of external costs related to road traffic to each network link. Using Matlab and VISSIM software (microscopic traffic simulation model), a tool that dynamically returns the optimal distribution of network traffic and seeks to minimize negative externalities associated with road traffic was developed. In addition to the analysis of the current scenario, alternative scenarios were defined and simulated in order to evaluate the impact of the implementation of possible mitigating measures aimed at reducing the traffic volume on the secondary road. The results of this study show that the implementation of a network intervention/redesign measure may not be enough, and that the adoption of local defensive solutions can be able to minimize externalities. Thus, seeking to minimize economic costs, an evaluation using microscopic simulation of systematic crossing phenomena to improve network performance is recommended.

Índice

Índice de Figuras	III
Índice de Tabelas.....	VII
Índice de Nomenclatura.....	IX
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	2
1.2. Objetivos do trabalho.....	5
1.3. Contribuições do trabalho.....	6
1.4. Estrutura da dissertação	6
2. Estado de Desenvolvimento do Conhecimento	9
3. Princípios Fundamentais da Modelação de Transporte Rodoviário	15
3.1. Redes de transporte e Grafos	16
3.2. Equilíbrio de Wardrop e Paradoxo de Braess	18
3.3. Processo de modelação em transporte rodoviário.....	18
3.3.1. Rede e Zonamento	19
3.3.2. Modelo clássico de transportes	20
3.4. Planeamento e Distribuição de Tráfego em Redes Viárias	22
3.4.1. Distribuição de tráfego.....	22
3.4.2. Congestionamento	25
3.4.3. Fenómenos de atravessamento sistemático de espaços locais.....	26
3.4.3.1. “Rat-Running”	27
3.4.3.2. Medidas Mitigadoras.....	30
3.5. Modelos de microssimulação de tráfego	40
4. Metodologias de Avaliação do Desempenho da Rede.....	45
4.1. Desempenho de redes viárias: externalidades associadas ao tráfego rodoviário.....	45
4.2. Metodologias para estimativa de emissões e consumo combustível.....	48
4.3. Avaliação global do desempenho de redes viárias	51
4.3.1. Metodologia de base.....	51
4.3.2. Metodologia proposta.....	52
5. Aplicação a Estudo de Caso: Avaliação do Comportamento e Desempenho da Rede	55
5.1. Caso em estudo	55
5.2. Parâmetros em estudo e Equipamento necessários para monitorização experimental	58

5.3.	Modelação da rede no software VISSIM.....	59
5.4.	Análise de impactos do tráfego atual e custos associados	65
5.5.	Análise global do desempenho da rede usando microssimulação de tráfego	78
5.5.1.	Calibração e validação do modelo VISSIM	78
5.5.2.	Minimização do tempo de viagem	88
5.5.3.	Minimização do tempo de viagem, emissões de poluentes, ruído e segurança	89
5.5.4.	Introdução de medidas mitigadoras	92
5.5.4.1.	Lombas e passadeiras.....	93
5.5.4.2.	Sinalética vertical: STOP e cedência de passagem	96
5.5.4.3.	Medidas aplicadas em conjunto: lombas e cedência de passagem.....	101
5.6.	Resumo dos resultados	102
6.	Conclusões.....	107
6.1.	Principais resultados e conclusões.....	107
6.2.	Possíveis medidas mitigadoras e recomendações	108
6.3.	Limitações do estudo e Trabalho futuro	109
7.	Referências.....	111
	Anexo I - Contagens detalhadas dos volumes de tráfego.....	119
	Anexo II- Gráficos de restantes poluentes	123

Índice de Figuras

Figura 1. Número de passageiros por modo de transporte, em Portugal (APA, 2019).	2
Figura 2. Transporte individual: Portugal vs União Europeia (APA, 2019).	2
Figura 3. Produção de veículos por tipo na UE, em percentagem (T&E, 2019).	3
Figura 4. Acidentes de viação por tipo de via, em Portugal (Base de Dados Portugal Contemporâneo, 2009).	4
Figura 5. As 10 principais causas de morte entre os jovens de 15-29 anos. (OMS, 2015).	5
Figura 6. Exemplo da representação de um grafo (Picado, 2010).	16
Figura 7. Rede de estradas (Picado, 2010).	17
Figura 8. Estrutura do Modelo dos 4 Passos (Ferreira, 2010).	20
Figura 9. Distribuição de acidentes e vítimas, segundo a localização (ANSR, 2017).	28
Figura 10. Distribuição de acidentes com vítimas, segundo o tipo de via (ANSR, 2017).	29
Figura 11. Tipo de veículos intervenientes em acidentes (ANSR, 2017).	29
Figura 12. Causa identificada para acidentes dos quais resultaram vítimas mortais (ANSR, 2017).	30
Figura 13. Distribuição segundo o tipo de via de peões vítimas mortais, dentro de localidades (ANSR, 2017).	30
Figura 14. Exemplo de uma zona 'woonerf' (Seco et al, 2008).	31
Figura 15. Exemplo de uma zona 'woonerf' (Seco et al, 2008).	31
Figura 16. Exemplo de uma zona 'woonerf' e respetiva sinalização (Seco et al, 2008).	31
Figura 17. Exemplo de zona com limite de velocidade de 30 km/h, na Suíça (Pereira, 2013). ..	32
Figura 18. Exemplo de zona com limite de velocidade de 20 km/h (Seco et al, 2008).	32
Figura 19. Exemplo encerramento total de via (Estrasburgo) (InIR).	34
Figura 20. Esquema encerramento total de via (InIR).	34
Figura 21. Esquema encerramento parcial de via (InIR).	34
Figura 22. Exemplo encerramento parcial de via (Oregon, Estados Unidos da América) (Rodrigues, 2010).	34
Figura 23. Esquema de um separador central numa interseção (InIR).	34
Figura 24. Exemplo de um separador central (EN 234) (Rodrigues, 2010).	34
Figura 25. Exemplo de uma gincana (Pereira, 2013).	35
Figura 26. Rotunda (Coimbra) (Rodrigues, 2010).	35
Figura 27. Esquema de uma gincana (InIR).	35
Figura 28. Mini-rotunda, marcada no pavimento (Cantanhede) (Rodrigues, 2010).	35
Figura 29. Esquema de um estrangulamento pelo centro (InIR).	36
Figura 30. Esquema de um estrangulamento pelo lado (InIR).	36
Figura 31. Exemplo de um estrangulamento pelo lado (Pereira, 2013).	36
Figura 32. Exemplo de um estrangulamento pelo centro (Pereira, 2013).	36
Figura 34. Exemplo de bandas cromáticas (Pombal) (InIR).	37
Figura 33. Exemplo de uma lomba redutora de velocidade, numa zona residencial (Coimbra) (InIR).	37
Figura 36. Exemplo de uma via ao nível do passeio (Coimbra). (Rodrigues, 2010)	37
Figura 35. Exemplo de uma via ao nível do passeio (Estrasburgo). (InIR)	37
Figura 37. Exemplo de uma interseção elevada (Tomar). (Rodrigues, 2010)	37
Figura 38. Exemplo de uma passadeira elevada (Miranda do Corvo). (InIR)	37

Figura 39. Exemplo de um radar de controlo de velocidade. (Pereira, 2013)	38
Figura 40. Exemplo de um semáforo de controlo de velocidade. (Pereira, 2013)	38
Figura 41. Sinal de pré-aviso de semáforo (Cantanhede). (Rodrigues, 2010).....	38
Figura 42. Exemplo de pavimentos diferenciados para os diferentes utilizadores (Estrasburgo). (InIR)	38
Figura 43. Exemplo de aplicação do software de simulação VISSIM (PTV Group)	42
Figura 44. Exemplo de procedimento algorítmico de distribuição de tráfego dinâmica num software de simulação (Chiu, et al., 2011).	43
Figura 45. Esquema ilustrativo dos passos a seguir para obtenção das emissões instantâneas.	50
Figura 46. Caso de estudo. Fonte: Google Maps.	56
Figura 47. Situação de congestionamento na aproximação à rotunda. Fonte: Google Traffic; Data de acesso: 04/07/2019	57
Figura 48. Situação de congestionamento na aproximação à rotunda. Fonte: Google Traffic; Data de acesso: 04/07/2019	57
Figura 49. Percurso rota principal (Fonte: Google Maps).	57
Figura 50. Percurso rota alternativa (Fonte: Google Maps).....	57
Figura 51. Rede modelada no VISSIM.	59
Figura 52. Rede modelada no VISSIM.	59
Figura 53. Rede modelada no VISSIM.	59
Figura 54. Rede modelada no VISSIM.	59
Figura 55. Exemplo da ligação entre links, através de conectores.	60
Figura 56. Exemplo definição das características de um link.....	60
Figura 57. Exemplo da definição das características de um conector.	60
Figura 58. Exemplo da aplicação da ferramenta Desired Speed Decision.	61
Figura 59. Exemplo da aplicação da ferramenta Reduced Speed Area.	61
Figura 60. Exemplo da aplicação de Conflict Areas na rotunda.....	61
Figura 61. Exemplo da aplicação de Conflict Areas num cruzamento.	61
Figura 62. Exemplo da aplicação da ferramenta Parking Lot a uma zona de chegada de veículos.	62
Figura 63. Exemplo da aplicação da ferramenta Parking Lots a uma zona de partida de veículos.	62
Figura 64. Matriz OD para veículos que circulam pela via principal.	63
Figura 65. Matriz OD para veículos que circulam pela via secundária.....	63
Figura 66. Matriz OD para veículos que partem da Rua do Crasto.....	63
Figura 67. Tipos de veículos criados.....	64
Figura 68. Atribuição dos diferentes tipos de veículos às matrizes OD correspondentes.....	64
Figura 69. Período de aquecimento definido.....	64
Figura 70. Ilustração dos locais de interesse ao estudo. Fonte: Google Maps	65
Figura 71. Tempo médio total para cada rota.	67
Figura 72. Velocidade média para cada rota.....	67
Figura 73. Gráfico velocidade-aceleração, para o percurso principal.....	67
Figura 74. Gráfico velocidade-aceleração, para o percurso alternativo.	68
Figura 75. Gráfico sensação de movimento por altitude.	68
Figura 76. Gráfico sensação de movimento por altitude.....	69
Figura 77. Distribuição acumulada para os Modos VSP para as duas rotas.	70
Figura 78. Gráfico de emissões instantâneas de CO ₂ em função da distância percorrida, para 3 das viagens.	70

Figura 79. Gráfico de emissões instantâneas de CO ₂ em função da distância percorrida, para 3 das viagens.	71
Figura 80. Gráfico de emissões instantâneas de CO ₂ em função da distância percorrida, para 3 das viagens.	71
Figura 81. Gráfico de emissões instantâneas de CO ₂ em função da distância percorrida, para 3 das viagens.	72
Figura 82. Gráfico das emissões acumuladas de CO ₂ em função da distância percorrida, para 3 das viagens.	72
Figura 83. Gráfico das emissões acumuladas de CO ₂ em função da distância percorrida, para 3 das viagens.	73
Figura 84. Gráfico das emissões acumuladas de CO ₂ em função da distância percorrida, para 3 das viagens.	73
Figura 85. Gráfico das emissões acumuladas de CO ₂ em função da distância percorrida, para 3 das viagens.	74
Figura 86. Média das taxas de emissão instantânea de CO ₂ de todas as viagens.	74
Figura 87. Média das taxas de emissão instantânea de CO ₂ , de todas as viagens.	75
Figura 88. Emissões acumuladas de emissão de CO ₂ , de todas as viagens.	75
Figura 89. Média das taxas de emissão de NO _x de todas as viagens.	76
Figura 90. Média das taxas de emissão de NO _x de todas as viagens.	76
Figura 91. Emissões acumuladas de emissão de NO _x , de todas as viagens.	76
Figura 92. Custo total associado às emissões de CO ₂ , em ambas as rotas.	77
Figura 93. Custo total associado às emissões de NO _x , em ambas as rotas.	77
Figura 94. Soma dos custos totais associados às emissões de CO ₂ e de NO ₂ , em ambas as rotas.	77
Figura 95. Apresentação dos resultados nos nós.....	79
Figura 96. Definição de contagens nos nós.....	79
Figura 97. Calibração dos volumes de tráfego para o 1º dia de contagens.....	80
Figura 98. Calibração de volumes de tráfego para o 2º dia de contagens.....	81
Figura 99. Definição de dados de recolha de veículos.	82
Figura 100. Definição dos atributos a recolher.	82
Figura 101. Exemplo da definição do gradiente de um conector.	83
Figura 102. Exemplo da definição do gradiente de um Link.	83
Figura 103. Exemplo do bloqueio dos CV_2 à rota principal.	84
Figura 104. Exemplo do bloqueio dos CV_1 à rota alternativa.....	84
Figura 106. Definição de ficheiros gerados pelo Dynamic Assignment.	85
Figura 105. Definição dos critérios de convergência.	85
Figura 107. Definição de parâmetros da simulação.....	85
Figura 108. Configuração da ferramenta Evaluation Configuration para a recolha de dados de trajetória dos veículos.	86
Figura 109. Configuração da ferramenta Evaluation Configuration, para a recolha de dados nos Links e nós.	86
Figura 110. Definição do tipo de veículos, para a recolha dos dados de trajetória.....	86
Figura 111. Definição das variáveis da trajetória do veículo a serem extraídas do VISSIM.....	87
Figura 112. Ilustração das diferenças nos parâmetros do Dynamic Assignment.	88
Figura 113. Definição dos custos a ter em conta pelos veículos (apenas em termos de tempo).	88
Figura 114. Velocidade em função da distância, para cada uma das rotas.	89
Figura 115. Lista dos Links existentes.	90

Figura 116. Seleção do atributo de custo por quilómetro.	90
Figura 117. Introdução dos custos por quilómetro, para cada link.	90
Figura 118. Definição dos custos a ter em conta pelos veículos.....	91
Figura 119. Velocidade em função da distância, para cada uma das rotas.	92
Figura 120. Remover o bloqueio dos CV_2 à rota principal.....	93
Figura 121. Manter o bloqueio do acesso dos CV_1 à rota alternativa	93
Figura 122. Ilustração do posicionamento da lombaa.....	93
Figura 123. Características do comportamento dos veículos na aproximação à lombaa.	94
Figura 124. Velocidade em função da distância, para cada uma das rotas.	95
Figura 125. Velocidade em função da distância, para cada uma das rotas.	96
Figura 126. Ilustração da implementação da cedência de passagem.....	96
Figura 127. Características da zona de cedência de passagem.....	97
Figura 128. Velocidade em função da distância, para cada uma das rotas.	98
Figura 129. Velocidade em função da distância, para cada uma das rotas.	98
Figura 130. Ilustração da implementação do sinal de STOP.	99
Figura 131. Velocidade em função da distância, para cada uma das rotas.	100
Figura 132. Velocidade em função da distância, para cada uma das rotas.	100
Figura 133. Velocidade em função da distância, para cada uma das rotas.	101
Figura 134. Velocidade em função da distância, para cada uma das rotas.	102
Figura 135. Ilustração de trajetos possíveis no ponto de filmagem 1. Fonte Google Maps.....	119
Figura 136. Ilustração de trajetos possíveis no ponto de filmagem 1. Fonte: Google Maps....	119
Figura 137. Ilustração de trajetos possíveis no ponto de filmagem 1. Fonte: Google Maps....	119
Figura 138. Ilustração de trajetos possíveis no ponto de filmagem 2. Fonte: Google Maps....	121
Figura 139. Ilustração de trajetos possíveis no ponto de filmagem 2. Fonte: Google Maps....	121
Figura 140. Ilustração de trajetos possíveis no ponto de filmagem 2. Fonte: Google Maps....	121
Figura 141. Média das taxas de emissão de CO de todas as viagens.....	123
Figura 142. Média das taxas de emissão de CO de todas as viagens.....	123
Figura 143. Emissões acumuladas de emissão de CO, de todas as viagens.....	123
Figura 144. Média das taxas de emissão de HC de todas as viagens.	124
Figura 145. Média das taxas de emissão de HC de todas as viagens.	124
Figura 146. Emissões acumuladas de emissão de HC, de todas as viagens.	124

Índice de Tabelas

Tabela 1. Definição dos diferentes modos VSP.....	49
Tabela 2. Custos associados a cada parâmetro (Essen, et al., 2019).	53
Tabela 3. Especificações dos veículos de teste utilizados. (AutoData.Net)	59
Tabela 4. Caracterização das viagens efetuadas, na monitorização experimental.	66
Tabela 5. Resultados obtidos para cada par de viagens.	66
Tabela 6. Desvio máximo entre Modos VSP das duas rotas.	70
Tabela 7. Valores de GEH para as contagens do dia 1.	80
Tabela 8. Valores de GEH para as contagens do dia 2.	80
Tabela 9. Tempo médio recolhido na monitorização e definição dos "Floating Cars".	81
Tabela 10. Tempo médio simulado e cálculo do p-value.....	82
Tabela 11. Resumo de resultados de Volumes de tráfego e de Tempos médios de viagem (avaliação das rotas principal e alternativa).	103
Tabela 12. Resumo de resultados de Velocidades médias e de Tempo médio de espera (avaliação das rotas principal e alternativa).	103
Tabela 13. Resumo de resultados de Emissão de CO ₂ e de NO _x (avaliação das rotas principal e alternativa).	104
Tabela 14. Resumo de resultados de Emissão de CO ₂ e de NO _x , por unidade de comprimento (avaliação das rotas principal e alternativa).	104
Tabela 15. Resumo de resultados de Tempos de viagem (avaliação global da rede).....	105
Tabela 16. Resumo de resultados de Emissões totais de CO ₂ e de NO _x (avaliação global da rede).....	105

Índice de Nomenclatura

- BEV – Veículo elétrico a bateria (do inglês *“Battery Electric Vehicle”*)
- CNG – Gás natural comprimido (do inglês *“Compressed Natural Gas”*)
- CO – Monóxido de Carbono
- CO₂ – Dióxido de Carbono
- DTA – Distribuição de tráfego dinâmica (do inglês *“Dynamic Traffic Assignment”*)
- EN109 – Estrada Nacional 109
- FCEV – Veículo elétrico com célula a combustível (do inglês *“Fuel Cell Electric Vehicle”*)
- GEE – Gases com Efeito de Estufa
- GEH – Índice de Geoffrey E. Havers
- GPS – Sistema de posicionamento global (do inglês *“Global Positioning System”*)
- HC – Hidrocarbonetos
- HEV – Veículo híbrido elétrico (do inglês *“Hybrid Electric Vehicle”*)
- NO_x – Óxidos de Azoto
- OBD-II – Sistema de diagnóstico a bordo (do inglês *“On Board Diagnostic”*)
- OD – Origem-Destino
- PEMS – Sistema portátil de medição de emissões (do inglês *“Portable Emission Measurement System”*)
- PHEV – Veículo híbrido elétrico *plug-in* (do inglês *“Plug-in Hybrid Electric Vehicle”*)
- PM – Partículas em suspensão (do inglês *“Particulate Matter”*)
- STA – Distribuição de tráfego estática (do inglês *“Static Traffic Assignment”*)
- TEP – Toneladas Equivalentes de Petróleo
- VISSIM – Modelo de Simulação (do alemão *“Verkehr In Städten – SIMulationsmodell”*)
- Vph – Veículos por hora
- VSP – Potência específica do veículo (do inglês *“Vehicle Specific Power”*)
- ZAT – Zonas de Análise de Tráfego

1. Introdução

Ao longo das últimas décadas tem-se assistido a um acelerado processo de urbanização, acompanhado por um crescimento populacional expressivo e pela expansão das atividades industriais e comerciais, o que levou a uma modificação e reorganização do espaço urbano com o propósito de facilitar a circulação de veículos, também eles em número crescente.

De facto, não é possível, hoje em dia, pensar em meio urbano sem pensar em trânsito, ou seja, em viagens diárias e deslocações de pessoas e bens, sejam eles de curta ou longa distância. Trânsito é um conceito que se pode definir como um “conjunto de deslocamentos de pessoas e veículos nas vias públicas, dentro de um sistema convencional de normas, que tem por fim assegurar a integridade dos seus participantes” (Araújo, et al., 2011).

O setor dos transportes tem um impacto determinante tanto na qualidade de vida da população, quanto a nível económico. No entanto, acarreta também alguns pontos negativos (efeitos externos), como o aumento do congestionamento, atrasos no tempo de viagem, poluição sonora e ambiental, e acidentes, prejudicando igualmente a saúde humana, principalmente dos utilizadores vulneráveis (como peões e ciclistas). A título de exemplo, segundo dados do Observatório Europeu da Mobilidade, a média europeia de horas despendidas em deslocações situa-se nas 9 horas e meia semanais, aproximadamente 2 horas por dia (BCG, 2017), enquanto que no caso particular de Portugal, a média de horas gastas é ligeiramente inferior, assumindo um valor um pouco acima das 8 horas semanais, das quais aproximadamente 4 horas correspondem a veículos motorizados individuais. Ora, estes últimos valores demonstram que existe uma dependência do transporte individual. De facto, nos últimos anos tem-se verificado um aumento das vendas de novos veículos ligeiros de passageiros, que atingiu em 2017 um valor de 222,1 mil unidades (cerca de 7,1% superior a 2016). No mesmo ano, o registo dos veículos rodoviários motorizados em circulação ascendeu a uns impressionantes 6,4 milhões de unidades (com 78,5% destes a serem veículos ligeiros de passageiros), o que reflete também um aumento de 3,8% face a 2016, com o consumo de combustíveis a atingir os 5,5 milhões de TEP (toneladas equivalentes de petróleo) (INE, 2018). Esta tendência tem tomado proporções que acabam por influenciar negativamente o meio ambiente (poluição atmosférica, contribuição para o aumento do efeito de estufa, utilização excessiva de recursos não renováveis) e a saúde pública (degradação da qualidade do ar, poluição sonora, elevado número de acidentes) (Peixoto & Teixeira, 2012).

Sendo considerado um setor em constante evolução e que gera desafios, novas abordagens relacionadas com o conceito de mobilidade têm surgido, focadas em reduzir os seus impactos ambientais, económicos e sociais, garantindo a contínua deslocação de pessoas, bens e serviços, nomeadamente a designada mobilidade sustentável. A mobilidade sustentável pode definir-se como “a capacidade de dar resposta às necessidades da sociedade em deslocar-se livremente, aceder, comunicar, negociar e estabelecer relações, sem sacrificar outros valores humanos e ecológicos hoje ou no futuro” (Albatroz, 2005).

Reconhecendo que a mobilidade é um requisito essencial para a garantia dos padrões de qualidade de vida da população, é inevitável minimizar os efeitos externos. Assim, tem-se procurado definir estratégias de atuação e sensibilização que permitam reduzir efeitos nefastos, muitos deles

associados a comportamentos inadequados por parte de condutores, sendo as questões de mobilidade eficiente e sustentável um tema bem patente da agenda global do desenvolvimento sustentável tanto a nível europeu, como nacional e regional.

1.1. Enquadramento

Numa era de urbanização global sem precedentes, onde a sociedade apresenta uma forte procura por mobilidade, o modo rodoviário destaca-se (Figura 1) e, em particular, o transporte individual assume um papel de relevo (Figura 2).

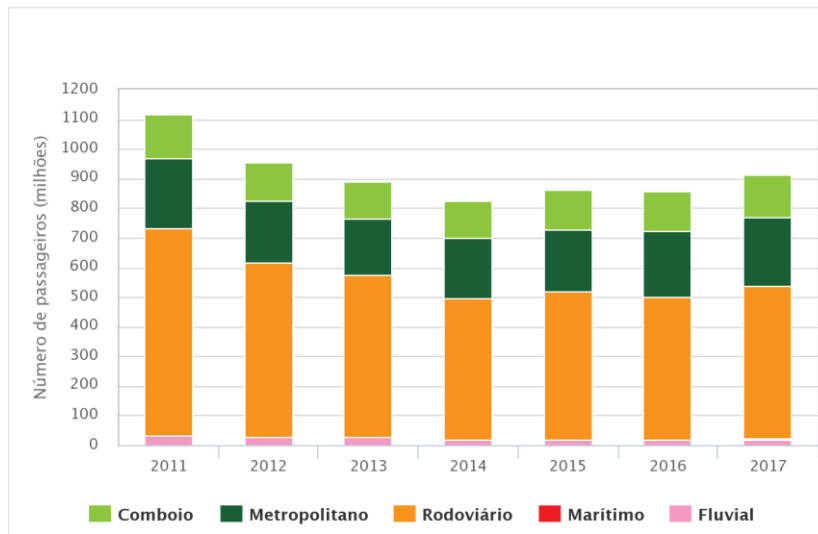


Figura 1. Número de passageiros por modo de transporte, em Portugal (APA, 2019).

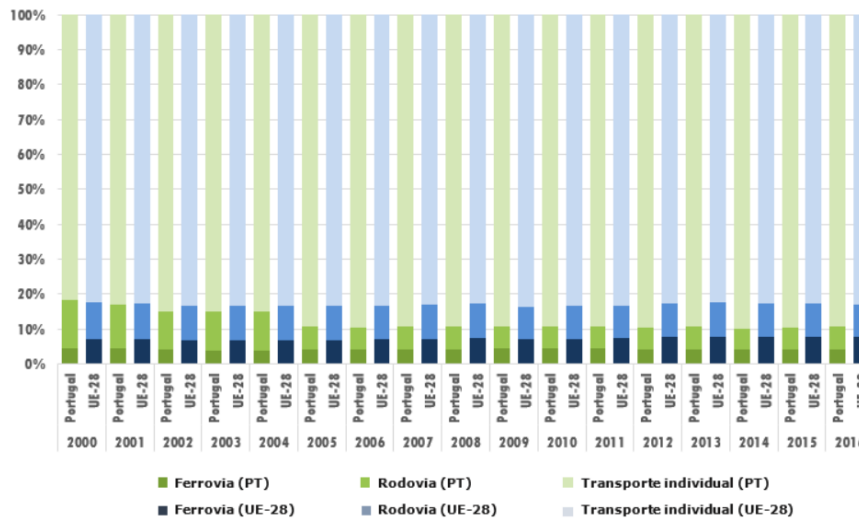


Figura 2. Transporte individual: Portugal vs União Europeia (APA, 2019).

Esta enorme procura, conduz a uma crescente utilização do transporte individual, que se prende pelo facto de permitir: maior flexibilidade (de horários e de trajetos); mais privacidade; maior

conforto; adaptação ao perfil do condutor e às suas necessidades e preferências; facilidade de transportar bagagem (Ribeiro, 2015).

Ora, esta preferência tão vinculada tem, naturalmente, as suas implicações, e manifesta-se sobretudo na forma de congestionamentos de trânsito e zonas de tráfego intenso nas áreas urbanas. Torna-se evidente que implica algumas consequências sociais, económicas e ambientais, tais como: redução das velocidades e, conseqüentemente, maiores tempos de viagem (atrasos) e perda de tempos produtivos; aumento das emissões e, conseqüentemente, maiores níveis de poluição atmosférica e de consumo de combustíveis; ocupação ineficiente do espaço urbano e, conseqüentemente, comportamentos inadequados dos condutores e diminuição da segurança rodoviária, nomeadamente no que respeita a utilizadores vulneráveis (como peões e ciclistas) (Carvalho, 2011).

Reconhecendo esta discrepância no transporte de passageiros, com forte prevalência do transporte individual, o Plano Estratégico de Transportes e Infraestruturas estabelece que uma das soluções a longo prazo para minimizar os impactos negativos associados ao tráfego rodoviário passa pela transferência do transporte individual para o transporte coletivo, sendo para isso necessárias de qualidade e de oferta de serviços públicos de transportes de passageiros a nível local, regional e nacional, adequados à satisfação das necessidades das populações (APA, 2019).

No entanto, essa realidade parece ainda algo distante, tendo em conta não só o enorme desequilíbrio existente entre o transporte individual e o coletivo, mas também o recente desenvolvimento de automóveis híbridos e até exclusivamente elétricos, que permitem uma considerável redução dos efeitos de poluição atmosférica causados pelos veículos convencionais com motores de combustão interna (Józwicka, 2016). Este é, na verdade, um mercado em franca expansão, pelo que não se prevê uma diminuição acentuada na utilização do transporte individual a curto/médio prazo.

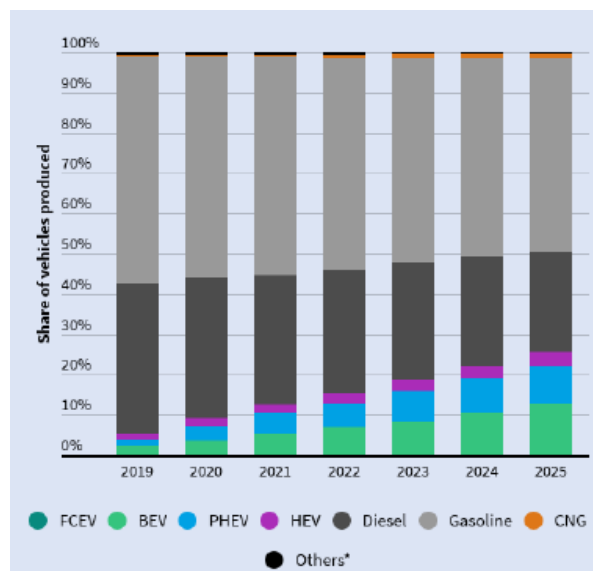


Figura 3. Produção de veículos por tipo na UE, em percentagem (T&E, 2019).

Como é explícito na figura acima, prevê-se um aumento na produção de veículos elétricos e híbridos desde os cerca de 5% no corrente ano de 2019 até aos 25% do total de veículos produzidos, em 2025; por sua vez espera-se ainda que a produção de veículos a gasolina e gasóleo diminua durante

este período. Assim, torna-se expectável que o impacto ambiental (pelo menos a curto prazo), uma das principais consequências da excessiva utilização de veículos, possa ser cada vez menor; no entanto, ainda se desconhecem os reais impactos desta tendência num longo prazo, nomeadamente com a crescente necessidade de utilização de baterias e de produção energia elétrica. Assim, é uma evidência que o número de carros em circulação continuará a ser excessivo, pelo que é de prever que o principal problema seja acima de tudo um problema de espaço e de segurança rodoviária.

Importa, então, perceber e analisar o comportamento das redes rodoviárias em situações de congestionamento, onde os elevados e inevitáveis níveis de tráfego nas vias dos centros urbanos têm conduzido a comportamentos de risco por parte dos condutores e que naturalmente têm consequências no equilíbrio e desempenho da rede o que, em parte, pode ter contribuído para o aumento do número de acidentes verificado nos últimos anos em arruamentos (Figura 4).

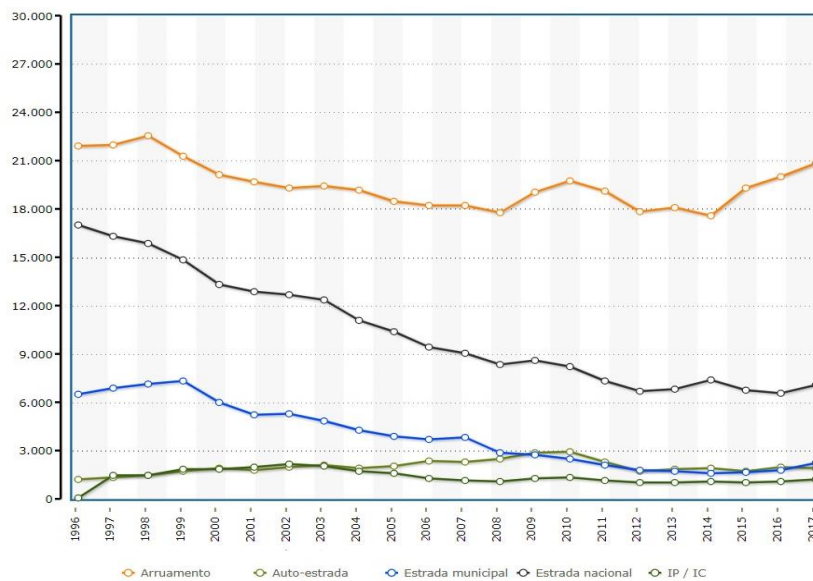


Figura 4. Acidentes de viação por tipo de via, em Portugal (Base de Dados Portugal Contemporâneo, 2009).

Em concordância com o gráfico da figura acima estão outros dados preocupantes, relativos ao ano de 2017: houve em Portugal Continental um aumento de 6,6% no número de acidentes com vítimas (34,4 mil) e de 6,9% no número de vítimas mortais registadas (602), relativamente ao ano precedente (INE, 2018). A nível mundial a tendência é semelhante, tendo-se verificado em 2013 um número de 1,25 milhões de mortes resultantes de lesões no trânsito. De facto, esta é, de acordo com a Organização Mundial de Saúde, a principal causa de morte entre jovens de faixa etária entre os 15 e os 29 anos de idade (Figura 5) (OMS, 2015).

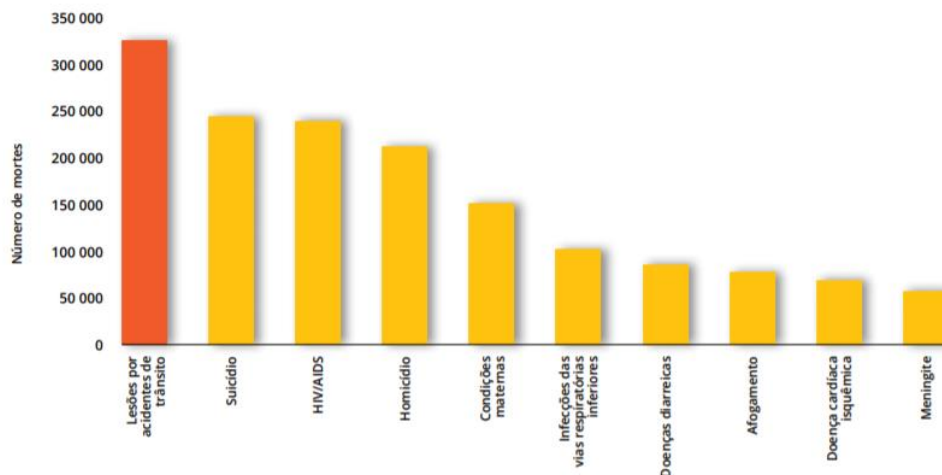


Figura 5. As 10 principais causas de morte entre os jovens de 15-29 anos. (OMS, 2015)

Reconhecendo estas evidências, os chefes de Estado presentes na Assembleia Geral das Nações Unidas de Setembro de 2015, adotaram novas metas para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), sendo uma delas a redução do número global de mortes e lesões relacionadas com o trânsito para metade, até 2020 (OMS, 2015).

Tendo em conta tudo o que foi exposto, é neste contexto que se insere o presente trabalho, pretendendo-se procurar soluções que desencorajem eventuais comportamentos inadequados por parte dos condutores, que possam pôr em causa a eficiência da rede. Neste sentido, o planeamento de modificações numa rede deve, numa primeira fase, incidir num estudo detalhado que passa por uma modelação e simulação do fluxo de tráfego e possíveis incidentes. Isto permite captar a complexidade do trânsito nas vias urbanas e servir de base para uma abordagem efetiva para análise, suporte e avaliação de sistemas de tráfego, nomeadamente a nível local.

Em suma, a mobilidade nos espaços urbanos é hoje uma realidade muito diversificada e complexa, onde o transporte individual se destaca inquestionavelmente, provocando sérios problemas de congestionamento nas redes viárias, muitos dos quais associados a comportamentos inadequados, os quais serão abordados e analisados nesta dissertação com exemplificação num caso de estudo.

1.2. Objetivos do trabalho

A presente dissertação tem como principal objetivo a análise do comportamento e avaliação do desempenho de redes rodoviárias em situações de congestionamento. Mais concretamente, pretende-se estudar o impacto na eficiência da rede de fenómenos de atravessamento sistemático (e abusivo) de espaços locais (por exemplo, residenciais), conhecidos por *“rat-running”*. Estes fenómenos prendem-se com comportamentos inadequados por parte de condutores que procuram (a todo o custo) minimizar o seu tempo de viagem de uma forma egocêntrica ou egoísta (*selfish routing choice*), influenciando muitas das vezes o desempenho da rede de forma negativa, aumentando o congestionamento e o tempo de viagem, e até a distância percorrida.

Para ser possível atingir este objetivo, será necessário cumprir um conjunto de tarefas, começando por uma revisão de literatura cuidada no que respeita a estes fenómenos e, posteriormente, definir um caso de estudo que se enquadre na situação descrita e estabelecer os parâmetros a analisar.

Com vista à aplicação de modelos de simulação de tráfego, segue-se um trabalho de campo que tem como finalidade a recolha de dados que permitam uma representação fiel da realidade. Após as fases de calibração e validação do modelo, procurar-se-á fazer a análise da situação atual do caso de estudo selecionado, e avançar para o tratamento dessa informação, de onde se pretende fazer uma avaliação do desempenho da rede em termos de tempo de viagem, ambientais, energéticos e de segurança, nomeadamente no que respeita a utilizadores vulneráveis

Posteriormente, tem-se como objetivo explorar diferentes cenários de implementação de possíveis medidas mitigadoras de externalidades e que possam melhorar o desempenho da rede.

De forma resumida, pretende-se com este trabalho cumprir/abordar os seguintes pontos:

- Apresentar um estudo detalhado do desempenho da rede rodoviária em situações de congestionamento;
- Explorar o fenómeno de atravessamento sistemática de espaços locais (*rat-running*);
- Definir caso e parâmetros em estudo;
- Construir uma base de dados para simular e aplicar modelos que permitam perceber o comportamento da rede;
- Utilizar e adaptar metodologias que relacionem variáveis de tráfego e que permitam avaliar o desempenho da rede de forma dinâmica, nomeadamente, aproveitando as potencialidades de software de microsimulação (VISSIM);
- Analisar externalidades associadas à distribuição de tráfego na rede (tempo de viagem, distância percorrida, emissões, ruído e acidentes), usando para algumas componentes uma abordagem focada em custos;
- Estabelecer e avaliar cenários alternativos para uma melhoria do desempenho da rede tendo por base uma otimização multiobjetiva.

1.3. Contribuições do trabalho

Primeiramente, procura-se com a temática particular do fenómeno de *rat-running* explorada no presente trabalho contribuir para um conhecimento mais profundo das variáveis implícitas e suas características fundamentais. Visa também alertar para os constrangimentos/perigos decorrentes desta prática, sendo importante para melhorar o entendimento e perceção tanto do ponto de vista do condutor, do utilizador vulnerável, como dos gestores de tráfego e autoridades locais.

A abordagem proposta de avaliação do desempenho de redes viárias assenta em componentes de eficiência, ambientais, de ruído e de segurança, e constitui uma ferramenta importante para um processo de planeamento, monitorização, avaliação, definição de estratégia e reorganização, fulcral para uma otimização dos fluxos de tráfego locais. Mais ainda, a metodologia desenvolvida pode ser adaptada a qualquer rede (escalabilidade).

1.4. Estrutura da dissertação

Este relatório encontra-se dividido em seis capítulos: Introdução, Revisão Bibliográfica, Avaliação Global do Desempenho de Redes Viárias, Avaliação do Comportamento e Desempenho, Modelação da Rede no Software VISSIM e Conclusões.

O presente é um capítulo introdutório onde é feita uma contextualização do tema em estudo no panorama atual e são apresentados os objetivos a que o mesmo se propõe.

O segundo capítulo, Estado de Desenvolvimento do Conhecimento, consiste na revisão da literatura sobre os fenómenos de atravessamento sistemático de vias secundárias, acerca dos quais incide este estudo.

O terceiro capítulo, Princípios Básicos de Modelação de Transporte Rodoviário, foca-se na definição de conceitos relevantes para o desenvolvimento do trabalho, como o Equilíbrio de Wardrop, o Paradoxo de Braess, Grafos e Modelos de transportes, e na sua importância para o planeamento e gestão de tráfego rodoviário. É também feita uma análise da distribuição de tráfego em redes viárias e de fenómenos de atravessamento sistemático de espaços locais, que são o principal objeto de estudo deste trabalho, bem como dos modelos de microssimulação de tráfego existentes.

No capítulo seguinte, intitulado Metodologias de Avaliação do Desempenho da Rede, são analisadas as externalidades associadas ao tráfego rodoviário e são apresentadas algumas metodologias existentes para a estimativa de emissões e de custos associados. Apresentam-se ainda a metodologia que serviu de base para este trabalho e a metodologia proposta para a avaliação global do desempenho da rede viária.

No quinto capítulo, Aplicação a Estudo de Caso, é apresentado o caso de estudo considerado e são descritos os equipamentos utilizados na campanha de monitorização experimental e no tratamento de dados. Há ainda uma descrição do procedimento seguido no software de modelação e, posteriormente, é feita uma análise de conflitos de tráfego existentes (e dos seus custos associados) e do desempenho da rede através da microssimulação (pela simulação dos diversos cenários).

Por último, são apresentadas as conclusões a retirar do trabalho desenvolvido, bem como as dificuldades encontradas no decorrer do mesmo. São ainda propostas algumas medidas que visam diminuir o impacto dos fenómenos em estudo e sugestões de trabalho futuro.

2. Estado de Desenvolvimento do Conhecimento

Apesar dos inúmeros benefícios do transporte rodoviário tem-se verificado nos últimos anos uma crescente preocupação com os efeitos nocivos não só no meio ambiente, mas também nas questões de saúde pública e de vivência urbana. Esta preocupação, aliada aos recentes avanços tecnológicos e a numerosos estudos desenvolvidos nesta área, têm permitido quantificar e analisar impactos e, assim, definir medidas e estratégias que contribuam para a minimização de externalidades e para uma mobilidade mais ecológica e eficiente. Estas estratégias passam, por exemplo, pelo desenvolvimento de modos de transporte menos poluentes (não só individuais, mas também coletivos) e da sua integração com o uso do solo nos processos de planeamento urbano, bem como com medidas de acalmia de tráfego e promoção da segurança. No que se segue serão apresentados alguns estudos cujas conclusões têm particular interesse para os temas em análise na presente dissertação.

Quanto ao desenvolvimento de meios de transporte menos poluentes, têm existido avanços evidentes nos últimos anos, sobretudo pela crescente utilização de veículos híbridos e elétricos, já evidenciada no capítulo anterior, mas não só: um estudo recente, onde são analisados dados referentes a um período entre 2000 e 2014, em diversos países europeus, mostra que mesmo existindo um aumento gradual do número de veículos (particularmente ligeiros) por mil habitantes, tem-se verificado uma estabilização e até, em alguns casos, uma diminuição das emissões de poluentes; para isto, contribuem decisivamente as medidas impostas pela União Europeia no sentido de delimitar a emissão de gases de escape, forçando os novos veículos a estarem equipados com tecnologias que permitam o controlo dessas mesmas emissões (Tafidis et al, 2018). No entanto, segundo o mesmo estudo, conclui-se que ainda há uma necessidade urgente da redução drástica de emissões nocivas e o desenvolvimento de tecnologias de propulsão menos poluentes.

No que diz respeito à integração dos meios de transporte com o uso do solo, esta é uma área mais abrangente e que conta com numerosos estudos que vão desde a previsão de volumes e velocidades de tráfego até aos possíveis problemas que advêm de um elevado nível de congestionamento e às medidas que o permitam controlar, bem como de metodologias para quantificar os seus impactos. De seguida serão apresentados alguns destes estudos.

A previsão de volumes de tráfego e de velocidades é uma área de estudo importante, pois permite estimar a resposta de uma determinada via a solicitações futuras e assim antecipar possíveis problemas que dela advenham. Existem vários modelos que o permitem fazer, desde modelos paramétricos, baseados num conjunto finito de parâmetros, como ARIMA (*Auto-Regressive Integrated Moving Average*) ou KFT (*Kalman Filtering Technique* - exemplo de aplicação em (Kumar, 2017)), e modelos não paramétricos (baseados num conjunto não-finito de parâmetros) como *Bayesian Networks* ou LSTM (*Long Short-Term Memory* - exemplo de aplicação em (Yang et al, 2019)). O grande desafio destes modelos é o de tentar prever as não-linearidades associadas ao tráfego (Polson & Sokolov, 2017), tais como possíveis acidentes, avarias, condições climatéricas adversas ou outros eventos, ou seja, de “prever o imprevisível” (Nagy & Simon, 2018). No vasto leque de estudos nesta matéria, de um modo geral, todos apontam uma previsão fidedigna como uma importante ajuda no sentido de melhorar tomadas de decisão por parte dos condutores quanto à escolha da melhor rota e, deste modo, reduzir problemas de congestionamento e de emissões de poluentes (Tian et al, 2018).

Com o objetivo de estabelecer uma comparação do desempenho do tráfego em áreas urbanas altamente congestionadas, Humphrey et al. levaram a cabo um estudo na região oeste dos Estados Unidos da América e identificaram as seguintes variáveis como principais causadoras de fenômenos de congestionamento (Humphrey et al, 2016): densidade populacional, quantidade da população que diariamente se desloca no seu veículo pessoal, distância média de viagem de cada passageiro por dia, área disponível para a circulação de veículos (difere da distância de viagem por fatores como o número de faixas existentes, etc.) e o orçamento anual para reparação de vias. Existem ainda outras variáveis que também influenciam os níveis de congestionamento, mas que não foram consideradas por dificuldade de quantificação das mesmas, como: o estado do tempo (chuva, neve, etc.), eventos especiais (que resultem num determinado fluxo de tráfego difícil de distinguir do tráfego normal) ou o número de viagens de cada condutor, por dia (por ser difícil de distinguir condutores que fazem múltiplas viagens numa determinada rota, por dia). Os parâmetros utilizados para efetivamente avaliar a eficiência de zonas urbanas congestionadas foram: o tempo de viagem, o custo anual de congestionamento (não só o custo do excesso de combustível consumido, mas também o custo do tempo perdido nestas situações - *time is money*), percentagens de congestionamento (diferenças entre a hora de ponta e os restantes períodos do dia), índices de stress provocados nos condutores e passageiros e a quantidade de acidentes que resultam em fatalidades, por ano. O estudo realça ainda que estes parâmetros não devem ser estudados isoladamente, uma vez que são interdependentes naquilo que é a sua contribuição para os níveis de congestionamento.

Vários estudos têm sido desenvolvidos no sentido de reduzir o congestionamento urbano, bem como minimizar problemas decorrentes com excesso de volumes de tráfego. Um estudo realizado na cidade de Daca (capital do Bangladesh, com quase 9 milhões de habitantes), numa área com forte prevalência de estabelecimentos de ensino que provocam um elevado grau de congestionamento na hora de ponta da manhã recorreu a simulações com o software de microsimulação VISSIM (Muniruzzaman et al, 2019). Os resultados mostram que a introdução de algumas medidas, tais como o aumento do número de faixas, a proibição da inversão de marcha, a implementação de sinais de passagem para peões ou a criação de uma zona de paragem exclusivamente para deixar os alunos, podem permitir uma gestão mais eficaz do trânsito nesse tipo de zonas (Muniruzzaman et al, 2019). Muitos estudos são centrados em casos específicos, pelo que a reprodução das soluções encontradas para outras zonas pode não ter o efeito desejado, sendo necessário uma análise cuidada de cada caso e o desenvolvimento de metodologias que facilitem uma análise, um entendimento e uma avaliação o mais abrangente possível no que respeita ao desempenho de uma rede.

Para além de situações de congestionamento, existem problemas relacionados com a prática de velocidades excessivas por parte dos condutores, bem como a adoção de uma condução volátil (do termo *vehicular jerk*, que decorre de (rápidas) alterações de aceleração). Uma condução inadequada não se prende somente por excesso do limite de velocidade, mas também da falta de perceção das condições existentes, mesmo que essa velocidade seja abaixo do limite em vigor. Assim, e tendo em conta que quanto maior for a velocidade de circulação maior será a probabilidade de envolvimento em acidentes e da gravidade dos mesmos, torna-se de extrema importância controlar as velocidades de circulação através de medidas físicas que efetivamente levem os condutores a adotar comportamentos adequados, principalmente em zonas onde haja exposição dos utilizadores mais vulneráveis (como peões e ciclistas).

Algumas medidas têm demonstrado serem eficazes na redução da velocidade, tais como passadeiras elevadas (ao nível do passeio) e o estreitamento da via (Gonzalo-Orden et al, 2016); no entanto, acarretam alguns custos significativos a nível de investimento na infraestrutura e, portanto, torna-se importante ponderar e estudar as soluções adequadas. Em termos de controlo, os radares de velocidade, são uma das medidas mais aplicadas, geralmente de cariz de intervenção mais pontual, dado que os condutores habitualmente reduzem a velocidade apenas na zona onde o mesmo se encontra, voltando a acelerar após a passagem pelo mesmo (Gonzalo-Ordena et al, 2018). Em ambos os estudos, conclui-se que a eficiência destas medidas é aumentada quando mais do que uma medida de acalmia de tráfego é utilizada de uma forma planeada numa dada zona, contribuindo para uma melhoria na segurança e no conforto da área envolvente. Com o objetivo de quantificar os efeitos destas medidas de acalmia, mais precisamente a nível de acidentes rodoviários, Jateikienė et al. fizeram uma investigação na Lituânia, e os resultados mostram que em vias com implementação de medidas de acalmia de tráfego verticais (como lombas, passadeiras elevadas, etc.- ver capítulo 3.4.3.2.) houve uma redução de mais de 80% no número de mortes e de 63% no número de feridos; e com a instalação de radares de velocidade, houve menos 36% de feridos e menos um terço de vítimas mortais (Jateikienė et al, 2016).

É inegável que estas medidas de acalmia de tráfego são essenciais para o aumento da segurança em zonas urbanas mas, ainda assim, há outros fatores a ter em conta quando se analisa de uma forma global o impacto destas medidas. Um estudo realizado no México que pretende fazer uma análise económica e ambiental destas medidas, levanta uma questão pertinente acerca do assunto: haverá um conflito entre as preocupações ambientais e as prevenções de segurança no trânsito (Jazcilevich et al, 2015)? De facto, Jazcilevich et al. centraram-se na análise de uma estrada secundária da Cidade do México com lombas, de onde se conclui que esta medida provoca um aumento das emissões e dos custos associados ao consumo de combustível e à manutenção do veículo. Estes estudos suportam a ideia de que evidentemente, a segurança e o bem-estar de todos os utilizadores da via são questões importantes, mas que se devem aliar o impacto ambiental na implementação de medidas a nível da infraestrutura. Assim, será desejável reunir metodologias assentes em medidas mitigadoras de externalidades relacionadas com o tráfego rodoviário que sejam abrangentes e completas (multiobjetivo).

As medidas de acalmia de tráfego podem ainda ter consequências no âmbito da vivência urbana. Por exemplo, Polloni S. através de um estudo realizado em Portland, nos EUA, revela que os moradores têm em conta os volumes de tráfego na hora da escolha da habitação e da sua influência num ambiente urbano mais calmo, demonstrando que as medidas de acalmia mais eficientes (e que impliquem uma diminuição de tráfego na ordem dos 16%) chegam a ter um ligeiro impacto no preço das habitações (em cerca de 1%) (Polloni, 2019).

Assim, a tomada de decisão quanto às medidas de acalmia a adotar deve ser incluída num processo de planeamento urbano sustentável e que leve todos estes fatores em linha de conta. É ainda relevante notar que a avaliação da eficácia de cada medida deve ser feita ao longo do tempo, dado que o efeito surpresa aquando da sua implementação pode provocar nos condutores uma reação exagerada e que pode ser alterada após algum tempo de adaptação (Ariën, et al., 2014). De facto, Jamson et al. indicam que o padrão de comportamento dos condutores em relação a cada medida difere, sendo que algumas têm maior impacto quando os condutores não estão familiarizados com elas, enquanto outras tornam-se mais eficazes à medida que o tempo passa e os condutores se habituam (Jamson & Lai, 2011).

Relativamente a uma outra problemática, nomeadamente o atravessamento de localidades em diversos troços de estradas, Rodrigues P. revelou que a aplicação de medidas de acalmia de tráfego passíveis de serem implementadas no país, bem como “a segurança dos utilizadores mais vulneráveis encontra-se ainda pouco enraizada no nosso país, sendo necessário percorrer um longo caminho até que os fatores segurança e qualidade de vida urbana deixem de ser um assunto esquecido ou relegado para segundo plano” (Rodrigues, 2010). É ainda sugerido como um passo importante para a evolução do conhecimento acerca destas matérias a “atualização de uma base de dados relativa à inventariação das medidas já efetivamente implementadas no nosso país” de onde seja possível “permitir a divulgação sustentada da informação relativa aos casos de sucesso ou insucesso, bem como a eficácia associada a cada tipologia de medidas”. Este trabalho reforça a ideia de que, numa era de constante evolução como a que nos encontramos, uma estratégia bem delineada passa pela exploração de medidas que podem efetivamente conduzir a uma minimização das externalidades relacionadas com o tráfego, factos que podem ser testados em ambiente de simulação, que permitem testar diferentes alternativas de forma segura e económica.

No que respeita ao estudo e quantificação dos impactos do congestionamento rodoviário, quer seja do nível de poluição do ar, das alterações climáticas, do ruído, dos tempos de viagem ou da segurança, vários estudos têm surgido na literatura. Alguns desses estudos focam-se numa quantificação em termos de custos monetários têm relevância para o trabalho que se pretende desenvolver nesta dissertação. Recentemente, por exemplo, Fernandes et al. propõem um indicador de sustentabilidade destinado a contabilizar os custos monetários, por veículo, dos referidos impactos (Fernandes, et al., 2019); deste modo, foi possível integrar os custos monetários de cada componente num único indicador o que permite uma análise flexível e confiável com o propósito de reduzir os impactos negativos do tráfego rodoviário. Do mesmo estudo pode concluir-se que o peso das componentes de custos varia de acordo com o tipo de estrada, sendo que em vias rurais/urbanas os acidentes assumiram a principal parcela, enquanto que em autoestradas a maior contribuição foi da emissão de GEE (gases com efeito de estufa) (Fernandes, et al., 2019). Também Sampaio et al. apresentam um procedimento para avaliação dos custos relativos às emissões de GEE, à poluição do ar e à poluição sonora, através de um eco indicador que considera diferentes tipos de veículos e que é ainda ajustado a um fator de vulnerabilidade de acordo com as características demográficas da área em estudo (Sampaio, et al., 2019). Os resultados mostram que com o fator de vulnerabilidade, os custos são 80% e 15% superiores, quer se use como critério de escolha de rota a distância ou o tempo de viagem, o que destaca a importância de ter em conta a “vulnerabilidade da exposição da população aquando da implementação de medidas de gestão de tráfego” (Sampaio, et al., 2019).

Macedo et al. sugerem uma metodologia para avaliação do desempenho de uma rede viária envolvendo três componentes: eficiência da rede em termos de tempo de viagem e distância percorrida, impactes a nível de poluentes globais (CO_2 – dióxido de carbono) que se insere numa componente de alterações climáticas, e uma última componente que visa quantificar impactes mais direcionados a utilizadores vulneráveis relacionada com poluição do ar em termos de emissões de NO_x (óxidos nitrosos) (Macedo et al., 2019). A quantificação de emissões de CO_2 e NO_x baseia-se numa simplificação dos modelos intrínsecos do COPERT, recorrendo apenas à velocidade média num segmento como variável de entrada. Estes modelos simplificados entram como funções objetivo no modelo de otimização multiobjetivo proposto de distribuição de tráfego dinâmica, englobando as três componentes, i.e., a avaliação do desempenho da rede viária é feita tendo em conta a minimização em todo o sistema não só do tempo de viagem, mas também da distância

percorrida, e das emissões de poluentes globais (CO₂) e locais (NO_x). Os resultados obtidos para um caso de estudo compreendido entre duas zonas com diferentes tipos de vias (urbano, rural e autoestrada) demonstram que a solução da distribuição de tráfego ótima para o sistema com base nas três componentes denota melhorias ao nível da distância percorrida (-2.6%) e das emissões (-1.3% para o CO₂ e -1.1% para o NO_x), penalizando o tempo de viagem de cada condutor em somente alguns segundos. Estes resultados podem parecer relativamente baixos em termos de redução de emissões, mas no entanto, para a simples e pequena rede do caso de estudo, se se considerasse para uma mesma distribuição a rondar os 600 veículos por hora, uma perspetiva anual, resultava numa poupança de cerca de 8 toneladas de CO₂ e 20 quilogramas de NO_x, se todos os condutores aceitassem um ligeiro aumento do seu tempo de viagem, mais precisamente, cerca de 20 segundos numa viagem de 12 a 15 minutos (Macedo et al, 2019). Estes estudos em particular fornecem conclusões a nível metodológico que servirão de base para o trabalho que se pretende desenvolver nesta dissertação

No entanto, questões relacionadas com o fenómeno que se pretende abordar nesta dissertação, mais concretamente o fenómeno de “*rat-running*”, podem ser consideradas uma lacuna na investigação, afirmação suportada pelos poucos trabalhos de investigação existentes na literatura sobre esse tópico.

Um dos primeiros estudos sobre o fenómeno de *rat-running* pode ser atribuído a Duffell e Carden (Duffell & Carden, 1983), publicado em 1983 e pouco tempo depois, surge um outro estudo agora por Duffell e Kalombaris (Duffell & Kalombaris, 1988), publicado em 1988. Ambos os estudos foram conduzidos numa zona de Hertfordshire, no Reino Unido, onde para além da disseminação de um questionário se examinou que condutores assumiam um papel de *rat-runners* optando por vias secundárias, ou utilizavam a via principal. Em alguns dos casos estudados, a via de *rat-running* foi mais curta e mais rápida que a via principal, mas a conclusão de destaque é que “o tempo de viagem é o critério mais importante que afeta a escolha da rota do condutor em redes onde existe uma alternativa viável à rota principal” e que os condutores estão dispostos a percorrer uma distância maior se isso reduzir o tempo de viagem. Num estudo mais recente, conduzido na Cidade do Cabo, na África do Sul, confirma os efeitos significativamente negativos desta prática nas localidades onde ocorre, levantando vários problemas (de segurança, de saúde, e até económicos) (Tarrant, 2016). Conclui-se ainda que as principais razões que levam a esta prática são um pobre planeamento urbano, aliado a uma oferta de transporte público abaixo do necessário, sendo que não foram encontradas soluções para a minimização dessa problemática, a curto prazo.

Com o avanço das tecnologias e a facilidade de acesso às mesmas, seria de esperar que sistemas de navegação pudessem facultar indicações de quais os melhores trajetos a usar que servem de ajuda e apoio à tomada de decisão do condutor. Curiosamente, apresentam-se como uma das causas que pode contribuir para a ocorrência do fenómeno de *rat-running*. De facto, Kubota et al. levaram a cabo uma análise comparativa do comportamento de condutores com e sem acesso a sistemas de navegação, de onde se concluiu que os condutores de veículos munidos com esses sistemas tendem a escolher a rota mais direta possível ao seu destino, podendo para isso estar a evitar estradas principais (congestionadas ou não) e recorrer a zonas residenciais ou com algumas singularidades, enquanto que condutores com carros sem sistemas de navegação não fariam (Kubota et al, 1995). Kojima et al. revelam que muitos dos condutores que adotam esta postura já passaram por situações perigosas que poderiam causar acidentes, maioritariamente devido ao facto de as estradas serem mais estreitas do que o esperado (Kojima, Elfferding, & Kubota, 2013).

Como tentativa de evitar estes comportamentos Kojima et al, através de um estudo recente, propõe uma medida que mostrou reduzir em cerca de 10% o volume de tráfego numa estrada residencial (Kojima & Kubota, 2000); a estratégia utilizada consistiu numa campanha de consciencialização dos *rat-runners* assente em duas informações chave: os incómodos causados pelo trânsito na zona residencial (apelando à sua consciência moral) e a comparação do tempo de viagem pelas rotas principal e alternativa (demonstrando que as vantagens não são assim tão relevantes). Os resultados mostram que uma parte dos condutores ao tomarem consciência dos problemas explícitos dessa prática, acabaram por efetivamente mudar o seu comportamento. Verificou-se ainda que este tipo de campanha (*soft measures*) não enfrentou qualquer tipo de resistência ao contrário de medidas impostas (*hard measures*), tais como a implementação de lombas ou estreitamentos de estrada. No entanto, convém salientar que muitas vezes torna-se necessário uma estratégia mais “dura” por forma a que os resultados se prolonguem no tempo.

Assim, na sequência de todos estes estudos apresentados e tendo presente as suas conclusões, a presente dissertação visa estudar ao pormenor o fenómeno de *rat-running* e estabelecer uma comparação ao nível do tráfego, da energia e da segurança entre uma via principal congestionada e uma via alternativa de cariz mais residencial. Para o efeito, propõe-se uma metodologia que permite testar e analisar através de uma perspetiva multiobjetivo do desempenho de uma rede.

3. Princípios Fundamentais da Modelação de Transporte Rodoviário

Os modelos de transporte são uma representação sistemática dos complexos sistemas de transportes e de uso do solo, existentes no mundo real. Tratam-se de poderosas ferramentas que permitem avaliar o impacto efetivo das infraestruturas de transporte e identificar como o sistema de transporte irá responder no futuro às diversas solicitações a que estará sujeito, o que é essencial para o desenvolvimento de um planeamento urbano prático e eficaz (ATAP, 2017).

O desenvolvimento e aplicação destes importantes modelos permite (ATAP, 2017):

- Estabelecer uma estrutura analítica que permita avaliar as exigências de um sistema de transporte e projetar o seu comportamento futuro, de modo a testar sistematicamente o impacto das opções de transporte e de uso do solo;
- Elaborar medidas quantitativas para fornecer indicadores-chave na avaliação de desempenho do sistema.

Para isso, os modelos de transporte usam relações matemáticas que representam as inúmeras e complexas decisões que as pessoas tomam em viagem, para que o seu comportamento futuro possa ser previsto e, assim, replicar os padrões de viagem observados nos vários pontos do sistema. De facto, os modelos de transporte retratam não só a distribuição geográfica de inúmeras viagens, como também a seleção dos diferentes modos alternativos de transporte, de maneira a ser possível caracterizar os volumes de tráfego em cada elemento da infraestruturas (Tavares & Pereira, 2015). De uma forma mais concreta, a estrutura dos modelos de transporte inclui (ATAP, 2017):

- Uma base de dados (volumes de tráfego observados, dados de uso solo e demográficos, atuais e previstos para o futuro, ...);
- Dados de entrada do modelo (custos de viagem, medidas de gestão de tráfego, restrições de acesso, oferta de estacionamento, entre outros);
- Um modelo de procura de viagens (quantidade de viagens numa dada região);
- Um modelo de oferta de transportes (abrange redes rodoviárias e de transportes públicos, e inclui fatores como as suas capacidades, tempos de viagem ou custos de deslocação);
- Um modelo de atribuição (relacionar e adequar a procura de viagens com o modelo de oferta de transporte, de maneira iterativa, para se atingir um equilíbrio);
- Dados de saída do modelo (indicadores de desempenho de rede, indicadores de congestionamento e de emissões, ...).

Existem várias ferramentas de modelação em transporte que permitem uma análise rigorosa do sistema de transporte. Em particular, os modelos de simulação, tais como VISSIM, Paramics, AIMSUN, VISUM (Tavares & Pereira, 2015) têm imensas funcionalidades e vários algoritmos implementados que permitem representar com bastante detalhe a dinâmica de interações de uma rede rodoviária, fornecendo resultados precisos. Os modelos de simulação são ferramentas que podem ser usadas no apoio à tomada de decisão, principalmente importante no que respeita a investimentos ou análise de riscos de implementação de alguma medida específica a nível da rede.

Na base dos modelos de transporte rodoviário estão alguns conceitos teóricos que é fundamental entender, por isso, nos subcapítulos que se seguem, vão ser apresentados numa primeira fase alguns conceitos matemáticos que estão na gênese dos modelos de transporte. Posteriormente, será abordada a modelação em transportes propriamente dita, bem como as suas principais características/etapas, e será exposto o principal modelo que permite sequenciar essas etapas e que é seguido pela grande maioria dos modelos de transportes. Será ainda abordada a distribuição de tráfego em redes viárias e os fenómenos de dela resultam.

3.1. Redes de transporte e Grafos

Uma rede de transporte pode ser extensa e confusa, pelo que é conveniente representá-la de uma forma o mais simples e compreensível possível, o que pode ser feito através de nós/vértices ou arcos/arestas, que simbolizam interseções/cruzamentos e segmentos de estrada, respetivamente.

A Teoria dos Grafos é atualmente uma das áreas mais importantes da matemática discreta. Teve a sua origem em jogos matemáticos, e atribui-se a sua criação a Euler, ao resolver o problema das sete pontes de Königsberg em 1736; mas foi devido a problemas acerca de fórmulas de estrutura de compostos químicos, na segunda metade do século XIX, que se começou a desenvolver esta teoria (Picado, 2010).

Formalmente, um grafo simples, G , consiste num conjunto finito e não vazio, $V(G)$, de elementos chamados vértices e num conjunto finito, $A(G)$, de pares não ordenados de elementos distintos de $V(G)$, chamados arestas (Picado, 2010). Por outras palavras, um grafo é uma representação de elementos e das relações entre eles através de vértices e arestas (Figura 6).

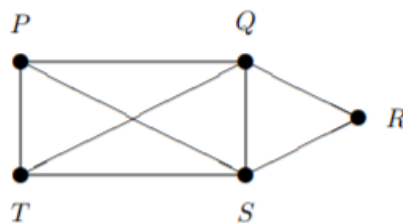


Figura 6. Exemplo da representação de um grafo (Picado, 2010).

Hoje em dia, a Teoria dos Grafos é aplicada em muitas e diversas áreas (informática, investigação, economia, etc.), uma vez que um grafo constitui o modelo matemático ideal para o estudo das relações entre objetos discretos de qualquer tipo e que se podem representar através de uma rede (Picado, 2010). Por exemplo, na Figura 7, pode-se observar uma rede de estradas, cujas relações podem ser representadas pelo grafo da Figura 6.

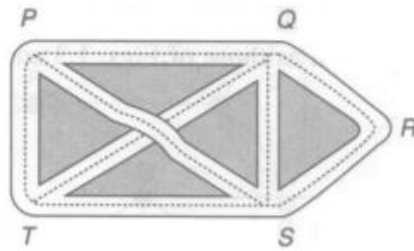


Figura 7. Rede de estradas (Picado, 2010).

Trata-se assim, de uma forma simples, de representar a topologia de uma rede rodoviária. Para tal, consideram-se os vértices correspondentes a cruzamentos, interseções ou outros locais de interesse nas vias em análise e as arestas como os segmentos de estradas entre esses pontos (Thomson & Richardson, 1995). Note-se que neste caso, sendo o mapa de estradas visto como um grafo, e tendo informações relativas às relações entre os vários vértices do mesmo (como por exemplo dados de comprimento de estradas, de tempo ou custo de percorrê-las), poder-se-ia através de um algoritmo adequado, determinar o caminho mais curto, o mais rápido ou o mais económico.

Por exemplo, o algoritmo de Dijkstra, desenvolvido em 1959 pelo holandês Edsger Wybe Dijkstra (Goldberg), permite calcular o caminho mais curto entre determinados nós de um grafo, de acordo com o custo/peso das arestas que os ligam (no caso de uma rede de transportes estamos a falar de distâncias ou tempos/custos de viagem), sendo que não considera valores negativos para estes custos. O referido algoritmo consiste em, começando pelo nó inicial, encontrar sucessivamente o nó mais “próximo” (com menor peso da aresta), até que todos os restantes nós do grafo tenham sido percorridos, e se tenha chegado ao nó de destino (Santos & Rangel). Trata-se de um procedimento relativamente simples porém, quando num nó intermédio existem várias opções de caminhos disponíveis, o tempo de análise será naturalmente maior, uma vez que o algoritmo armazena a rota escolhida inicialmente e compara com as restantes até o menor caminho ser encontrado (Santos & Rangel). Várias versões deste algoritmo têm sido desenvolvidas, apresentando melhorias em termos de tempo computacional.

Existem outros algoritmos que se destacam por admitir possibilidades que o algoritmo de Dijkstra não contempla. O algoritmo de Bellman-Ford, por exemplo, resolve o mesmo problema do caminho mais curto com um procedimento semelhante, só que permite a existência de pesos negativos nas arestas (Rossetti et al, 2011); no entanto, o tempo de execução requerido por este por vezes é superior ao de Dijkstra (Cormen et al, 2001). Entretanto, outros algoritmos mais avançados têm sido propostos na literatura e implementados em softwares específicos, como é o caso do VISSIM, que iremos explorar mais à frente.

Assim, e tendo em conta que quando se tratam de modelos de transporte os valores associados aos pesos das arestas não assumem valores negativos (distâncias, tempos e custos são variáveis positivas), percebe-se que o algoritmo concebido por Dijkstra é uma ferramenta importante para o desenvolvimento destes modelos, já que se afigura como um método eficaz na procura do caminho mais curto.

3.2. Equilíbrio de Wardrop e Paradoxo de Braess

O equilíbrio de Wardrop tem como princípio reduzir ao máximo o tempo global de percurso de cada condutor dentro de uma rede. Em particular, do ponto de vista do condutor, este procurará minimizar o seu próprio tempo de viagem, adotando uma postura comumente designada por egoísta ao escolher a rota que o satisfaz (*selfish routing choice*). Este comportamento pode influenciar negativamente o desempenho da rede (Correa & Stier-Moses, 2011). Podia também julgar-se que a introdução/abertura de mais vias poderia facilitar e resolver os problemas relacionados com congestionamento e tempo de viagem. No entanto, um outro conceito importante inerente à modelação em transporte rodoviário é o paradoxo de Braess, um resultado que mostra que, em equilíbrio, adicionar uma via alternativa pode aumentar o custo de viagem para cada utilizador da rede de transporte, tanto a nível de congestionamento de tráfego, como de consumo de combustível, de emissões de poluentes, ou até de segurança, prejudicando assim o desempenho da mesma (Rapoport et al, 2009). Deste modo, pode-se estar perante um efeito contraintuitivo: uma extensão na rede rodoviária pode causar uma redistribuição do tráfego, o que pode levar a um aumento do congestionamento e do tempo de percurso individual; por outro lado, o fecho de estradas existentes pode diminuir o congestionamento do tráfego. Este conceito foi inicialmente explorado por Dietric Braess, em 1968, tentando precisamente encontrar uma explicação matemática para este contrassenso (Baker, 2009).

Na prática, tal conclusão pode ser demonstrada, por exemplo, num caso que remonta a 1999, quando um dos principais túneis da capital da Coreia do Sul foi fechado para manutenção. O resultado expectável seria congestionamento e filas de trânsito intermináveis, mas, na realidade, o trânsito melhorou. Na sequência destes acontecimentos, foi demolida uma autoestrada cujo destino era o centro de Seul, com o mesmo resultado benéfico em termos de fluxo de tráfego (Debney, 2014).

Contudo, é importante notar que nem sempre adicionar uma via alternativa tem como consequência uma diminuição do desempenho da rede de transporte. De facto, não é fácil prever quando é que uma determinada alteração na infraestrutura irá induzir este paradoxo, mas pode-se dizer que ele ocorre principalmente quando uma dada melhoria atrai um volume de tráfego desproporcional, cujas vias adicionadas não conseguem suportar (Debney, 2014). Além disso, as ferramentas de simulação de tráfego podem ser cruciais no estudo e análise de situações em que se pretende uma intervenção ao nível da infraestrutura

3.3. Processo de modelação em transporte rodoviário

A modelação em transportes é importante para prever e simular procuras futuras com recurso a modelos matemáticos, computacionais e comportamentais, tentando reproduzir o nível de desempenho da rede através de (Tavares & Pereira, 2015):

- estimativas de volumes e velocidades de tráfego;
- estimativas de tempos de viagem;
- deteção de segmentos congestionados;
- estimativas de outras variáveis associadas à rede, como o consumo de combustível ou a emissão de poluentes;
- identificação de percursos entre pares de zonas.

Os softwares de simulação de tráfego, e que serão abordados com maior detalhe no capítulo seguinte, beneficiaram de importantes avanços ao longo do tempo, não só em termos tecnológicos na ciência da computação, mas também das áreas da engenharia de transportes e da psicologia (Gomes, 2004). Os modelos de simulação de tráfego incorporam atualmente submodelos que retratam todas as especificidades geométricas e topológicas de uma rede, bem como o comportamento de um condutor.

O processo de modelação em transportes compreende várias etapas, que se apresentam de seguida (ATAP, 2017):

- 1) Consolidação (identificação dos problemas específicos de transporte e de uso do solo a serem modelados; definição dos objetivos a cumprir);
- 2) Recolha de dados;
- 3) Calibração e validação dos modelos (verificação e tratamento dos dados recolhidos; comparação dos resultados do modelo com os dados base; fase importante onde se pretende aferir a convergência do modelo para a realidade (Tavares & Pereira, 2015));
- 4) Desenvolvimento de alternativas e sua modelação (geralmente envolve um processo iterativo);
- 5) Análise (avaliação das opções estudadas em relação aos objetivos previamente delineados);
- 6) Relatório de modelação (inclui todos os resultados e documentação relativa às etapas anteriores).

No caso do modelo de transportes o objetivo é representar as diversas componentes da infraestrutura de transporte (rede viária, linhas de transporte público, gestão e controlo de tráfego) e os fluxos de tráfego (utilizadores e veículos) de forma a reproduzir as condições de operação do sistema viário (Ferreira, 2010). Do ponto de vista matemático e de otimização, o que se pretende numa rede de transporte é conseguir fluxo máximo e o custo mínimo.

3.3.1. Rede e Zonamento

Nas últimas décadas os modelos de transporte têm sido usados para prever a procura de viagens para efeitos de planeamento de longo prazo, sobretudo em espaços urbanos. Assim, por questões práticas, é necessário que a área em estudo seja decomposta em áreas mais pequenas de forma a viabilizar a aplicação do modelo de transporte.

Estas áreas são designadas zonas de análise de tráfego (ZAT) e representam áreas a partir das quais e para as quais as viagens são destinadas; idealmente, devem ser homogéneas em termos populacionais, socioeconómicos e de características de uso do solo, sendo que um modelo de área urbana usa, por exemplo blocos de ruas ou bairros como ZAT. Os seus respetivos centros de atividade, onde se iniciam e terminam as viagens são denominados centroides. Existem alguns critérios a ter em conta na definição destas zonas (Chang, Khatib, & Ou, 2002):

- Ter em atenção as fronteiras (físicas, políticas, etc.);
- Assegurar características homogéneas para cada zona;
- Minimizar o número de viagens no interior de cada zona;

Dado que estas zonas e os centroides são definidos no início do processo de modelação, podem afetar todos os resultados subsequentes. De facto, um estudo recente aponta para a importância de uma correta definição destas zonas, reforçando o benefício de usar zonas de análise menores

aquando da modelação, uma vez que assim se obtêm melhores resultados (Chang, Khatib, & Ou, 2002). No entanto, o mesmo estudo alerta para o facto de que, caso sejam zonas demasiado reduzidas, poderão exigir recursos incompatíveis. Daí que não se possa ignorar o impacto que as decisões sobre a definição das zonas de análise de tráfego, centroides e detalhes da rede terão na confiabilidade do modelo e no seu ajustamento à realidade.

3.3.2. Modelo clássico de transportes

Os modelos de transportes são geralmente sequenciais, envolvendo uma série de etapas que correspondem às decisões dos utilizadores, para os quais é necessário definir os vários pressupostos sobre como são tomadas as decisões (Ferreira, 2010). O “modelo clássico de transportes” ou “Modelo de 4 Passos” reúne um conjunto de etapas e trata-se de um modelo amplamente utilizado na modelação de transporte (Viegas, 2010). Envolve as fases de geração e distribuição de viagens, divisão modal e atribuição de viagens. Este modelo foi concebido e inicialmente aplicado nos EUA, no início da década de 60, com o objetivo de apoiar as decisões de investimento rodoviário em resposta aos problemas de congestionamento (Viegas, 2010). Trata-se de um modelo macroscópico, e a sua característica sequencial deve-se ao facto de cada etapa do modelo servir como entrada para a etapa seguinte. O Modelo de 4 Passos é a principal ferramenta para a previsão futura de viagens e desempenho de um sistema de transporte, normalmente definido em escala regional (Lopes, 2016). A Figura 8 apresenta um esquema que ilustra o modelo e a sequência das diversas etapas que o constituem.

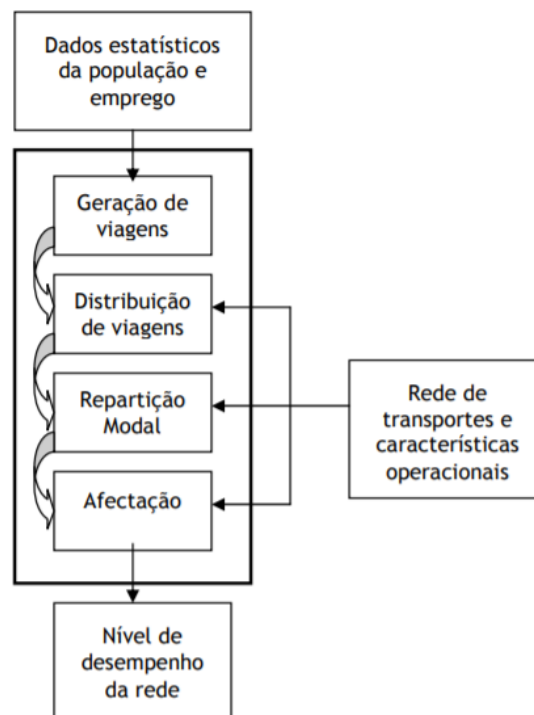


Figura 8. Estrutura do Modelo dos 4 Passos (Ferreira, 2010).

- Primeiro passo: Geração

Estimar o número de viagens iniciadas ou terminadas nas zonas de tráfego que compõem a área em estudo; é necessária informação relativa ao uso do solo e dados socioeconómicos, para prever o número de pessoas que irão realizar deslocações de e para cada zona, ao longo de um determinado período de tempo (Ferreira, 2010).

- Segundo passo: Distribuição

Para as viagens iniciadas em cada zona, estimar o número de viagens entre cada par de zonas; formação de pares de viagens origem-destino (Viegas, 2010).

- Terceiro passo: Repartição modal

Das viagens entre cada par de zonas, reparti-las pelos modos alternativos de transporte; esta distribuição pode ser feita com recurso a métodos determinísticos (utilizam processos quantitativos simples, como por exemplo, a regressão linear) ou probabilísticos (utilizam a probabilidade de escolha de cada modo) (Lopes, 2016).

- Quarto passo: Atribuição de tráfego

Atribuição das viagens entre cada par de zonas a um ou mais percursos, com o respetivo modo de transporte da rede; os modelos de atribuição de tráfego visam fornecer estimativas de fluxos de tráfego em vias estratégicas, sendo nesta fase que se reproduz o nível de desempenho da rede.

O modelo 4 passos, apresenta algumas limitações de entre as quais se destaca o excessivo foco nas viagens individuais, ignorando as particularidades de um padrão de atividade familiar/urbano, no dia-a-dia (Lopes, 2016). Outra limitação é o facto de na segunda etapa, quando é feita a escolha de destinos a partir de cada origem (escolha baseada nos custos de deslocação), ainda não se ter em conta o modo de transporte, que apenas é definido na terceira etapa. De uma forma análoga, quando é feita a escolha do modo de transporte (3ª etapa), tendo por referência os custos e tempos de cada uma das alternativas de transporte, ainda não se tem em conta o nível de congestionamento (que só é determinado no final da 4ª etapa), e que poderia alterar a escolha do modo de transporte (Viegas, 2010).

Ainda assim, a simplicidade conceptual e computacional do Modelo dos 4 Passos é largamente responsável pelo seu alto nível de utilização e, apesar de contar com algumas debilidades, este continua a ser de longe o mais utilizado em estudos. É também evidente que a informação gerada por estes modelos, particularmente acerca das diferentes alternativas de atuação no sistema de transportes, é de grande utilidade no processo de planeamento e de tomada de decisão.

No que se segue, iremos abordar com mais detalhe a fase de distribuição de tráfego pela rede, mais concretamente de forma dinâmica para ter em conta possíveis interações entre veículos e consequentes padrões de congestionamento, bem como para estudar o comportamento por vezes inadequado de condutores quando têm a perceção de que optando por vias secundárias minimizariam o custo/tempo de viagem.

3.4. Planeamento e Distribuição de Tráfego em Redes Viárias

Como já foi referido, as redes viárias podem ser representadas como um conjunto de nós/vértices, simbolizando locais específicos, e de arestas, simbolizando os segmentos de estrada que os unem. Estas possuem diversas propriedades estruturais, que podem ser topológicas (de acordo com o arranjo dos seus vértices e arestas) ou geométricas (de acordo com os seus atributos de forma, orientação, densidade, entre outros) (Xie & Levinson, 2007). Ora, estas propriedades estruturais têm um impacto relevante no desempenho dos sistemas de transporte e de uso do solo, pelo que se torna importante haver um planeamento estratégico e eficaz das mesmas, de forma a encontrar a melhor solução possível em termos de mobilidade. De facto, o objetivo primordial de um correto planeamento é o de fornecer uma alternativa de estrutura de uso do solo que seja de alguma forma vantajosa em relação à que existiria sem planeamento (Hall, 2002).

Para um planeamento efetivo, é necessário numa primeira fase estudar e perceber a forma como a área urbana em questão se comporta em termos de tráfego, de sistemas de transporte existentes e de uso do solo. Só depois disto é possível a elaboração de um plano alternativo, o qual deverá ser acompanhado por previsões de como o sistema virá a responder às alterações propostas. Por fim, será necessário avaliar os custos (custos diretos: construção de novas estradas, introdução de dispositivos de controlo de tráfego, fomentação de novos serviços de transportes públicos; custos indiretos: impactos sociais e ambientais) e benefícios (do ponto de vista do utilizador: redução de tempos e custos de viagem) associados ao mesmo (Black, 1981).

É ainda importante realçar que o planeamento e as intervenções sobre o sistema de transportes devem ser baseados em três princípios especialmente pertinentes nos dias de hoje, a saber (Seco et al, 2008):

- **Sustentabilidade:** a solução encontrada deve acautelar o uso excessivo de energias não renováveis, o que implica naturalmente o favorecimento dos transportes públicos e de outros mais benéficos para o meio ambiente (bicicleta, deslocações a pé);
- **Coerência:** ter a sensibilidade de perceber em que zonas do espaço urbano não é aconselhável nem atrativo a ocorrência de elevados níveis de tráfego (zonas de comércio ou de serviços);
- **Preservação:** ter em conta o contexto global onde a rede viária se situa, e o seu património histórico e cultural que importa conservar.

No que se segue, apresenta-se uma descrição de um modelo de atribuição/distribuição de tráfego pela rede e alguns dos problemas que ela acarreta quando a resposta da rede não é suficiente, como o congestionamento e o atravessamento sistemático e possivelmente abusivo de espaços locais, que é o objeto principal em estudo. Depois, serão apresentadas algumas medidas que são usualmente aplicadas no sentido de minimizar estes problemas, e a sua evolução ao longo dos anos, e serão ainda abordados alguns dos diversos softwares de microssimulação de tráfego, amplamente utilizados nos dias que correm.

3.4.1. Distribuição de tráfego

O processo de atribuição/distribuição tem como objetivo fundamental determinar o padrão de movimentos veiculares que seria observado quando a procura, representada pela(s) matriz(es) origem-destino, é satisfeita, ou seja, determinar qual o volume de tráfego a atribuir a cada eixo. Os principais objetivos da distribuição de tráfego são:

1. Estimar o volume de tráfego nos segmentos da rede;
2. Estimar o tempo/custo da viagem entre zonas;
3. Analisar o padrão de viagem de cada par origem-destino (O-D);
4. Identificar segmentos congestionados e obter dados de tráfego que possam ser usados para previsões futuras.

Os estudos de tráfego de uma determinada rede viária consistem na caracterização do volume de veículos que nela se deslocam, ao longo de um determinado período de tempo. Para caracterizar estas correntes de tráfego é necessário conhecer a forma como os veículos se distribuem ao longo do espaço e do tempo, o que nem sempre é trivial, dado o carácter altamente aleatório associado ao escoamento de tráfego (Costa, 2008), que se relaciona diretamente com o processo de escolha de rota por parte do condutor.

Um dos modelos de atribuição de tráfego mais populares é o designado “modelo tudo-ou-nada”. Trata-se de um método simples, que serve de base para outros modelos de atribuição, e que assenta nas seguintes características (Hui, 2014): o tempo de viagem de todos os caminhos é uma constante que não muda com o volume de tráfego existente, ou seja, a influência do congestionamento no tempo de viagem não é considerada; todos os condutores no mesmo par OD selecionam a mesma rota e, assim, são usados vários algoritmos para determinar o caminho mais curto e, em seguida, atribuir todos os fluxos de tráfego de todos os pares OD ao caminho mais curto.

A vantagem mais relevante do modelo tudo-ou-nada é, então, a sua simplicidade de cálculos. No entanto, este modelo tem como principal desvantagem a dificuldade em refletir o comportamento humano, já que falha nos seguintes pontos (Dial, 1971): não considera adequadamente o efeito do limite da capacidade de uma via de trânsito; não permite uma variação aleatória (e realista) da seleção de rotas por parte dos condutores. De facto, as estimativas de volumes de tráfego são muito imprecisas (principalmente quando o tamanho da rede aumenta) havendo volumes muito elevados em determinados *links* e muito baixos nos restantes, o que denota pouca “estabilidade e verosimilhança experimental” (Dial, 1971).

Importa, então, ter presente que é o condutor, um ser humano, quem tem o controlo da tomada de decisão relativamente à escolha da rota a seguir numa determinada viagem. Este processo de decisão baseia-se no conhecimento e na experiência adquirida por parte do condutor, e pode ocorrer previamente à viagem ou até no decurso da mesma. Existem vários critérios que influenciam esta escolha, a saber: o custo ou a distância da viagem; o caminho mais curto ou mais rápido; o trajeto com o menor número de mudanças de direção ou de obstáculos; o percurso que evite zonas pouco seguras (Carvalho, 2011). No entanto, vários estudos apontam como principal objetivo da escolha de rotas por parte dos condutores o de minimizar o tempo de viagem (por exemplo, Dominik et al. (Papinski, Scott, & Doherty, 2009), Ahn et al. (Ahn & Rakha, 2008)). Recentemente, Dominik et al. mostraram ainda que cerca de 1 em cada 5 condutores procedem a alterações à rota planeada no decurso da viagem, devido ao congestionamento ou outros aspetos mais convenientes (Papinski, Scott, & Doherty, 2009). Convém também salientar que uma rede é composta por agentes (condutores) e que cada um deles toma uma decisão, a qual inevitavelmente afetará outro agente, numa propagação ao longo da rede e de forma dinâmica.

A distribuição de tráfego dinâmica (DTA - do inglês *Dynamic Traffic Assignment*) procura fornecer interações entre veículos mais detalhadas ao longo do tempo, considerando mudanças do comportamento de tráfego ao longo da viagem representando, assim, de uma forma mais realística as escolhas de rota e os fluxos de tráfego (Macedo et al, 2019). A grande vantagem da DTA em relação à distribuição de tráfego estática (STA - do inglês *Static Traffic Assignment*) é precisamente essa: tem em consideração as “flutuações temporais” inerentes ao fluxo de tráfego de uma dada rede rodoviária, o que é uma aproximação mais fiel à realidade (PTV, 2018). Adicionalmente, os valores de saída dos modelos DTA oferecem maior compatibilidade com outros modelos de estimativa de emissões, e com uma resolução temporal mais alta (Wang et al, 2018); por conseguinte, a utilização destes modelos tem vindo a aumentar, nomeadamente na otimização de sistemas de transporte tendo em vista, por exemplo, considerações ambientais (Wang et al, 2018). Por exemplo, Ahn et al. mostraram que para além da minimização do tempo de viagem, os condutores não se importam de percorrer trajetos mais longos (Ahn & Rakha, 2008). Ora, isto levanta questões do foro ambiental e energético, uma vez que, associadas a estas opções, poderão estar velocidades mais elevadas e, por conseguinte, um aumento no consumo de combustíveis e das emissões de poluentes.

Indiscutivelmente, e facilmente se entende, a escolha de um trajeto por parte de um condutor será sempre condicionada pelas escolhas dos restantes agentes da rede. Wardrop (1952) sugere que a escolha do caminho, considerando por hipótese que todos os condutores têm a mesma perceção dos tempos/custos de viagem, assenta em duas ideias de equilíbrio:

- Cada condutor escolhe a rota que no seu entender lhe traz vantagem, i.e., é a melhor, com base nas condições de tráfego (foco no individuo);
- Os condutores cooperam entre si por forma a produzir um padrão de tráfego que minimize o tempo/custo de toda a rede (foco no sistema).

Em geral, assume-se o princípio da distribuição de equilíbrio. Um dos métodos de distribuição de tráfego mais conhecido assenta em bases estocásticas e de forma dinâmica, i.e., tendo em conta a aleatoriedade na tomada de decisão por parte de cada condutor (que pode escolher um caminho que julga ser melhor, e que pode estar errado) e por forma a ter em consideração as diferentes variabilidades na rede em termos temporais (propagação de efeitos decorrentes de conflitos/congestionamento em certos pontos da rede). Assim, os modelos de previsão da distribuição de tráfego devem ser estocásticos, isto é, pressupor a existência de fatores de decisão tidos como aleatórios, o que implica o recurso integrado às áreas da matemática (probabilidades e estatística), da física e da computação (Tavares & Pereira, 2015), havendo diversos tipos de abordagens, sendo as principais (Costa, 2008):

- microscópica, onde os veículos são considerados isoladamente e as variáveis mais relevantes são o tempo e a distância entre veículos e a velocidade individual, sendo necessário conhecer a distribuição estatística destas variáveis através da lei da estatística (como a de Poisson, a binomial ou a binomial negativa) que melhor se adegue a cada caso;
- macroscópica, onde se analisa um grupo de veículos através de variáveis de tendência, como o número de veículos por hora, o número de veículos por unidade de comprimento, a taxa de ocupação e a velocidade média.

Existem ainda abordagens mesoscópicas que permitem ter em consideração os efeitos de interação, isto é, a simulação do efeito que um cruzamento tem noutros, obedecendo a relações

simples entre fluxo e velocidade, mas sem o detalhe dos modelos microscópicos, ou seja, não descrevendo o comportamento do veículo e do condutor individualmente.

Note-se que a informação resultante de análises de previsão de tráfego se refere a cenários com padrões de tráfego regulares, como dias semanais de trabalho, sendo necessário ter em conta que casos particulares como a ocorrência de acidentes ou obstruções da via, condições meteorológicas adversas, fins de semana, períodos de festividades (Natal, Ano Novo e Páscoa) ou meses típicos de férias (particularmente Agosto), têm associados a si volumes de tráfego anormais (Tavares & Pereira, 2015) e que podem afetar a sua distribuição.

Com o objetivo de solucionar limitações existentes nesta área, e tendo presente que através da resolução de problemas de distribuição de tráfego é possível promover um uso mais eficiente da infraestrutura rodoviária, a abordagem recentemente proposta por Macedo et al. apresenta-se como uma ferramenta que pode servir de apoio à tomada de decisão, permitindo uma avaliação global do desempenho de uma rede de forma dinâmica (Macedo et al , 2019).

3.4.2. Congestionamento

O transporte rodoviário individual é nos dias de hoje, como previamente referido no Capítulo 1, o meio de transporte preferencial da generalidade da população. Posto isto, é fácil prever que em zonas com elevada densidade populacional e/ou com grande pendor industrial, o congestionamento seja um dos mais graves problemas do dia-a-dia, dada a grande afluência de veículos, que excedem largamente a capacidade da via, especialmente durante as horas de ponta (períodos entre as 7 e as 9 horas da manhã e entre as 17 e as 19 horas da tarde).

Esta problemática é evidente e, para se ter uma ideia da sua dimensão, considere-se o caso de Lisboa: em média, os habitantes da capital portuguesa perdem 40 minutos por dia presos no trânsito o que, em termos anuais, representa cerca de 154 horas (aproximadamente 6 dias e meio). Estes dados são disponibilizados por uma empresa de mapeamento e navegação holandesa, a TomTom, que também indica uma média de 31 minutos de espera diária em filas de trânsito (118 horas anuais, cerca de 5 dias) para quem circule na cidade do Porto (International, 2019). De acordo com a mesma fonte, o período de maior congestionamento em ambas as cidades verifica-se ao final da tarde.

Numa outra perspetiva sobre a dimensão deste problema, estima-se que nas 39 áreas metropolitanas dos Estados Unidos da América com uma densidade populacional acima de 1 milhão de habitantes, cerca de um terço das viagens rodoviárias ocorra sobre condições de congestionamento, nas quais a velocidade de circulação é aproximadamente metade da que se verificaria em situações de normalidade (Arnott & Small, 1994).

Ora, este elevado nível de congestionamento afeta em grande medida a mobilidade dos utilizadores das rodovias, pois implica que as velocidades de circulação sejam drasticamente reduzidas, inclusivamente com paragens frequentes, provocando um enorme aumento do tempo de viagem. Por outro lado, há também um aumento não só das emissões de gases poluentes, mas também do consumo de combustível por parte dos veículos, quando circulam nestas circunstâncias. De Vlieger et al., num estudo recente relacionado com os efeitos a nível ambiental do congestionamento e do tipo de condução adotado, mostram que o consumo de combustível aumenta entre 20 a 45% em situações de tráfego intenso quando comparado com uma situação de tráfego normalizada (Vlieger, Keukeleere, & Kretzschmar, 2000). Zhang et al., focados em avaliar as emissões de veículos em circulação em hora de ponta e fora dela, concluem que as emissões

combinadas de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e óxidos nitrosos (NO_x) quase duplicam nos períodos de ponta (Zhang, Batterman, & Dion, 2011). Estes trabalhos sugerem que um trajeto que à partida poderia ser considerado o mais rápido e económico pode tornar-se no mais lento e poluente, obrigando muitos condutores a tomar decisões no decorrer da viagem.

Outra das implicações relacionadas com o congestionamento é a sua contribuição para o aumento do stress nos condutores, fomentando o recurso a uma condução volátil, agressiva e insegura. Hennessy et al., com o intuito de analisar a influência do congestionamento no comportamento dos condutores, referem que a prática da condução é, na sua generalidade, uma atividade stressante, já que a urgência de tempo é uma necessidade transversal à grande maioria dos condutores; adicionalmente, em condições de congestionamento, a agressividade e por vezes, a tomada de decisão repentina face a alguma situação vem agravar este estado de espírito (Hennessy & Wiesenthal, 1999). No referido estudo observou-se que, como seria de esperar, tanto o stress como a agressividade do condutor são superiores em situações com elevado nível de congestionamento, quando comparados com circunstâncias de normalidade, sendo que em nenhuma outra categoria de comportamento se verificaram diferenças acentuadas. Foi igualmente constatado que, nesta matéria, não há diferenças relevantes entre condutores do sexo masculino ou do sexo feminino. Numa outra perspetiva, é também de esperar que maiores tempos de viagem obriguem os condutores a sair de casa mais cedo e a chegar mais tarde de forma a cumprirem o horário de trabalho, o que pode indicar, entre outras privações, a perda de horas de sono (Humphrey et al, 2016) e, assim, aumentar os seus níveis de cansaço e a sua vulnerabilidade a acidentes rodoviários. Para além disso, elevados níveis de congestionamento podem ainda ter sérios efeitos em matérias de saúde pública, já que estudos realizados permitiram associar a exposição prolongada ao ruído e poluição resultante do tráfego com o desenvolvimento de doenças dos sistemas cardiovascular, respiratório e metabólico (Recio et al, 2016).

Na maioria dos casos, o stress e agressividade que é induzido no condutor está intimamente ligado com a ocorrência de acidentes, já que muitas vezes tem associado a si a adoção de uma postura inadequada ou imprudente, aumentando a insegurança não só do condutor, mas também dos restantes utilizadores da via (Hennessy & Wiesenthal, 1999). Torna-se, assim, evidente que o congestionamento é um fenómeno que importa prever e acautelar, já que tem um sério impacto no quotidiano da população, afetando não só a sua qualidade de vida e produtividade (pelo tempo perdido em viagem) mas também a sua segurança, envolvendo ainda implicações ambientais. Face ao exposto, metodologias que permitam quantificar estes impactos são, por isso, uma parte muito importante deste trabalho e serão abordadas em maior detalhe no capítulo 4.

3.4.3. Fenómenos de atravessamento sistemático de espaços locais

Os sistemas de transporte rodoviário têm associadas a si duas funções básicas que devem garantir (Seco et al, 2008):

- **Acessibilidade:** refere-se ao acesso a espaços urbanos ou de estacionamento e ocorre habitualmente no início ou no final da viagem. Aqui, aquilo que se pretende é uma circulação segura e a velocidades reduzidas, com condições adequadas à execução de manobras.
- **Mobilidade:** está associada ao período de circulação, normalmente o percurso intermédio da viagem que decorre entre as proximidades da origem da mesma até às proximidades do seu destino. Nestes casos, o que se pretende é uma deslocação rápida e segura, com condições de trânsito fluidas.

Existem ainda outras funções relacionadas com os modos de deslocação não motorizados como peões e ciclistas, considerados os utilizadores mais vulneráveis das vias, e que requerem um ambiente seguro, onde se verifiquem níveis reduzidos de volumes e velocidades de tráfego motorizado. Estas funções de deslocação não motorizada e de convivência urbana são facilmente compatíveis com as de acessibilidade por parte dos veículos motorizados, uma vez que envolvem velocidades reduzidas e adequadas ao ambiente onde se encontram. No entanto, são dificilmente conciliáveis com a função de mobilidade, pois ela acarreta velocidades bastante elevadas havendo, assim, uma diminuição considerável da segurança dos peões e ciclistas (Seco et al, 2008), e neste caso, requerem a adoção de medidas específicas para zonas de coexistência, ou seja, zonas em que seja promovida a convivência dos diferentes utilizadores do espaço público”, nomeadamente através de velocidades condicionadas ao tráfego motorizado (Silva & Seco, 2015).

Considerando o caso de Portugal, é consensual afirmar que existem vários problemas ao nível do atravessamento de localidades. Efetivamente, por vezes existem vias de importância nacional/regional com volumes de tráfego bastante significativos, que atravessam zonas urbanas e/ou residenciais. Atendendo às diversas atividades que tomam parte nos espaços marginais destas zonas urbanas, e às intensas movimentações pedonais que são geradas, tornam-se evidentes os conflitos que podem vir a ocorrer, com impacto na segurança rodoviária, na mobilidade, na acessibilidade e até no meio ambiente (Rodrigues, 2010).

A coexistência do tráfego motorizado e de utilizadores vulneráveis, especialmente em zonas onde ocorrem atividades locais, é um assunto de extrema importância e sensibilidade. Recordando, ainda, os três princípios fundamentais ao planeamento e intervenção sobre o sistema de transportes (sustentabilidade, coerência e preservação) abordados no início do presente capítulo, é de realçar a necessidade de garantir que os espaços mais vulneráveis do meio urbano, como zonas residenciais, comerciais e históricas, sejam protegidos da ocupação automóvel.

3.4.3.1. “Rat-Running”

Resumindo os tópicos abordados nos subcapítulos acima, pode-se afirmar que muitos condutores tentam evitar situações de congestionamento optando por um novo trajeto, muitas vezes mais longo e de cariz urbano/residencial, com o objetivo de minimizar o seu tempo de viagem sendo de salientar que, aquando da escolha da rota alternativa, não têm em consideração os impactos ambientais e sociais consequentes. É a esta prática que habitualmente se designa de *rat-running*.

Na base desta problemática está o volume de tráfego que se verifica em diversas zonas urbanas e/ou industriais, especialmente em horários de ponta. Daí que os condutores, conscientes destes inconvenientes e tendo geralmente por base a sua experiência de condução e o conhecimento da rede viária em que circulam, optem pelo trajeto que lhes é mais favorável no sentido de minimizar o fator a que dão mais importância: o tempo de viagem (Tarrant, 2016).

Esta realidade implica que vias que inicialmente teriam apenas de assegurar funções de acessibilidade (caracterizada por velocidades baixas e possibilidade de ocorrência de manobras de acesso a espaços locais), se tornem também em vias com funções de mobilidade e geralmente com algum perigo associado devido ao tipo de condução muitas vezes verificadas nos fenómenos de *rat-running*: uma condução tipicamente mais volátil e por vezes agressiva. Ora, esta combinação ocorre frequentemente de forma pouco harmoniosa, provocando conflitos que afetam o desempenho e a segurança da via (Rodrigues, 2010). Com efeito, Hallmark et al., através de um estudo realizado no âmbito da avaliação de medidas de acalmia de tráfego em zonas rurais, referem que os condutores

que fazem o atravessamento de espaços locais circulam em velocidades excessivas e que procuram mantê-las ao longo do atravessamento (Hallmark et al, 2007). Deste modo, há uma redução da sua visibilidade e tempo de reação o que, associado às características particulares das vias locais por onde se dá o atravessamento (por exemplo, circulação e atravessamento de peões – e muitas vezes sem a existência passeios adequados -, de ciclistas e veículos agrícolas, probabilidade de manobras de acesso a espaços locais por parte de outros veículos) provoca uma acentuada diminuição da segurança rodoviária.

Assim, a extensão da via por onde é feito o atravessamento torna-se numa fonte de conflito e insegurança, para além de outras implicações como o aumento da poluição atmosférica, da poluição sonora, a perda de espaços originalmente destinados à circulação de peões (Rodrigues, 2010), no fundo afetando o desempenho, a qualidade e o conforto da mesma, propiciando a ocorrência de acidentes e de vítimas, particularmente entre os seus utilizadores mais vulneráveis, isto é, peões e ciclistas.

Em Portugal, os dados que constam no relatório de sinistralidade elaborado pela Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária (ANSR, 2017) relativos ao ano de 2017, vêm confirmar esta diminuição da segurança e relevar os impactos sociais consequentes. Segundo esse relatório, após uma tendência de diminuição que se verificou no período de 2010-2016, o número de acidentes e de vítimas sofreu um ligeiro aumento no ano de 2017.

Um acidente pode ser definido como qualquer ocorrência na via pública (ou que nela tenha origem), envolvendo pelo menos um veículo em movimento, do qual resultem vítimas ou danos materiais, e que seja do conhecimento das entidades fiscalizadoras (GNR e PSP); é considerado uma vítima qualquer ser humano que sofra danos corporais como consequência de um acidente (ANSR, 2017).

A Figura 9 mostra a distribuição dos acidentes e vítimas de acordo com a localização da ocorrência, sendo que o número total de acidentes com vítimas registado no ano de 2017 foi de 34416.

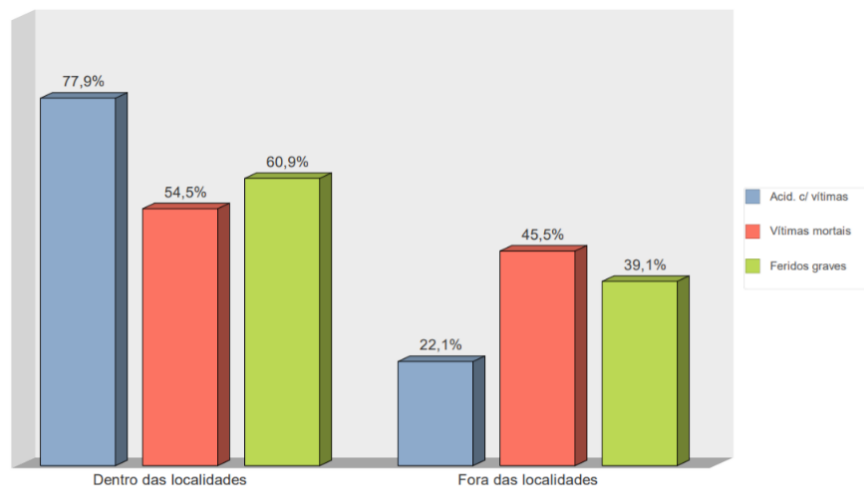


Figura 9. Distribuição de acidentes e vítimas, segundo a localização (ANSR, 2017).

A diferença é notória, uma vez que cerca de 3 em cada 4 acidentes ocorreram dentro de localidades. Porém, é também uma evidência que os acidentes que se dão fora das localidades são mais graves,

uma vez que número de vítimas mortais é semelhante às que se verificam dentro das localidades, mesmo com a diferença enorme de número de acidentes que existe, o que se pode dever às elevadas velocidades de circulação que se praticam nessas zonas. Um outro dado interessante, presente no mesmo relatório, é a distribuição dos 34416 acidentes com vítimas pelo tipo de via em que ocorreram (Figura 10).

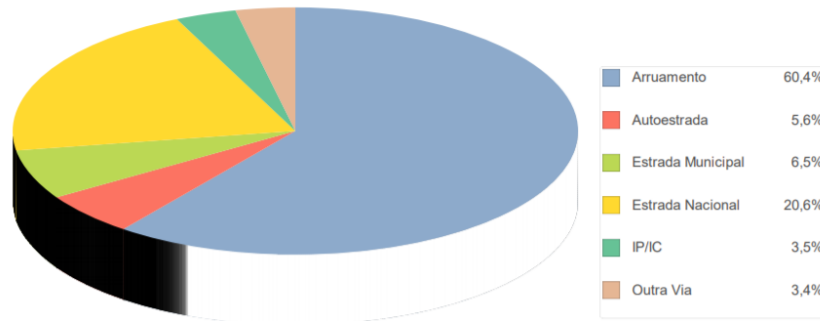


Figura 10. Distribuição de acidentes com vítimas, segundo o tipo de via (ANSR, 2017).

Mais de 60% desses acidentes foram verificados em arruamentos; logo, pode dizer-se que este se trata de um ambiente propício à ocorrência de acidentes, podendo fenómenos como o atravessamento de localidades ser um dos fatores que estão na génese destes números. Um outro conjunto de dados, também relacionado com esta temática, prende-se com o tipo de veículos envolvidos nos acidentes (Figura 11).

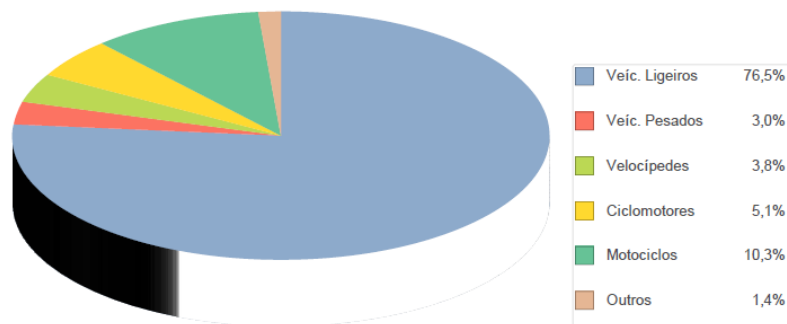


Figura 11. Tipo de veículos intervenientes em acidentes (ANSR, 2017).

A grande maioria dos acidentes (mais de 75%) ocorre com veículos ligeiros, o que à partida já seria de esperar, porque também são os que circulam em maior número; no entanto, é também este o tipo de veículos que se associa à prática do atravessamento de localidades, dada a sua maior versatilidade e ao perfil do condutor que normalmente o utiliza. Na Figura 12, pode-se observar um outro tópico pertinente ao tema em análise, que é a causa dos acidentes com vítimas mortais.

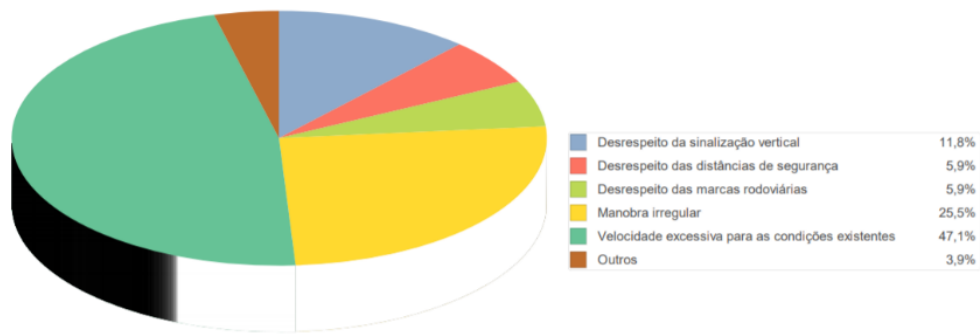


Figura 12. Causa identificada para acidentes dos quais resultaram vítimas mortais (ANSR, 2017).

Estes dados revelam que a principal causa para os acidentes dos quais resultam vítimas mortais vai novamente ao encontro de uma das maiores problemáticas que podem decorrer do atravessamento de localidades: o excesso de velocidade para as condições existentes. Associando esta informação à do tipo de via onde maioritariamente ocorrem os acidentes (Figura 10), podem-se prever danos bastante graves, como acidentes envolvendo peões (Figura 13).

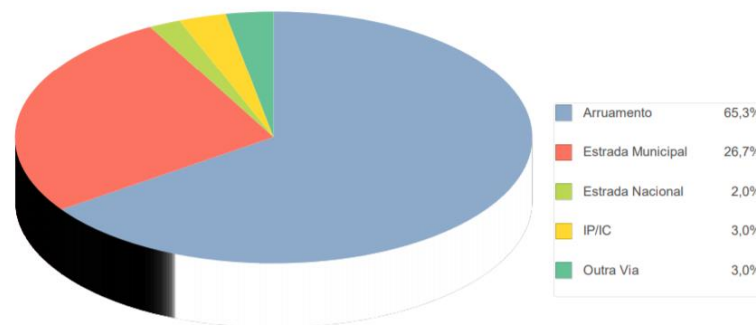


Figura 13. Distribuição segundo o tipo de via de peões vítimas mortais, dentro de localidades (ANSR, 2017).

De facto, a principal fatia é, novamente, em arruamentos onde, em conjunto com estradas municipais, assumem 92% do total de vítimas mortais que, no ano de 2017, foram 130. Somando a este valor o número de feridos (leves e graves), o número total de peões vítimas de acidentes, referentes ao ano de 2017, ascendeu a 5651. Este número é preocupante e, em conjunto com os restantes dados apresentados, leva a crer que há comportamentos inadequados da parte dos condutores na sua origem.

Em suma, fatores como o volume de tráfego, o excesso de velocidade praticada, a volatilidade da condução, as condições de visibilidade e de circulação da via, configuram-se como alguns dos principais problemas que justificam os valores da sinistralidade rodoviária acima descritos, e que tornam o atravessamento sistemático de espaços locais numa questão de elevada relevância no contexto atual e que urge compreender e prevenir, ou mesmo combater.

3.4.3.2. Medidas Mitigadoras

Numa perspetiva histórica, a necessidade de controlar os efeitos nefastos da sinistralidade rodoviária surgiu em meados da década de 60, em alguns países do Norte da Europa como a Dinamarca, a Holanda ou a Alemanha, particularmente em localidades de maiores dimensões. Os referidos países avançaram inicialmente com o desenvolvimento de estudos no âmbito da

conciliação das necessidades de deslocação rodoviária com a vivência urbana, que resultaram na implementação daquilo a que se começou a designar medidas de acalmia de tráfego (Rodrigues, 2010).

O conceito de acalmia de tráfego pode ser definido como sendo um conjunto de procedimentos utilizados por especialistas de tráfego e segurança rodoviária, com o intuito de diminuir velocidades de circulação e de garantir a segurança de peões e ciclistas, recorrendo para isso a medidas físicas que influenciem a circulação do trânsito e o comportamento dos condutores, especialmente em vias locais e zonas urbanas (Council, 1991) (Boulter & Webster, 1997). No fundo, é a tentativa de dar resposta à incompatibilidade que se verifica entre a presença de tráfego automóvel e dos restantes utilizadores das vias locais, já abordada no início do presente subcapítulo, proporcionando melhores condições de segurança para todos.

Assim, no início da década de 70, surgiu na Holanda a primeira aplicação prática de acalmia de tráfego com a criação de zonas que promoviam a partilha de espaço entre veículos e peões, com a prioridade legal a ser atribuída aos peões (InIR). Nestas zonas, geralmente residenciais, comerciais ou centros históricos, há a colocação de obstáculos físicos à normal circulação de veículos, o que faz com que as velocidades máximas verificadas sejam de aproximadamente 15 km/h (Seco et al, 2008). Também designadas por *zonas woonerf*, são caracterizadas por não haver uma distinção física entre a via destinada à circulação rodoviária e os restantes modos de locomoção (Pereira, 2013), havendo um só nível de pavimento.



Figura 14. Exemplo de uma zona 'woonerf' (Seco et al, 2008).



Figura 15. Exemplo de uma zona 'woonerf' (Seco et al, 2008).



Figura 16. Exemplo de uma zona 'woonerf' e respetiva sinalização (Seco et al, 2008).

Com base nesta medida surgem na Dinamarca, por volta dos anos 80, um outro tipo de estratégias de acalmia de tráfego menos restritivas, destinadas a vias que assegurem já alguma função de circulação, sendo ainda a função predominante a acessibilidade: a imposição de zonas com limite de velocidade compreendido entre 20 e 30 km/h; nestas zonas, a prioridade continuaria a ser dada aos peões, embora haja uma distinção clara entre a faixa rodoviária e os passeios (Seco et al, 2008). Na sequência desta implementação, registaram-se consequências positivas na redução da gravidade dos acidentes, no menor nível de ruído e de poluição atmosférica (Pereira, 2013).



Figura 17. Exemplo de zona com limite de velocidade de 30 km/h, na Suíça (Pereira, 2013).



Figura 18. Exemplo de zona com limite de velocidade de 20 km/h (Seco et al, 2008).

O sucesso destes estudos e implementação de medidas foi tal que transpôs fronteiras e continentes, a ponto de começarem a ser aplicados em países como a Austrália e Estados Unidos da América; aos dias de hoje, elas constituem uma prática comum a nível global. O motivo deste sucesso e pelo qual as soluções de acalmia de tráfego se tornaram muito usuais foi a grande eficácia que revelaram. A experiência adquirida nos países pioneiros demonstrou que a aplicação de medidas deste tipo, quando realizada de forma correta e integrada, leva efetivamente não só à redução da velocidade dos veículos e à diminuição do número e da gravidade dos acidentes, mas também à diminuição do ruído e da poluição do ar, ou seja, a uma melhoria global da qualidade de vida da população (Seco et al, 2008). Neste sentido, apresentam-se de seguida algumas linhas de ação habitualmente adotadas para tentar reduzir os fenómenos descritos nos capítulos acima, e os seus impactos.

Quanto à problemática do congestionamento, é necessário adequar a procura à resposta dada pela rede. Há portanto dois níveis de intervenção distintos: por um lado, pode-se atuar no aumento do desempenho dos trechos da via que apresentem um funcionamento ineficiente; por outro lado, poder-se-á apostar numa atenuação dos níveis de carga a que os mesmos estão sujeitos, nomeadamente através da criação de caminhos alternativos que sejam adequados e atrativos ao tipo de trânsito em questão para, deste modo, transferir uma parte do tráfego para outros elementos menos sobrecarregados (Seco et al, 2008).

Relativamente aos fenómenos de *rat-running*, eles poderão também de uma forma geral ser reduzidos com um investimento na melhoria do nível de desempenho da via principal que apresente um funcionamento ineficaz ou, por outro lado, com a procura e implementação de soluções que protejam a rede local e que, assim, tornem o seu atravessamento menos interessante (Seco et al, 2008). De facto, e assumindo que o fator a que os condutores dão maior relevância é o

tempo de viagem (mostrado nos capítulos anteriores), facilmente se conclui que a imposição de medidas que o aumentem significativamente poderá despoletar uma mudança de comportamento e levar a que optem por retomar a rota pela via principal, já que esta passaria a figurar como o melhor cenário possível.

Importa, por isso, perceber quando é que estas mudanças de comportamento ocorrem, isto é, quando é que os condutores efetivamente tomam a decisão de alterar a sua seleção de rota e o que será preciso fazer para desencadear essa mudança o mais rápida e eficazmente possível. Existem, para isso, duas teorias predominantes: a Teoria de Formulação de Hábitos (*Habit Formation Theory*) e a Teoria da Dissonância Cognitiva (*Cognitive Dissonance Theory*) (Tarrant, 2016). A primeira defende que há um princípio inerente à condição humana e que guia os comportamentos da população: o princípio do menor esforço. Assim, quando pela primeira vez o condutor pondera acerca da melhor rota a escolher de entre as várias alternativas possíveis, e daí surge um resultado que lhe é favorável, ele irá repetir essa escolha quando, no futuro, for confrontado com a mesma situação de decisão (Adjei & Behrens, 2012). Assim sendo, é necessário tomar alguma medida que incite a mudança de comportamento, como por exemplo, tornando a via local suficientemente incómoda (aumentando o esforço), para deste modo forçar os condutores a reformularem o hábito inicialmente escolhido (Tarrant, 2016). Por outro lado, a segunda teoria assenta na ideia base de que cada indivíduo tentará sempre alcançar a concordância entre as suas ações e os seus princípios morais (Adjei & Behrens, 2012). Daí que, quando há um conflito entre estes aspetos, ele irá sentir um certo transtorno/preocupação, que o levará a mudar de atitude no sentido de os realinhar novamente. Neste caso, campanhas de sensibilização que exponham os impactos negativos que o atravessamento de localidades tem na zona afetada podem ser suficientes para gerar o referido conflito e provocar uma alteração de comportamento (Tarrant, 2016).

Ainda assim, é a Teoria da Formulação de Hábitos que prevalece e que representa o comportamento da grande maioria dos condutores, daí que as medidas de acalmia de tráfego se tenham tornado numa ferramenta importante para a alteração destes hábitos e para fomentar a adoção de condutas que possam vir a dotar as zonas urbanas de melhores condições de habitabilidade (Rodrigues, 2010). Apresentam-se de seguida alguns exemplos de medidas de acalmia de tráfego de comum aplicação nos dias de hoje, que se separam em dois grupos de controlo distintos: as medidas de controlo de volume e as medidas de controlo de velocidade.

Várias medidas podem ser adotadas com vista a prevenir e combater o fenómeno de *rat-running*, de entre as quais se destacam as mais eficazes que são o encerramento do trânsito a uma determinada via propícia a essas práticas, ou torná-la numa via de sentido único (Traffic Choices, 2014). Ainda assim, outras medidas gerais de acalmia de tráfego que se apresentam de seguida também podem ser um bom impedimento aos *rat-runners*.

Quanto às medidas de controlo de volume elas visam, como o nome sugere, reduzir ou até eliminar o volume de tráfego em determinadas zonas, especialmente residenciais, que estejam expostas a elevados níveis de atravessamento por veículos. De entre elas, destaca-se a mais comum: o encerramento total ou parcial de vias, que consiste na colocação de barreiras físicas, como se demonstra nas figuras abaixo, que impeçam a circulação de tráfego automóvel, permitindo apenas o acesso a peões e ciclistas (Rodrigues, 2010).



Figura 19. Exemplo encerramento total de via (Estrasburgo) (InIR).

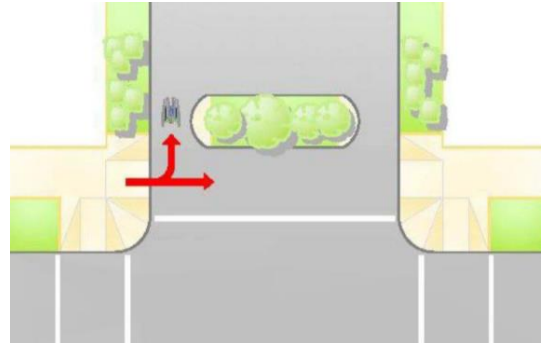


Figura 20. Esquema encerramento total de via (InIR).



Figura 21. Esquema encerramento parcial de via (InIR).



Figura 22. Exemplo encerramento parcial de via (Oregon, Estados Unidos da América) (Rodrigues, 2010).

Um outro tipo de intervenção pode ser a colocação de barreiras (como ilhéus ou separadores centrais) em interseções/cruzamentos, que impeçam a execução de determinadas trajetórias que possam gerar pontos de conflito (InIR).



Figura 23. Esquema de um separador central numa interseção (InIR).



Figura 24. Exemplo de um separador central (EN 234) (Rodrigues, 2010).

Relativamente às medidas de controlo de velocidade, é importante referir que a imposição de limites de velocidade por si só não leva a uma redução efetiva das velocidades praticadas, uma vez que na esmagadora maioria dos casos os condutores circulam à velocidade que consideram ser segura (Hallmark et al, 2007), o que nem sempre vai de encontro aos limites estabelecidos. Logo, pode-se dizer que estas medidas representam uma forma mais direta de controlo do comportamento dos condutores (InIR) e contam com uma gama mais alargada de soluções que são habitualmente divididas em dois grupos: alterações aos alinhamentos horizontais e alterações aos alinhamentos verticais.

As medidas de alteração aos alinhamentos horizontais são aquelas que implicam modificações no traçado da faixa de rodagem e que obrigam os veículos automóveis a desviar a sua trajetória, levando-os a reduzir a velocidade (Rodrigues, 2010). Seguem-se alguns exemplos destas medidas, que vão desde a colocação de obstáculos que é necessário contornar (rotundas ou gincanas) até à diminuição da largura ou do número de vias de circulação das faixas de rodagem (estrangulamentos).



Figura 25. Exemplo de uma gincana (Pereira, 2013).

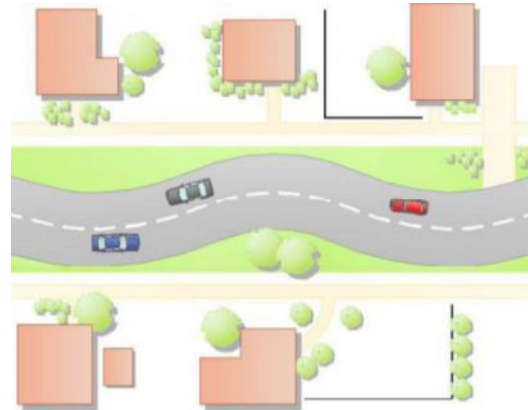


Figura 27. Esquema de uma gincana (InIR).



Figura 26. Rotunda (Coimbra) (Rodrigues, 2010).



Figura 28. Mini-rotunda, marcada no pavimento (Cantanhede) (Rodrigues, 2010).

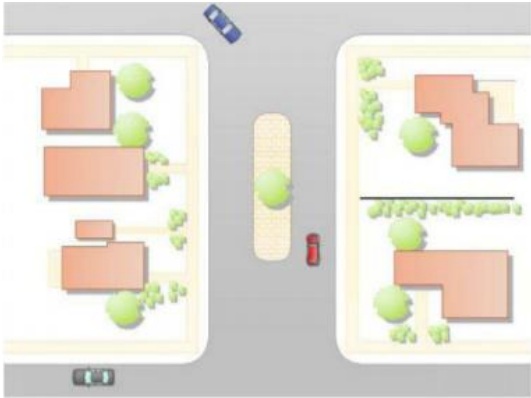


Figura 29. Esquema de um estrangulamento pelo centro (InIR).

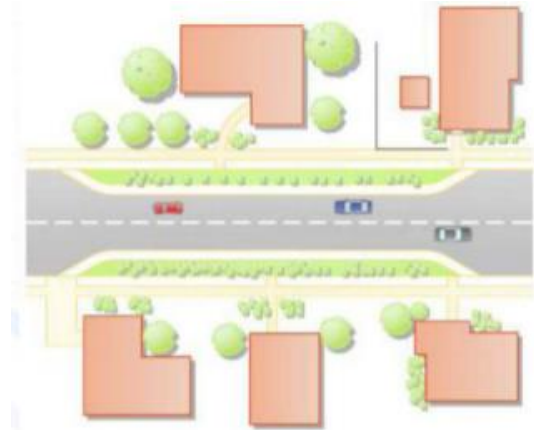


Figura 30. Esquema de um estrangulamento pelo lado (InIR).



Figura 32. Exemplo de um estrangulamento pelo centro (Pereira, 2013).



Figura 31. Exemplo de um estrangulamento pelo lado (Pereira, 2013).

Quanto às medidas de alteração aos alinhamentos verticais, elas incluem todas as que impõem mudanças da cota do pavimento, forçando deste modo os condutores a abrandarem, sob pena de danificarem os seus veículos (Seco et al, 2008). Seguem-se também alguns exemplos destas medidas.



Figura 33. Exemplo de bandas cromáticas (Pombal) (InIR).



Figura 34. Exemplo de uma lomba redutora de velocidade, numa zona residencial (Coimbra) (InIR).



Figura 36. Exemplo de uma via ao nível do passeio (Estrasburgo). (InIR)



Figura 35. Exemplo de uma via ao nível do passeio (Coimbra). (Rodrigues, 2010)



Figura 37. Exemplo de uma interseção elevada (Tomar). (Rodrigues, 2010)



Figura 38. Exemplo de uma passadeira elevada (Miranda do Corvo). (InIR)

Existem ainda um conjunto de medidas complementares que não se enquadram nos grupos acima descritos, mas que também permitem melhorias substanciais no sentido de reduzir velocidades e volumes de tráfego. Seguem-se alguns exemplos:



Figura 39. Exemplo de um radar de controlo de velocidade. (Pereira, 2013)



Figura 40. Exemplo de um semáforo de controlo de velocidade. (Pereira, 2013)



Figura 41. Sinal de pré-aviso de semáforo (Cantanhede). (Rodrigues, 2010)



Figura 42. Exemplo de pavimentos diferenciados para os diferentes utilizadores (Estrasburgo). (InIR)

Apesar do sucesso das medidas de acalmia de tráfego como as que acima se exemplificam e da sua contribuição para a redução da sinistralidade rodoviária e para o aumento da segurança e da qualidade de vida nas zonas urbanas, é de notar que algumas podem ser dispendiosas para autoridades locais e por vezes nem são bem aceites. Com efeito, muitas destas medidas causam um certo desconforto na condução, na medida em que os condutores se vêm forçados a ter maiores tempos de viagem e níveis mais elevados de desgaste e danos no veículo (Rodrigues, 2010). Importa também realçar que estas medidas podem representar um obstáculo à correta atuação de veículos de emergência ou de veículos agrícolas, no caso de se tratar também de uma zona rural (Hallmark et al, 2007).

O sucesso destas medidas é ainda influenciado pelo perfil psicológico do condutor, isto é, pelos seus comportamentos e reações subconscientes, como apontam Domenichini et al. num estudo realizado na cidade italiana de Florença (Domenichini, Branzi, & Smorti, 2019). Os condutores selecionados para esta investigação foram, numa primeira fase, submetidos a um questionário que permitiu distingui-los entre três grupos comportamentais: cuidadoso, apreensivo e agressivo.

Depois, efetuaram um percurso de cerca de 15 quilómetros em área urbana, com limite de velocidade de 50 km/h, durante o qual tiveram de atravessar passadeiras com diferentes configurações (como plataformas elevadas, pavimento colorido ou com textura). Os resultados obtidos confirmam o inicialmente esperado, revelando as diferenças de comportamento dos diferentes grupos de condutores quando confrontados com as diferentes configurações de passadeiras, onde se verificou que (Domenichini, Branzi, & Smorti, 2019):

- os condutores de perfil cuidadoso tendem a respeitar os limites de velocidade em todas as zonas, adotando uma condução homogénea e com baixos níveis de ansiedade;
- os condutores com perfil apreensivo tendem a adotar velocidades mais reduzidas do que todos os outros devido sobretudo aos elevados níveis de ansiedade e de nervosismo verificados, o que pode levar a uma condução insegura e mais propícia a erros;
- nos condutores de perfil agressivo denotam-se em geral baixos níveis de ansiedade (tal como nos de perfil cuidadoso), mas as velocidades praticadas são as mais elevadas e as travagens bruscas, resultando numa condução volátil e inapropriada e também ela propícia a erros.

Assim, a decisão de implementar estas medidas deve ser tomada de uma forma coerente e em zonas onde haja uma necessidade comprovada de acalmia de tráfego e que estejam adequadamente integradas com a restante estruturação viária (Seco et al, 2008). Algumas medidas podem ainda ser aplicadas pontualmente para tentar resolver um problema específico como um cruzamento ou uma passadeira que se revelem ineficazes, embora seja usual e aconselhável que se faça numa perspetiva mais global da rede viária em questão, para tentar evitar fenómenos de migração dos problemas (Seco et al, 2008). É também recomendado que se aplique várias medidas em conjunto, combinadas entre si, de forma a ser possível obter soluções mais eficazes e complementadas (Seco et al, 2008).

Resumidamente, as medidas mitigadoras acima detalhadas têm como objetivos primordiais (Seco et al, 2008):

- reduzir o impacto dos veículos motorizados nas vias locais;
- requalificar o espaço urbano;
- criar vias mais seguras e atrativas para todos os seus utilizadores, principalmente peões e ciclistas;
- conciliar as exigências de circulação dos vários meios de transporte com as restantes atividades que decorrem nos espaços adjacentes às vias
- melhorar a qualidade de vida.

Para que estes objetivos sejam atingidos, as referidas medidas são implementadas de forma a que haja uma diminuição (Seco et al, 2008):

- da velocidade de circulação dos veículos;
- do volume de tráfego em certos trechos das vias;
- do ruído e da poluição do ar;
- do número e da gravidade dos acidentes.

Neste contexto, os modelos de distribuição e simulação de tráfego podem ser ferramentas importantes para planeadores e gestores de tráfego para a avaliação de estratégias de gestão e controlo de tráfego, porque permitem retratar os casos reais com todo o detalhe a nível de

interações entre veículos e espaço, e complexidade inerentes a redes rodoviárias. Seguidamente será apresentado e brevemente descrito o modelo que irá ser usado nesta dissertação.

3.5. Modelos de microssimulação de tráfego

Os modelos de transportes, cujas características e benefícios foram já evidenciados anteriormente, podem ser classificados e divididos em três grupos, de acordo com o seu nível de detalhe: macroscópicos, mesoscópicos ou microscópicos. No que se segue, centrar-se-á a atenção no modelo microscópico.

Os modelos microscópicos apresentam um maior detalhe, na medida em que consideram cada viatura como uma entidade em estudo e onde é possível, por exemplo, observar os movimentos e as interações entre os veículos (Tavares & Pereira, 2015).

Este tipo de simulação consiste na criação de um modelo de toda a infraestrutura de transporte para posteriormente simular padrões de movimento e qualquer interação decorrente do tráfego rodoviário com um nível de detalhe microscópico que consiga representar toda a complexidade inerente à rede viária. Para ser possível atingir este nível de detalhe cada utilizador da rede viária (condutor, ciclista, peão) será considerado como um agente com objetivos e atributos comportamentais que os caracterizam e que interagem com os restantes utilizadores. Nesta representação deve-se incorporar todos os dados que permitam transferir características dinâmicas (alteração das condições de modelação no decorrer da análise por via de variabilidade temporal) e estocásticas (variáveis intervenientes sujeitas a mudanças aleatórias) dos movimentos dos veículos (Oliveira S. , 2016).

Nos modelos de microssimulação, a complexidade das interações de tráfego rodoviário obriga a que se considerem diferentes submodelos para caracterizar de forma fiel o que se verifica por observação na prática. Existem modelos e algoritmos que descrevem não só a deslocação dos carros ("*car-following*"), a mudança de faixas ("*lane-changing*") e a aceitação de intervalo crítico ("*gap-acceptance*"), mas também a movimentação livre de peões (Coelho R. , 2015). No que se segue descrevem-se os submodelos que permitem caracterizar o movimento e interação dos veículos, algo que iremos usar no trabalho para reproduzir o caso de estudo.

O submodelo *car-following* permite caracterizar o comportamento do condutor de acordo com a existência ou não de um veículo precedente (denominado "veículo líder"). Este modelo, tem por base a circulação livre de um veículo com a velocidade desejada enquanto não for restringido por outro. Quando se depara com um veículo considerado "veículo líder", e der conta que seguir à velocidade desejada levará a uma colisão, o veículo irá ajustar a sua velocidade de forma a manter uma distância de segurança ao mesmo (Olstam & Tapani, 2004).

Relativamente ao submodelo *lane-changing* este procura caracterizar a forma como um agente muda de via, não descurando o objetivo intrínseco ao tipo de veículo (Silva et al, 2013). Existem várias motivações que podem levar a esta mudança, como a obrigatoriedade (por exemplo, se a via onde um determinado veículo se encontra estiver bloqueada ou prestes a terminar), a antecipação a qualquer situação de congestionamento na via, ou simplesmente por opção, na busca de melhores condições de circulação (Oliveira S. , 2016).

Perante uma situação de cedência de passagem, os condutores podem assumir diversos perfis e, portanto, torna-se necessário modelar, o que se chama de aceitação de intervalo crítico (*gap-acceptance*). Este tipo de submodelo pretende indicar as condições necessárias para que um veículo se possa inserir numa via com tráfego prioritário (Silva et al, 2013). Ou seja, a sua utilização permite simular o comportamento de veículos em situações de cedência de passagem (como cruzamentos ou interseções), particularmente se o veículo não prioritário consegue inserir-se na mesma ou fazer uma manobra de atravessamento. Para que se consiga caracterizar este perfil, são utilizadas as velocidades e taxas de aceleração dos veículos, bem como as distâncias dos mesmos a um possível ponto de colisão e ainda o tempo necessário para o veículo fazer a sua manobra em segurança (Oliveira S. , 2016).

Posto isto, torna-se claro que a utilização de modelos de microssimulação pode ser bastante conveniente no processo de planeamento rodoviário, visto que permite prever o comportamento dos condutores e os possíveis impactos resultantes de alterações aos diversos elementos da infraestrutura (por exemplo da sinalização, do número de faixas, de rotundas, ou até mesmo de fluxos de tráfego), que podem ser verificados ou dimensionados através da simulação, e avaliar os benefícios de diferentes configurações, sendo ainda possível ajustá-los à realidade do local que se pretende estudar (seja em termos geométricos seja em termos de comportamento dos utilizadores) (Oliveira S. , 2016). De facto, as análises detalhadas a infraestruturas rodoviárias que estes modelos fornecem, permitindo obter dados de tempo de viagem, de consumo de combustível ou de emissões de poluentes, têm-nos tornado rapidamente numa ferramenta generalizada no planeamento de tráfego em todo o mundo (Coelho R. , 2015).

Atualmente, existe uma grande variedade de softwares de microssimulação tais como os modelos AIMSUN, INTEGRATION, PARAMICS ou VISSIM que, como referido acima, têm como principal vantagem a utilidade de avaliar estratégias alternativas no sistema de transportes, sem ter de fazer intervenções no “mundo real” (Oliveira S. , 2016).

Na realização desta dissertação foi utilizado o VISSIM11 como ferramenta de modelação do caso de estudo e da distribuição de tráfego, por permitir simular o comportamento do condutor em diferentes tipos de vias e perante diferentes situações de tráfego (interseções, rotundas, sinais luminosos, etc.); adicionalmente, é vantajoso para a estimativa de emissões dos veículos com base nas suas trajetórias e com elevada precisão temporal (segundo a segundo), já que possibilita a exportação de dados, ou seja, é compatível com metodologias externas ao software para o cálculo das emissões (Tomás, 2018). Relativamente ao VISSIM, ele foi criado em 1992 pela PTV (*Planung Transport Verkehr AG*), uma empresa alemã especializada em serviços de consultoria e soluções de software na área dos transportes, mobilidade e logística (PTV Group). É um software largamente utilizado em todo o mundo, permitindo analisar redes de diversos tamanhos, desde um caso particular de uma interseção/cruzamento até uma área metropolitana inteira; a sua utilização possibilita ainda apresentações visuais de grande qualidade, já que a animação dinâmica durante a simulação são ferramentas complementares à análise (Oliveira R. , 2014).



Figura 43. Exemplo de aplicação do software de simulação VISSIM (PTV Group).

O pacote de simulação do VISSIM é composto internamente por dois programas distintos: o simulador de tráfego, que é um modelo microscópico de simulação do fluxo de tráfego (onde são geradas as operações de tráfego e os dados de saída); e o gerador de sinal, um software que compila as informações do simulador de tráfego numa base de tempo discreta (Ratrouf & Rahman, 2019).

Um exemplo da utilidade da aplicação deste software foi a sua utilização para estudar o efeito de diferentes medidas de acalmia de tráfego e do espaçamento ideal entre elas por García et al onde, após a sua calibração e validação no que diz respeito ao comportamento dos condutores com recurso a dados recolhidos num trabalho de campo, foram simulados e analisados diferentes cenários (García et al, 2011). A importância da utilização do modelo de simulação neste estudo é significativa pois permitiu a exploração dos diferentes cenários o que, no mundo real, não poderia ser feito (não era praticável).

Mais ainda, o VISSIM tem um módulo externo de distribuição de tráfego dinâmica que permite incorporação de efeitos dinâmicos do tráfego e para uma dada rede devolver a distribuição quase-ótima (pode não ser garantida a convergência para a solução ótima – situação de equilíbrio, e por isso é devolvida uma solução muito próxima). O algoritmo adotado no VISSIM, procura o caminho mais curto que pode ter em conta o tempo de viagem, a distância percorrida e ainda um custo, geralmente atribuído a segmentos da rede para retratar portagens, por exemplo. Mesmo sendo apresentado como *black box*, baseia-se certamente na construção de matrizes OD de caminho mais curto (em termos de distância, ou tempo, ou custo generalizado), que não é mais do que o custo/tempo de viagem entre quaisquer pares OD. O critério de paragem baseia-se numa análise a nível da convergência, e sendo um procedimento iterativo, compara os valores da função objetivo entre iterações e pára quando não se verificar uma alteração significativa (tendo em conta uma tolerância numérica). A base do algoritmo incorporado neste módulo encontra-se representado na figura que se segue (Figura 44) (Chiu, et al., 2011).

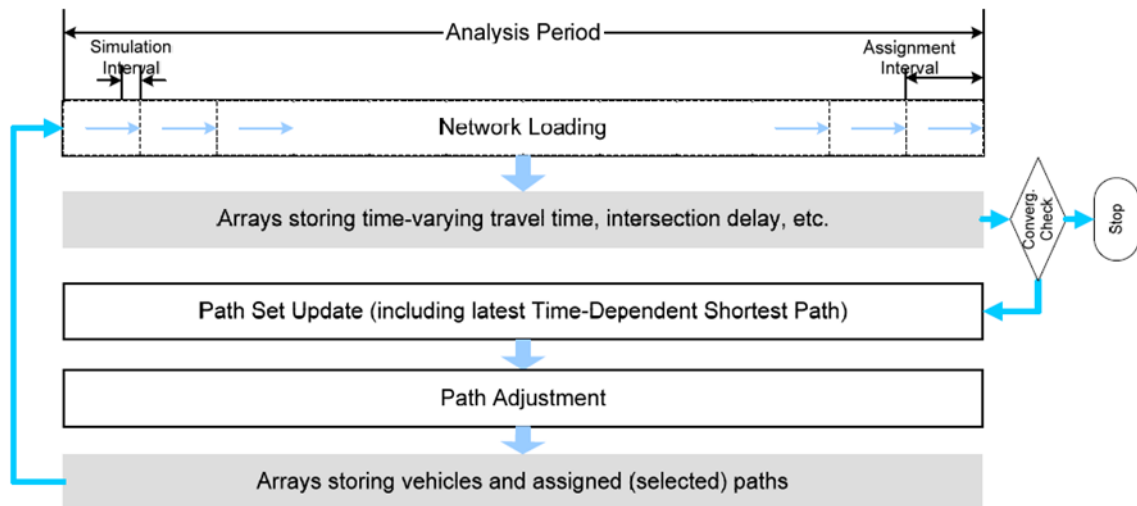


Figura 44. Exemplo de procedimento algorítmico de distribuição de tráfego dinâmica num software de simulação (Chiu, et al., 2011).

Este módulo é usado neste trabalho para avaliação do desempenho da rede viária para diversos cenários de introdução de medidas mitigadoras de efeitos negativos associados ao tráfego, e considerando funções objetivo que envolvem componentes de eficiência, ambientais, de ruído e de segurança.

4. Metodologias de Avaliação do Desempenho da Rede

Tendo em consideração que quaisquer medidas a introduzir numa rede devem ser ponderadas, os modelos de (micro)simulação de tráfego permitem prever e analisar os impactos decorrentes dessa implementação. Conclui-se que o recurso a estes modelos apresenta vantagens notórias, principalmente quando se procuram analisar diversos cenários hipotéticos (*what-if*). A avaliação dos resultados da aplicação destes modelos assenta na tarefa de atribuição/distribuição de tráfego (volumes) na rede. Posteriormente, devem ser calculados indicadores do desempenho da rede, ou seja, determinar a sua capacidade para suprir a procura potencial de que a rede será alvo e perceber se haverá algum tipo de anomalia no funcionamento da mesma (Seco et al, 2008). Este procedimento permitirá identificar possíveis zonas de conflito da rede viária em questão ainda antes de a mesma ser implementada, viabilizando assim a obtenção de soluções mais eficazes. Deste modo, poderá haver uma redução não só dos custos associados a intervenções/reformulações da rede, mas também da ocorrência dos diversos problemas, já abordados nos capítulos acima, decorrentes de um mau nível de serviço da mesma tais como o congestionamento, a sinistralidade, os níveis de tráfego excessivos e os comportamentos inadequados em vias locais; recomenda-se ainda que esta avaliação de desempenho seja contínua, durante e após a implementação da estrutura (Seco et al, 2008).

De seguida, serão detalhadas as externalidades associadas ao tráfego rodoviário, bem como os principais indicadores que permitem quantificar o seu desempenho e as metodologias utilizadas para a estimativa dos mesmos.

4.1. Desempenho de redes viárias: externalidades associadas ao tráfego rodoviário

De modo a ser possível avaliar o desempenho de uma rede rodoviária e averiguar a qualidade das suas condições de operação, é necessário ter presente as principais variáveis que influenciam a sua eficiência. De entre elas, destacam-se de uma forma geral: a mobilidade, o congestionamento, a segurança, a emissão de poluentes, o ruído e o consumo de combustível.

A mobilidade é, provavelmente, a consequência com maior relevância uma vez que se trata da finalidade primordial dos sistemas de transportes: permitir a circulação de pessoas e bens; sem que ela seja conseguida, a eficiência da rede será altamente afetada. O congestionamento assume também uma grande importância, uma vez que interfere diretamente com o fator a que os utilizadores das redes rodoviárias dão maior destaque: o tempo de viagem. Não menos importantes são as restantes consequências apresentadas, cujo impacto na eficiência da rede se reflete no plano social (segurança e ruído), ambiental (emissão de poluentes) e económico (consumo de combustível).

De um modo mais particular, no que diz respeito à circulação rodoviária, é possível distinguir algumas características específicas das vias de tráfego que figuram também como variáveis com influência na eficiência da rede, tais como o número de faixas de rodagem, a largura de vias e bermas ou a existência de um separador central, que devem ser concordantes com a capacidade

da via projetada e com o perfil de velocidades pretendido, de forma a garantir a qualidade do serviço (Seco et al, 2008).

No que diz respeito à circulação de peões e ciclistas, a qualidade destes serviços está relacionada com a dimensão de passeios e vias reservadas, em que deve ser garantido o mínimo necessário para servir o seu denominado “espaço vital”, devendo ainda haver uma separação física ou espacial do tráfego motorizado. Estas variáveis mais concretas permitem um aumento do conforto e segurança destes utilizadores, influenciando positivamente a eficiência da rede (Seco et al, 2008).

A emissão de poluentes, particularmente de gases de efeito de estufa que são considerados atualmente como os principais causadores das alterações climáticas e do aquecimento global (CO₂) e da poluição do ar (como NO_x e partículas em suspensão), é também uma consequência determinante na eficiência da rede, e que tem relevância na atualidade, uma vez que há uma consciencialização cada vez maior para a temática da preservação do ambiente. De facto, o setor dos transportes contribui diariamente com uma grande parte da emissão destes gases poluentes, pelo que este efeito tem adquirido grande importância no contexto do desenvolvimento sustentável (Kuang et al, 2019).

Assim, pode-se concluir que variáveis específicas ligadas aos perfis de velocidade e aceleração, bem como a distância a percorrer influenciam o desempenho da rede. Paralelamente, há ainda um conjunto de indicadores de desempenho da rede que não se podem descurar, tais como: a fluidez oferecida; a versatilidade de operação; os custos de investimento e manutenção; o conforto/stress provocado; o grau de compatibilidade com o meio envolvente (Seco et al , 2008).

No entanto, o planeador ou gestor de tráfego precisa analisar as variáveis que influenciam a rede e avaliar o seu impacto, necessitando de algum tipo de indicador de desempenho, de forma a determinar níveis aceitáveis para cada fator (Gomes, 2004). Este procedimento não é trivial, pois os sistemas de transportes são complexos e, muitas vezes, os requisitos sociais, económicos e ambientais entram em conflito (*trade-offs*), tornando difícil a definição adequada dos níveis para cada fator; no entanto, ele permite a formulação de uma solução ajustada a cada caso já que é feita uma previsão global do desempenho intrínseco da mesma (Seco et al, 2008). Face ao exposto, pode-se afirmar que é importante ter à disposição dos planeadores e gestores de tráfego uma ferramenta abrangente que permita avaliar o desempenho de uma rede de uma forma integrada, multiobjetiva e dinâmica.

O setor dos transportes traz benefícios evidentes à qualidade de vida da população, mas são também notórios os diversos prejuízos que acarreta, muitos deles já abordados nos capítulos acima. Ora, quando estes prejuízos afetam não só os condutores, mas também a restante sociedade é usual falar-se em externalidades.

O conceito de externalidade refere-se ao custo que os efeitos colaterais de uma determinada atividade impõem à sociedade, e representam a diferença entre os custos sociais (no caso do setor dos transportes, são os custos decorrentes do uso do sistema de transporte, tais como: custos de manutenção, custos de acidentes, custos de congestionamento, custos ambientais) e os custos privados (diretamente suportados pelo utilizador; no caso do setor de transportes são os custos referentes ao desgaste do veículo, custos de impostos e taxas de circulação e de tempos gastos em viagem) (Korzhenevych, et al., 2014). Note-se que as externalidades se referem aos casos em que os custos sociais são superiores aos custos privados.

De seguida, serão detalhadas as principais externalidades associadas ao transporte rodoviário, a saber: congestionamento, acidentes, impactos ambientais, danos nas vias de tráfego e ruído.

A temática do congestionamento foi já abordada no subcapítulo anterior, onde se viu que ele ocorre quando a procura de uma determinada via é superior à sua capacidade, resultando em baixas velocidades de circulação e maiores tempos de viagem e custos por quilómetro (Santos et al, 2010). Há, no entanto, alguma ambiguidade sobre se o congestionamento deve ser efetivamente considerado como um custo externo, isto porque se pode assumir que os efeitos negativos deste fenómeno afetam apenas os restantes utilizadores da via (utilizadores do mesmo bem/serviço) (Korzhenevych, et al., 2014). No entanto, a maior parte da literatura refere que qualquer impacto negativo a terceiros que não seja compensado monetariamente deve ser considerado como externalidade, independentemente de serem ou não utilizadores do mesmo serviço.

Os custos externos relativos aos acidentes rodoviários são aqueles que não são cobertos pelas seguradoras, ou seja, são as consequências para os indivíduos que estão envolvidos no acidente (lesões ou mortes), para os seus parentes e amigos (dor e sofrimento) e para a restante sociedade (danos materiais, custos médicos e policiais envolvidos) (Korzhenevych, et al., 2014). É de notar que, quantos mais veículos em circulação houver, maior será a probabilidade de ocorrência de acidentes, o que aumentará os custos associados aos mesmos; no entanto, este aumento não é linear, uma vez que, com mais veículos em circulação, haverá menores velocidades devido ao nível de congestionamento o que contribuiria para reduzir a gravidade dos mesmos (Santos et al, 2010).

Relativamente aos impactos ambientais, eles vão desde a emissão de poluentes até às alterações da biodiversidade e das paisagens naturais e urbanas (ocupação de zonas centrais e históricas). De entre estes, aquele que acarreta mais custos quer a nível regional quer a nível global é a emissão de poluentes, isto porque a esmagadora maioria dos veículos funciona à base da combustão de combustíveis fósseis, o que implica a libertação de gases poluentes como óxidos nitrosos (NO_x), hidrocarbonetos (HC), partículas em suspensão (PM) ou monóxido de carbono (CO) (Santos et al, 2010). A nível regional os custos em questão relacionam-se com a degradação da qualidade do ar e com o elevado risco de doenças do foro respiratório em caso de exposição prolongada, enquanto que a nível global há uma enorme contribuição para o fenómeno do aquecimento global (CO_2).

Os danos nas vias são causados na grande maioria das vezes pelos veículos pesados, sobretudo quando circulam em estradas de menores dimensões (Santos et al, 2010); os custos externos associados são os custos de reparação da via, suportados pela agência rodoviária responsável pela mesma, e os custos de reparação de veículos que possam vir a ser afetados por tais danos, suportados pelo proprietário.

O ruído originado pelo tráfego automóvel tem também um grande impacto no quotidiano da sociedade, principalmente dos habitantes de zonas urbanas. Os seus custos externos incluem complicações ao nível auditivo (dor e perda de audição, quando a exposição é elevada), interferência no comportamento social (dificuldades na comunicação verbal), perturbações do sono e falta de produtividade no trabalho e na escola (Korzhenevych, et al., 2014). As medidas de proteção que tipicamente são adotadas no sentido de reduzir o ruído são dispendiosas, e consistem na implementação de barreiras acústicas nas autoestradas e, num contexto mais particular, na colocação de vidros duplos nas janelas dos edifícios (Santos et al, 2010).

Importa perceber que, na presença de externalidades como as identificadas acima, o sistema de transportes é incapaz de alcançar o equilíbrio. Assim, uma possível forma de as evitar é incluir os

custos externos no preço do bem ou serviço (por exemplo, implementando impostos corretivos) para, desta forma, aumentar os custos privados (Silva, 2014). Há ainda uma outra forma de atuação no sentido de reduzir o nível de externalidades, que se prende com um correto planeamento do uso do solo e do sistema de transporte, combinados com outras medidas de correção (Santos et al, 2010).

4.2. Metodologias para estimativa de emissões e consumo combustível

Torna-se então necessário quantificar estas variáveis da forma mais precisa possível para se poder fazer uma análise fiável do nível de desempenho da rede.

Relativamente às emissões, estas podem ser quantificadas com recurso ao uso de um equipamento especialmente concebido para medir emissões, mais concretamente o PEMS (*Portable Emissions Measurement Systems*). Trata-se de um sistema de medição de emissões portátil em que é introduzido no tubo de escape do veículo um instrumento que recolhe amostras dos gases de exaustão. O dispositivo tem incorporado sensores, um conjunto de analisadores de gases e um computador que fornece informações relativas a emissões de alguns poluentes, como por exemplo CO₂, CO, NO_x, HC e PM, consumo de combustível, velocidade do veículo e motor, temperatura, posição do acelerador, permitindo uma monitorização contínua (instantânea) e precisa do veículo (Franco, et al., 2013) (Frey et al, 2003). De facto, o PEMS é um dispositivo que tem uma vasta aplicação em estudos neste âmbito, pois fornece resultados precisos podendo ser facilmente instalado nos mais diversos tipos de veículos (Kousoulidou et al, 2013), possibilitando a recolha de dados em qualquer localização a que o veículo em estudo se desloque e em condições reais no ambiente de condução (condições ambientais, de tráfego, etc.), numa base de tempo de segundo a segundo (Coelho et al, 2009). No entanto, a desvantagem é que são equipamentos dispendiosos e a sua instalação em todos os veículos de uma rede não é viável para se quantificar as emissões de poluentes numa dada zona. Assim, torna-se necessário recorrer a estimativas dos níveis de emissões com base em modelos matemáticos que forneçam essa informação de forma aproximada.

Existem vários modelos que permitem estimar as emissões, desde os modelos macroscópicos (como COPERT ou HBEFA) aos microscópicos (VSP, VERSIT ou MOVES). Os modelos macroscópicos requerem como valores de entrada velocidades médias ou a descrição de uma situação de tráfego (hora de ponta ou de vazio), estimando assim as emissões associadas para um determinado intervalo de tempo e distância percorrida (Samaras, et al., 2018); estes modelos são geralmente usados em aplicações mais gerais como “inventários nacionais de emissões ou grandes troços de estradas, onde não é necessária a análise das emissões de veículos em particular” (So et al, 2018). Por outro lado, os modelos microscópicos (também designados modelos instantâneos) geram as estimativas de emissões com base nos perfis de velocidade e de aceleração, “veículo-a-veículo e segundo-a-segundo” (Zhou, et al., 2015). Estes últimos modelos são mais relevantes para redes locais mais pequenas e permitem simular os comportamentos de condução de cada veículo, possibilitando assim uma “visão mais detalhada dos fluxos de tráfego e uma base adequada para o cálculo das emissões em cenários alternativos” (Quaassdorff, et al., 2016).

Tendo acesso a informação do modo como o veículo opera, a metodologia VSP (*Vehicle Specific Power*) permite calcular a potência específica de um determinado veículo a cada segundo, necessitando para isso de informação detalhada de dados de dinâmica do mesmo, como: a sua velocidade instantânea, a sua aceleração instantânea e o declive da via. Estas variáveis permitem

definir a potência requerida pelo motor de uma forma precisa, já que são tidos em conta a energia cinética, a inclinação do plano e o arrasto aerodinâmico a que o veículo está sujeito (Carvalho, 2011).

O primeiro passo desta metodologia é calcular a potência específica do veículo, de acordo com a seguinte expressão:

$$VSP = v[1,1 \times a + 9,81 \times (\tan^{-1}(\sin(g))) + 0,123] + 0,000302 \times v^3 ,$$

Em que:

- v é a velocidade instantânea do veículo, em m/s;
- a é a aceleração instantânea do veículo, em m/s²;
- g é o declive da via, em %;
- VSP é potência específica instantânea do veículo, em kW/ton.

Os valores resultantes do VSP são classificados segundo diferentes modos (geralmente 14), de forma a que cada modo corresponda a uma determinada taxa de emissão (Coelho, et al., 2013). Assim, calculada a potência em cada segundo, é necessário atribuí-la a cada um dos diferentes modos VSP, o que pode ser feito da forma indicada na Tabela 1 (EPA, 2002). Segundo a mesma fonte, os modos 1 e 2 (com valores negativos) correspondem a cenários de travagens ou descidas; o modo 3 corresponde a situações de marcha lenta ou de pára-arranca; os restantes modos (4-14) dizem respeito a situações de crescente aceleração ou subidas.

Tabela 1. Definição dos diferentes modos VSP.

Modo VSP	Gama de valores
1	$VSP < -2$
2	$-2 \leq VSP < 0$
3	$0 \leq VSP < 1$
4	$1 \leq VSP < 4$
5	$4 \leq VSP < 7$
6	$7 \leq VSP < 10$
7	$10 \leq VSP < 13$
8	$13 \leq VSP < 16$
9	$16 \leq VSP < 19$
10	$19 \leq VSP < 23$
11	$23 \leq VSP < 28$
12	$28 \leq VSP < 33$
13	$33 \leq VSP < 39$
14	$39 \leq VSP$

Cada valor de VSP corresponde a um único destes 14 modos e, depois de todos eles estarem agrupados corretamente, é possível fazer corresponder cada modo a uma determinada taxa de emissão dos diferentes poluentes.

Esta metodologia tem sido amplamente utilizada e é considerada como uma boa aproximação no que à modelação de emissões diz respeito. De facto, a grande variedade de taxas de emissões verificadas no mundo real pode ser em grande parte explicada pela variação entre modos de condução (aceleração, desaceleração, marcha lenta, etc.); assim, o VSP demonstra ser útil na medida em que, como tem em consideração tanto a velocidade como a aceleração instantânea, consegue representar estas variações de uma forma mais precisa do que outros métodos (Coelho et al, 2009). Efetivamente, diversos estudos que recorreram a esta metodologia indicam-na como adequada para a avaliação das emissões de veículos no mundo real, seja em ambiente urbano, rural ou em autoestrada (Fernandes, et al., 2019).

Os dados relativos à velocidade e aceleração segundo-a-segundo e da localização do veículo (em termos de gradiente do segmento), que são necessários para a aplicação da metodologia VSP podem ser fornecidos por dispositivos como um sistema de diagnóstico automóvel com protocolo de comunicação standard via interface OBD2 (*On Board Diagnostic*) e de um Sistema de Posicionamento Global (GPS, do inglês *Global Positioning System*), respetivamente. Na figura que se segue apresenta-se um esquema-resumo dos passos a seguir desde a informação fornecida pelos dispositivos de medição à obtenção dos dados das emissões.

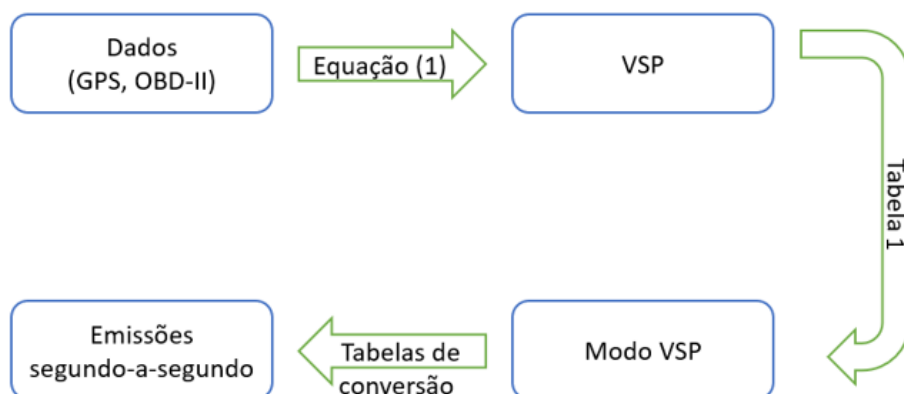


Figura 45. Esquema ilustrativo dos passos a seguir para obtenção das emissões instantâneas.

O risco de acidentes e a previsão da sua possível localização, é também uma informação relevante para a análise do desempenho da via e para a decisão quanto à implementação de medidas de segurança a adotar, no entanto, trata-se de uma área que vai para além foco desta dissertação (que se prende apenas com os custos associados a esses acidentes, para um determinado número de veículos/quilómetro). Ainda assim, modelos de estimativa de densidade de acidentes, como GIS (*Geographical Information Systems*) ou KDE (*Kernel Density Estimation*), permitem a identificação de áreas potencialmente perigosas de maneira objetiva, relacionando os acidentes ocorridos com as características da zona onde ocorrem (população e outros fatores da via); estudos realizados nesta área mostram que os dados fornecidos pelo KDE são concordantes com o número real de

acidentes de trânsito verificados, tal como as indicações de zonas preferencialmente mais indicadas para a introdução das medidas de acalmia de tráfego (Hashimoto, et al., 2016).

Esta avaliação quantitativa dos impactos ambientais e sociais relacionados com o tráfego rodoviário tem uma grande importância na análise do nível de desempenho da rede viária, na medida em que permite evidenciar o grau de desempenho de cada parâmetro (emissão de poluentes, congestionamento, segurança, ruído) e analisar cenários alternativos no sentido de os otimizar e encontrar melhores soluções.

4.3. Avaliação global do desempenho de redes viárias

A avaliação do comportamento e desempenho da rede é fundamental para a análise dos impactos de uma dada distribuição de tráfego. Existem ferramentas que incorporam funcionalidades que permitem uma avaliação com detalhe, principalmente os modelos microscópicos de simulação de tráfego que simulam com bastante precisão o comportamento de cada veículo (agente) na rede. Quanto à distribuição de tráfego, ela permite conhecer a forma como os veículos se distribuem ao longo da rede e está intimamente ligada à decisão de escolha de rota por parte do condutor que pode variar no decorrer da viagem conforme as condições de trânsito existentes.

No VISSIM, a distribuição de tráfego consiste na alocação do fluxo de tráfego definido pela matriz O-D, pelas diferentes rotas disponíveis (Jeihani, 2007). Quanto à DTA, ela é garantida através de um módulo adicional, o *Dynamic Assignment*. Neste módulo o processo de atribuição dinâmica é iterativo, ou seja, a rede é modelada repetidamente e não apenas uma vez, até ser atingido o equilíbrio da rede (PTV, 2018). Deste modo, os condutores escolhem a sua rota ao longo da rede com base na sua experiência das iterações anteriores sendo que, neste “processo de aprendizagem”, é feita para cada rota uma análise do critério de escolha dos condutores que é representado através de um custo geral que inclui o tempo de viagem, a distância e outros custos (como portagens, por exemplo) (PTV, 2018). Estes custos, bem como a distância de viagem, são definidos diretamente na modelação da rede, enquanto que o tempo de viagem é calculado durante a simulação (PTV, 2018). Desta forma, a distribuição é feita em diferentes passos de tempo, o que permite redefinir rotas como consequência de um congestionamento pontual numa determinada zona da rede (Tomás, 2018). Ainda assim, um possível inconveniente destes modelos é a necessidade de conhecer a matriz de viagens O-D e os critérios de escolha das mesmas o que, para redes viárias mais extensas, pode tornar a análise inviável (Tomás, 2018).

Em particular, no que se segue será descrita a metodologia que servirá de base para o estudo que se pretende levar a cabo nesta dissertação. Esta metodologia destaca-se pelo facto de poder ser considerada uma perspetiva abrangente das possíveis preocupações de um condutor, nomeadamente, procurar rotas que minimizem impactos em termos de tempo de viagem, distância percorrida (consumo de combustível), e do meio ambiente (emissões de poluentes).

4.3.1. Metodologia de base

Macedo et al. sugerem uma metodologia de otimização multiobjetivo para distribuição de tráfego tendo em conta o tempo de viagem, a distância percorrida e a emissão de poluentes (Macedo et al, 2019), desenvolvida por forma a tirar partido das potencialidades de um software de simulação de tráfego microscópica (VISSIM).

A metodologia proposta por Macedo et al. envolve uma simplificação dos modelos COPERT para estimar as emissões de poluentes (em contraste com o modelo utilizado na presente dissertação, o VSP) com base em veículos representativos do grupo em que estão categorizados (veículos ligeiros de passageiros, comerciais, pesados, ...), fazendo somente a distinção de acordo com o tipo de combustível (sem informação específica de cada tipo de veículo).

As expressões obtidas foram usadas como funções objetivo numa formulação do problema de otimização multiobjetivo para distribuição de tráfego dinâmica, em que se procura a melhor distribuição de tráfego que minimiza simultaneamente o tempo de viagem, a distância percorrida, as emissões de CO₂ e as de NO_x (no que se refere ao presente trabalho, não se irá considerar a distância percorrida e tentar-se-á incluir um conjunto mais alargado de externalidades). Uma vez que se trata de um problema de otimização multiobjetivo é natural haver um comprometimento entre as soluções ótimas de cada função objetivo (*trade-offs*). Cabe ao analista ponderar, e atribuir algum peso à componente que considerar mais importante avaliar.

A ideia fundamental é usar os resultados relativos a dados de dinâmica dos veículos devolvidos por um software de simulação de tráfego microscópica (VISSIM) e incorporar componentes de impacto ambiental a cada passo da simulação, com vista a poder ir quantificando os níveis de emissão de poluentes em determinadas áreas. Para esse efeito, foi também desenvolvido por Macedo et al. um código em Matlab que permite integrar no VISSIM os custos (baseados nos custos de referência propostos em (Essen, et al., 2019) para emissões de poluentes) por link (por segmento de estrada), a cada passo da simulação, permitindo controlar a simulação (Macedo et al, 2019).

Com vista ao teste da metodologia, foi selecionado um caso de estudo que envolve diferentes tipos de vias. A rede foi codificada e modelada no VISSIM, já que este possibilita uma forma eficiente de descrever as condições de tráfego da rede ao longo do tempo e de encontrar o caminho mais curto segundo um determinado custo específico definido ao nível dos segmentos. Foram inseridos os volumes de tráfego através de uma matriz O-D e foi calibrado o modelo, para uma melhor aproximação ao caso real. A validação do modelo foi feita através da comparação entre os volumes de tráfego e os tempos de viagem estimados e os efetivamente observados.

Foram considerados dois cenários: distribuição de tráfego considerando apenas minimização dos tempos de viagem da rede); e um segundo caso, considerando três componentes, nomeadamente em termos de eficiência da rede associada ao tempo de viagem e à distância percorrida (que engloba também uma vertente de energia pela relação com o consumo de combustível), em termos de impacto a nível das alterações climáticas, focando-se nas emissões de CO₂, e por fim uma componente associada a impacto na qualidade do ar, focando-se em particular nas emissões de NO_x. Os resultados da aplicação da metodologia proposta no estudo de caso em particular, mostram-se promissores no sentido em que também refletem impactos ambientais da situação da rede.

Nesta dissertação sugere-se alargar esta metodologia, incluindo ainda outros custos (como os de ruído e de acidentes). Para isso, o módulo *Dynamic Assignment* terá uma grande importância, já que será necessário analisar as distribuições ótimas de tráfego para diversos cenários e com diferentes custos associados.

4.3.2. Metodologia proposta

Numa tentativa de englobar várias externalidades numa só análise, procurou-se uma abordagem que permitisse avaliar o desempenho de rede viária tendo em conta: o tempo de viagem, a distância

percorrida, e que ao mesmo tempo se pudesse quantificar as emissões de poluentes globais (como o CO₂), mas também locais pela direta relação com efeitos adversos na saúde humana (como o NO_x), bem como a poluição sonora (ruído) e risco de acidentes, numa última componente associada à segurança rodoviária.

Assim, com recurso a dados da trajetória e de dinâmica de todos os veículos da rede em simulação (velocidade, aceleração, gradiente da via), pode-se calcular emissões e todos os custos associados tanto a emissões, como a acidentes e ruído, tendo por base os custos de referência para o caso de Portugal disponíveis em (Essen, et al., 2019).

Os custos associados a cada parâmetro estão representados na tabela que se segue.

Tabela 2. Custos associados a cada parâmetro (Essen, et al., 2019).

CO ₂ (€/ton)	NO _x (€/ton)		Ruído (cent./vkm)		Acidentes (cent./vkm)	
	Rural (Via Principal)	Cidades (Via Alternativa)	Ligeiros (Gasolina/gasóleo)	Comercial	Rural (Via Principal)	Urbano (Via Alternativa)
100	1700	2800	0,80	1,10	0,76	2,80

Para o estudo, em termos de avaliação de externalidades dos fenómenos de *rat-running*, sugere-se fazer uma clara distinção entre áreas que envolvam uma maior/menor exposição de utilizadores vulneráveis. Em particular, sugere-se que custos mais elevados sejam associados a uma (possível) maior exposição a peões e ciclistas, ou seja, em áreas residenciais, escolares ou de serviços, como será o caso da via alternativa pela qual se dão os fenómenos de atravessamento. Em contraste, na via principal a exposição de peões será menor e, desta feita, os custos associados a esta via serão também inferiores.

Face à dimensão dos ficheiros, gerados pelo VISSIM, relativos à trajetória dos veículos, foi utilizado um procedimento computacional de cálculo numérico e implementado um código em Matlab para efetuar o cálculo das emissões, tendo por base a metodologia VSP, e dos custos associados à situação de tráfego, tendo como referência (Essen, et al., 2019). O código Matlab permitirá obter dados de emissões dos veículos por cada segundo, por cada tipo de veículo e também por cada rota, sendo que será ainda possível obter os custos associados a cada *Link*. Para tal, fez-se a seguinte consideração, em que a composição da frota em Portugal segue a seguinte distribuição (Macedo et al, 2019): 39% de veículos ligeiros de passageiros, a gasolina, 40% de veículos ligeiros de passageiros, a gasóleo, e 21% de veículos ligeiros comerciais.

Tendo em conta o que se sugere, as funções objetivo a considerar no problema de otimização multiobjetivo para distribuição de tráfego dinâmica com vista à minimização do tempo de viagem e das externalidades associadas ao tráfego são:

- Tempo de viagem:

$$\sum_a \sum_m x_{am} \frac{l_a}{s_{am}}$$

- Custos associados a emissões, ruído e segurança:

$$\sum_a \sum_m x_{am} e f_{K,am}(s_{am}) l_a c_K + \sum_a \sum_m x_{am} l_a (c_R + c_S)$$

Em que:

- x_{am} representa o volume dos veículos do tipo m que circulam no *Link* a ;
- s_{am} representa a velocidade dos veículos do tipo m que circulam no *link* a ;
- K representa um dos poluentes CO₂ ou NO_x;
- $f_{K,am}$ é o fator de emissão associado ao poluente K no *Link* a ;
- c_K , c_R e c_S representam os custos associados aos poluentes, ao ruído e à segurança, respetivamente, com base na tabela anterior.

A abordagem apresentada permite avaliar o estado atual de uma rede tendo em conta diferentes componentes, todas elas com um peso notório, bem como testar a implementação de alterações à rede, constituindo uma ferramenta fundamental para planeadores e gestores de tráfego, bem como autoridades locais.

5. Aplicação a Estudo de Caso: Avaliação do Comportamento e Desempenho da Rede

No presente capítulo, apresentar-se-á um estudo de caso baseado numa rede rodoviária real no qual se procura demonstrar a aplicabilidade da metodologia proposta previamente. Em particular, o caso a explorar apresenta frequentemente situações de atravessamento sistemático de espaços locais (*rat-running*), nomeadamente por uma zona de características residenciais. O objetivo do estudo que se segue é avaliar a situação observada no terreno, e testar a implementação de medidas de acalmia de tráfego (como cenários alternativos) com base nos resultados da aplicação da metodologia proposta para avaliação do desempenho da rede, que é precisamente o objetivo nuclear desta dissertação.

Assim, no que se segue, irá ser estudado detalhadamente um caso de estudo para avaliação do comportamento e desempenho de uma rede quando sujeita ao fenómeno de *rat-running*. Para esse efeito, foi realizada uma análise ao caso real em que se observasse uma frequência significativa da ocorrência de *rat-running*, ou seja, em que alguns condutores quando confrontados (no seu entendimento) com situações de congestionamento num trajeto principal, optassem em alternativa por uma rota secundária. Para possibilitar essa análise e atingir os objetivos propostos para esta dissertação, é fundamental ter informação detalhada dos volumes de tráfego associados à referida rede e da dinâmica dos veículos que nela circulam.

A metodologia para a monitorização experimental de obtenção e tratamento dos dados relevantes ao estudo encontra-se detalhada nas próximas secções.

5.1. Caso em estudo

Na definição do caso de estudo, foi fundamental considerar uma situação em que se verificassem níveis de congestionamento numa via principal, na qual seja evidente a existência de condutores que usam uma via secundária como alternativa à primeira. Existem algumas zonas na cidade de Aveiro que são particularmente vulneráveis a tais fenómenos. Assim, o estudo foca-se num caso na cidade de Aveiro, que dado a sua proximidade à Universidade de Aveiro, facilita a fase de monitorização experimental.

Tendo em conta a realidade portuguesa, Aveiro é uma cidade de tamanho médio com uma área de 197.5 km² e, segundo dados de 2011, 78450 habitantes, com uma densidade populacional de 390 hab./km², um valor acima da média nacional que se situa nos 115 hab./km² (INE, 2012). É uma cidade com uma atividade industrial considerável, particularmente nas zonas periféricas, e com diversos estabelecimentos de ensino, de entre os quais se destaca a Universidade de Aveiro, que movimentam um grande volume de tráfego. Assim, não é de estranhar que haja alguns pontos de congestionamento, principalmente nos períodos horários que coincidem com as viagens casa-trabalho/escola e vice-versa.

A área a analisar está ilustrada na Figura 46, e situa-se entre o centro comercial Glicínias (a Norte) e a rotunda do Bota-Fogo, uma rotunda compacta e com duas vias de circulação (a Sul). Trata-se de

uma zona de acesso ao centro da cidade e a zonas industriais, pelo que há uma elevada afluência de tráfego. Em particular, a rotunda do Bota-Fogo (rodeada a azul na imagem que se segue) faz parte do caso em estudo e tem um diâmetro da ilha central de aproximadamente 38m, largura do anel de circulação de aproximadamente 19m, duas via de circulação, e cinco ramos de entrada e saída. Está localizada num ponto em que por vezes, em alguns períodos da hora de ponta da manhã e especialmente na hora de ponta da tarde, se observam períodos de congestionamento. Nestes casos, os veículos circulam com uma velocidade média que pode não ultrapassar os 20km/h.



Figura 46. Caso de estudo. Fonte: Google Maps.

Na figura acima estão representadas as vias que serão alvo de avaliação. A via principal, representada a verde, corresponde à estrada nacional (EN109) com uma via de circulação em cada sentido; a via secundária (composta pela Rua Eça de Queiróz e pela Rua Conselheiro Queiróz) está representada a vermelho e constitui a grande alternativa à primeira, quando esta se encontra em situações de (elevado) congestionamento. A zona onde confluem ambas as vias encontra-se representada a azul, que se trata da rotunda supracitada.

Foi observado que, nesta área são frequentes os fenómenos de “*rat-running*”, que envolvem o atravessamento de uma zona residencial (através da via alternativa, a vermelho); isto deve-se ao facto de a EN109 (via principal, a verde) ter associada a si volumes de tráfego por vezes elevados o que, em horas de ponta, faz com que a entrada na rotunda seja feita de uma forma mais lenta, podendo gerar longas filas de trânsito, com baixas velocidades de circulação na aproximação à mesma. Ora, apercebendo-se de (ou prevendo) situações de engarrafamento nesta aproximação à rotunda, alguns condutores optam por fazer um trajeto alternativo no qual a via se encontra geralmente desimpedida de trânsito e onde acabam por circular a velocidades mais elevadas; deste modo, poderão chegar à rotunda através de uma outra entrada por vezes mais cedo do que os restantes condutores na via principal.

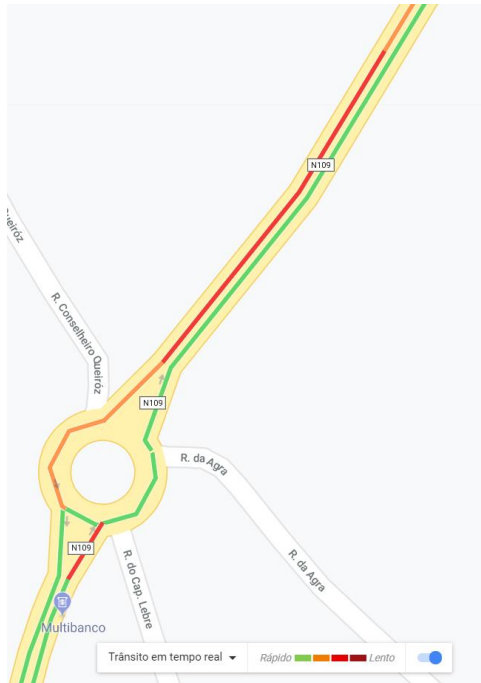


Figura 47. Situação de congestionamento na aproximação à rotunda. Fonte: Google Traffic; Data de acesso: 04/07/2019

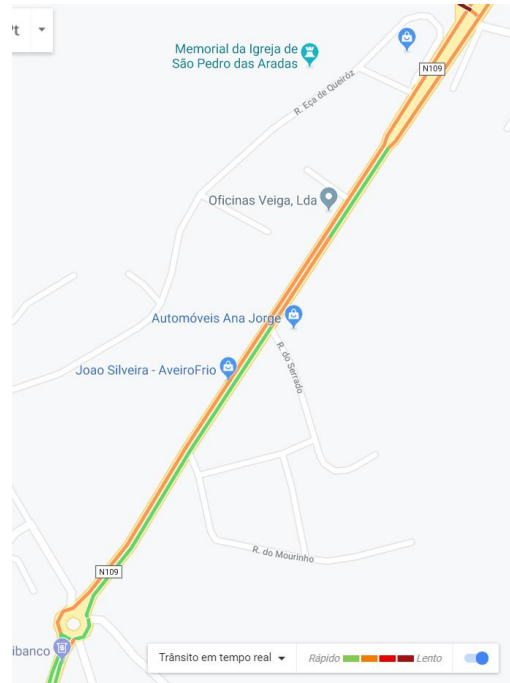


Figura 48. Situação de congestionamento na aproximação à rotunda. Fonte: Google Traffic; Data de acesso: 04/07/2019

As Figuras 47 e 48 demonstram a lentidão do trânsito na aproximação à rotunda, em hora de ponta da tarde (18h30). Este será, porventura, o principal fator que leva os condutores a optar pelo trajeto alternativo: o tempo de viagem. Na verdade, depende da percepção do condutor; muitos acabam por julgar que se optarem pela via secundária poderão ter benefício, minimizando o seu tempo da viagem, e adotam por vezes, uma condução inadequada para o local em questão, podendo mesmo pôr em perigo a segurança de outros utilizadores da via. No entanto, isso nem sempre acontece. Isto porque, na verdade, a rota alternativa tem uma extensão 200 metros mais elevada do que a principal, pela EN109 (Figuras 49 e 50); para além disso, outros fatores como ser uma estrada estreita, com o pavimento em pior estado e com desníveis de altitude (nomeadamente uma subida íngreme) não parecem ser razões suficientes para demover os *rat-runners de tal prática*.

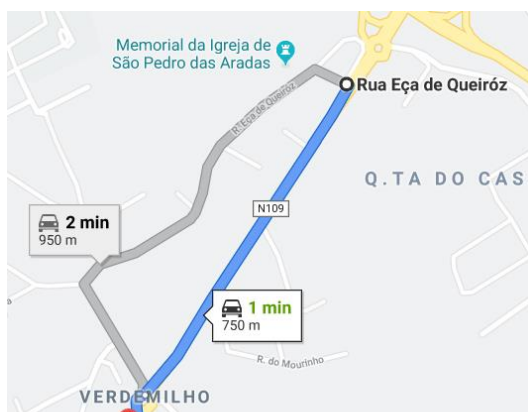


Figura 49. Percurso rota principal (Fonte: Google Maps).

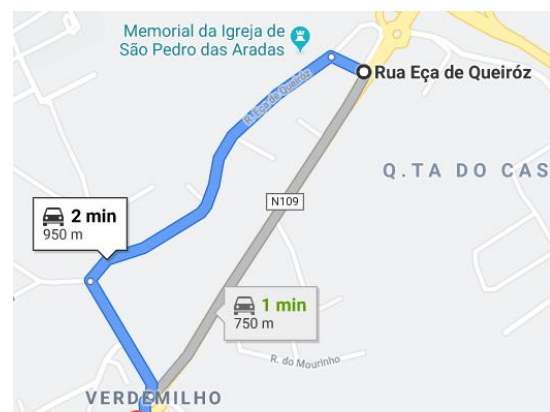


Figura 50. Percurso rota alternativa (Fonte: Google Maps).

Importa ainda referir que este fenómeno se dá apenas no sentido Norte-Sul, pelo que é aí que se irá centrar o estudo. Serão ainda negligenciados os veículos pesados, por estes não utilizarem a via alternativa, muito menos de uma forma relevante ao estudo, ou seja, como tentativa de *rat-running*.

5.2. Parâmetros em estudo e Equipamento necessários para monitorização experimental

Os principais parâmetros que se pretendem analisar neste estudo são então os volumes de tráfego associados a cada rota e a dinâmica dos veículos que as percorrem, em situações onde se verifiquem elevados níveis de congestionamento (previsivelmente horas de ponta da manhã ou da tarde).

Inicialmente foi feita uma análise preliminar ao caso de estudo escolhido, em termos de volumes de tráfego observados, de forma a aferir o nível de saturação das vias em questão e a perceber se a situação é representativa dos fenómenos que se pretendem estudar.

Numa fase posterior, levou-se a cabo uma análise pormenorizada dos volumes associados a cada rota (através de filmagens), dos parâmetros de desempenho dos veículos e de avaliação das externalidades associadas à rede (através de dados dos veículos de teste).

De seguida, apresentam-se os dispositivos utilizados no decorrer da monitorização experimental e referem-se alguns aspetos importantes para a sua correta utilização.

- Câmaras de filmar para aferição dos volumes de tráfego através de uma posterior contagem manual; devem ser colocadas em pontos estratégicos por forma a caracterizar de um modo correto todos os pontos de interesse; deve-se ainda garantir que a sua bateria esteja totalmente carregada e que a memória disponível seja suficiente para armazenar o ficheiro de vídeo gerado.
- Veículos de teste que sejam representativos da frota local (maioritariamente ligeiros de passageiros a gasolina ou diesel); foram utilizadas duas viaturas, ambas a gasolina, cujas especificações se encontram na Tabela 3; a utilização de dois veículos distintos é importante para se ter em consideração algumas diferenças que possam vir a existir resultantes das próprias especificações da viatura e dos dois padrões e estilos de condução diferentes; deve-se garantir o abastecimento do veículo para que se possam fazer os testes ininterruptamente e no período de interesse (hora de ponta).
- Equipamentos GPS e OBD-II instalados a bordo, para permitir um diagnóstico completo do posicionamento e desempenho dos veículos.

Tabela 3. Especificações dos veículos de teste utilizados. (AutoData.Net)

Veículo	Cilindrada (cc)	Consumo (l/100km)	Emissões CO ₂ (g/km)	Potência máxima (Nm/rpm)	Binário máximo (hp/rpm)	Tipo de transmissão
1	998	3.7-4.0	86-93	93/4400	72/6000	5 velocidades, manual
2	1497	4.8-5.0	109-112	136/4400	106/6000	5 velocidades, manual

5.3. Modelação da rede no software VISSIM

Posteriormente à recolha e análise dos dados, foi utilizado o software de microsimulação VISSIM que, como já descrito acima, atribui características comportamentais a cada veículo tendo por base a matriz O-D correspondente (Origem-Destino, que pode ser preenchida através das contagens de tráfego efetuadas) e simula as suas interações; através deste software foi possível modelar a rede e simular não só a situação verificada no terreno, mas também (e principalmente) os cenários alternativos com possíveis medidas mitigadoras, e fazer a respetiva comparação.

Os dados recolhidos na monitorização experimental, foram usados para calibrar e validar a modelação da rede no VISSIM, mais concretamente, proceder com a caracterização da situação de tráfego observada, através da definição de matrizes O-D (Origem-Destino) com os volumes de tráfego obtidos através de contagens obtidas pelas filmagens para cada uma das rotas, como também de contagens manuais.

O primeiro passo para a modelação da rede consistiu na criação da rede de estradas (*Links*), pelas quais os veículos irão circular (Figura 52); para que isso fosse feito com precisão, foi inserida no VISSIM uma imagem da rede em questão e definida como imagem de fundo para que os *Links* fossem modelados de acordo com a geometria da rede (Figura 51).



Figura 51. Rede modelada no VISSIM.



Figura 52. Rede modelada no VISSIM.

Os vários Links foram interligados através de conectores, como ilustrado na Figura 55, e as suas características foram definidas como se mostra nas figuras 56 e 57.

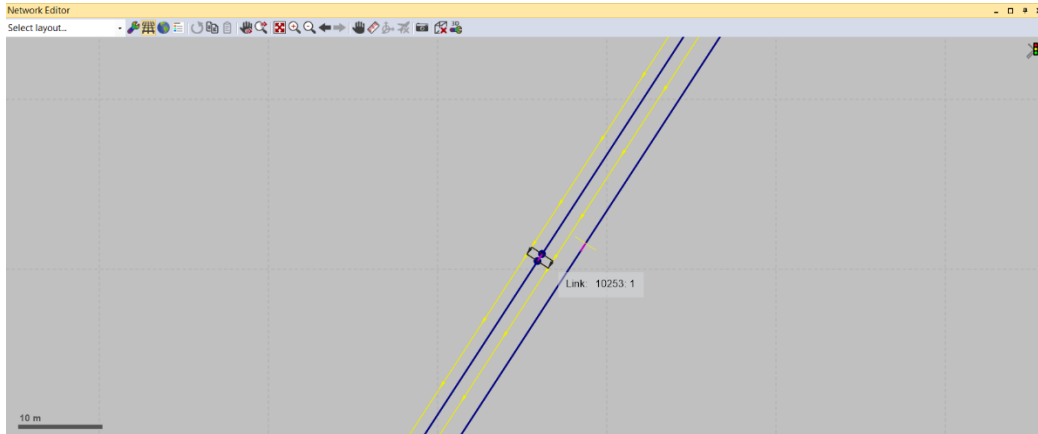


Figura 55. Exemplo da ligação entre links, através de conectores.

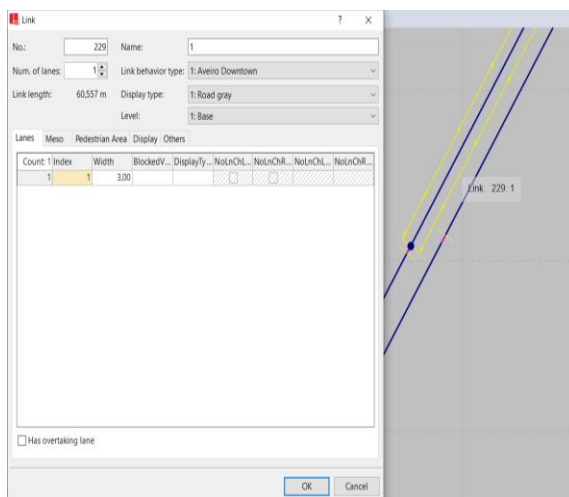


Figura 56. Exemplo definição das características de um link.

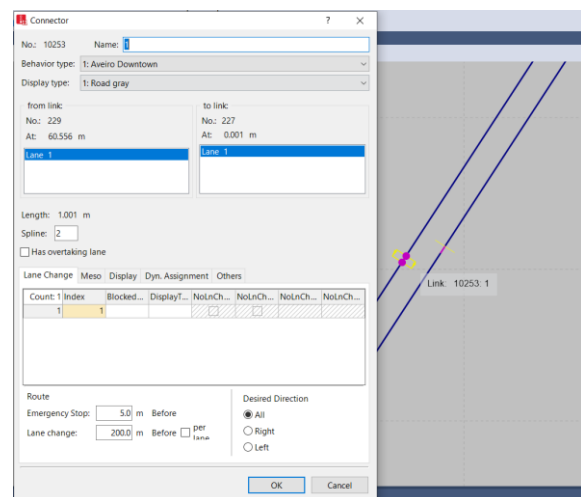


Figura 57. Exemplo da definição das características de um conector.

Foram introduzidas algumas restrições a nível de velocidade (*Desired Speed Decision*), de acordo com os limites de velocidade em vigor nas zonas em foco para permitir controlar as velocidades de circulação dos veículos simulados (Figura 58). Foram ainda definidas zonas de redução de velocidade (através da ferramenta *Reduced Speed Areas*) para melhor caracterizar o comportamento dos veículos em determinadas zonas da via, nomeadamente em curvas ou na entrada na rotunda (Figura 59).

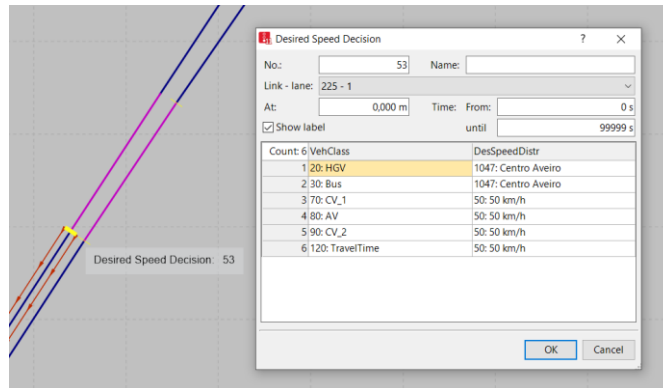


Figura 58. Exemplo da aplicação da ferramenta Desired Speed Decision.

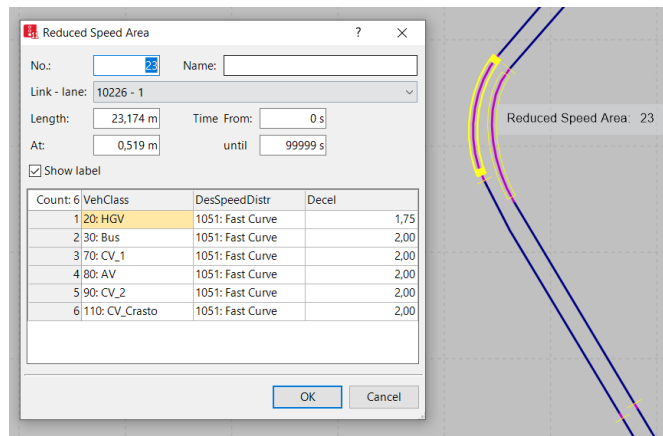


Figura 59. Exemplo da aplicação da ferramenta Reduced Speed Area.

Depois, procedeu-se à caracterização do comportamento dos veículos em zonas de conflito, como cruzamentos ou rotunda, para melhor representar as regras de prioridade entre eles, através da ferramenta *Conflict Areas* (Figuras 60 e 61).

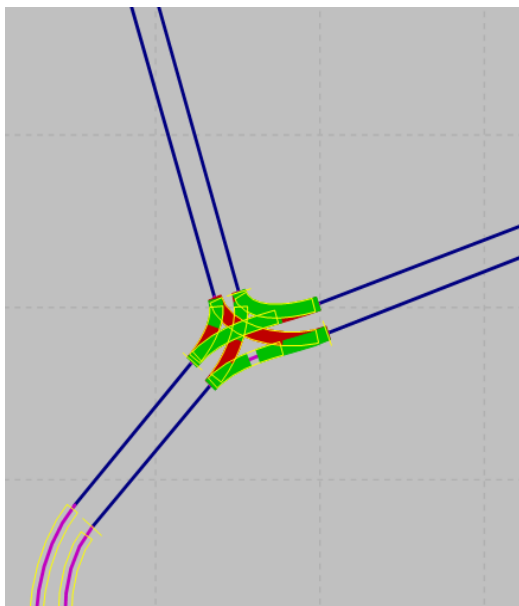


Figura 61. Exemplo da aplicação de Conflict Areas num cruzamento.

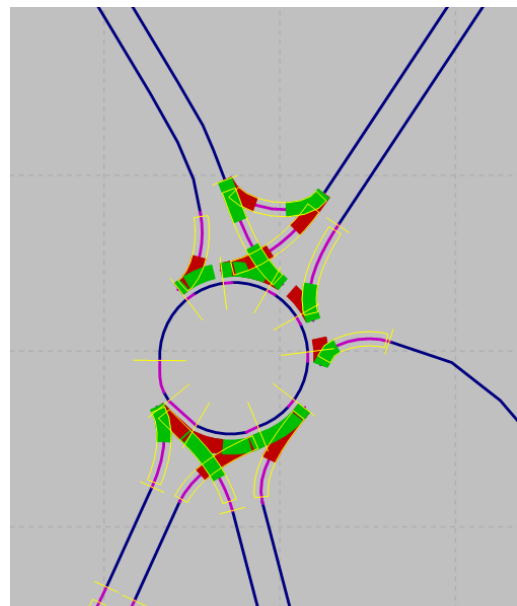


Figura 60. Exemplo da aplicação de Conflict Areas na rotunda.

Uma vez que a capacidade da rotunda pode ser afetada pelo comportamento de aceitação de intervalos entre veículos (*gap acceptance*) dos condutores, foram estudados, com base nos dados observados, os tempos médios de aceitação de intervalo entre veículos, nomeadamente junto à linha de cedência de prioridade. Em particular, os resultados obtidos evidenciaram que o tempo médio que um veículo leva desde a chegada à linha de cedência de prioridade e considerar um intervalo aceitável para entrar no anel de circulação tendo em conta os restantes veículos com prioridade é de aproximadamente 2.9s, estando de acordo com outros estudos de caso realizados em Portugal em que se procurou definir o intervalo médio de tempo de aceitação para entrada no anel (Vasconcelos, Seco, & Silva, 2013).

A distribuição de tráfego através da ferramenta *Dynamic Assignment* é especificada por meio de matrizes OD. Para isso, a área a ser simulada será dividida em várias subáreas (zonas), de forma a que as matrizes contenham o número de viagens que são feitas de todas as zonas para todas as zonas, num dado intervalo de tempo (Fellendorf & Vortisch, 2010). Assim, para modelar os pontos onde os veículos efetivamente surgem e saem da rede (pontos de partida e de chegada dos veículos), foi utilizada a ferramenta *Parking Lots* (Figuras 62 e 63), onde é importante definir estes pontos com um “*Rel. Flow*” de acordo com a sua função (0 para chegadas e 1 para partidas).

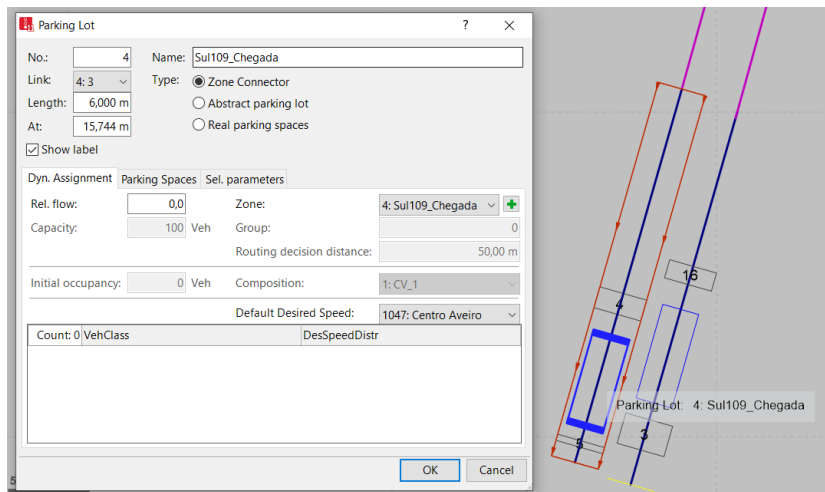


Figura 62. Exemplo da aplicação da ferramenta *Parking Lot* a uma zona de chegada de veículos.

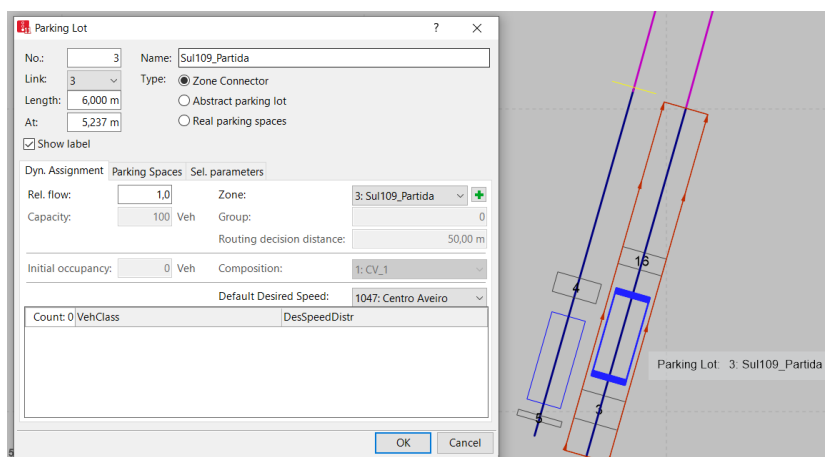


Figura 63. Exemplo da aplicação da ferramenta *Parking Lots* a uma zona de partida de veículos.

As matrizes O-D foram definidas por forma a serem consistentes com os dados recolhidos das contagens de volumes de tráfego. Uma vez que o caso em estudo pressupõe duas rotas distintas para o mesmo par OD, para melhor controlar os volumes de tráfego que circulam por cada uma das rotas, foram definidas duas matrizes distintas: uma para os veículos que circulam pela via principal (matriz “Aveiro_SituaçãoAtual_1”, na Figura 64) e outra para os que circulam pela via secundária como alternativa à principal (matriz “Aveiro_SituaçãoAtual_2”, na Figura 65). Procurou-se ainda definir uma outra matriz para os veículos que partem da Rua do Crasto (matriz “Aveiro_SituaçãoAtual_Crasto”, na Figura 66), para facilitar a sua distinção relativamente aos outros veículos, uma vez que em alguns períodos do dia o volume de tráfego poderá influenciar o ramo de entrada na rotunda.

Name	Sum	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1 N235_Partida	317,00	0,00	0,00	0,00	0,00	648,00	0,00	620,00	187,00	0,00	55,00
2 N235_Chegada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3 Sul109_Partida	579,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	553,00	0,00	0,00	26,00
4 Sul109_Chegada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5 N109_Partida	496,00	0,00	0,00	0,00	396,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00
6 N109_Chegada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7 RuaCapLebre_Chegada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8 RuaCrasto_Partida	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9 RuaCrasto_Chegada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10 Extra_Chegada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11 TravelTime_Rota1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12 RuaCapLebre	118,00	0,00	0,00	0,00	22,00	0,00	67,00	0,00	0,00	0,00	29,00

Figura 64. Matriz OD para veículos que circulam pela via principal.

Name	Sum	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 N235_Partida	34,00	0,00	0,00	0,00	45,00	0,00	0,00	10,00	0,00	19,00
2 N235_Chegada	0,00	0,00	0,00	0,00	20,00	0,00	0,00	5,00	0,00	9,00
3 Sul109_Partida	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 Sul109_Chegada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5 N109_Partida	40,00	0,00	0,00	0,00	25,00	0,00	0,00	5,00	0,00	10,00
6 N109_Chegada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7 RuaCapLebre_Chegada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8 RuaCrasto_Partida	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9 RuaCrasto_Chegada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Figura 65. Matriz OD para veículos que circulam pela via secundária.

Name	Sum	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 N235_Partida	0,00	0,00	0,00	67,00	0,00	133,00	78,00	0,00	0,00	9,00
2 N235_Chegada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3 Sul109_Partida	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 Sul109_Chegada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5 N109_Partida	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6 N109_Chegada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7 RuaCapLebre_Chegada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8 RuaCrasto_Partida	287,00	0,00	0,00	67,00	0,00	133,00	78,00	0,00	0,00	9,00
9 RuaCrasto_Chegada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10 Extra_Chegada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11 TravelTime_Rota1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12 RuaCapLebre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Figura 66. Matriz OD para veículos que partem da Rua do Crasto.

Por fim, foram definidos os tipos de veículos em circulação, onde se optou por considerar apenas veículos ligeiros e pela criação de um tipo de veículo distinto para cada matriz e com cores diferentes (Figura 67), para ser mais fácil a sua distinção visual ao longo das simulações.

Count	No	Name	VehTypes	UseVehType	Color
1	10	Car	100	<input checked="" type="checkbox"/>	(255, 0, 0, 0)
2	20	HGV	200	<input checked="" type="checkbox"/>	(255, 0, 0, 0)
3	30	Bus	300	<input checked="" type="checkbox"/>	(255, 94, 97, 161)
4	40	Tram	400	<input checked="" type="checkbox"/>	(255, 0, 0, 0)
5	50	Pedestrian	510,520	<input checked="" type="checkbox"/>	(255, 0, 0, 0)
6	60	Bike	610,620	<input checked="" type="checkbox"/>	(255, 0, 0, 0)
7	70	CV_1	630	<input type="checkbox"/>	(255, 237, 26, 18)
8	80	AV	640	<input type="checkbox"/>	(255, 38, 231, 24)
9	90	CV_2	650	<input type="checkbox"/>	(255, 255, 216, 0)
10	100	CV_Aquecimento	660	<input type="checkbox"/>	(255, 0, 255, 255)
11	110	CV_Crasto	670	<input type="checkbox"/>	(255, 255, 0, 220)

Count	No	Name	Category	Model2D3D	Distr	ColorDistr1	OccupDistr	Capacity
1	630	CV_1	Car	10: Car	1: Default	1: Single Occupancy	5	5
2	650	CV_2	Car	10: Car	1: Default	1: Single Occupancy	5	5
3	660	CV_Aquecimento	Car	10: Car	1: Default	1: Single Occupancy	5	5
4	670	CV_Crasto	Car	10: Car	1: Default	1: Single Occupancy	5	5

Figura 67. Tipos de veículos criados.

No módulo Dynamic Assignment, um dos importantes parâmetros a definir é a relação entre as matrizes OD e o tipo de veículos correspondente, o que foi feito como se mostra na Figura 68.

Matrizes

Count	Matrix	VehComp
1	1: Aveiro_Aquecimento	5: CV_Aquecimento
2	2: Aveiro_SituacaoAtual_1	1: CV_1
3	4: Aveiro_SituacaoAtual_Crasto	6: CV_Crasto
4	3: Aveiro_SituacaoAtual_2	4: CV_2

Figura 68. Atribuição dos diferentes tipos de veículos às matrizes OD correspondentes.

No VISSIM, foi considerado um período de aquecimento de 5 min (Figura 69) que corresponde a um período em que os veículos são inseridos na rede, mas os seus dados não são considerados para o resultado final da simulação (apenas os dos 60 minutos seguintes), uma vez que o comportamento desses veículos não representa de uma forma fiel a realidade, já que na fase inicial da simulação nenhum veículo se encontra na rede, logo a sua interferência nos restantes não é considerada. O período de aquecimento considerado foi de 5 minutos (300 segundos) pois é um tempo superior ao que foi observado ser necessário para efetuar cada rota.

Count	No	Name	FromTime	ToTime
1	1	Aveiro_Aquecimento	00:00:00	00:05:00
2	2	Aveiro_SituacaoAtual_1	00:05:00	01:05:00
3	3	Aveiro_SituacaoAtual_2	00:05:00	01:05:00
4	4	Aveiro_SituacaoAtual_Crasto	00:05:00	01:05:00

Figura 69. Período de aquecimento definido.

5.4. Análise de impactos do tráfego atual e custos associados

Tendo sido feita a análise preliminar ao caso de estudo escolhido, e tendo-se concluído que o mesmo é representativo dos fenómenos que se pretende estudar, avançou-se para a monitorização experimental. As recolhas de dados foram efetuadas durante as horas de ponta da tarde (entre as 17h e as 19h) dos dias 13,14 e 15 de maio de 2019, com boas condições climáticas.

Os volumes de tráfego foram obtidos por contagem manual, através das filmagens de pontos estratégicos selecionados. Na Figura 70 estão ilustrados esses pontos sendo que: no local 1 foi possível analisar todas as movimentações (entradas e saídas) da rotunda, com especial atenção a ser dada aos casos em que a entrada é feita pela via principal (EN109-Norte) e a saída pela EN109-Sul ou em que a entrada é feita pela via alternativa (Rua Conselheiro Queiróz) e a saída pela EN109-Sul; no local 2, foi feita a identificação dos veículos no cruzamento entre a Rua Eça de Queiróz (via alternativa) e a Rua do Crasto (rua com ligação à Escola Superior de Saúde da Universidade de Aveiro, que tem também um volume de tráfego considerável); no local 3, é possível a identificação dos veículos que seguem na EN109 e dos que entram na Rua Eça de Queiróz. Neste último ponto foi apenas feita uma contagem preliminar (para avaliar se os volumes de tráfego associados a estes trajetos são representativos) e optou-se pela não colocação de câmara de filmar pois seriam dados redundantes com os já obtidos nos pontos 1 e 2.

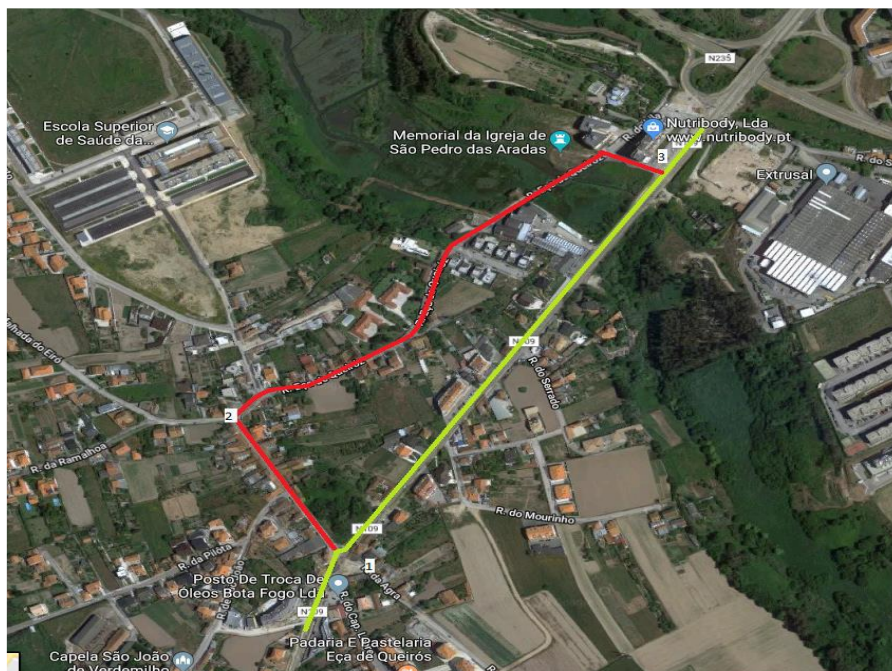


Figura 70. Ilustração dos locais de interesse ao estudo. Fonte: Google Maps

Os resultados detalhados destas contagens encontram-se no Anexo I.

Quanto à comparação entre as duas rotas no que à dinâmica do veículo diz respeito, foi necessário fazer um tratamento dos dados fornecidos pelos dispositivos GPS e OBD-II. Importa referir que durante os testes com os veículos foram realizadas várias passagens (*runs*) pelos percursos descritos, sendo que apenas se recolheram dados no sentido Norte-Sul, pois é o de maior interesse para o fenómeno em análise. Foi tido o cuidado de, no início de cada percurso, os dois carros de

teste irem consecutivos e seguirem por caminhos distintos. Assim, no conjunto dos dias de monitorização, a recolha de dados foi feita para as seguintes viagens.

Tabela 4. Caracterização das viagens efetuadas, na monitorização experimental.

Percurso	Nº de viagens	
	Principal	Alternativo
Veículo 1	10	13
Veículo 2	13	10

A primeira base de comparação entre as duas rotas foram os tempos de viagem e as variações de velocidade e de aceleração verificadas.

Para facilitar a comparação, os dados foram divididos segundo 23 pares de viagens distintos, em que 13 deles correspondem ao Veículo 1 a seguir pela via alternativa e o 2 pela principal, e os restantes 10 representam os casos em que foi o Veículo 2 a seguir pela via alternativa e o 1 pela principal. A Tabela 5 mostra que em 16 das 23 *runs* o tempo de viagem é mais vantajoso (leia-se, mais reduzido) para o carro que seguiu pela via principal; quanto à velocidade média de circulação, os resultados são mais equilibrados, sendo que em 12 ocasiões se constataram velocidades mais elevadas nos que seguiam pela via alternativa. Convém referir que durante a monitorização experimental houve situações em que o veículo teste que seguiu a via secundária tentou reproduzir o comportamento de um veículo líder nessa via. Nestes casos, foram observadas por vezes velocidades excessivas e acelerações e travagens mais repentinas, o que sugere um alinhamento com o comportamento volátil que estes fenómenos de *rat-running* podem inferir num condutor.

Tabela 5. Resultados obtidos para cada par de viagens.

	Principal	Alternativo
Tempo de viagem	16	7
Velocidade média	11	12

De forma a quantificar estas diferenças, apresentam-se os gráficos das Figuras 71 e 72. No primeiro indicam-se os tempos médios de cada percurso tendo em conta todas as 23 viagens efetuadas, e constata-se que o percurso pela via principal é (em média) 16 segundos mais rápido do que o alternativo (110s vs 126s). Do segundo gráfico pode-se constatar que as velocidades médias registadas em cada percurso, tendo também em conta todas as viagens efetuadas, são muito semelhantes, tal como os resultados da Tabela 5 faziam prever; ainda assim, pela via alternativa verificaram-se velocidades médias ligeiramente superiores (34,5 km/h vs 33,7 km/h).

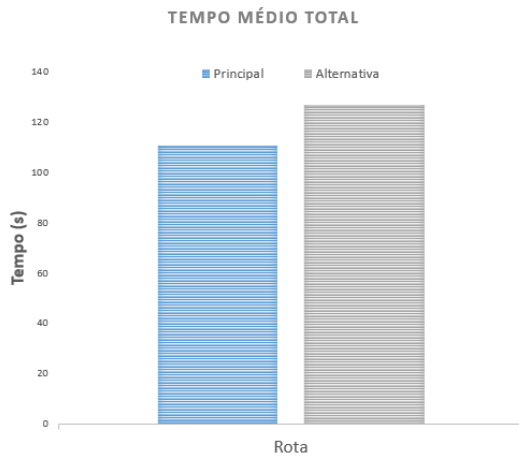


Figura 71. Tempo médio total para cada rota.

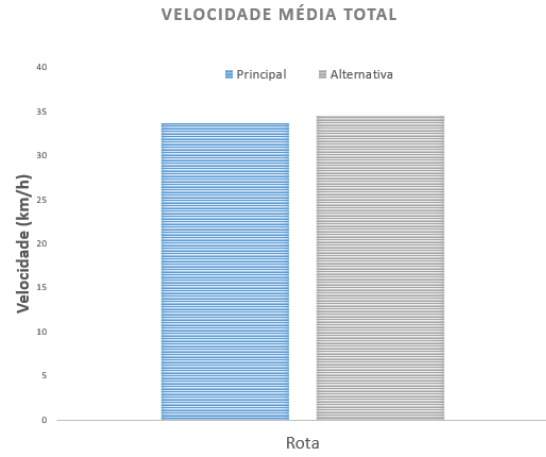


Figura 72. Velocidade média para cada rota.

Em termos de velocidades médias os resultados são, como foi visto, semelhantes para ambas as rotas, importando agora perceber de que forma se distribuem as velocidades instantâneas registadas. Pelos gráficos seguintes (Figuras 73 e 74) é possível notar uma distribuição de velocidades mais uniforme no percurso principal, quando comparado com o sucedido no percurso alternativo, cujas velocidades adotam um perfil mais disperso.

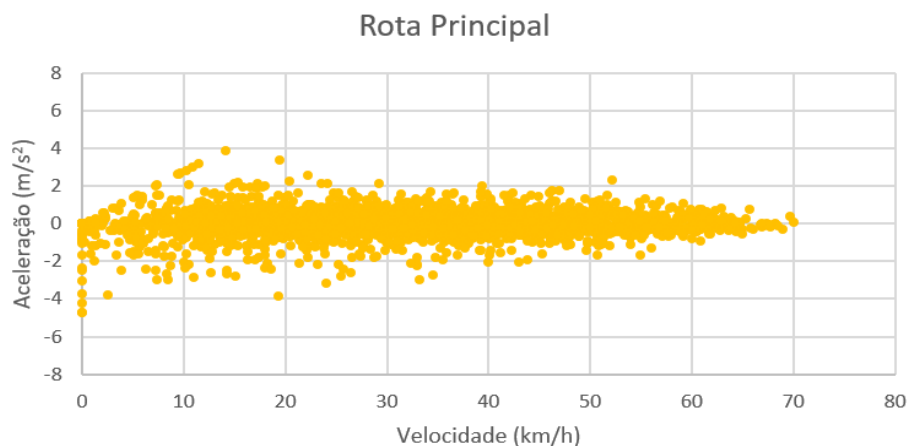


Figura 73. Gráfico velocidade-aceleração, para o percurso principal.

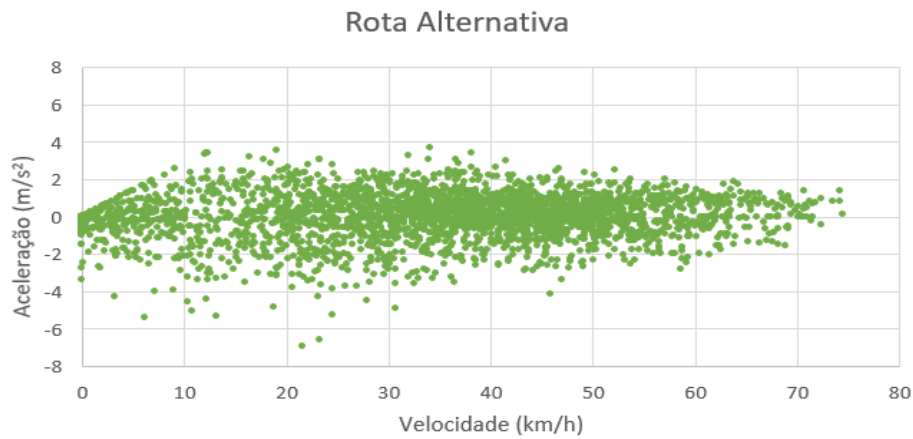


Figura 74. Gráfico velocidade-aceleração, para o percurso alternativo.

Daqui é possível perceber que o percurso alternativo tem associado a si uma condução mais irregular e que implica maiores variações de velocidade (registadas velocidades máximas acima dos 70 km/h) e travagens mais bruscas (representadas pelos valores em que a aceleração é negativa, e inferior a -4 m/s^2), algo que não se verificou no percurso principal que se nota ter um perfil de condução mais uniforme (maior densidade de pontos junto ao eixo da aceleração 0 m/s^2).

Uma outra avaliação pertinente prende-se com a variação da sensação de movimento (em inglês, “jerk”) em relação à distância percorrida e à altitude. Nos seguintes gráficos é possível verificar essa relação para ambas as rotas.

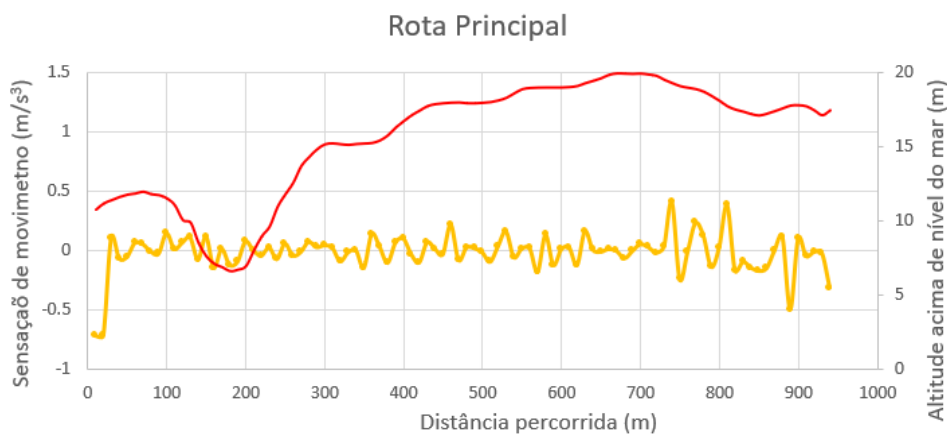


Figura 75. Gráfico sensação de movimento por altitude.



Figura 76. Gráfico sensação de movimento por altitude.

Estes resultados reforçam o caráter mais irregular e volátil associado à condução pela via alternativa. A sensação de movimento (ilustrada pelas linhas verde e amarela) corresponde aos arranques proporcionados por acelerações bruscas (picos positivos) ou travagens rápidas (picos negativos). Como se pode constatar, na via alternativa essa sensação de movimento tem mais oscilações e as variações mais evidentes, o que indica haver diversas variações bruscas na aceleração/velocidade, enquanto que na via principal esse perfil é mais uniforme, sugerindo uma velocidade mais constante ao longo do percurso. É possível ainda verificar que entre os 200 e os 400m existe um aumento considerável da altitude acima do nível do mar (linha a vermelho), o que indica tratar-se de uma subida, subida essa que se nota ser mais acentuada na via alternativa, o que é um pormenor importante e a ter em atenção na análise do desempenho do veículo, já que previsivelmente irá coincidir com uma zona do percurso onde o nível de emissões aumenta.

Depois, recorrendo a estes dados instantâneos apresentados, fez-se uma análise relativamente aos níveis de emissões de CO₂, CO, NO_x e HC associados a cada rota e estimados através da metodologia VSP, já caracterizada no capítulo 4.2.

Para averiguar se os valores dos diferentes modos VSP têm a mesma distribuição para ambas as rotas, foi feito um teste estatístico, nomeadamente o teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) para duas amostras independentes, através das médias dos valores de cada modo VSP, de onde se confirmou que a distribuição é bastante aproximada (Figura 77).

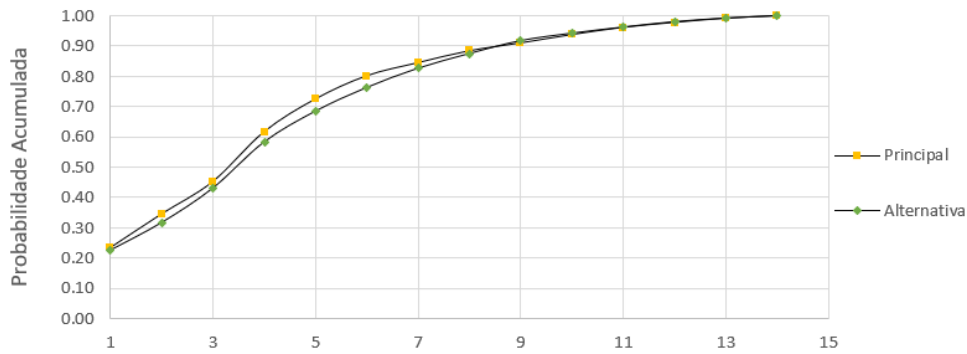


Figura 77. Distribuição acumulada para os Modos VSP para as duas rotas.

Tabela 6. Desvio máximo entre Modos VSP das duas rotas.

Desvio				
Máximo	Crítico 90%	Crítico 95%	Crítico 97,5%	Crítico 99%
0,04	0,15	0,17	0,19	0,21

A Tabela 6 mostra que o valor do desvio máximo entre modos VSP das duas rotas distintas é inferior aos desvios críticos, pelo que se pode assumir que a distribuição que seguem é a mesma para qualquer um dos níveis apresentados. Desta forma, é possível ter informações detalhadas acerca das emissões de poluentes de ambos os carros, e partir para uma análise pormenorizada das mesmas

Os gráficos que se seguem permitem uma análise detalhada das emissões dos poluentes em análise, para os vários casos. Começando pelo dióxido de carbono, escolheram-se três viagens e representou-se as suas emissões instantâneas de CO₂, ao longo da distância percorrida, de forma a reconhecer possíveis padrões entre elas. Optou-se por representar apenas três viagens (das treze que o Veículo 1 fez pela via alternativa) para que o gráfico ficasse legível. Desta feita, observando a Figura 78, é possível distinguir os picos de emissões e as zonas onde ocorrem: 200-300m, que se trata de uma zona de subida íngreme; e no final da viagem, que coincide com a entrada na rotunda.

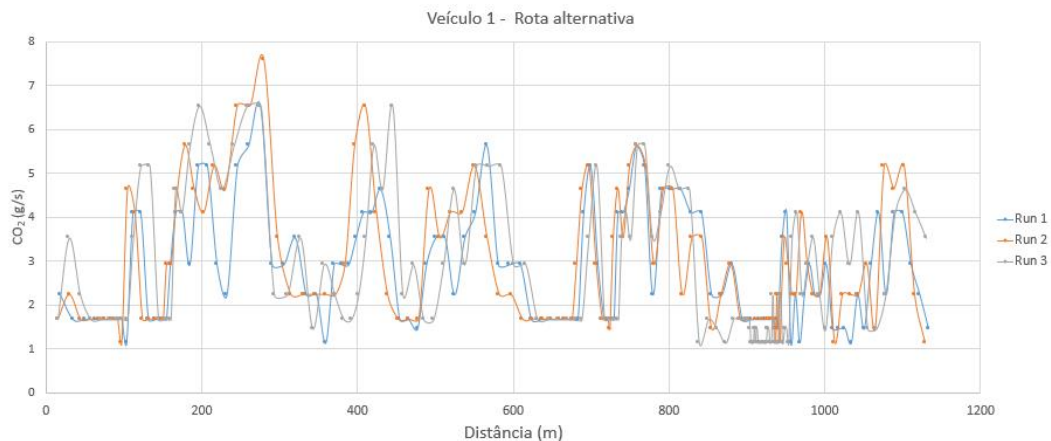


Figura 78. Gráfico de emissões instantâneas de CO₂ em função da distância percorrida, para 3 das viagens.

Para a via principal, os níveis de emissões são de um modo geral mais baixos, mas não se encontram diferenças evidentes, havendo igualmente um pico entre os 200 e os 300 m e outro no fim, previsivelmente na entrada da rotunda.

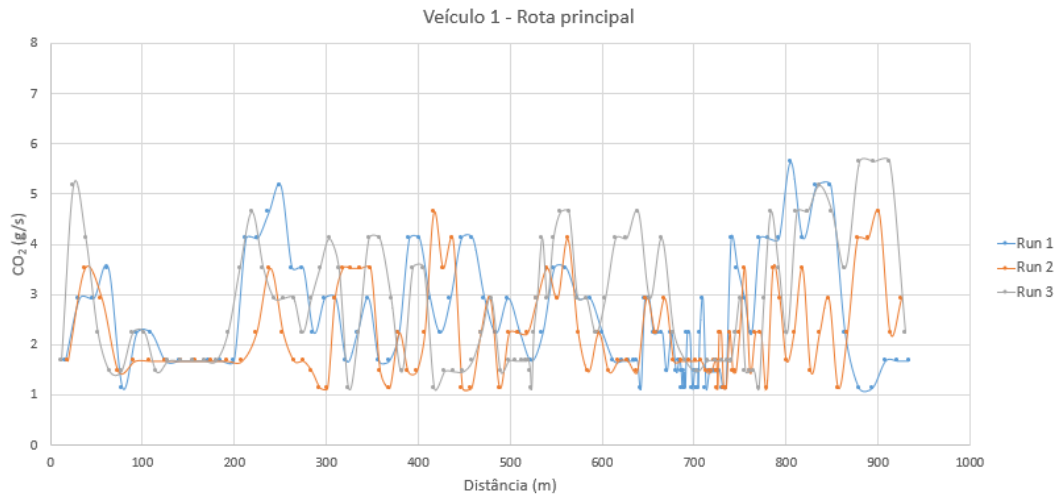


Figura 79. Gráfico de emissões instantâneas de CO₂ em função da distância percorrida, para 3 das viagens.

Quanto ao Veículo 2, o nível de emissões aparenta ser ligeiramente superior, mas as diferenças não são significativas; notam-se, no entanto, diferenças entre a via alternativa e a principal, sendo que esta última apresenta valores mais baixos de emissões.

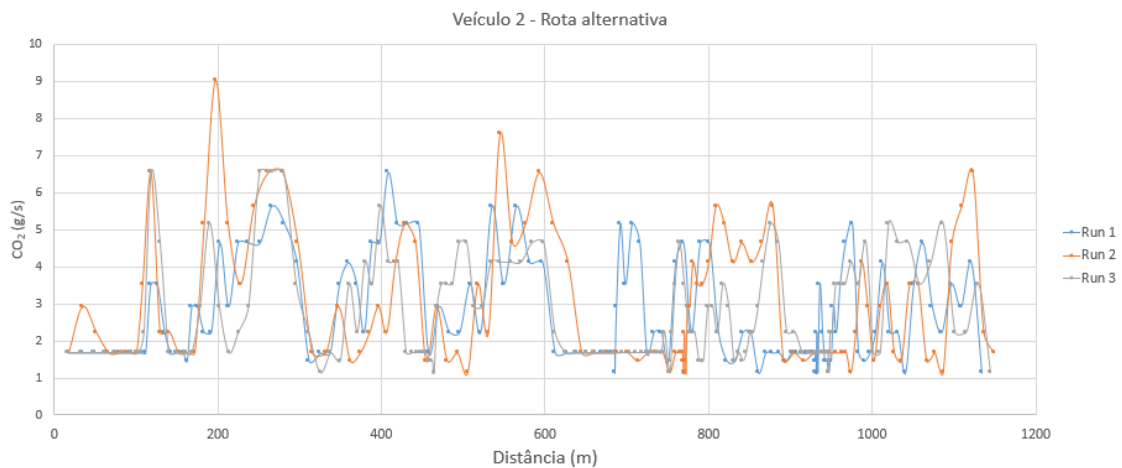


Figura 80. Gráfico de emissões instantâneas de CO₂ em função da distância percorrida, para 3 das viagens.

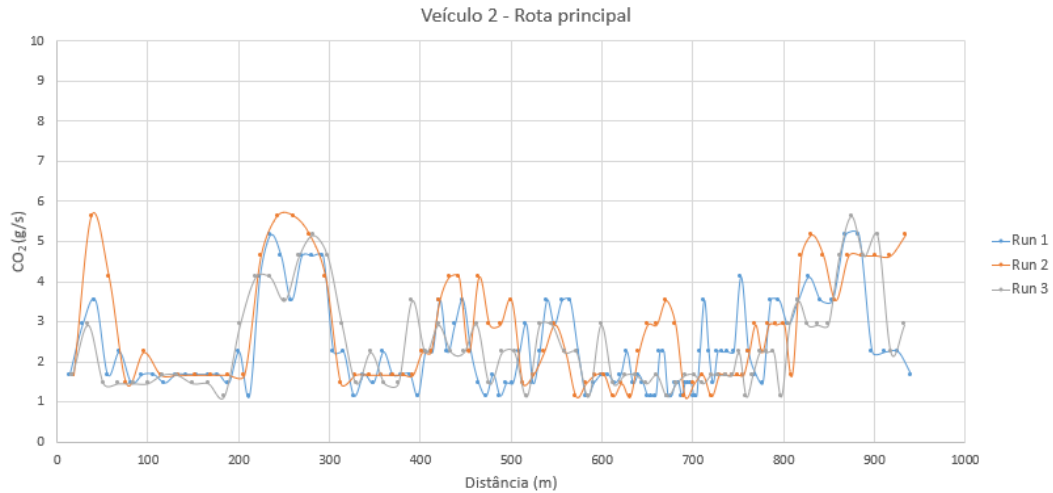


Figura 81. Gráfico de emissões instantâneas de CO₂ em função da distância percorrida, para 3 das viagens.

Para ser mais perceptível a diferença entre ambas as rotas, optou-se por representar as mesmas viagens, mas com as emissões acumuladas ao longo da distância (e não as instantâneas). Assim, as Figuras 82 e 83 evidenciam as claras diferenças entre as emissões acumuladas de CO₂ ao longo das rotas principal e alternativa, em favor da primeira.

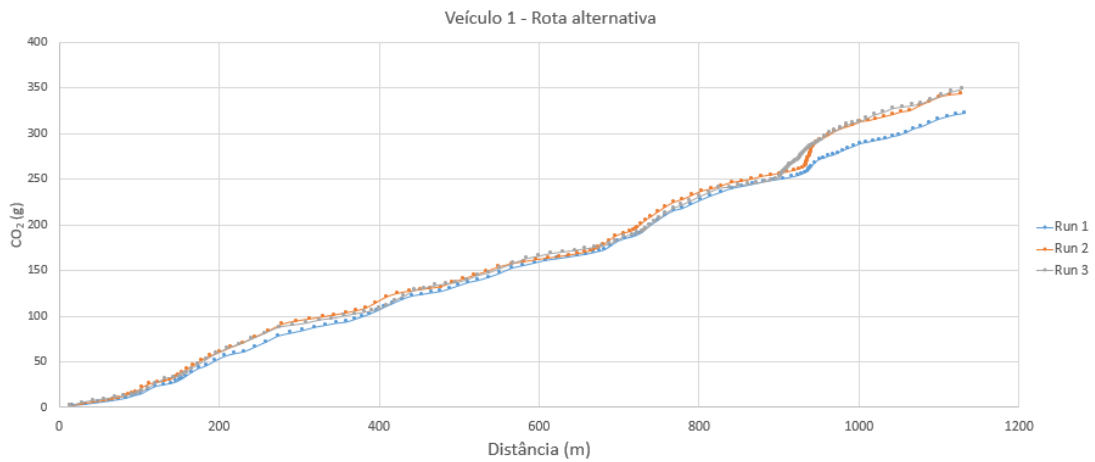


Figura 82. Gráfico das emissões acumuladas de CO₂ em função da distância percorrida, para 3 das viagens.

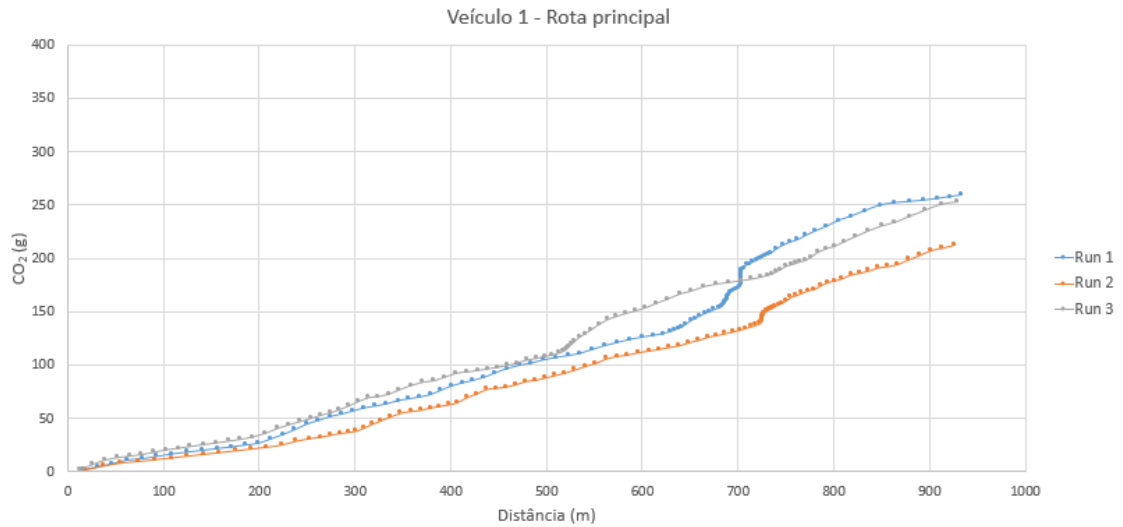


Figura 83. Gráfico das emissões acumuladas de CO₂ em função da distância percorrida, para 3 das viagens.

Para o Veículo 2 é também evidente a diferença entre as emissões acumuladas ao longo da via alternativa (Figura 84) e da via principal (Figura 85); não há uma distinção clara entre os dois carros nesta matéria.

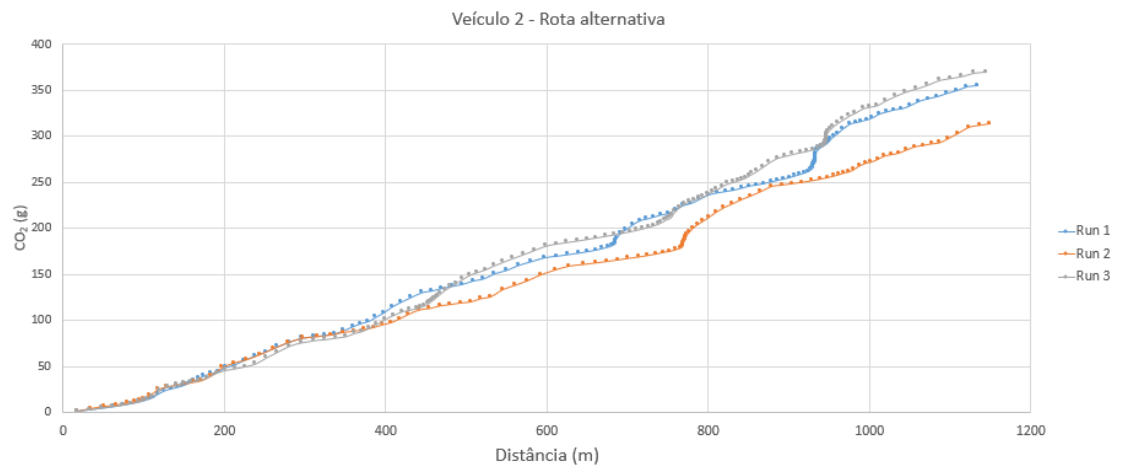


Figura 84. Gráfico das emissões acumuladas de CO₂ em função da distância percorrida, para 3 das viagens.

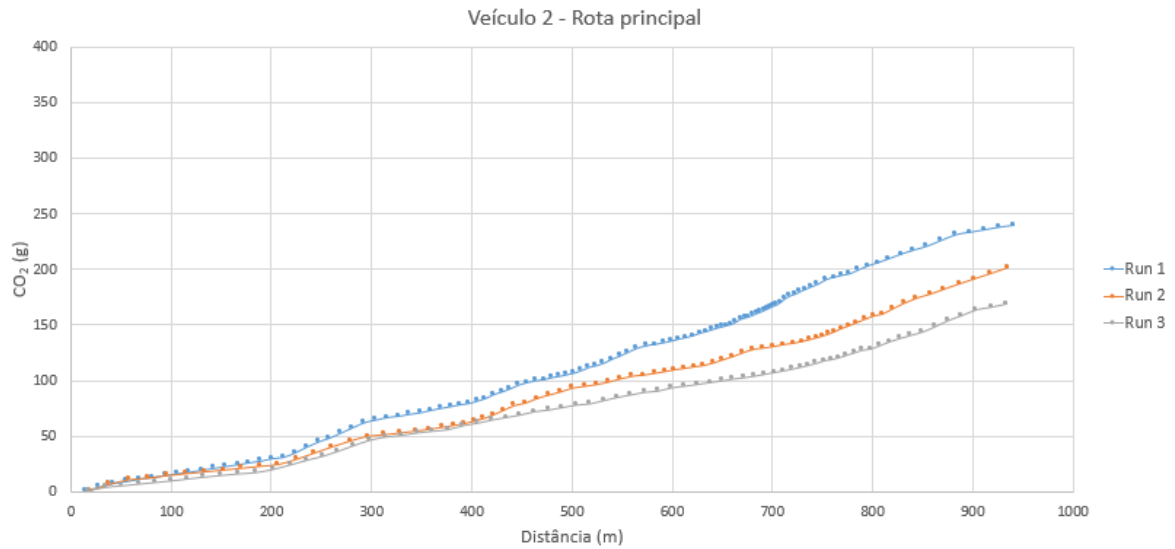


Figura 85. Gráfico das emissões acumuladas de CO₂ em função da distância percorrida, para 3 das viagens.

Considerando agora todas as viagens realizadas por ambos os veículos, tem-se que a média das taxas de emissão de CO₂, tem a seguinte distribuição para as duas rotas (Figura 86).

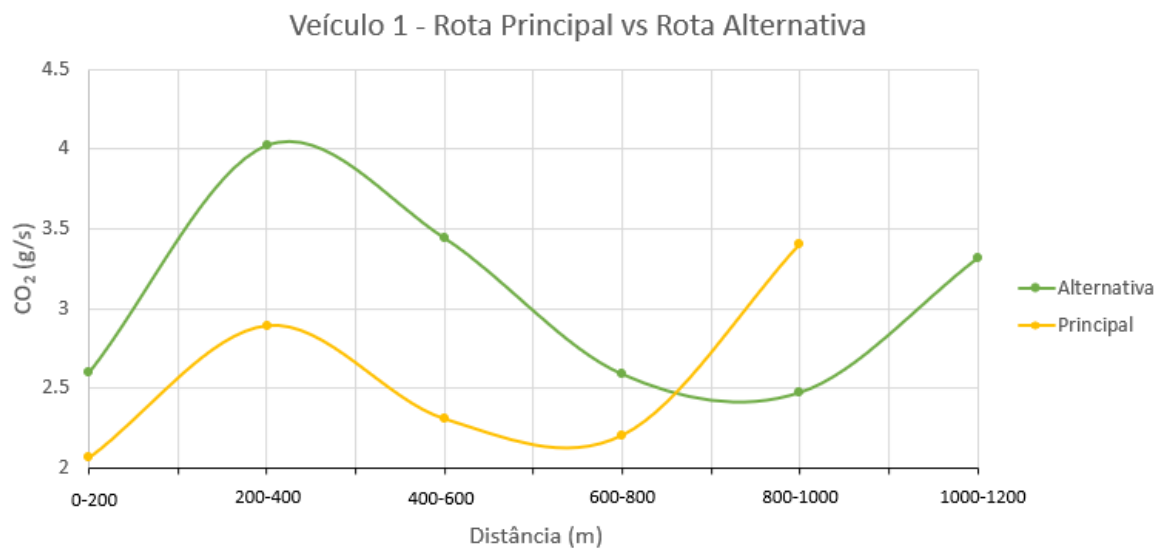


Figura 86. Média das taxas de emissão instantânea de CO₂ de todas as viagens.

Daqui, nota-se claramente que as emissões de dióxido de carbono são mais reduzidas no percurso principal, sendo que no final de cada rota há um aumento substancial destas emissões, e que coincide com a aproximação e entrada na rotunda. Para o veículo 2, a situação é em tudo semelhante (Figura 87).

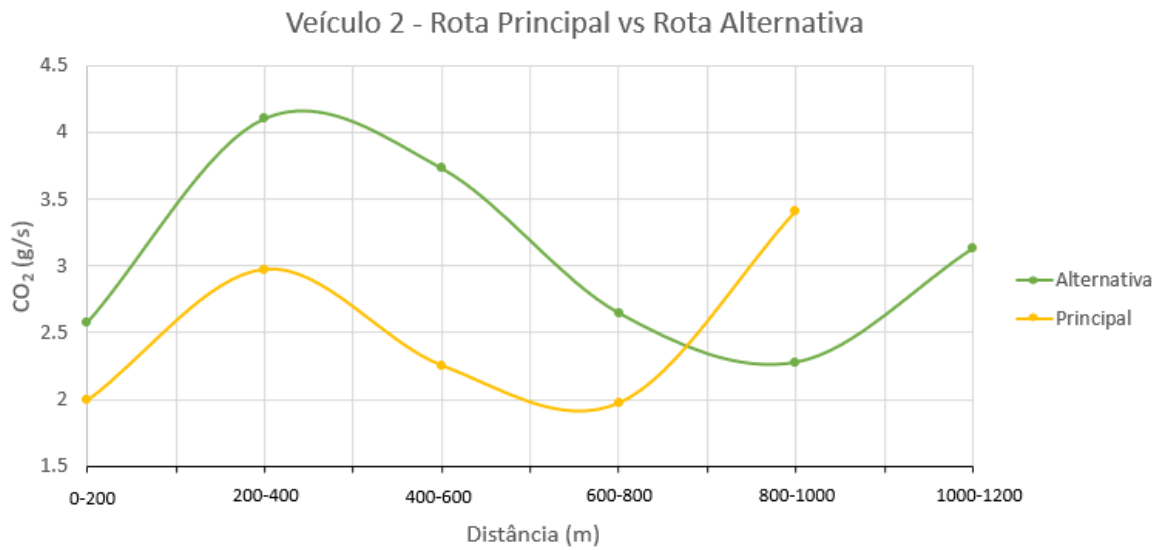


Figura 87. Média das taxas de emissão instantânea de CO₂, de todas as viagens.

Na figura seguinte apresentam-se a média de emissões associadas a cada rota, considerando também todas as viagens efetuadas.

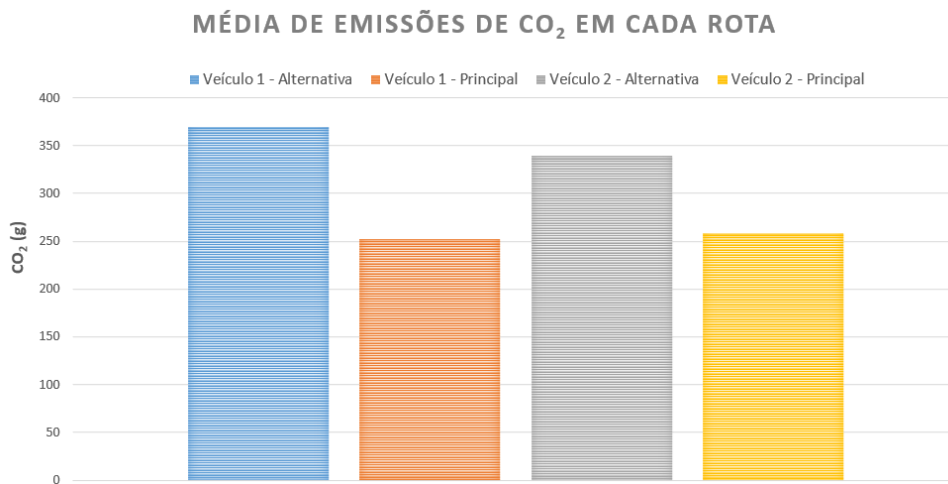


Figura 88. Emissões acumuladas de emissão de CO₂, de todas as viagens.

No que diz respeito ao NO_x foi feita uma análise em tudo semelhante, de onde se obtiveram os seguintes resultados.

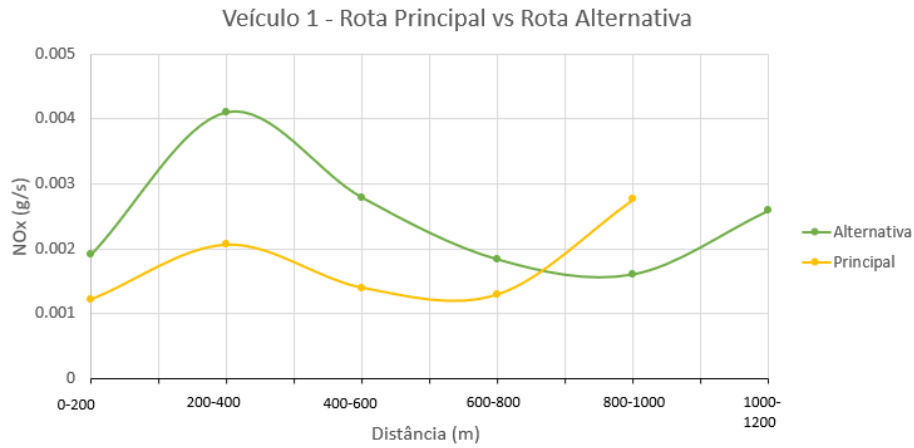


Figura 89. Média das taxas de emissão de NO_x de todas as viagens.

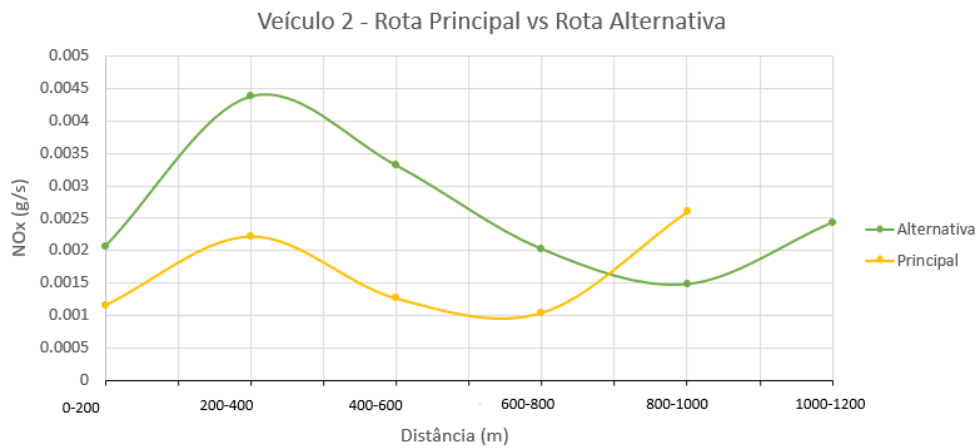


Figura 90. Média das taxas de emissão de NO_x de todas as viagens.

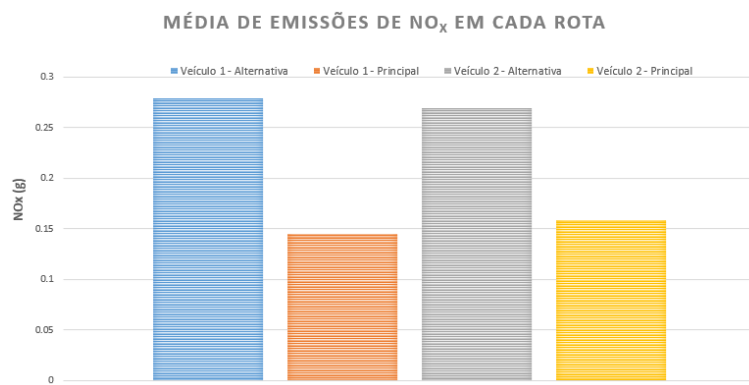


Figura 91. Emissões acumuladas de emissão de NO_x de todas as viagens.

Novamente nota-se que o nível médio de emissões de NO_x é mais baixo no percurso principal quando comparado com o percurso alternativo, para ambos os veículos.

Com o objetivo de materializar em termos monetários estas diferenças do nível de emissões dos dois poluentes para ambas as rotas, optou-se por calcular os custos associados a cada caso, com base nos valores teóricos de referência ajustados à realidade portuguesa: 100€/ton de CO₂ e 2800€/ton de NO_x para a via alternativa (urbana) e 1700€/ton de NO_x para a via principal (rural) (Essen, et al., 2019).

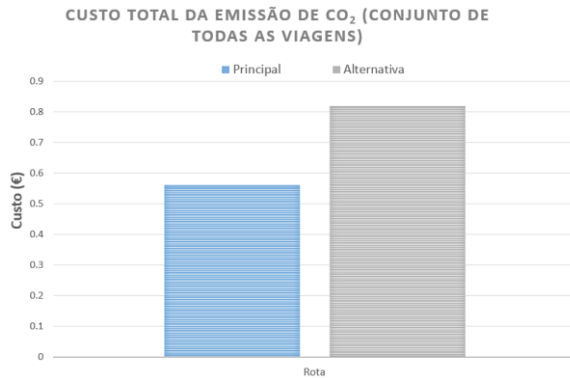


Figura 92. Custo total associado às emissões de CO₂, em ambas as rotas.

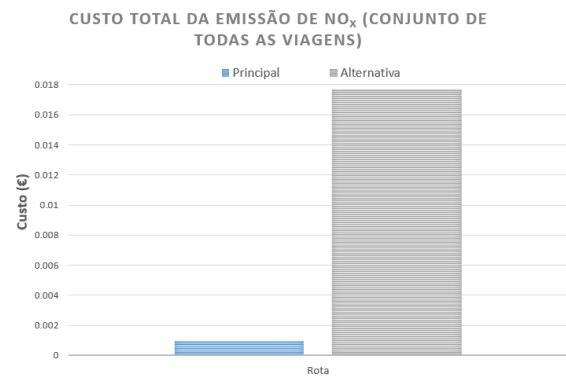


Figura 93. Custo total associado às emissões de NO_x, em ambas as rotas.

Assim, somando as contribuições de todas as 23 viagens realizadas na monitorização experimental, obteve-se um custo total de emissões de CO₂ de cerca de 0,82€ quando circulando pela via alternativa; pela via principal, o custo total foi de cerca de 0,56€ (Figura 92). O custo associado à emissão de NO_x é bastante mais reduzido, não chegando sequer a atingir os 0,02€, na via alternativa (Figura 93).

Considerando agora um custo global onde se tem em conta quer as emissões de CO₂ quer as emissões de NO_x, tem-se que:

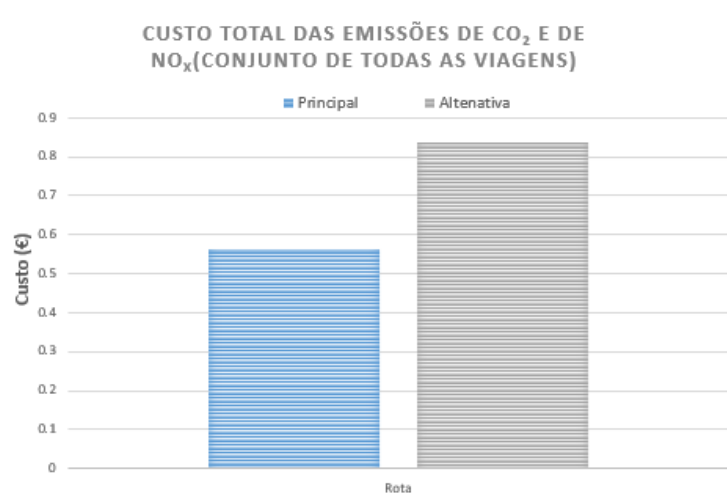


Figura 94. Soma dos custos totais associados às emissões de CO₂ e de NO₂, em ambas as rotas.

Assim, somando as contribuições de todas as 23 viagens realizadas na monitorização experimental e de ambos os poluentes, obteve-se um custo total de emissões de cerca de 0,84€ quando circulando pela via alternativa e de cerca de 0,56€ pela via principal.

Estes valores parecem irrisórios, mas no entanto, se se considerasse um período diário de 2 horas (1 hora no período de ponta da manhã + 1 horas no período de ponta da tarde), com o mesmo volume de tráfego, bem como uma perspetiva anual de 365 dias, isto representaria um custo de 613,2€ pela via secundária e de 408,8€ pela via principal.

De uma forma análoga, fez-se a mesma análise para as emissões de CO e HC, não se tendo detetado diferenças significativas ao já descrito acima; assim, apresentam-se no Anexo II os gráficos relativos a estes dois poluentes.

5.5. Análise global do desempenho da rede usando microssimulação de tráfego

Tendo a análise da situação de tráfego corrente e o seus custos associados, é possível avançar para a simulação da mesma no software de microssimulação, para que seja possível reproduzir e testar o comportamento da rede em determinados cenários de particular interesse para o estudo, nomeadamente com a introdução de possíveis medidas mitigadoras.

5.5.1. Calibração e validação do modelo VISSIM

De forma a obter resultados mais precisos e que reproduzam a realidade da forma o mais fiel possível, é necessária uma correta calibração e validação do modelo. Apenas após estes passos é que o modelo estará pronto a ser aplicado às simulações pretendidas. De facto, nenhum modelo de microssimulação consegue incluir todo o conjunto de variáveis que afetam as condições de tráfego no mundo real, pelo que há a necessidade de o adaptar às condições locais (Dowling, Skabardonis, & Alexiadis, 2004).

No contexto do presente trabalho, os parâmetros mais relevantes são os volumes de tráfego e os tempos de viagem por ambas as rotas. Posto isto, o modelo foi calibrado usando os dados recolhidos de volumes de tráfego e de tempos de viagem, de forma a aproximar os movimentos da rede às condições de condução no mundo real. A sua validação foi feita em dois passos: primeiro em termos de volumes de tráfego e depois em termos de tempos de viagem.

Quanto aos volumes de tráfego foram comparados os volumes observados (através das contagens) com os do modelo (que foram também criados com base nos dados das contagens). Para isso, foi necessário definir nós ao longo da rede, em pontos onde houvesse dados de volumes; depois, configurou-se a recolha de dados nos referidos nós e no intervalo de tempo pretendido (Figura 96) e, recorrendo à ferramenta *Node Results* (Figura 95), foi possível obter as contagens de veículos que passam nos mesmos, de modo a ser possível estabelecer uma comparação.

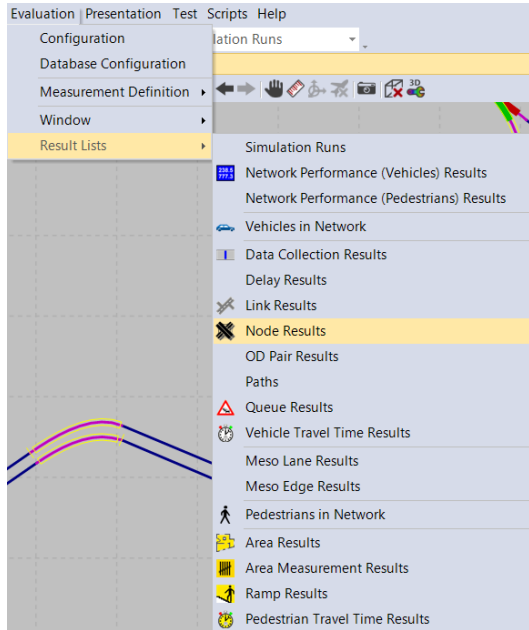


Figura 95. Apresentação dos resultados nos nós.

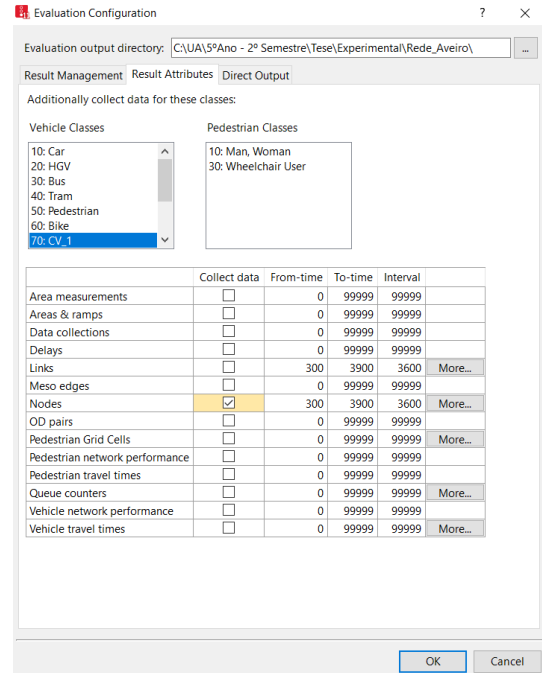


Figura 96. Definição de contagens nos nós

O critério de comparação entre os volumes de tráfego observados e simulados foca-se na estatística GEH, que se pode definir pela seguinte expressão (Priya et al, 2013):

$$GEH = \sqrt{\frac{2(O - S)^2}{O + S}}$$

onde:

- GEH representa índice de Geoffrey E. Havers;
- O é o valor observado;
- S é o valor simulado.

A aplicação deste método prevê a caracterização dos valores do GEH da seguinte forma (Tomás, 2018):

- $GEH < 4$, o volume de tráfego é considerado adequado;
- $4 < GEH < 10$, o volume de tráfego precisa de ser ajustado;
- $GEH > 10$, o volume de tráfego não deve ser considerado.

Tabela 7. Valores de GEH para as contagens do dia 1.

Day1							
ID	Node	Counted	Estimated	Diff. Volume	Diff. Volume2	GEH	<4
7	Alternative_Rotunda	74	95	0.283783784	0.283783784	2.284498832	1
8	Alternative_Glicinias	15	15	0	0	0	1
9	Main_Rotunda	813	827	0.017220172	0.017220172	0.488901207	1
10	Main_Glicinias	715	687	0.039160839	0.039160839	1.057545404	1
4	Sul109_Chegada	700	733	0.047142857	0.047142857	1.232837518	1
16	Sul109_Partida	579	578	0.001727116	0.001727116	0.041576537	1
18	Crasto_Chegada	94	79	0.159574468	0.159574468	1.612809992	1
20	Crasto_Partida	287	285	0.006968641	0.006968641	0.118262479	1
21	CapLebre_Chegada	287	262	0.087108014	0.087108014	1.508929101	1
							1

Tabela 8. Valores de GEH para as contagens do dia 2.

Day2							
ID	Node	Counted	Estimated	Diff. Volume	Diff. Volume2	GEH	<4
7	Alternative_Rotunda	94	95	0.010638298	0.010638298	0.1028689	1
8	Alternative_Glicinias	18	15	0.166666667	0.166666667	0.738548946	1
9	Main_Rotunda	858	827	0.036130536	0.036130536	1.068013492	1
10	Main_Glicinias	677	687	0.014771049	0.014771049	0.382919791	1
4	Sul109_Chegada	724	733	0.012430939	0.012430939	0.333447704	1
16	Sul109_Partida	541	578	0.068391867	0.068391867	1.564233846	1
18	Crasto_Chegada	115	79	0.313043478	0.313043478	3.655246194	1
20	Crasto_Partida	258	285	0.104651163	0.104651163	1.638622248	1
21	CapLebre_Chegada	283	262	0.074204947	0.074204947	1.272143319	1
							1

Uma vez que em todos os nós se registaram valores de GEH abaixo de 4, pode-se concluir que é satisfeito o critério de validação. Os seguintes gráficos de dispersão mostram um ajuste perfeitamente adequado entre os volumes observados nos dois dias de monitorização experimental e os estimados pelo modelo (valores de R^2 de 0,9958 e 0,9937, respetivamente para o primeiro e segundo dias).

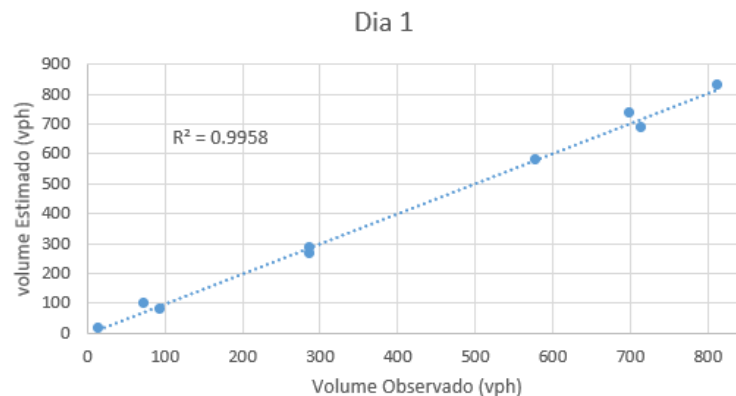


Figura 97. Calibração dos volumes de tráfego para o 1º dia de contagens.

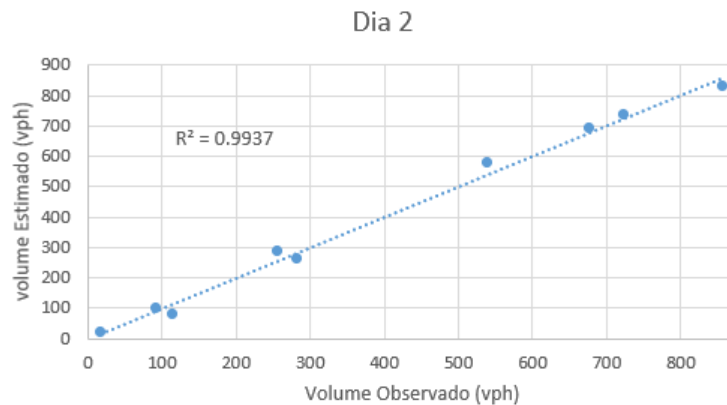


Figura 98. Calibração de volumes de tráfego para o 2º dia de contagens.

Relativamente aos tempos de viagem foi feita a comparação entre os tempos verificados na monitorização experimental e os tempos simulados pelo VISSIM para os veículos flutuantes (*Floating Cars*, que são uma amostra de veículos a realizar cada rota), através do teste de hipótese *t* de *Student*. O número de veículos flutuantes a simular foi definido tendo em conta o número de repetições, a média e o desvio padrão da amostra de cada rota dos dados da monitorização experimental (Tomás, 2018), como indicado na Tabela 9.

Tabela 9. Tempo médio recolhido na monitorização e definição dos "Floating Cars".

Rota	Percurso	Tempo médio (s)	Desvio padrão	IC	Floating Cars
1	Principal (N109)	110,5	35,1	12,8	73,6
2	Alternativo (R.EçaQueiroz)	126,9	37,8	13,8	75,4

Uma vez que o número indicado pela fórmula aponta para a simulação de mais de 70 veículos flutuantes (um volume relativamente grande, cuja análise seria mais dispendiosa em termos de tempo), considerou-se a regra geral no uso do Teorema do Limite Central que indica que desde que uma amostra seja baseada em 30 ou mais observações, a distribuição dessa amostra aproxima-se da distribuição normal (Kwak & Kim, 2017) e, podendo ser considerada representativa, ou seja, deste modo, pode ser extrapolada para um caso real.

Assim, foram simulados 30 veículos "adicionais" a realizar as diferentes rotas, para os quais se determinou o tempo de viagem através dos ficheiros de trajetória de cada veículo (Figuras 99 e 100).

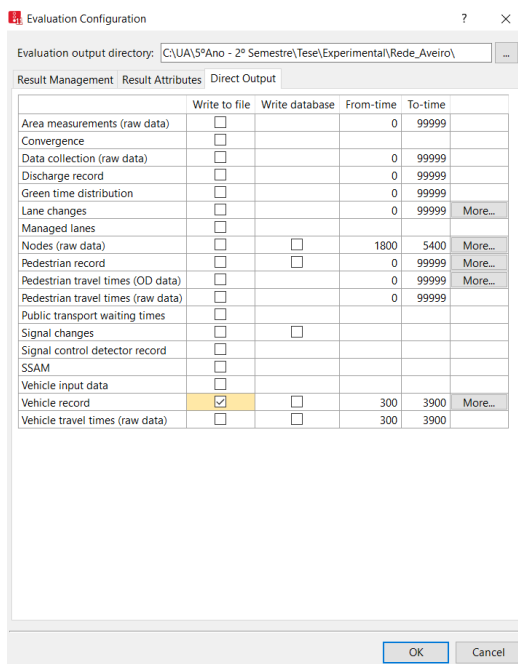


Figura 99. Definição de dados de recolha de veículos.

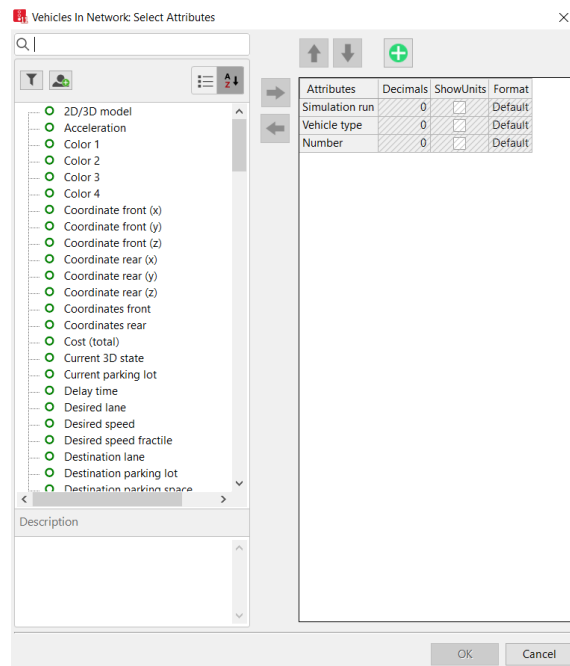


Figura 100. Definição dos atributos a recolher.

Os resultados do tempo médio de viagem para os referidos veículos (Tabela 10) foram comparados com os recolhidos na monitorização, e mostram que os valores de *p-value* foram superiores ao nível de significância do teste (5%) o que permite concluir que não há diferenças significativas nos valores estimados das amostras e, portanto, também este critério de validação foi verificado (Tomás, 2018). Note-se que, durante este processo, os decisores de velocidade foram ajustados em algumas zonas (nomeadamente na zona de aproximação à rotunda) para a aproximação ao caso observado ser o mais fiel possível, e para ser garantido o nível de significância pretendido.

Tabela 10. Tempo médio simulado e cálculo do *p-value*.

Rota	Percurso	Tempo médio	Desvio padrão	IC	Diff	<i>p-value</i>
1	Principal (N109)	103,4	11,2	3,5	-6,4%	0,36
2	Alternativo (R.EçaQueiroz)	114,1	15,4	4,9	-10,1%	0,14

Após a validação e calibração do modelo, foi possível simular os cenários de particular interesse para o estudo e otimizar as distribuições de tráfego tendo em conta os parâmetros já referidos (tempo de viagem, ruído, emissões e acidentes) e avaliar os seus custos.

Numa primeira fase, simulou-se a situação atual para se poder estabelecer uma comparação com a situação observada no caso real relativamente ao nível das emissões, já que ao nível dos volumes

de tráfego e dos tempos de viagem a simulação já se encontra aproximada (pela calibração feita no subcapítulo anterior).

Para isso, foi necessário ainda introduzir no VISSIM a informação relativa ao gradiente nos vários *Links*, para que haja uma caracterização mais fiel das inclinações da via (subidas e descidas), uma vez que a via secundária do caso em estudo apresenta uma secção com uma subida íngreme quando comparada com a rota pela via principal, o que pode ter impacto nos resultados subsequentes. Isto foi feito através de um procedimento que consistiu em dois passos, onde primeiro se procedeu a uma correção das coordenadas geográficas de altitude (em metros acima do nível do mar) disponibilizadas pelo GPS, que por vezes vêm afetadas de erros, da seguinte forma (EC, 2017):

$$\bar{h}_i = \begin{cases} h_{i-1}, & \text{se } |h_i - h_{i-1}| > \frac{v_i}{3,6 \times \sin 45^\circ} \\ h_i & \end{cases}$$

Em que:

- \bar{h}_i é a altitude corrigida do veículo;
- h_i é a altitude do veículo no instante i ;
- h_{i-1} é a altitude no instante $i - 1$;
- v_i é a velocidade do veículo no instante i .

Depois, estes valores corrigidos foram relacionados com a distância percorrida e com o comprimento dos vários *Links*, pela seguinte expressão:

$$\text{Gradiente (\%)} = \frac{\bar{h}_i - \bar{h}_{i-1}}{\text{Distância}_i - \text{Distância}_{i-1}} \times 100$$

Relativamente aos valores obtidos, destaca-se que o valor máximo de gradiente de um *Link* na rota principal é de cerca de 5,6%, enquanto que na rota alternativa o *Link* com maior gradiente tem uma percentagem média de inclinação de cerca de 11,1%, e que coincide com a referida zona de subida íngreme. A introdução dos gradientes nos vários segmentos e conectores é feita como se ilustra nas Figuras 101 e 102.

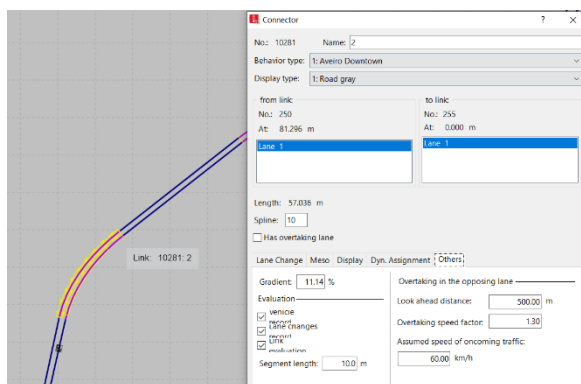


Figura 101. Exemplo da definição do gradiente de um conector.

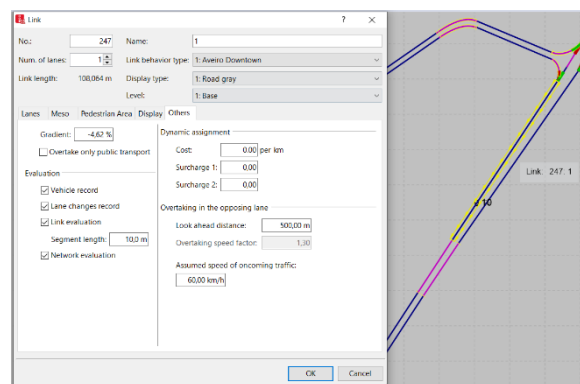


Figura 102. Exemplo da definição do gradiente de um Link.

Outro pormenor importante a definir no VISSIM previamente à simulação, prende-se com a necessidade de garantir que os volumes inseridos nas matrizes OD seguem as rotas que se pretende. Isto foi assegurado pelos bloqueios ilustrados nas Figuras 103 e 104, através dos quais se consegue que os veículos do tipo “CV_1” associados à matriz da rota principal sigam efetivamente pela rota principal e que os veículos do tipo “CV_2” associados à matriz da rota alternativa sigam pela alternativa. Outros bloqueios foram ainda inseridos ao longo da rede para evitar que os veículos adotem trajetórias inusitadas.

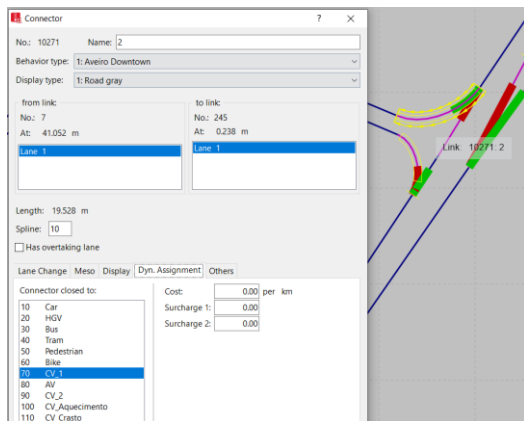


Figura 104. Exemplo do bloqueio dos CV_1 à rota alternativa.

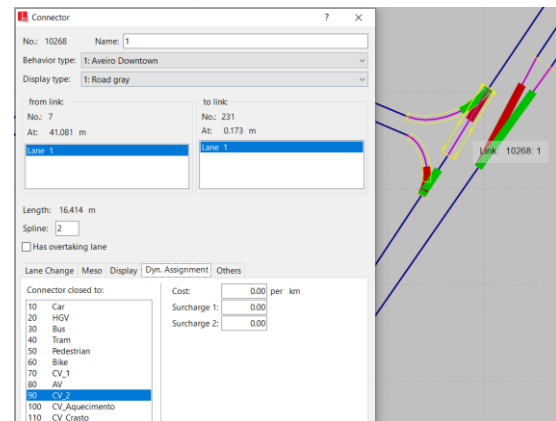


Figura 103. Exemplo do bloqueio dos CV_2 à rota principal.

Posto isto, o passo que se segue consiste em configurar alguns parâmetros do *Dynamic Assignment*, desde logo a criação de novos ficheiros *Cost File* e *Path File* (onde o VISSIM irá armazenar alguns dados resultantes da simulação) para que não entrem em conflito com ficheiros de simulações anteriores (Figura 106). Depois, é preciso definir os critérios de convergência que o software irá adotar para encontrar a melhor distribuição de tráfego (Figura 105).

Para isso, é necessário ter em conta que o procedimento de distribuição dinâmica de tráfego adotado pelo VISSIM é baseado numa simulação iterada, ou seja, a rede modelada será simulada repetidamente e não apenas uma vez, de forma a que os condutores possam escolher a sua rota com base nas viagens que realizaram durante as simulações anteriores (Fellendorf & Vortisch, 2010).

Assim, como geralmente os métodos iterativos utilizados para atingir o equilíbrio em modelos matemáticos não irão convergir absolutamente, é necessário definir critérios de paragem para descrever o ponto em que se considera que se atingiu uma convergência satisfatória (Ng, 2012). Para este trabalho, estabeleceu-se que a simulação se dá por concluída quando ocorrerem 5 convergências consecutivas; considerou-se ainda que a convergência é atingida se os volumes de tráfego não variarem (relativamente à iteração anterior) em mais do que 15 veículos, que corresponde ao valor padrão definido pelo VISSIM, e se a percentagem de caminhos que convergir for no mínimo 85%; para este parâmetro o valor padrão definido pelo VISSIM é de 95% mas, pode ser reduzido ligeiramente para eliminar o impacto de trajetos particularmente curtos (PTV, 2018). De facto, uma vez que a rede é relativamente pequena, existe uma maior variabilidade dos valores de volumes de tráfego, daí que atingir os 95% definidos por defeito fosse quase impossível (dentro de um tempo razoável de simulação); com este novo critério (85%) o modelo convergiu mais rapidamente.

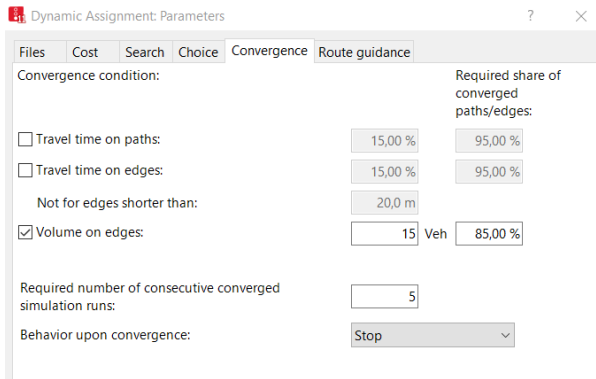


Figura 105. Definição dos critérios de convergência.

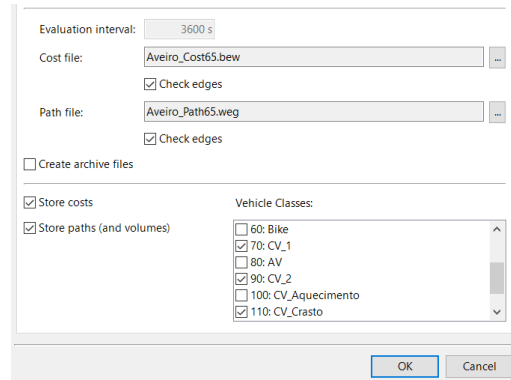


Figura 106. Definição de ficheiros gerados pelo Dynamic Assignment.

Outros parâmetros a definir, na secção *Simulation Parameters* (Figura 107), estão relacionados com o período da mesma ($T_{aquecimento} + T_{simulação} = 5min. + 1h = 3900s$), a sua resolução temporal (10 passos de tempo por segundo, para assegurar os dados de saída segundo a segundo) e o número máximo de iterações (100, para garantir que há um número suficiente de tentativas até serem atingidas as 5 convergências consecutivas.)

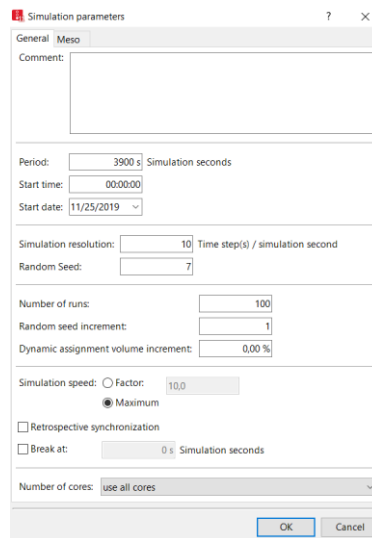


Figura 107. Definição de parâmetros da simulação.

Tendo a configuração dos parâmetros de simulação efetuada, o próximo passo foi definir quais os dados a recolher e de que forma é que essa recolha é feita. Para isso, através da ferramenta *Evaluation Configuration*, na secção *Result Attributes* (Figura 109), escolheu-se a recolha de dados para os *Links* e para os nós, o tipo de veículos a considerar (apenas CV_1 e CV_2) e o período da análise desejado (300s-3900s); de uma forma análoga, na secção *Direct Output* (Figura 108), seleccionou-se a opção que permite extrair os dados de trajetória dos veículos

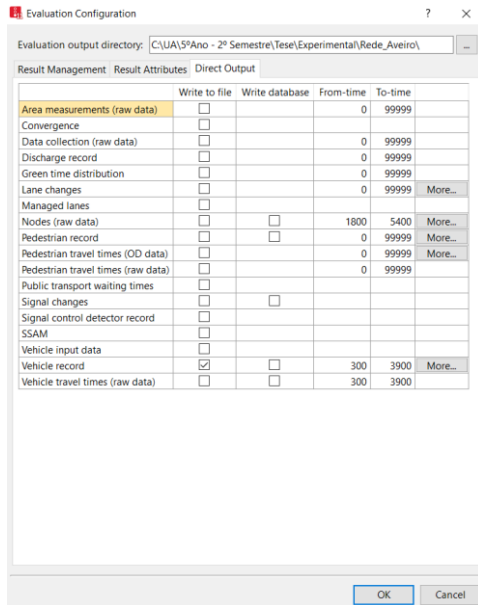


Figura 108. Configuração da ferramenta Evaluation Configuration para a recolha de dados de trajetória dos veículos.

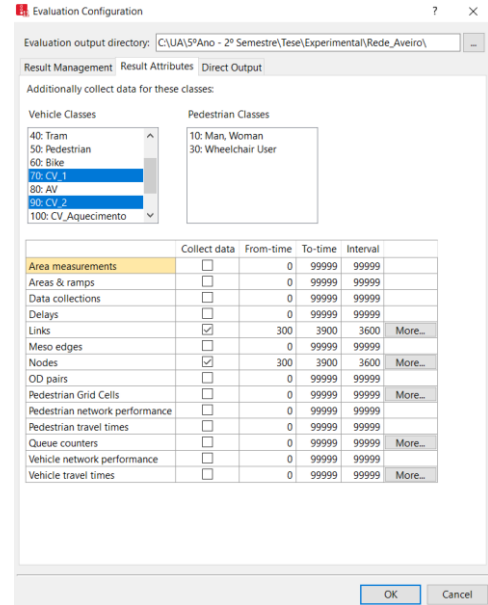


Figura 109. Configuração da ferramenta Evaluation Configuration, para a recolha de dados nos Links e nós.

Para a recolha dos dados de trajetória dos veículos (“Vehicle Record”), foi necessário definir o tipo de veículos a que ela se iria aplicar, como ilustrado na Figura 110.

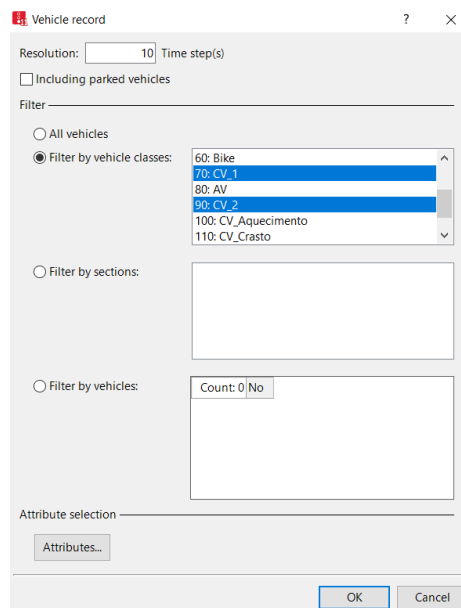


Figura 110. Definição do tipo de veículos, para a recolha dos dados de trajetória.

Por fim, foi necessário especificar quais as variáveis a extrair do VISSIM, através da ferramenta *Select Attributes* (Figura 111).

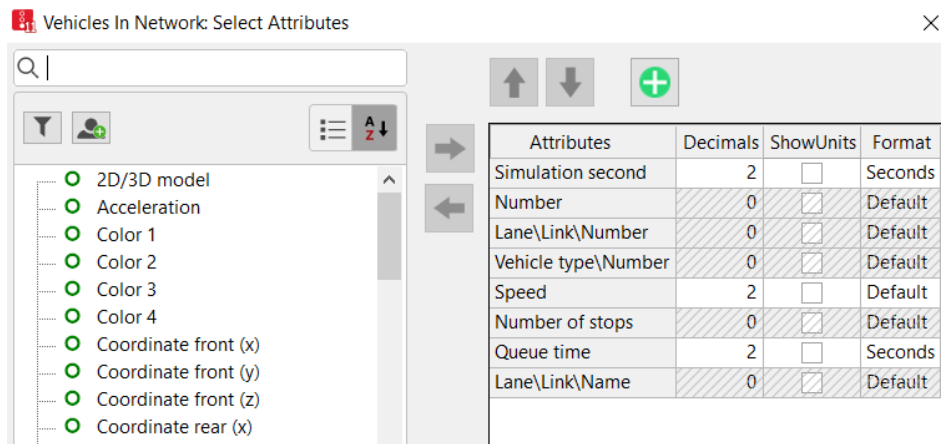


Figura 111. Definição das variáveis da trajetória do veículo a serem extraídas do VISSIM.

Estas variáveis consistem no tempo de simulação (que permitirá identificar o tempo que um veículo passa na rede e até numa rota em específico), no número do veículo, no número do *Link* em que se encontra, no número do tipo de veículo, na sua velocidade instantânea, no número de paragens, no tempo em espera e no nome do *Link* (os *Links* pertencentes às rotas em estudo estão identificados com um nome, para mais fácil distinção). Note-se que a ordem destas variáveis é importante, pois são elas os valores de entrada no código Matlab.

Com base na metodologia sugerida neste trabalho para avaliação do desempenho da rede viária, é possível obter os resultados relativos à simulação que representa a situação atual, por forma a perceber se o nível de emissões é semelhante ao que se observou em 5.4.

Os resultados indicam que, dos 671 veículos que realizaram o percurso no sentido em análise (N109-Norte -> N109-Sul), 626 seguiram pela via principal e 46 pela alternativa. Estes dados estão em concordância com as contagens feitas, e são uma base de comparação muito importante para os cenários apresentados nos próximos subcapítulos. Relativamente aos dados recolhidos na monitorização experimental, é possível ainda verificar que os valores de velocidade média e de tempo de viagem para cada rota são ligeiramente inferiores aos registados na simulação:

- rota principal: 110,5 seg. (real) vs 128 seg. (simulado) → +15,8%;
33,7 km/h (real) vs 35,3 km/h (simulado) → +4,7%.
- rota secundária: 126,9 seg. (real) vs 141,7 seg. (simulado) → +11,7%;
34,5 km/h (real) vs 37 km/h (simulado) → +7,2%.

Estas diferenças são justificadas, não por uma má calibração, mas sim pelo facto de os dados da simulação estarem a ser retirados para uma distância cerca de 300m superior àquela que foi considerada nos veículos de teste (rota principal: ≈1300m (simulado) vs ≈1000m (real); rota alternativa: ≈1500m (simulado) vs ≈1200m (real)).

No que às emissões de CO₂ diz respeito, nota-se que os valores simulados são inferiores aos registados pela dinâmica dos veículos (rota principal: 222g (simulado) vs 252g (real); rota alternativa: 260g (simulado) vs 339g (real)).

Numa perspetiva de análise global da rede, isto é, considerando todos os veículos inseridos na simulação (e não apenas os que efetuam as rotas em estudo) é possível afirmar que o tempo médio de viagem é de 134,4 segundos, sendo que a soma dos tempos de viagem de todos os veículos assume um valor de 4190,7 horas. Quanto às emissões totais na rede, para o cenário inicial, os valores obtidos são de: 435,9 quilogramas de CO₂ e 1,17 quilogramas de NO_x.

Assim, nos vários cenários que de seguida se apresentam, os resultados serão comparados com os da simulação do caso base e não com os que se extraíram da dinâmica dos veículos de teste, para que se possa fazer uma análise mais fiável das diferenças existentes.

5.5.2. Minimização do tempo de viagem

Procedeu-se então à determinação da distribuição ótima de tráfego, tendo em vista a minimização do tempo de viagem dos utilizadores das vias de interesse (no sentido Norte-Sul), por forma a comparar os resultados da simulação com os dados da simulação do caso base e com os cenários posteriores. Para isso, fez-se algumas alterações na abordagem da simulação, de entre as quais se destacam:

- introdução de uma só matriz OD (que corresponde à soma das matrizes “Aveiro_SituacaoAtual_1” e “Aveiro_SituacaoAtual_2” da simulação anterior);
- introdução de um só tipo de veículo (apenas CV_1) (Figura 112);
- remoção dos bloqueios no corte para a via alternativa.

Deste modo, procurou-se dar liberdade de escolha aos condutores para que optem pela rota que lhes for mais conveniente apenas e só em termos de tempos de viagem. Isto foi garantido através da definição dos “Cost Coefficients” dos veículos unicamente de acordo com o “Travel Time”, conforme ilustrado na Figura 113.

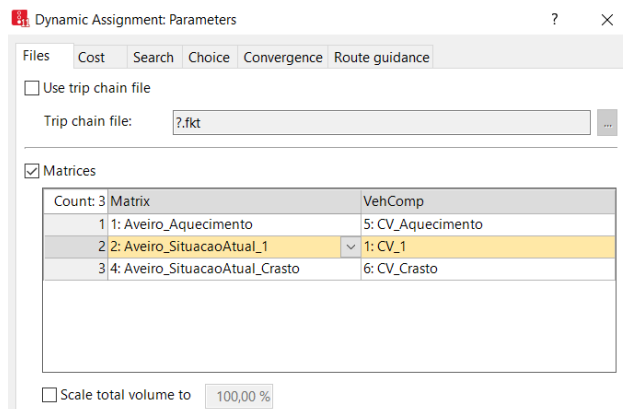


Figura 112. Ilustração das diferenças nos parâmetros do Dynamic Assignment.

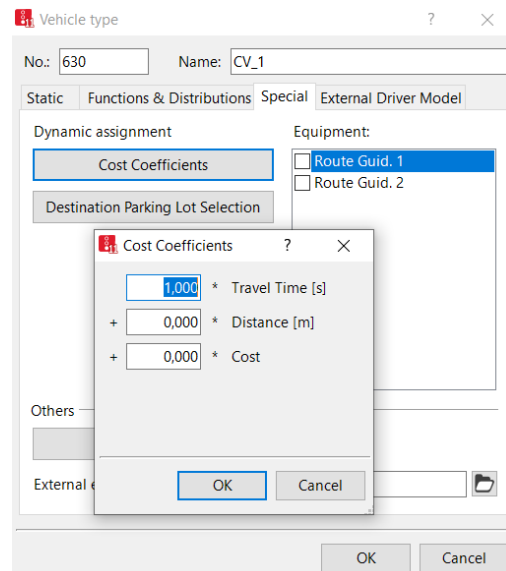


Figura 113. Definição dos custos a ter em conta pelos veículos (apenas em termos de tempo).

Com esta distribuição ótima, verificou-se que, dos mesmos 671 veículos que realizam o percurso em estudo, 527 seguem pela via principal e 144 pela alternativa. Isto representa uma diferença significativa em relação ao caso base, o que permite deduzir que efetivamente estamos perante uma rede propícia a fenómenos de “rat-running” já que, se a via alternativa fosse utilizada na sua potencialidade máxima e se todos os condutores tivessem como critério de escolha a melhoria do tempo de viagem da rede, seriam muitos mais aqueles que iriam optar pela via alternativa.

Assim, uma vez que há um volume de veículos significativamente mais elevado a circular pela via alternativa, notou-se nesta via um aumento não só do tempo médio de viagem (152 seg.), mas também das emissões de CO₂ e de NO_x, bem como uma ligeira diminuição da velocidade média de circulação (36 km/h). Por outro lado, na via principal, como existem menos veículos do que no caso base, regista-se um decréscimo do tempo de viagem (125,8 seg.) e da emissão de CO₂, sendo que os dados de velocidade média e de emissão de NO_x foram aproximadamente iguais.

Na Figura 114, apresenta-se um gráfico com a velocidade instantânea em função da distância percorrida por dois veículos representativos da frota, circulando por rotas distintas; analisando a figura, é possível identificar o perfil de velocidade mais regular associado à rota principal (a amarelo) na aproximação à rotunda, sendo que ambos tiveram uma grande diminuição de velocidade (e, inclusivamente, uma paragem) à entrada da mesma.

Numa análise global da rede, nota-se que esta distribuição é mais penalizadora relativamente ao cenário base, já que os tempos médios de viagem de todos os veículos aumentam para 144,3 segundos (+7,4%), o mesmo se verificando para as emissões de CO₂ (464,4 Kg → +6,5%) e de NO_x (1,25 Kg → + 6,8 %).

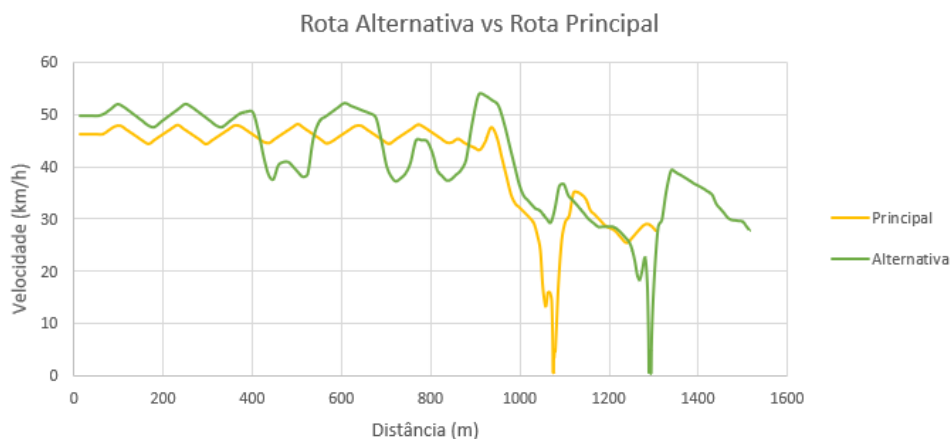


Figura 114. Velocidade em função da distância, para cada uma das rotas.

5.5.3. Minimização do tempo de viagem, emissões de poluentes, ruído e segurança

De seguida, determinou-se a distribuição ótima de tráfego, mas desta vez tendo como função objetivo não só a minimização do tempo de viagem, mas sim de todo um conjunto de custos relativos ao congestionamento (tempo de viagem), à poluição atmosférica (emissão de CO₂), às alterações climáticas (emissão de NO_x), ao ruído e aos acidentes. Estes custos foram calculados para cada *Link*, através do código Matlab, e inseridos no VISSIM através da lista de todos os *Links* (Figuras 115 e 117) e do atributo definido como se mostra na Figura 116.

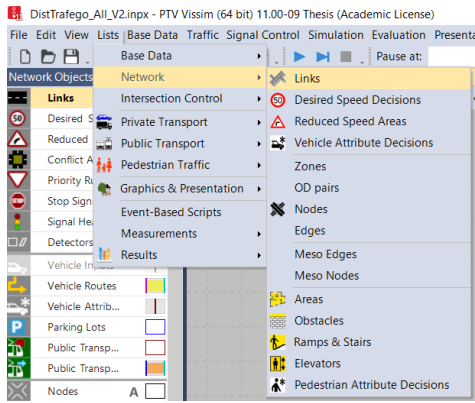


Figura 115. Lista dos Links existentes.

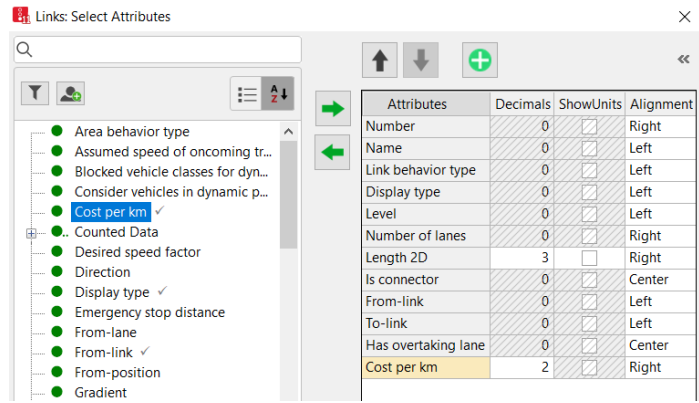


Figura 116. Seleção do atributo de custo por quilómetro.

Count	No	Name	LinkBehavType	DisplayType	Level	NumLanes	Length2D	IsConn	FromLink	ToLink	HasOvrtLn	CostPerKm
1	1	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	95,671	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	0,00
2	2	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	95,671	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	0,00
3	3	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	23,935	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	0,00
4	4 3	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	23,935	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	5,66
5	5	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	35,629	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	0,00
6	6	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	10,639	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	0,00
7	7 3	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	41,134	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	9,76
8	194	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	84,558	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	0,00
9	195	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	85,019	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	0,00
10	196 2	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	22,058	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	10,25
11	197	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	22,043	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	0,00
12	198 2	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	50,768	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	21,43
13	199	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	88,567	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	0,00
14	200	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	6,033	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	0,00
15	201 2	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	89,598	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	42,82
16	202	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	44,268	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	0,00
17	203 2	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	47,098	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	20,71
18	204	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	35,203	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	0,00
19	205 2	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	35,612	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	14,72
20	206	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	2	2	3,225	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	0,00
21	207	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	69,661	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	0,00
22	208 3	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	69,661	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	15,36
23	209	1: Aveiro Downtown	1: Road gray	1: Base	1	1	12,529	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	0,00

Figura 117. Introdução dos custos por quilómetro, para cada link.

Posteriormente, é ainda necessário redefinir os “Cost Coefficients” para que os veículos tenham em consideração repartidamente os custos dos tempos de viagem bem como dos restantes (Figura 118).

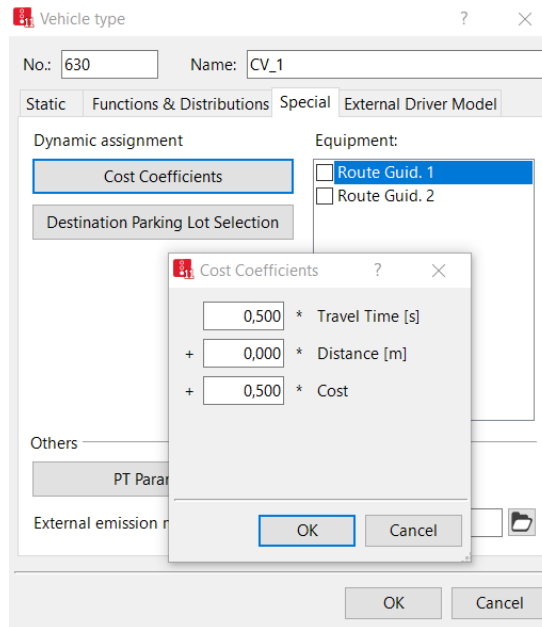


Figura 118. Definição dos custos a ter em conta pelos veículos.

Assim, para esta distribuição ótima, verificou-se que, do total dos 671 veículos que realizam o percurso em foco, 539 seguem pela via principal e 132 pela alternativa. Relativamente aos cenários precedentes, nota-se que há uma diminuição (de 12 veículos) no volume de tráfego que circula pela via alternativa quando a preocupação tida em conta é unicamente a do tempo de viagem. Este facto, vai ao encontro daquilo que seria de esperar, já que os custos exteriores associados à via alternativa são superiores.

Não obstante, é possível novamente comprovar que se está perante uma situação propícia a fenómenos de “rat-running”, já que mesmo tendo em conta um conjunto de custos associados a vários fatores de risco, há ainda muitos mais veículos a optarem pela rota alternativa do que no caso base. Deste modo, nota-se novamente um aumento do tempo de viagem e da emissão de CO₂, quando é feita uma comparação com o caso inicial.

A distribuição das velocidades ao longo da distância percorrida por dois veículos representativos da restante frota (Figura 119), é semelhante à verificada no subcapítulo anterior, onde se testemunha novamente o carácter mais regular das velocidades praticadas na rota principal.

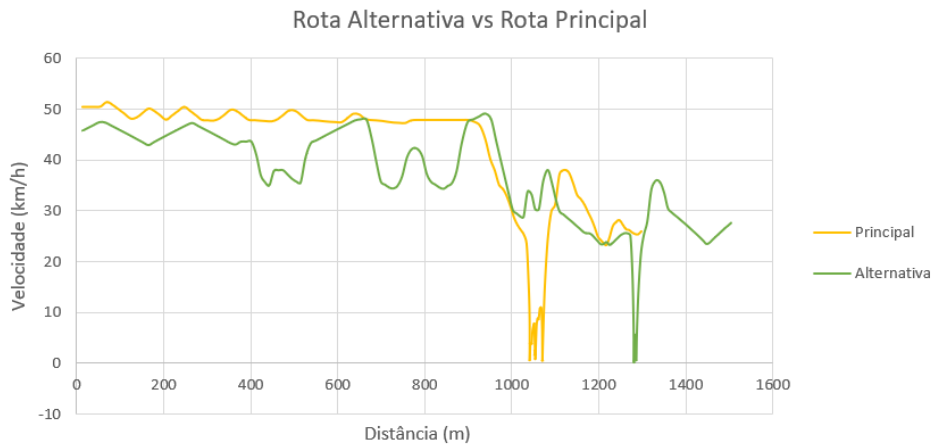


Figura 119. Velocidade em função da distância, para cada uma das rotas.

Analisando a rede de uma forma global conclui-se que, relativamente ao cenário inicial, esta distribuição é ainda mais penalizadora, uma vez que tanto os tempos médios de viagem (157,1s → +16,9% que o caso base) como as emissões de poluentes aumentam (489 Kg de CO₂ → + 12,2%; 1,33 Kg de NO_x → +13,7 %). Também a distribuição em termos da minimização somente do tempo de viagem apresenta melhores resultados em termos ambientais, já que a diferença é de cerca de 6% para o CO₂ e de 7% para o NO_x.

5.5.4. Introdução de medidas mitigadoras

Com o objetivo de reduzir os volumes de tráfego que circulam pela via alternativa, foram introduzidas na rede da simulação algumas medidas que visam forçar os condutores a preferir esta via ou seja, medidas que aumentem o tempo de viagem nessa rota e que causem um maior desconforto na condução. Para cada uma dessas medidas foi analisado o seu impacto no comportamento dos condutores e nas externalidades associadas à rede.

Para a simulação destas medidas foi considerado o modelo da simulação atual, já detalhado no subcapítulo 5.5., no qual se tinham definido uma matriz OD e um tipo de veículo distintos para cada rota, para assegurar o controlo dos volumes de tráfego em ambas as rotas. Para as simulações que se seguem, manteve-se essa abordagem, alterando apenas o bloqueio aos veículos do tipo CV_2, como ilustrado nas Figuras 120 e 121.

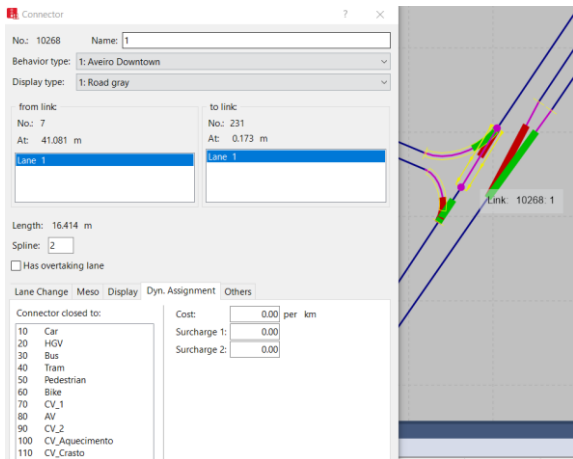


Figura 120. Remover o bloqueio dos CV_2 à rota principal.

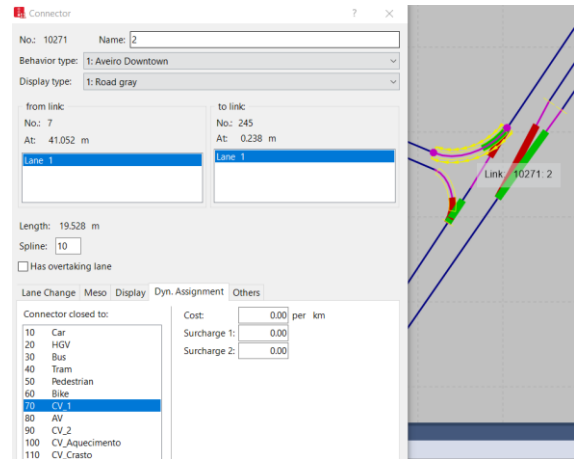


Figura 121. Manter o bloqueio do acesso dos CV_1 à rota alternativa

Desta feita, será permitido o acesso dos veículos do tipo CV_2 à rota principal que, assim, poderão escolher a rota que mais lhes convier de acordo com os custos definidos. Logo, será possível avaliar o impacto das medidas implementadas na decisão de escolha de rota dos veículos que seguiriam pela rota alternativa (e que previsivelmente se tratam dos “rat-runners”).

5.5.4.1. Lombas e passadeiras

A primeira medida sugerida foi a inclusão de lombas e de passadeiras em zonas estratégicas, de forma a causar um maior desconforto na condução; deste modo, os condutores vêm-se obrigados a reduzir as velocidades e deixam de ter vantagem ao adotar estas práticas. Uma vez que a via alternativa não tem associada a si um grande movimento de peões optou-se por não incluir passadeiras, já que o seu efeito seria residual. Assim, avançou-se com a simulação de uma lomba, posicionada na zona onde existe a subida (já caracterizada através dos gradientes nos *Links*) pois o plano inclinado provoca maiores reduções de velocidades (Figura 122).

No VISSIM simulou-se a presença de uma lomba ao introduzir uma zona de redução de velocidade (“Reduced Speed Area”), para reproduzir o comportamento dos condutores na aproximação à mesma (Yu et al, 2011).

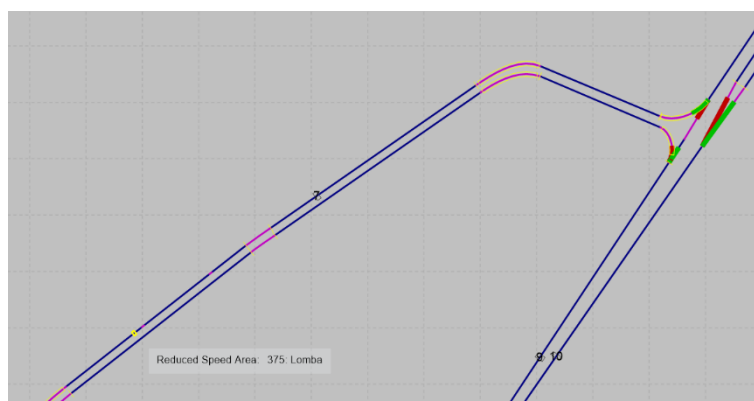


Figura 122. Ilustração do posicionamento da lomba.

Na definição dos parâmetros desta zona (Figura 123), foi necessário estipular o seu comprimento, isto é, o comprimento da área na qual os veículos irão circular à velocidade desejada (que não deve ser superior ao comprimento efetivo da lomba), a velocidade de circulação no interior dessa zona e a taxa de desaceleração, que indica a desaceleração máxima permitida aos veículos na aproximação à zona de redução de velocidade (logo, quanto mais baixo for este valor, mais longe o veículo terá de começar a reduzir a sua velocidade e, portanto, menos brusca será a desaceleração) (Yu et al, 2011). Existem dois tipos diferentes de lombas reductoras de velocidade: umas que são atravessadas a velocidades muito baixas, designadas “*speed bumps*” (que geralmente têm um comprimento de até 0,3m e velocidades de atravessamento na ordem dos 5-10 km/h); e ainda outras mais alongadas, designadas “*speed humps*”, que podem ser atravessadas a velocidades mais elevadas (comprimento típico de 3-4m e velocidades de atravessamento de 25-30 km/h) (Ghafghazi & Hatzopoulou, 2014). Para este caso, optou-se por simular um caso intermédio que, como ilustrado na figura seguinte, tem 1m de comprimento e a velocidade de circulação definida é de 12 km/h; o valor da desaceleração estabelecido foi de 8 m/s² (o valor máximo permitido pelo VISSIM é de 10 m/s²) para representar uma desaceleração algo brusca.

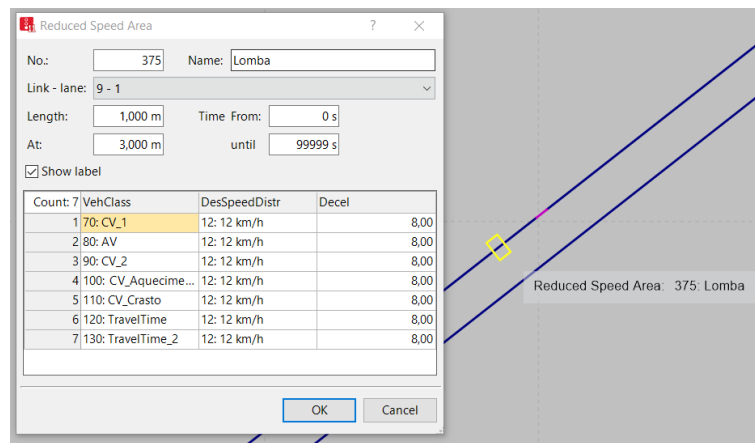


Figura 123. Características do comportamento dos veículos na aproximação à lomba.

Para esta medida, verificou-se que a distribuição ótima em termos de tempo de viagem apresenta um volume 644 veículos a optarem pela via principal e de 27 pela alternativa, o que representa uma redução de 18 veículos quando comparado com o caso base. Nota-se ainda um aumento do tempo médio de viagem em cerca de 6 segundos e uma diminuição da velocidade média de circulação para os 35,6 km/h. Segundo esta distribuição, regista-se ainda um aumento das emissões quer de CO₂ (296 g) quer de NO_x (0,79 g). Globalmente, a rede comporta-se de forma negativa (em termos de tempos médios de viagem e de emissões, para todos os veículos) relativamente ao cenário base

Através da Figura 124, onde são apresentados os valores da velocidade instantânea de dois veículos ao longo da distância percorrida, é possível comprovar claramente o efeito da lomba reductora de velocidade no comportamento dos condutores (diminuição acentuada entre os 600 e os 800 metros, que coincide com a zona de colocação da lomba)

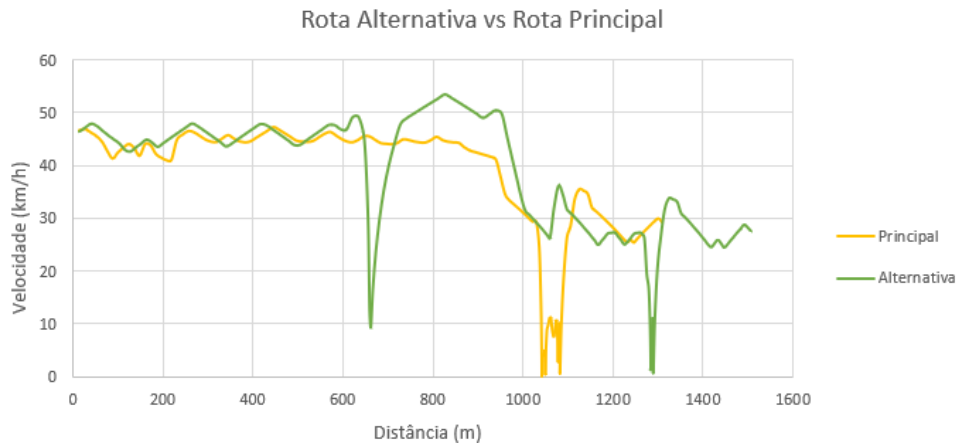


Figura 124. Velocidade em função da distância, para cada uma das rotas.

Em termos do conjunto dos restantes custos, a distribuição ótima é de 657 veículos pela via principal e de 14 pela alternativa. Comparando com os cenários anteriores, é possível verificar que há uma redução significativa no volume de tráfego que segue pela via alternativa (são menos 13 veículos do que na situação com a lombagem, mas com preocupações só em termos de tempos de viagem); ora, isto mostra que a colocação da lombagem não só aumenta o tempo de viagem, como também aumenta os restantes custos relacionados com as emissões de poluentes, de ruído e de segurança, o que contribui para o efeito que se pretende atingir (que é diminuir o volume de tráfego por esta via).

Nesta situação, estabelecendo uma comparação com a distribuição ótima em termos de tempos de viagem, como os veículos que circulam pela rota alternativa são cerca de metade, verifica-se que há um ligeiro aumento das velocidades médias de circulação (37,2 km/h) e, conseqüentemente, uma diminuição dos tempos de viagem (146,2 s); no que às emissões de CO₂ e de NO_x na via alternativa, os valores mantiveram-se face ao cenário precedente.

No que à análise global da rede diz respeito, nota-se também uma diminuição dos tempos médios de viagem para todos os veículos (132,3s → -2,3% relativamente ao caso base) e do nível de emissões (432,7 Kg de CO₂ → -0,7%; 1,16 Kg de NO_x → -0,8%).

Na Figura 125, pode-se observar novamente o efeito da colocação da lombagem na velocidade dos veículos que circulam pela rota alternativa (linha a verde, entre os 600 e os 800 metros).

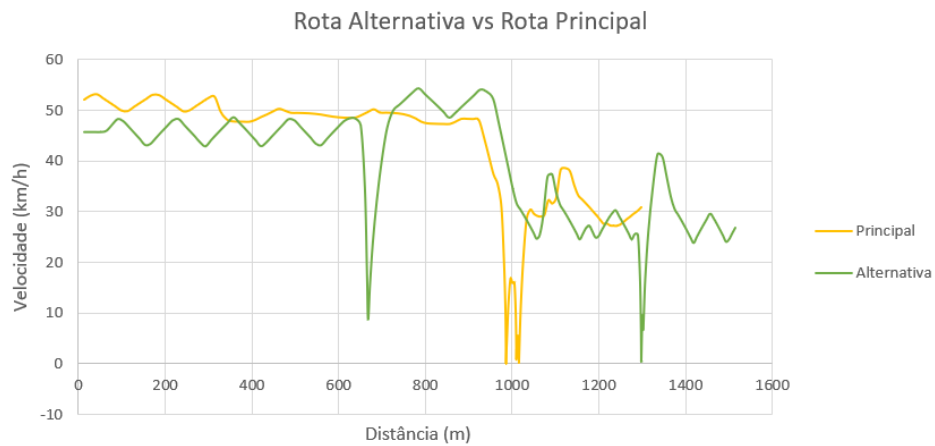


Figura 125. Velocidade em função da distância, para cada uma das rotas.

Estes resultados permitem testemunhar a efetividade da aplicação de uma lombagem na via alternativa como forma de forçar os condutores a seguirem pela via principal.

5.5.4.2. Sinalética vertical: STOP e cedência de passagem

Após uma análise do situação de trânsito em causa, identificou-se uma outra medida passível de desencorajar atos de “*rat-running*”: a introdução de um sinal de cedência de passagem ou até mesmo de STOP, no cruzamento com a rua do Crasto (que vem da Universidade); deste modo, os condutores que circulam pela via alternativa deixam de ter prioridade sobre os que vêm da Rua do Crasto e, assim, aumentam-se os seus tempos de espera e conseqüentemente os tempos de viagem, tornando esta via menos interessante.

Na simulação do VISSIM, recorrendo à ferramenta “*Priority Rules*” fez-se o ilustrado nas Figuras 126 e 127.

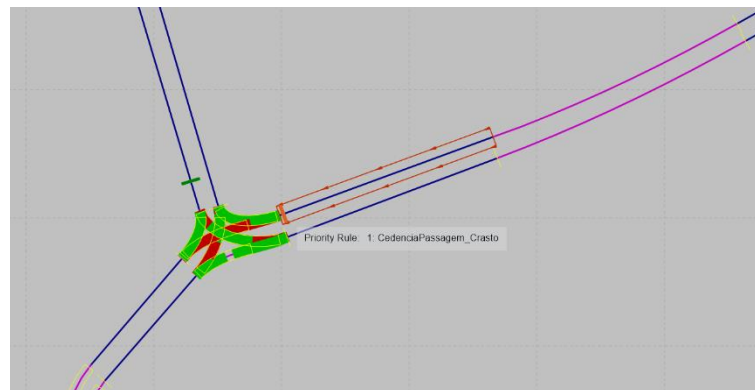


Figura 126. Ilustração da implementação da cedência de passagem.

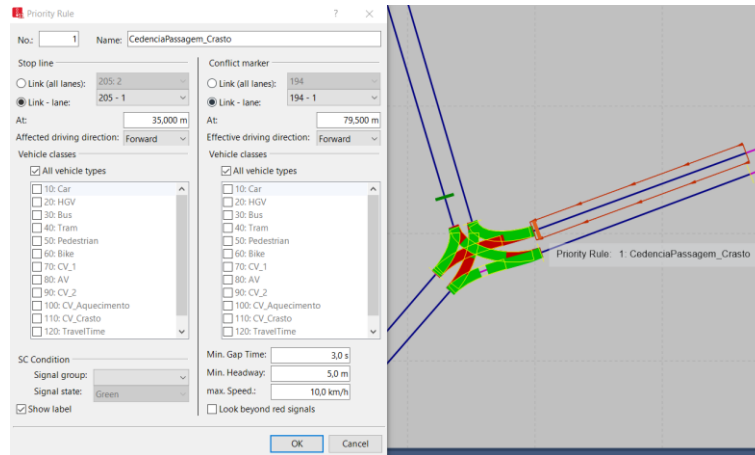


Figura 127. Características da zona de cedência de passagem.

Para esta medida, a distribuição ótima em termos de tempos de viagem é de 643 veículos pela via principal e 28 pela alternativa; comparando com o cenário base é possível verificar a efetividade da introdução desta medida na escolha de rota dos condutores. Quando comparado com o caso de implementação da lombagem, nota-se que os resultados são muito semelhantes, havendo apenas a diferença de 1 veículo que, nesse caso, seguiu pela via principal.

O tempo médio de viagem registado para os veículos que seguiram pela via alternativa foi de 143,7 segundos, o que representa um valor 2 segundos superior ao cenário base e cerca de 4 segundos inferior ao cenário da colocação da lombagem redutora de velocidade. Da mesma forma, também as emissões de CO₂ (268,4 g) e de NO_x (0,71 g) são superiores às registadas no cenário inicial, mas inferiores às da simulação com a lombagem. No entanto, quando se considera uma perspetiva global da rede, pode-se dizer que esta distribuição beneficia os tempos de viagem (133,9s → +1,1%) para o conjunto de todos os veículos, sendo que o nível de emissões se mantém praticamente igual.

Na figura 128, é possível observar o efeito da colocação do sinal de cedência de passagem no comportamento dos condutores que circulam pela via alternativa, pela redução de velocidade que ocorre por volta dos 1000 metros (linha verde); neste caso, nota-se que o veículo não precisou de parar, pelo que se trata de uma situação em que não coincidiu com nenhum veículo proveniente da Rua do Crasto.

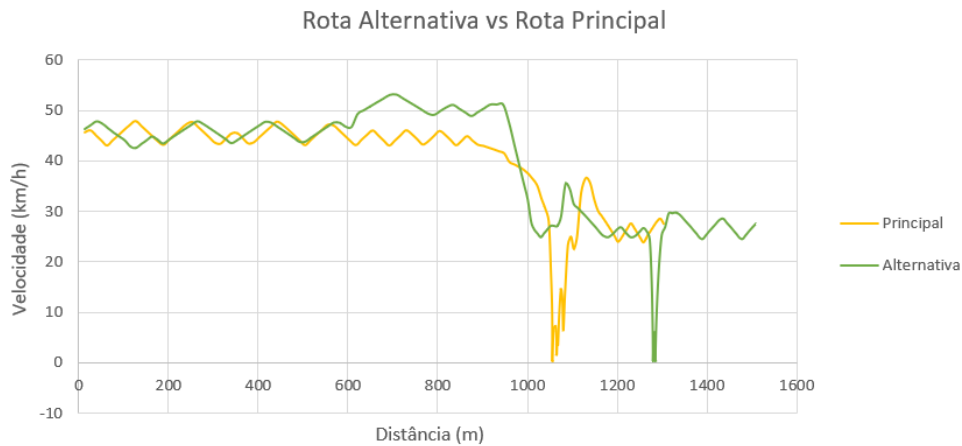


Figura 128. Velocidade em função da distância, para cada uma das rotas.

No que diz respeito aos restantes custos, a distribuição ótima é de 656 veículos pela via principal e de 15 pela alternativa; novamente, quando comparado com o caso de implementação da lombagem, nota-se que há a diferença de apenas um veículo que, nesse caso, seguiu pela via principal.

A velocidade média de circulação pela via alternativa é neste caso superior ao caso precedente (38 km/h vs 36,4 km/h), o que se pode explicar pelo facto de haverem menos veículos a fazer este percurso ($15 \ll 28$); também por isso, as emissões registadas são ligeiramente inferiores (265,8 g_{CO2}; 0,69 g_{NOx})

Globalmente, a rede apresenta melhorias ao nível dos tempos de viagem de todos os veículos (132,4s → -1,5%) e também do nível total de emissões (431,8Kg de CO₂ → -0,9%; 1,16Kg de NO_x → -0,8%), quando comparada com o cenário base.

Na Figura 129, é possível testemunhar novamente o efeito desta medida na velocidade instantânea dos veículos; relativamente ao gráfico da Figura, nota-se que neste caso o veículo foi forçado a reduzir mais a sua velocidade (previsivelmente para aguardar pelo veículo a quem cedeu a passagem) mas, ainda assim, não precisou de parar a sua marcha.

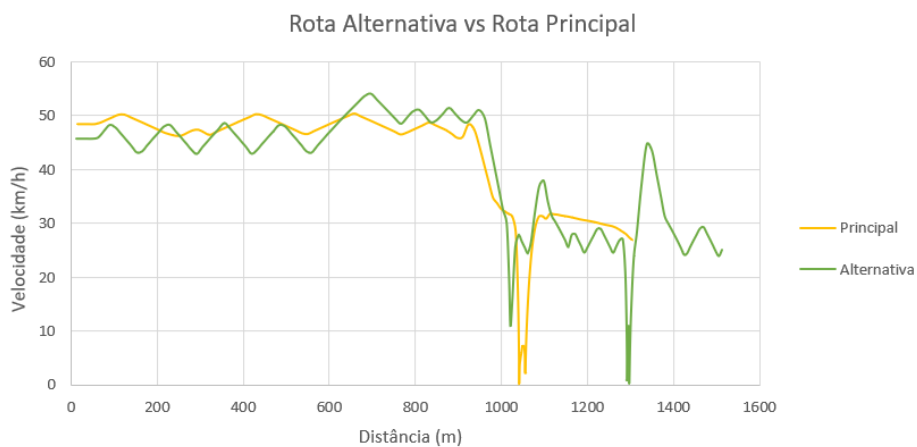


Figura 129. Velocidade em função da distância, para cada uma das rotas.

Para a introdução de um sinal de STOP, recorreu-se à ferramenta “*Stop Signs*” na simulação do VISSIM, como ilustrado na Figura 130.

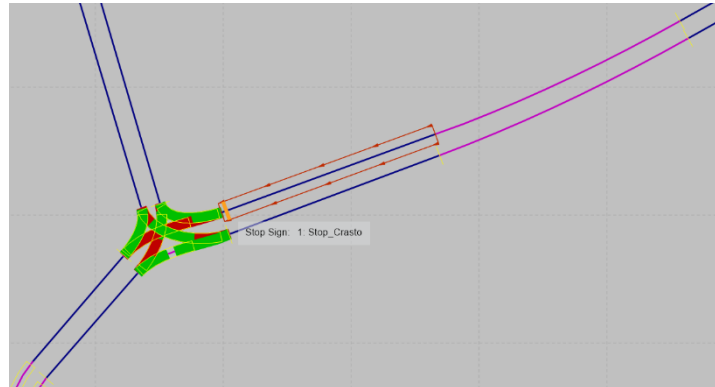


Figura 130. Ilustração da implementação do sinal de STOP.

Para esta medida, a distribuição ótima em termos de tempo de viagem é de 645 veículos pela via principal e de 26 pela via alternativa; comparando novamente com o caso base é possível confirmar a efetividade desta medida na escolha de rota por parte dos condutores. Relativamente aos cenários precedentes, nota-se que esta é a medida mais eficaz (menos 1 veículo pela via alternativa do que o cenário com a lomba redutora de velocidade e menos 2 do que o cenário com a cedência de passagem), o que se compreende pelo facto de esta medida implicar a paragem obrigatória dos veículos.

Pela via alternativa, o tempo médio de viagem verificado foi de 149,1 segundos, o que representa um aumento relativamente aos cenários precedentes (caso base - +8 segundos; lomba - +2 segundos; cedência - +6 segundos). As emissões de CO₂ e de NO_x registadas foram de 284 g e 0,75 g respetivamente, tratando-se de valores mais elevados quando comparados com o cenário de implementação da cedência de passagem, mas mais reduzidos quando a comparação é feita com o cenário de implementação da lomba. É possível ainda verificar que, neste caso, a velocidade média de circulação pela via alternativa é a mais reduzida de todos os cenários (35,1 km/h) e que o tempo médio de espera é o mais elevado (12,1 segundos).

No que ao comportamento dos condutores diz respeito, é possível ver na Figura 131 o efeito desta medida, que efetivamente obriga os condutores a pararem na zona onde o sinal foi colocado (linha representada a verde, na zona perto dos 1000 metros).

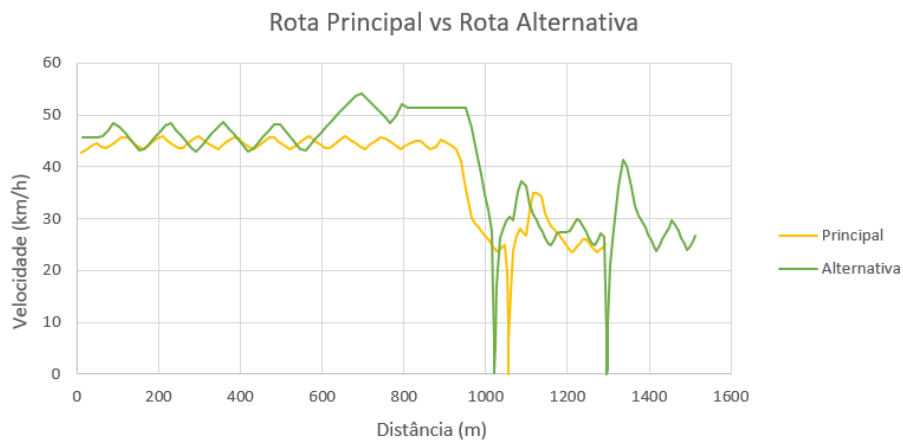


Figura 131. Velocidade em função da distância, para cada uma das rotas.

Quando se tem em conta os restantes custos, a distribuição ótima é 657 veículos pela via principal e de 14 veículos pela via alternativa; note-se que esta solução é, em termos de volumes de tráfego, precisamente a que foi obtida no cenário da lombagem quando também se consideraram todos os custos.

O tempo médio de viagem obtido pela via alternativa foi de 146,9 segundos, a velocidade média 35,6 km/h, e as emissões de CO₂ e de NO_x foram 279,2 g e 0,73 g respetivamente.

Novamente, na Figura 132 demonstra-se o efeito desta medida na velocidade instantânea dos condutores com a paragem a que obriga, por volta dos 1000 metros (linha a verde).

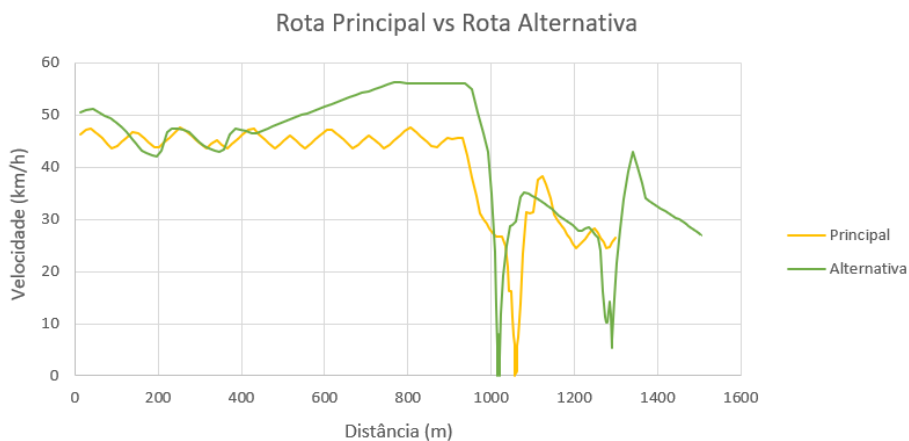


Figura 132. Velocidade em função da distância, para cada uma das rotas.

Estes resultados permitem concluir que, quando implementadas isoladamente, a medida mais eficaz é o sinal de STOP, seguido pela lombagem redutora de velocidade. A cedência de passagem revelou-se a medida menos eficaz, o que pode ser explicado pelo facto de o sinal de cedência de passagem não obrigar a uma efetiva paragem do veículo já que, se no instante em que passa nessa zona não vier nenhum veículo da Rua do Crasto, ele não terá necessidade de parar, pelo que se registará apenas uma diminuição de velocidade (na maioria das vezes inferior à que se regista na passagem pela lombagem).

5.5.4.3. Medidas aplicadas em conjunto: lombas e cedência de passagem

Por fim, optou-se por considerar um caso em que duas das medidas são implementadas em conjunto (lomba + cedência de passagem). Assim, tem-se que a distribuição ótima em termos de tempos de viagem é de 656 pela via principal e 15 pela alternativa; nota-se que, como seria de esperar, há uma redução significativa em relação aos cenários anteriores (menos 30 veículos do que no caso base, menos 13 do que no caso da cedência de passagem, menos 12 no da lombas e 11 no do STOP). O tempo médio de viagem registado é 10 segundos mais elevado do que o do cenário base, 8 segundos superior ao cenário com a cedência de passagem, 4 segundo maior que o cenário da lombas e 2 do que no do STOP. No que às emissões de CO₂ e de NO_x diz respeito, registaram-se também os valores mais elevados de todas as simulações (303,8g e 0,81g, respetivamente)

Na Figura 133 apresenta-se novamente um gráfico que ilustra as velocidades instantâneas de dois veículos representativos da frota, em cada uma das rotas; seguindo a linha representada a verde, é possível notar a diminuição de velocidade aquando da passagem pela lombas (entre os 600 e os 800 metros) e pelo sinal de cedência de passagem (por volta dos 1000 metros), onde mais uma vez não se verificou a necessidade do veículo em causa parar.

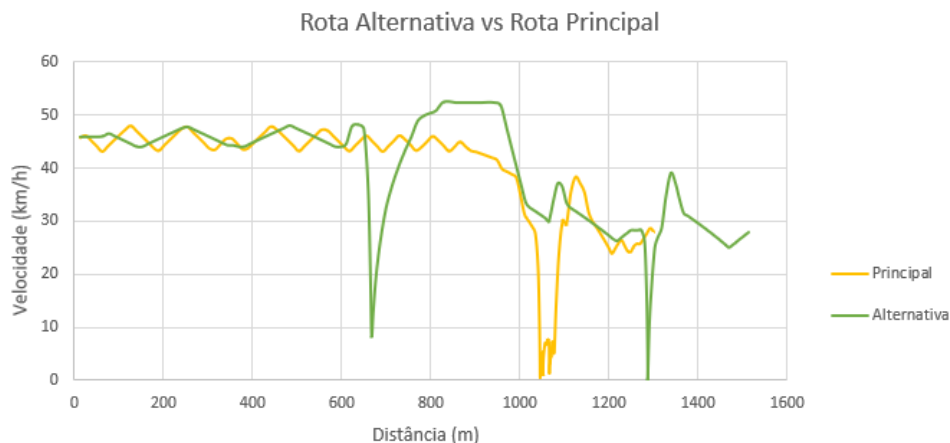


Figura 133. Velocidade em função da distância, para cada uma das rotas.

Quanto aos restantes custos, a distribuição ótima é de 657 pela via principal e 14 pela alternativa, o que coincide com a solução encontrada no caso da lombas e do STOP, quando se consideram todos os custos. Ainda assim, mesmo sendo iguais os volumes de tráfego em ambos os cenários, neste registaram-se tempos médios de viagem superiores (150,7 segundos), como seria de prever. As emissões de poluentes também são superiores, sendo coincidentes com as registadas no cenário precedente.

Fazendo novamente uma análise global da rede para este cenário, nota-se que o tempo médio de viagem de todos os veículos (134,2s) é praticamente coincidente com o do cenário base (134,4s), sendo, no entanto, ligeiramente superior aos verificados na distribuição ótima para as medidas isoladas (132,3s para a lombas e 132,4 para a cedência de passagem). A emissão total de CO₂ assume um valor de 436,6 quilogramas, um valor superior ao cenário base (+0,16%) e ao cenários com as medidas isoladas (+0,9% relativamente à lombas e +1,1% relativamente à cedência de passagem); quando comparado com o cenário de otimização de tempo de viagem nota-se uma melhoria relevante (-6,4%). A emissão total de NO_x é de 1,17 quilogramas, um valor coincidente com o

verificado no cenário base, e ligeiramente superior aos cenários em que as medidas foram implementadas isoladamente (+0,9%); mais uma vez, notam-se melhorias significativas quando comparado com o cenário de otimização do tempo de viagem (-6,8%).

Na Figura 134, apresenta-se mais uma vez um gráfico com as velocidades de dois veículos que circulam por rotas distintas, em função da distância percorrida; tal como nos anteriores, é possível averiguar a influência das diferentes medidas no comportamento dos condutores, sendo que neste caso a existência do sinal de cedência de passagem obrigou a uma redução quase total da velocidade do veículo (linha verde, por volta dos 1000 metros).

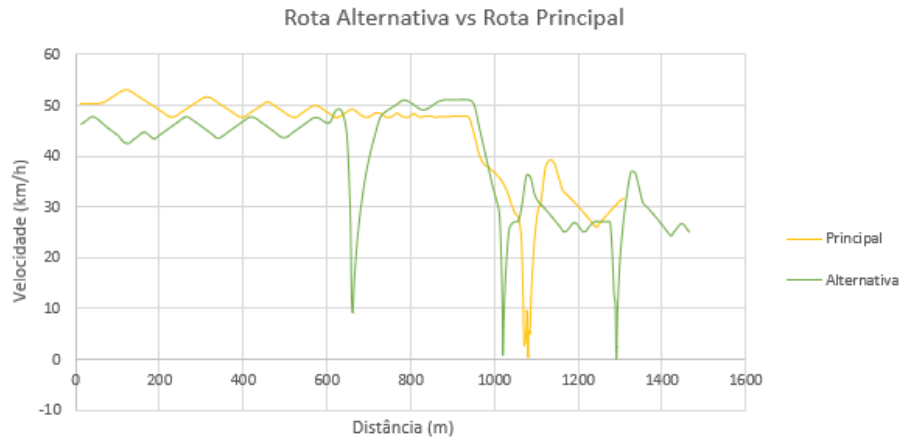


Figura 134. Velocidade em função da distância, para cada uma das rotas.

5.6. Resumo dos resultados

Os resultados apresentados anteriormente revelam que qualquer das medidas implementadas isoladamente tem o efeito pretendido, isto é, reduz o volume de tráfego pela via alternativa (41% para a lombada, 39% para a cedência de passagem e 43% para o STOP). Este efeito é ainda mais evidente se duas delas forem implementadas em conjunto, já que quando se simulou a lombada com a cedência de passagem, a redução de volume de tráfego pela via alternativa assumiu um valor de 67%.

O facto de a distribuição ótima de tráfego tendo em conta os vários custos coincidir para os cenários de implementação da lombada, do STOP e de implementação de ambas as medidas, permite deduzir que se atingiu o “limite” no que à redução de tráfego diz respeito; isto porque, como já restam poucos veículos para demover, seriam necessárias medidas bastante mais drásticas para que isso fosse conseguido.

De seguida, apresentam-se as Tabelas 11-16 que resumem todos os resultados obtidos para os vários cenários simulados.

Tabela 11. Resumo de resultados de Volumes de tráfego e de Tempos médios de viagem (avaliação das rotas principal e alternativa).

Caso		Volumes de tráfego (vph)		Tempo médio de viagem (s)	
		Principal	Alternativa	Principal	Alternativa
Base (5.5.1.)		626	46	128	141,7
Otimização	Tempo (5.5.2.)	527	144	125,8	152
	Custos (5.5.3.)	539	132	124,6	153,8
Lomba (5.5.4.1.)	Tempo	644	27	131,5	147,8
	Custos	657	14	131,8	146,2
Cedência (5.5.4.2.)	Tempo	643	28	129,2	143,7
	Custos	656	15	129,2	143
STOP (5.5.4.2.)	Tempo	645	26	129,4	149,1
	Custos	657	14	129,8	146,9
Ambas (5.5.4.3.)	Tempo	656	15	131,3	151,9
	Custos	657	14	129,4	150,7

Tabela 12. Resumo de resultados de Velocidades médias e de Tempo médio de espera (avaliação das rotas principal e alternativa).

Caso		Velocidade média (km/h)		Tempo médio de espera (s)	
		Principal	Alternativa	Principal	Alternativa
Base (5.5.1.)		35,3	37	11,07	7,16
Otimização	Tempo (5.5.2.)	35,4	36	10,53	5,84
	Custos (5.5.3.)	35,9	35,5	9,31	6,84
Lomba (5.5.4.1.)	Tempo	34,5	35,6	14,43	7,99
	Custos	34,3	37,2	14,91	3,75
Cedência (5.5.4.2.)	Tempo	35,1	36,4	12,08	8,30
	Custos	34,9	38,1	12,32	4,29
STOP (5.5.4.2.)	Tempo	35	35,1	12,4	12,1
	Custos	34,9	35,6	13	12,9
Ambas (5.5.4.3.)	Tempo	34,5	36	14,01	7,84
	Custos	34,9	36,2	12,22	6,89

Tabela 13. Resumo de resultados de Emissão de CO₂ e de NO_x (avaliação das rotas principal e alternativa).

Caso		Emissão de CO ₂ (g)		Emissão de NO _x (g)	
		Principal	Alternativa	Principal	Alternativa
Base (5.5.1.)		222	260,2	0,58	0,69
Otimização	Tempo (5.5.2.)	219,8	288,7	0,58	0,78
	Custos (5.5.3.)	217,7	289,1	0,57	0,78
Lomba (5.5.4.1.)	Tempo	226,1	296	0,59	0,79
	Custos	226,9	296,4	0,59	0,79
Cedência (5.5.4.2.)	Tempo	223,5	268,4	0,58	0,71
	Custos	224,4	265,8	0,58	0,69
STOP (5.5.4.2.)	Tempo	223,6	284	0,58	0,75
	Custos	223,8	279,2	0,58	0,73
Ambas (5.5.4.3.)	Tempo	226,5	303,8	0,59	0,81
	Custos	224	303,8	0,58	0,81

Tabela 14. Resumo de resultados de Emissão de CO₂ e de NO_x, por unidade de comprimento (avaliação das rotas principal e alternativa).

Caso		Emissão de CO ₂ (g/m)		Emissão de NO _x (mg/m)	
		Principal	Alternativa	Principal	Alternativa
Base (5.5.1.)		0.171	0.173	0.446	0.46
Otimização	Tempo (5.5.2.)	0.169	0.192	0.446	0.52
	Custos (5.5.3.)	0.167	0.193	0.438	0.52
Lomba (5.5.4.1.)	Tempo	0.174	0.197	0.454	0.527
	Custos	0.175	0.198	0.454	0.527
Cedência (5.5.4.2.)	Tempo	0.172	0.179	0.446	0.473
	Custos	0.173	0.177	0.446	0.46
STOP (5.5.4.2.)	Tempo	0.172	0.189	0.446	0.5
	Custos	0.172	0.186	0.446	0.487
Ambas (5.5.4.3.)	Tempo	0.174	0.203	0.454	0.54
	Custos	0.172	0.203	0.446	0.54

Tabela 15. Resumo de resultados de Tempos de viagem (avaliação global da rede).

Caso		Tempo total de viagem na rede (h)	Tempo médio de viagem na rede (s)
Base (5.5.1.)		4190,7	134,4
Otimização	Tempo (5.5.2.)	4495,4	144,3
	Custos (5.5.3.)	4894	157,1
Lomba (5.5.4.1.)	Tempo	4281,5	137,3
	Custos	4127	132,3
Cedência (5.5.4.2.)	Tempo	4176,6	133,9
	Custos	4127,5	132,4
STOP (5.5.4.2.)	Tempo	4264	133,5
	Custos	4187,8	134,2
Ambas (5.5.4.3.)	Tempo	4206,3	134,9
	Custos	4185,6	134,2

Tabela 16. Resumo de resultados de Emissões totais de CO₂ e de NO_x (avaliação global da rede).

Caso		Emissão total de CO ₂ (Kg) na rede	Emissão total de NO _x (Kg) na rede
Base (5.5.1.)		435,9	1,17
Otimização	Tempo (5.5.2.)	464,4	1,25
	Custos (5.5.3.)	489	1,33
Lomba (5.5.4.1.)	Tempo	443,6	1,19
	Custos	432,7	1,16
Cedência (5.5.4.2.)	Tempo	435,7	1,17
	Custos	431,8	1,16
STOP (5.5.4.2.)	Tempo	436,3	1,17
	Custos	437	1,17
Ambas (5.5.4.3.)	Tempo	438,8	1,18
	Custos	436,6	1,17

6. Conclusões

Finalizada a realização do trabalho, chega a altura de fazer um resumo das principais contribuições do mesmo, e também das limitações que foram surgindo; no presente capítulo são ainda indicadas perspectivas de trabalho futuro.

6.1. Principais resultados e conclusões

A presente dissertação teve como principal objetivo o estudo do impacto de fenómenos de atravessamento de espaços locais (*rat-running*) na eficiência da rede de transportes. Para isso, o caso de estudo escolhido consistiu num conjunto de vias representativas destes fenómenos, situadas em Aveiro.

Numa primeira fase, fez-se uma análise completa da situação atual com trabalho de campo, através de contagens manuais de volumes de tráfego, e da realização de vários percursos com veículos de teste, cuja dinâmica foi recolhida e tratada, e de onde foi possível retirar as seguintes conclusões:

- em média o tempo de viagem é mais reduzido pela via principal (110 segundos) do que pela via alternativa (126 segundos) → -12,7%;
- as velocidades médias de circulação são ligeiramente superiores pela via alternativa (34,5 km/h) do que pela via principal (33,7 km/h) → +2,4%;
- o perfil de velocidades é mais disperso na via alternativa do que na principal, havendo nesta maiores acelerações e desacelerações;
- as emissões de poluentes (CO₂, NO_x, HC, CO), calculadas através da metodologia VSP, são superiores na via alternativa do que na principal.

Depois, foi utilizada uma plataforma de modelação de tráfego (o VISSIM) que, depois da respetiva calibração e validação, permitiu a simulação de diferentes cenários alternativos, por forma a determinar as diferentes distribuições ótimas de tráfego, recorrendo para isso ao módulo adicional designado *Dynamic Assignment*. De facto, tentou-se explorar ao máximo as potencialidades deste módulo, nomeadamente integrando diferentes custos para comparar a sua influência na distribuição ótima de tráfego. Para facilitar a análise dos dados de saída do VISSIM e para auxiliar o cálculo dos custos associados, recorreu-se ainda a um código em Matlab.

Os resultados das distribuições ótimas de tráfego revelam que:

- há um aumento substancial do número de veículos que optam pela via alternativa; por esse facto, a velocidade média de circulação diminui e o tempo médio de viagem por essa via aumenta relativamente ao cenário inicial; as emissões de CO₂ e de NO_x aumentam;
- este aumento de volumes de tráfego demonstra que se trata de um caso de estudo adequado a estas práticas, já que numa situação ideal, em termos de melhoria do tempo de viagem, seriam muitos mais os veículos que optariam por seguir pela via alternativa;
- quando são inseridos na rede os custos associados a vários fatores de risco (como a segurança, o ruído, o nível de emissões), o número de veículos que segue pela via alternativa diminui.

6.2. Possíveis medidas mitigadoras e recomendações

Um outro objetivo do presente trabalho foi identificar possíveis medidas que possam levar os condutores a preferir a rota alternativa em relação à principal, e avaliar a sua efetividade. Assim, apontam-se as seguintes medidas:

- a inclusão de lombas ou passarelas elevadas em pontos estratégicos (como forma de diminuir as velocidades de circulação);
- a introdução de um sinal de cedência de passagem ou de STOP na interseção com a rua do Crasto (como forma de aumentar tempos de espera e dificultar/atrasar o acesso à rotunda);
- o corte total da via, que é uma medida drástica e que impede qualquer circulação pela via alternativa (exceto moradores); naturalmente esta é uma medida eficaz, mas que não é tão interessante no âmbito do estudo que se pretende realizar, uma vez que deixa de haver uma base de comparação entre ambas as rotas

Deste modo, optou-se por simular e avaliar os dois primeiros conjuntos de medidas, bem como um terceiro cenário em que duas delas são implementadas em conjunto. As principais conclusões a retirar são:

- quando implementadas a solo, a introdução do sinal de STOP assume-se como a solução mais eficaz, já que os tempos médios de viagem neste cenário são 6 segundos superiores aos verificados com a cedência de passagem e 2 segundos do que os verificados com a lomba; o seu maior impacto traduz-se também no tempo médio de espera que é superior aos restantes cenários e na velocidade média de circulação que assume um valor mais baixo, o que seria o efeito pretendido
- a implementação da lomba redutora de velocidade revela-se a segunda medida mais eficaz, já que o tempo médio de viagem atinge um valor 4 segundos superior ao verificado com a cedência de passagem; o seu maior impacto traduz-se também no nível de emissões que é superior relativamente às restantes medidas, quer para o CO₂ quer para o NO_x;
- a cedência de passagem é uma medida com o potencial de implicar a paragem dos veículos no entanto, muitas das vezes isso não se verifica (por não coincidirem com veículos provenientes da Rua do Crasto, e que passam a ter prioridade); logo, nestes casos, esta medida não implica uma paragem completa do veículo (como é o caso do sinal de STOP) ou uma redução de velocidade tão grande como a lomba redutora de velocidade, cujo impacto na velocidade dos veículos é sempre o mesmo, sob pena de os danificarem;
- quando duas delas são aplicadas em conjunto, tem-se naturalmente um tempo de viagem ainda maior, bem como os níveis de emissões; ainda assim, os volumes de tráfego da distribuição que tem em conta todos os custos são equivalentes aos registados na mesma circunstância, apenas com a lomba e apenas com o STOP; logo, pode dizer-se que se atingiu o “equilíbrio”, isto é, que para demover os restantes veículos que ainda optam pela via alternativa (14) seriam necessárias medidas mais drásticas.

Posto isto, percebe-se que há diferenças evidentes entre as diferentes medidas, pelo que é necessária uma análise cuidada dos benefícios e contrapartidas de cada uma, para que se possa tomar a melhor decisão. No seguimento do que foi estudado ao longo deste trabalho, e no sentido de implementação de uma medida de forma isolada, recomenda-se como medida mais eficaz a introdução de um sinal de STOP no cruzamento com a Rua do Crasto, pois se trata daquela que tem um maior impacto no tempo de viagem o que, como visto previamente, é o fator a que os

condutores dão mais importância aquando da escolha de rota; deste modo, e como os resultados deste estudo indicam, trata-se da medida com maior potencial para atingir o efeito pretendido, isto é, desencorajar atos de *rat-running*. No entanto, é relevante notar que neste caso o nível de emissões associadas é superior, quer para o CO₂ quer para o NO_x, quando comparado, por exemplo, com a introdução de uma cedência de passagem no mesmo cruzamento. De facto, esta última medida de sinalização vertical, embora não tenha o mesmo impacto em termos de desvio de tráfego, apresenta menores níveis de emissões, quer numa perspetiva de análise da rota alternativa em particular, quer numa perspetiva de análise global da rede.

6.3. Limitações do estudo e Trabalho futuro

A realização do presente trabalho permitiu identificar uma zona onde se dá a ocorrência de fenómenos de *rat-running* e apresentar uma análise detalhada da mesma, bem como do impacto de possíveis medidas mitigadoras. No entanto, o facto de a rede em questão ser relativamente pequena (em termos de extensão) e dos volumes de tráfego a ela associados (particularmente pela via alternativa) se terem revelado não muito elevados faz com que haja uma certa limitação na perceção do real impacto das medidas mitigadoras sugeridas. Assim, um possível trabalho futuro seria aplicar um estudo semelhante a este em outros casos, onde se verifiquem maiores volumes de tráfego, para que a implementação de medidas possa vir a ter um maior impacto para o efeito que se pretende.

7. Referências

- Adjei, E., & Behrens, R. (Julho de 2012). Travel Behaviour Change Theories and Experiments: a review and synthesis. *31st Annual Southern African Transport Conference*.
- Ahn, K., & Rakha, H. (Maio de 2008). The effects of route choice decisions on vehicle energy consumption and emissions. *Transportation Research Part D*, 3, pp. 151-167.
- Albatroz, G. (2005). Mobilidade Urbana Sustentável: O impacte das empresas e dos seus trabalhadores.
- ANSR - Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária. (2017). Relatório Anual de Sinistralidade Rodoviária.
- APA - Agência Portuguesa do Ambiente. (30 de Janeiro de 2019). *Relatório do Estado do Ambiente*. (Agência Portuguesa do Ambiente) Acedido em Março de 2019, <https://rea.apambiente.pt/content/transporte-de-passageiros>
- Araújo, M., Oliveira, J., Jesus, M., Sá, N., Santos, P., & Lima, T. (2011). Transporte Público Coletivo: Discutindo Acessibilidade, Mobilidade e Qualidade de Vida. *Psicologia & Sociedade*, 23, pp. 574-582.
- Ariën, C., Brijs, K., Brijs, T., Ceulemans, W., Vanroelen, G., Jongen, E., . . . Wets, G. (Janeiro de 2014). Does the effect of traffic calming measures endure over time? – A simulator study on the influence of gates. *Transportation Research Part F*, 22, pp. 63-75.
- Arnott, R., & Small, K. (1994). The Economics of Traffic Cogestion. *American Scientist*, 82(5), pp. 446-455.
- ATAP - Australian Transport Assessment and Planning. (30 de Outubro de 2017). Acedido em Março de 2019, <https://atap.gov.au/tools-techniques/travel-demand-modelling/2-overview.aspx>
- AutoData.Net. (Wiki Automotive Catalog) Acedido em Outubro de 2019, <https://www.auto-data.net/en/toyota-aygo-ii-facelift-2018-1.0-vvt-i-72hp-32810>
- AutoData.Net. (Wiki Automotive Catalog) Acedido em Outubro de 2019, <https://www.auto-data.net/en/toyota-yaris-iii-facelift-2017-1.5-dual-vvt-ie-111hp-29031>
- Baker, L. (2009). Removing Roads and Traffic Lights Speeds Urban Travel. *Scientific American*, pp. 20-21.
- Base de Dados Portugal Contemporâneo. (2009). (Fundação Francisco Manuel dos Santos) Acedido em Março de 2019, <https://www.pordata.pt/DB/Ambiente+de+Consulta/Nova+Consulta>
- BCG - Boston Consulting Group, (Abril de 2017). European Mobilities Observatory. *The expectations of Europeans in terms of mobility*.
- Black, J. (1981). *Urban Tranport Planning*. Routledge.

- Boulter, P., & Webster, D. (1997). Traffic calming and vehicle emissions: A literature review. *Transport Research Laboratory*.
- Carvalho, D. (2011). Escolha de Rotas - Influência da hora de ponta nos consumos e emissões. *Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro, Engenharia Mecânica*.
- Chang, K.-t., Khatib, Z., & Ou, Y. (2002). Effects of zoning structure and network detail on traffic demand modeling. *Environment and Planning B: Planning and design*, 29, pp. 37-52.
- Chiu, Y., Bottom, J., Mahut, M., Paz, A., Balakrishna, R., Wsller, T., & Hicks, J. (2011). Dynamic Traffic Assignment - A Primer. *Transportation Research Board of the National Academies*.
- Coelho, M. C., Fontes, T., Bandeira, J. M., Pereira, S., Tchepel, O., Dias, D., . . . Borrego, C. (2013). Assessment of potential improvements on regional air quality modelling related with implementation of a detailed methodology for traffic emission estimation. *Science of the Total Environment*, 470, pp. 127-137.
- Coelho, M. C., Frey, H., Roupail, N., Zhai, H., & Pelkmans, L. (2009). Assessing methods for comparing emissions from gasoline and diesel light-duty vehicles based on microscale measurements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14, pp. 91-99.
- Coelho, R. (2015). *FRATAR, Engenharia Consultiva*. Acedido em 15 de Maio de 2019, www.fratar.com.br/servicos/estudos-de-trafego-e-transportes/microsimulacao-de-trafego/
- Cormen, T., Leiserson, C., Rivest, R., & Stein, C. (2001). Introduction to Algorithms. 6.
- Correa, J., & Stier-Moses, N. (Fevereiro de 2011). Wardrop Equilibria. *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*.
- Costa, A. (2008). Correntes de Tráfego. *Manual do Planeamento de Acessibilidades e Transportes*.
- Council, D. (1991). Traffic Calming Guidelines. *Engineering and Planning*.
- Debney, P. (2014). Braess' Paradox - or why improving something can make it worse.
- Dial, R. (1971). A Probabilistic Multipath Traffic Assignment Model Which Obviates Path Enumeration. *Transportation Research*, 5, 83-111.
- Domenichini, L., Branzi, V., & Smorti, M. (2019). Influence of drivers' psychological risk profiles on the effectiveness of traffic calming measures. *Accident Analysis and Prevention*, 123, pp. 243-255.
- Dowling, R., Skabardonis, A., & Alexiadis, V. (Julho de 2004). Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software. *Traffic Analysis Toolbox* .
- Duffel, J., & Carden, P. (Novembro de 1983). Car driver route choice: a perception study of the 'rat running' phenomenon at St. Albans, Hertfordshire. *Traffic Engineering and Control*, 24, pp. 520-527.
- Duffell, J., & Kalombaris, A. (Agosto de 1988). Empirical Studies of Car Driver Route Choice in Hertfordshire. *Traffic Engineering and Control*, 29, pp. 398-408.
- EC. (2017). Commission Regulation (EU) 2017/1151. *Official Journal of the European Union*.

- EPA - Environmental Protection Agency. (Outubro de 2002). Methodology for Developing Modal Emission Rates for EPA's Multi-Scale Motor Vehicle and Equipment Emission System. *Air and Radiation*.
- Essen, H., Wijngaarden, L., Schroten, A., Sutter, D., Bieler, C., Maffii, S., . . . Beyrouthy, K. (2019). Handbook on the external costs of transport - Version 2019. *European Commission*.
- Fellendorf, M., & Vortisch, a. P. (2010). Microscopic traffic flow simulator VISSIM. *Fundamentals of traffic simulation*, 63-93.
- Fernandes, P., Vilaça, M., E.Macedo, Sampaio, C., Bahmankhah, B., Bandeira, J., . . . Coelho, M. C. (Novembro de 2019). Integrating road traffic externalities through a sustainability indicator. *Science of the Total Environment*, 691, pp. 483-498.
- Ferreira, S. (2010). A Segurança Rodoviária no Processo de Planeamento de Redes. *Dissertação para Doutoramento em Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*.
- Franco, V., Kousoulidou, M., Muntean, M., Ntziachristos, L., Hausberger, S., & Dilara, P. (2013). Road vehicle emission factors development: A review. *Atmospheric Environment*, 70, pp. 84-97.
- Frey, H., Unal, A., Roupail, N., & Colyar, J. (2003). On-road measurement of vehicle tailpipe emissions. *Journal of the Air and Waste Management Association.*, 53, pp. 992-1002.
- García, A., Torres, A., Romero, M., & Moreno, A. (2011). Traffic Microsimulation Study to Evaluate the Effect of Type and Spacing of Traffic Calming Devices on Capacity. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 16, pp. 270-281.
- Ghafghazi, G., & Hatzopoulou, M. (2014). Simulating the environmental effects of isolated and area-wide traffic calming schemes using traffic simulation and microscopic emission modeling. *Transportation*, 41, pp. 633-649.
- Goldberg, A. Basic Shortest Path Algorithms. *DIKU Summer School on Shortest Paths*.
- Gomes, G. (2004). Uso de Microsimulação na Avaliação da Sustentabilidade de Corredores Rodoviários. *Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo*.
- Gonzalo-Orden, H., Rojo, M., Pérez-Acebo, H., & Linares, A. (2016). Traffic calming measures and their effect on the variation of speed. *Transportation Research Procedia*, 18, pp. 349-356.
- Gonzalo-Orden, H., Pérez-Acebo, H., Unamunzaga, A., & Arcea, M. (2018). Effects of traffic calming measures in different urban areas. *Transportation Research Procedia*, 33, pp. 83-90.
- Hall, P. (2002). *Urban and Regional Planning*. Routledge.
- Hallmark, S., Peterson, E., Fitzsimmons, E., Hawkins, N., & Resler, J. (Outubro de 2007). Evaluation of Gateway and Low-Cost Traffic-Calming Treatments for Major Routes in Small Rural Communities. *InTrans Project Reports*, 30.
- Hashimoto, S., Yoshiki, S., Saeki, R., Mimura, Y., Ando, R., & Nanba, S. (2016). Development and application of traffic accident density estimation models using kernel density estimation. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 3, pp. 262-270.

- Hennessy, D., & Wiesenthal, D. (1999). Traffic Congestion, Driver Stress, and Driver Aggression. *Aggressive Behaviour*, 25, pp. 409-423.
- Hui, C. (2014). Application Study of All-or-Nothing Assignment Method for Determination of Logistic Transport Route in Urban Planning. *Computer Modelling & New Technologies*, 18, 932-937.
- Humphrey, M., Dona, S., Singh, A., & Swe, T. (Maio de 2016). A Comparison of Traffic Performance in Highly Congested Urban Areas. *International Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 5, pp. 47-63.
- INE - Instituto Nacional de Estatística. (2012). Censos 2011: Resultados Definitivos- Portugal. *Lisboa-Portugal*.
- INE - Instituto Nacional de Estatística. (2018). Estatísticas dos Transportes e Comunicações 2017.
- InIR - Instituto de Infraestruturas Rodoviárias. (s.d.). Medidas Individuais Aplicadas em Atravessamentos de Localidades. *Medidas de Acalmia de Tráfego*, 1.
- TomTom International (2019). *TomTom Traffic Index*. Obtido de https://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex/.
- Jamson, S., & Lai, F. (2011). Are Novelty Effects of Road Safety Treatments Observable in Simulator Experiments? *Transportation Research Board*.
- Jateikienė, L., Andriejauskas, T., Lingytė, I., & Jasiūnienė, V. (2016). Impact assessment of speed calming measures on road safety. *Transportation Research Procedia*, 14, pp. 4228-4236.
- Jazcilevich, A., Vázquez, J., Ramírez, P., & Pérez, I. (Maio de 2015). Economic-environmental analysis of traffic-calming devices. *Transportation Research Part D*, 36, pp. 86-95.
- Jeihani, M. (2007). A Review of Dynamic Traffic Assignment Computer Packages. *Journal of the Transportation Research Forum*, 46, pp. 34-46.
- Jóźwicka, M. (2016). Veículos elétricos: rumo a um sistema de mobilidade sustentável.
- Kojima, A., & Kubota, H. (2000). Effectiveness of Awareness Campaign on Rat-runners: Application of Mobility Management Methodology to Through Traffic Problems. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 7.
- Kojima, A., Elfferding, S., & Kubota, H. (2013). Intelligent Rat-Runners: Impact of Car Navigation Systems on Safety of Residential Roads.
- Korzhenevych, A., Dehnen, N., Bröcker, J., Holtkamp, M., Meier, H., Gibson, G., . . . Cox, V. (2014). Update of the Handbook on External Costs of Transport .
- Kousoulidou, M., Fontaras, G., Bonnel, L., Samaras, Z., & Dilara, P. (2013). Use of portable emissions measurement system (PEMS) for the development and validation of passenger car emission factors. *Atmospheric Environment*, 64, pp. 329-338.
- Kuang, Y., Yen, B., Suprun, E., & Sahin, O. (2019). A soft traffic management approach for achieving environmentally sustainable and economically viable outcomes: An Australian case study. *Journal of Environmental Management*, 237, pp. 379-386.

- Kubota, H., Koyama, S., Iwazaki, N., & Monji, T. (1995). Can we protect our neighborhood from Intelligent "Rat-Runs"?
- Kumar, S. (2017). Traffic Flow Prediction using Kalman Filtering Technique. *Procedia Engineering*, 187, pp. 582-587.
- Kwak, S., & Kim, J. (2017). Central limit theorem: the cornerstone of modern statistics. *Korean Journal of Anesthesiology*, 70, pp. 144-156.
- Lopes, R. (2016). Desenvolvimento de modelos de transporte num contexto de escassez de dados- O caso da cidade da Praia. *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Planeamento e Operações de Transporte, Instituto Superior Técnico de Lisboa*.
- Macedo, E., Tomás, R., Fernandes, P., Coelho, M. C., & Bandeira, J. M. (2019). Quantifying road traffic emissions embedded in a multi-objective traffic assignment model. *Transportation Research Procedia*.
- Muniruzzaman, S., Orvin, M., Hadiuzzaman, M., Wasif, S., & Nasrin, S. (2019). Investigating Network Efficiency Improvement Measures Using Simulation Technique in Mirpur Area. *International Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 8, pp. 8-17.
- Nagy, A., & Simon, V. (Outubro de 2018). Survey on traffic prediction in smart cities. *Pervasive and Mobile Computing*, 50, pp. 148-163.
- Ng, L. (2012). Volume 2: Strategic Modelling. *Transport Modelling Guidelines*.
- Oliveira, R. (2014). Indicadores de Desempenho de Tráfego Utilizando Microsimulação: estudo de caso das alterações viárias na região central da cidade do Rio de Janeiro. *Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro*.
- Oliveira, S. (2016). Calibração de modelos de microsimulação de tráfego para análise de interseções urbanas. *Tese de Mestrado, Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação*.
- Olstam, J., & Tapani, A. (2004). Comparison of Car-following models. *Swedish National Road and Transport Research Institute*, 960.
- OMS - Organização Mundial de Saúde. (2015). Relatório Global Sobre o Estado da Segurança Viária. *Informes sobre a situação mundial da segurança no trânsito*.
- Papinski, D., Scott, D., & Doherty, S. (2009). Exploring the route choice decision-making process: A comparison of planned and observed routes obtained using person-based GPS. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 12, pp. 347-358.
- Peixoto, E., & Teixeira, P. (Junho de 2012). Os Impactos do Automóvel no Meio Ambiente. *EcoDebate - Site de informações, artigos e notícias socioambientais*.
- Pereira, J. (2013). Medidas de acalmia de tráfego em áreas urbanas consolidadas: Um caso no concelho do Seixal. *Dissertação de Mestrado em Metropolição, Planeamento Estratégico e Sustentabilidade*.
- Picado, J. (2010). Teoria dos Grafos. *Estruturas Discretas, Textos de Apoio*.

- Polloni, S. (Janeiro de 2019). Traffic calming and neighborhood livability: Evidence from housing prices in Portland. *Regional Science and Urban Economics*, 74, pp. 18-37.
- Polson, N., & Sokolov, V. (Junho de 2017). Deep learning for short-term traffic flow prediction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 79, pp. 1-17.
- Priya, K., Shankar, K., Prasad, C., & Reddy, T. (2013). Evaluation of Area Traffic Management Measures using Microscopic Simulation Model. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, pp. 815-824.
- PTV. (2018). PTV Vissim 11 - User Manual. PTV AG, Karlsruhe, Germany.
- PTV Group. (PTV Group) Acedido em 17 de Maio de 2019, <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-vissim/>
- Quaassdorff, C., Borge, R., Pérez, J., Lumbreras, J., Paz, D., & Andrés, J. (2016). Microscale traffic simulation and emission estimation in a heavily trafficked roundabout in Madrid (Spain). *Science of the Total Environment*, 566, pp. 416-427.
- Rapoport, A., Kugler, T., Dugar, S., & Gisches, E. (2009). Choice of routes in congested traffic networks: Experimental tests of the Braess Paradox. *Games and Economic Behavior*, 65, pp. 538-571.
- Ratrout, N., & Rahman, S. (Abril de 2019). A comparative analysis of currently used microscopic and macroscopic traffic simulation software. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 34, pp. 121-133.
- Recio, A., Linares, C., Banegas, J., & Díaz, J. (2016). Road traffic noise effects on cardiovascular, respiratory and metabolic health: An integrative model of biological mechanisms. *Environmental Research*, 146, pp. 359-370.
- Ribeiro, T. (2015). Metodologia para Avaliação de Níveis de Desempenho em Redes de Transporte Público Rodoviário. *Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Engenharia Civil*.
- Rodrigues, P. (2010). Potencial de Aplicação de Medidas de Acalmia de Tráfego na Transformação do Ambiente Rodoviário- o caso do atravessamento de localidades. *Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro*.
- Rossetti, R., Rocha, A., Pereira, A., Silva, P., & Fernandes, T. (Março de 2011). Algoritmos em Grafos: Caminho mais curto.
- Samaras, C., Tsokolis, D., Toffolo, S., Magra, G., Ntziachristosa, L., & Samaras, Z. (2018). Improving fuel consumption and CO2 emissions calculations in urban areas by coupling a dynamic micro traffic model with an instantaneous emissions model. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 65, pp. 772-783.
- Sampaio, C., Bandeira, J. M., Macedo, E., Vilaça, M., Guarnaccia, C., Friedrich, B., . . . Coelho, M. C. (2019). A Dynamic Link-based Eco-indicator for supporting equitable traffic management strategies. *Transportation Research Procedia*, 37, pp. 43-50.

- Santos, G., Behrendt, H., Maconi, L., Shirvani, T., & Teytelboym, A. (2010). Part I: Externalities and economic policies in road transport. *Research in Transportation Economics*, 28, pp. 2-45.
- Santos, H., & Rangel, A. (s.d.). Aplicação do algoritmo de Dijkstra para o problema de roteamento da frota de táxis partindo de um ponto fixo.
- Seco, A., Antunes, A., Costa, A., & Silva, A. (2008). Princípios Básicos de Organização de Redes Viárias. *Manual do Planeamento de Acessibilidades e Transportes*.
- Seco, Á., Ferreira, S., Silva, A., & Costa, A. (2008). Segurança Rodoviária. *Manual do Planeamento de Acessibilidades e Transportes*.
- Seco, Á., Ribeiro, A., Macedo, J., & Silva, A. (2008). Acalmia de Tráfego. *Manual do Planeamento de Acessibilidades e Transportes*.
- Silva, A. (2014). Quantificação de custos externos ambientais no sector dos transportes rodoviários: Aplicação a veículos pesados de mercadorias. *Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Território e Gestão do Ambiente*.
- Silva, A., & Seco, A. (Dezembro de 2015). Zonas 30 e de Coexistência - Conceitos e Disposições Técnicas. *Edição ANSR (Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária)*.
- Silva, A., Vasconcelos, L., Correia, G., & Santos, S. (2013). Microssimulação Aplicada aos Estudos de Acessibilidade. *7º Congresso Rodoviário Português*.
- So, J., Motamedidehkordi, N., Wu, Y., Busch, F., & Choi, K. (2018). Estimating emissions based on the integration of microscopic traffic simulation and vehicle dynamics model. *International Journal of Sustainable Transportation*, 12, pp. 286-298.
- T&E - Transport & Environment. (Julho de 2019). Carmakers' electric car plans across Europe 2019-2025. *European Federation for Transport and Environment*.
- Tafidis, P., Macedo, E., Teixeira, J., Coelho, M. C., & Bandeira, J. (Abril de 2018). Evaluation and comparative analysis of road transport emissions evolution in different European countries: The case studies of Portugal, Romania, Spain, and Sweden. *Proceedings of 7th Transport Research Arena*.
- Tarrant, A. (2016). Rat-Running through Walmer Estate, University Estate and Upper Woodstock during the PM Peak Period. *Minor Dissertation, University of Cape Town*.
- Tavares, J., & Pereira, J. (2015). Modelos de Simulação e de Previsão de Tráfego. *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*.
- Thomson, R., & Richardson, D. (Setembro de 1995). A Graph Theory Approach to Road Network Generalization. *Proceeding of the 17th international cartographic conference*, pp. 1871-1880.
- Tian, Y., Zhang, K., Li, J., Lin, X., & Yang, B. (Novembro de 2018). LSTM-based traffic flow prediction with missing data. *Neurocomputing*, 318, pp. 297-305.

- Tomás, R. (2018). Incorporação de rota de atravessamento para veículos autónomos em ferramentas de modelação. *Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro, Engenharia Mecânica*.
- Traffic Choices*. (2014). (City of Bristol) Acedido em Dezembro de 2019, <https://www.trafficchoices.co.uk/rat-running.shtml>
- Vasconcelos, L., Seco, Á., & Silva, A. (2013). Comparison of procedures to estimate critical headways at roundabouts. *Promet-Traffic & Transportation*, 25, pp. 43-53.
- Viegas, J. (2010). O Modelo de 4 passos: Escolha Modal e Afectação de Tráfego. *Instituto Superior Técnico, Mestrado Integrado em Engenharia Civil*.
- Viegas, J. (2010). O Modelo de 4 passos: Geração e Distribuição. *Instituto Superior Técnico, Mestrado Integrado em Engenharia Civil*.
- Vlieger, D., Keukeleere, D., & Kretzschmar, J. (2000). Environmental effects of driving behaviour and congestion related to passenger cars. *Atmospheric Environment*, 34, pp. 4649-4655.
- Wang, Y., Szeto, W., Han, K., & Friesz, T. (2018). Dynamic traffic assignment: A review of the methodological advances for environmentally sustainable road transportation applications. *Transportation Research Part B: Methodological*, 111, pp. 370-394.
- Xie, F., & Levinson, D. (2007). Measuring the Structure of Road Networks. *Geographical Analysis*, 39, pp. 336–356.
- Yang, B., Sun, S., Li, J., Lin, X., & Tian, Y. (Março de 2019). Traffic flow prediction using LSTM with feature enhancement. *Neurocomputing*, 332, pp. 320-327.
- Yu, H., Liu, P., Huand, J., & Zhang, X. (2011). Developing the Simulation Module of Traffic Operations in Vicinity of Speed Bumps on Highways in VISSIM. *ICCTP 2011: Towards Sustainable Transportation Systems.*, pp. 2375-2384.
- Zhang, K., Batterman, S., & Dion, F. (2011). Vehicle emissions in congestion: Comparison of work zone, rush hour and free-flow conditions. *Atmospheric Environment*, 45, pp. 1929-1939.
- Zhou, X., Tanvir, S., Lei, H., Taylor, J., Liu, B., Roupail, N., & Frey, H. (2015). Integrating a simplified emission estimation model and mesoscopic dynamic traffic simulator to efficiently evaluate emission impacts of traffic management strategies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 37, pp. 123-136.

Anexo I - Contagens detalhadas dos volumes de tráfego

- Ponto de filmagem 1 (Cruzamento- Via alternativa e Rua do Crasto)

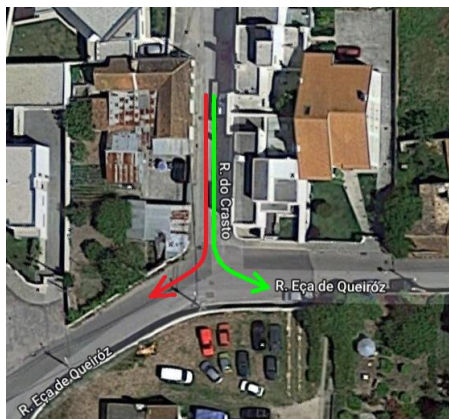


Figura 135. Ilustração de trajetos possíveis no ponto de filmagem 1. Fonte Google Maps.



Figura 136. Ilustração de trajetos possíveis no ponto de filmagem 1. Fonte: Google Maps.

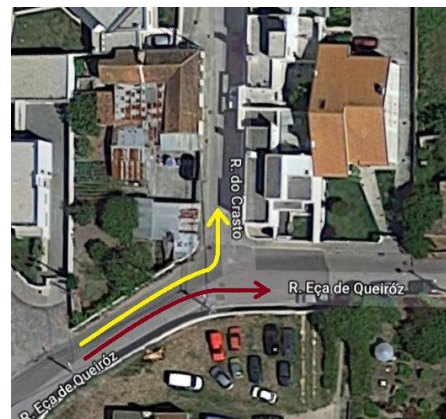


Figura 137. Ilustração de trajetos possíveis no ponto de filmagem 1. Fonte: Google Maps.

		Número de Veículos						
Percurso		1	2	3	4	5	6	
Cor								
Trajeto		Rua do Crasto → Rua Eça de Queirós (Sul)	Rua do Crasto → Rua Eça de Queirós (Norte)	Rua Eça de Queirós (Norte) → Rua do Crasto	Rua Eça de Queirós (Norte) → Rua Eça de Queirós (Sul)	Rua Eça de Queirós (Sul) → Rua do Crasto	Rua Eça de Queirós (Sul) → Rua do Eça de Queirós (Norte)	
13/05	Período	Hora de início de filmagem: 18h00						
		0-15 min	71	3	4	14	20	0
		15-30 min	65	0	8	11	15	3
		30-45 min	82	2	7	22	26	1
		45-60 min	82	3	9	18	21	1
		60-75 min	71	4	7	11	24	3
		75-90 min	71	0	5	7	7	1
		Total	442	12	40	83	113	9
		Total/h	295	8	27	55	75	6
				Hora de fim de filmagem: 19h15				

14/05	Período	Hora de início de filmagem: 17h15						
		0-15 min	55	0	5	7	13	0
		15-30 min	55	1	9	10	20	1
		30-45 min	69	1	3	16	26	2
		45-60 min	85	1	5	12	19	3
		60-75 min	72	3	6	19	28	0
		75-90 min	70	3	2	20	22	1
		90-105 min	81	6	3	12	15	0
		Total	487	15	33	96	143	7
		Total/h	278	9	19	55	82	4
Hora de fim de filmagem: 19h00								
15/05	Período	Hora de início de filmagem: 17h30						
		0-15 min	56	1	5	18	13	3
		15-30 min	51	1	7	16	19	2
		30-45 min	66	0	5	17	25	2
		45-60 min	81	5	7	16	23	2
		60-75 min	63	1	11	10	25	6
		75-90 min	59	3	10	19	23	2
		Total	376	11	45	96	128	17
		Total/h	251	7	30	64	85	11
		Hora de fim de filmagem: 19h00						

• Ponto de filmagem 2 (Rotunda)



Figura 138. Ilustração de trajetos possíveis no ponto de filmagem 2. Fonte: Google Maps.



Figura 139. Ilustração de trajetos possíveis no ponto de filmagem 2. Fonte: Google Maps.

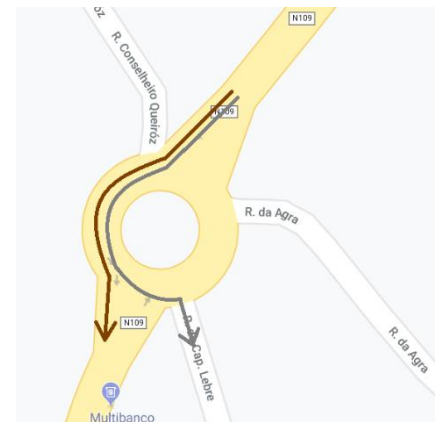


Figura 140. Ilustração de trajetos possíveis no ponto de filmagem 2. Fonte: Google Maps.

		Número de Veículos						
Percurso	1	2	3	4	5	6	7	
Cor								
Trajeto	Rua Eça de Queiróz → N109 (Sul)	Rua Eça de Queiróz → Rua do Cap. Lebre	Rua Eça de Queiróz → N109 (Norte)	N109 (Sul) → N109 (Norte)	N109 (Sul) → Rua Eça de Queiróz	N109 (Norte) → N109 (Sul)	N109 (Norte) → Rua do Cap. Lebre	
14/05*	Hora de início de filmagem: 17h15							
	0-15 min	15	20	27	133	4	159	48
	15-30 min	13	18	43	149	5	155	48
	30-45 min	12	25	43	162	12	165	52
	45-60 min	25	22	50	130	6	153	47
	60-75 min	19	27	54	145	4	152	36
	75-90 min	22	27	37	120	7	149	47
	90-105 min	23	36	30	129	7	163	49
	Total	129	175	284	968	45	1096	327
	Total/h	74	100	162	553	26	626	187
Hora de fim de filmagem: 19h00								

15/05	Hora de início de filmagem: 17h30							
	0-15 min	15	16	36	121	1	160	59
	15-30 min	19	12	33	137	5	159	48
	30-45 min	13	22	53	96	13	159	53
	45-60 min	15	34	55	123	11	162	44
	60-75 min	14	26	53	154	8	165	46
	75-90 min	16	22	25	129	13	189	43
	Total	92	132	255	760	51	994	293
	Total/h	61	88	170	507	34	663	195
Hora de fim de filmagem: 19h00								

*Não foi possível obter as contagens para o primeiro dia, pois a câmara de filmar não ficou posicionada corretamente (falta de tripé).

Anexo II- Gráficos de restantes poluentes

- CO

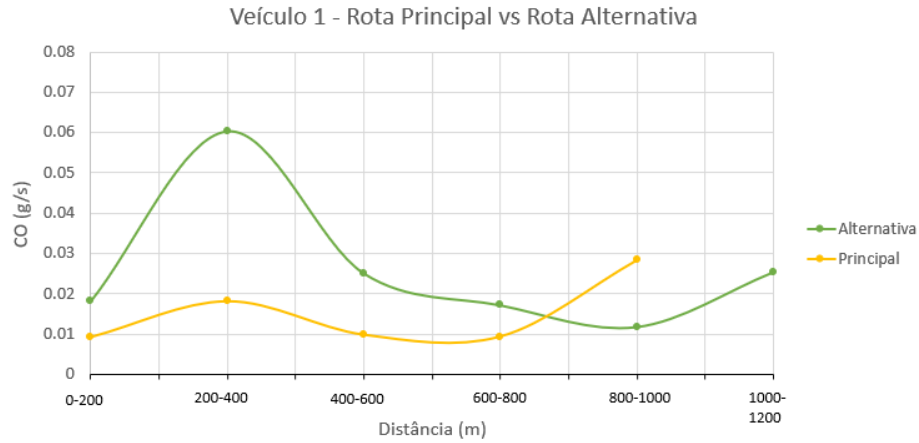


Figura 141. Média das taxas de emissão de CO de todas as viagens.

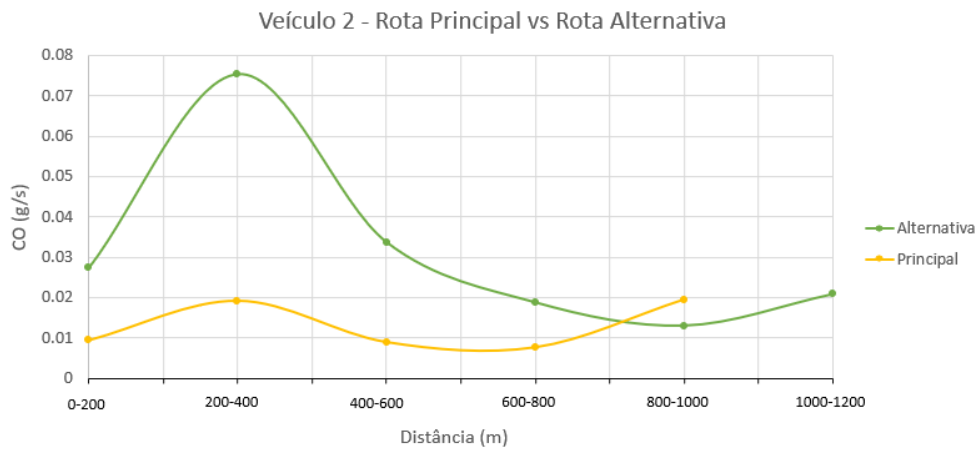


Figura 142. Média das taxas de emissão de CO de todas as viagens.

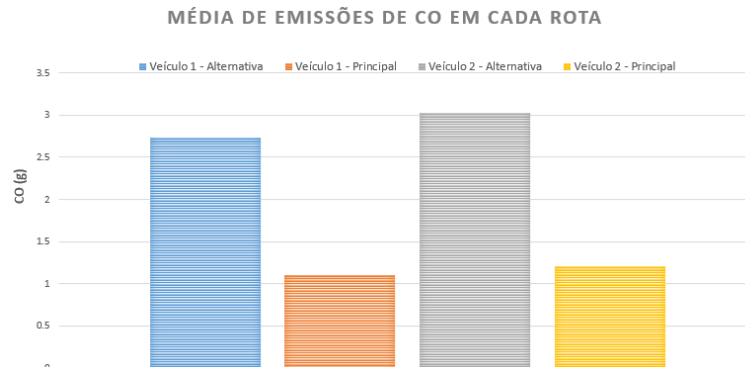


Figura 143. Emissões acumuladas de emissão de CO, de todas as viagens.

• HC

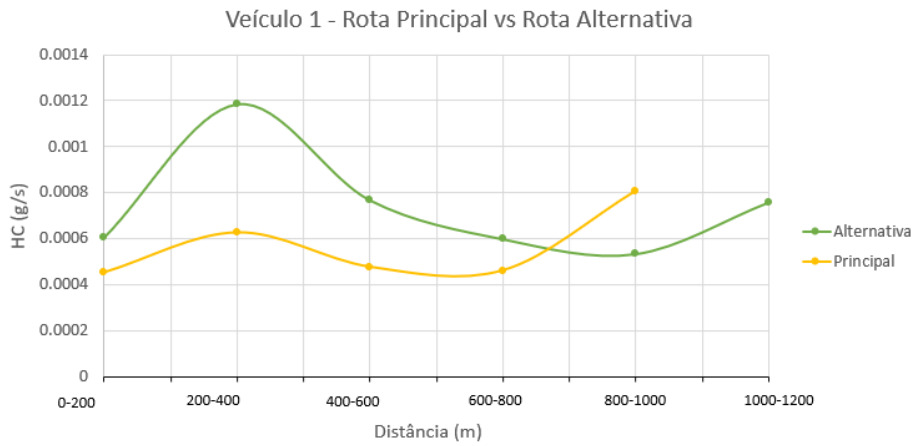


Figura 144. Média das taxas de emissão de HC de todas as viagens.

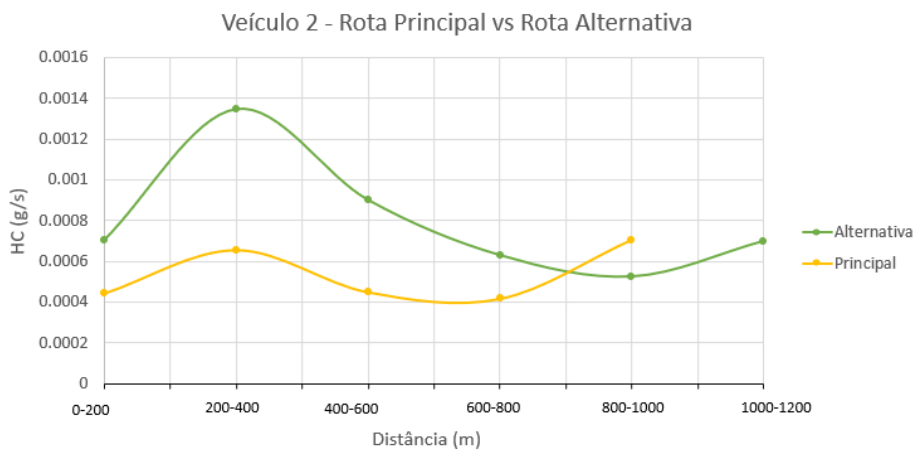


Figura 145. Média das taxas de emissão de HC de todas as viagens.

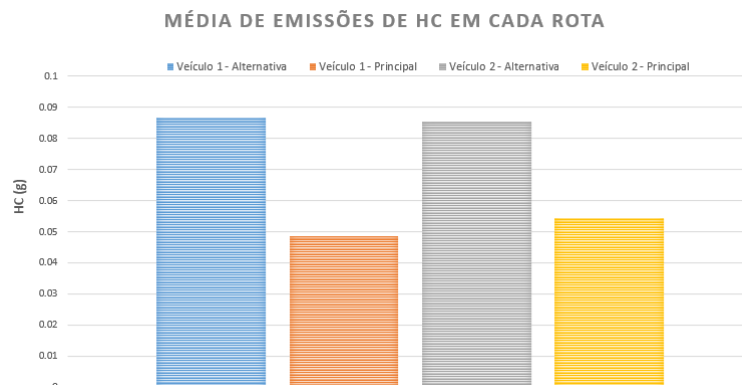


Figura 146. Emissões acumuladas de emissão de HC, de todas as viagens.