



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
Ano 2013

**MÁRIO ANDRÉ
AMARO VASCO**

**ANÁLISE ENERGÉTICO-AMBIENTAL DE
ROTUNDAS**



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
Ano 2013

**MÁRIO ANDRÉ
AMARO VASCO**

**ANÁLISE ENERGÉTICO-AMBIENTAL DE
ROTUNDAS**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Margarida Isabel Cabrita Marques Coelho, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais, à minha irmã e à minha namorada por todo o apoio e compreensão.

O júri

Presidente

Professor Doutor José Paulo Oliveira Santos
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Orientadora

Professora Doutora Margarida Isabel Cabrita Marques Coelho
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

Professora Doutora Ana Maria César Bastos Silva
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Agradecimentos

Aproveito este espaço para agradecer a todas as pessoas que contribuíram para que fosse possível a concretização desta dissertação.

Agradeço à minha orientadora Prof. Margarida Coelho pela forma como orientou o meu trabalho e pelo apoio e ajuda prestada. Assim como ao Eng. Paulo Fernandes por toda a ajuda conferida e por todo auxílio.

Um agradecimento especial à minha família e à minha namorada pelo apoio inesgotável, motivação e força.

Este trabalho foi financiado por fundos FEDER Funds através do Programa Operacional “Factores de Competitividade – COMPETE” e por fundos Nacionais através da Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito do projeto AROUND (PTDC/SEN-TRA/122144/2010), e pelo Projeto Estratégico PEst-C/EME/UI0481/2011.

Palavras-chave

Rotunda, Micro-simulação, VISSIM, VSP, Emissões.

Resumo

A implementação de mecanismos de acalmia de tráfego tem sido importante para combater os índices de sinistralidade, onde uma das causas principais é o excesso de velocidade. Uma das soluções passa pela implementação de obstáculos físicos de modo a obrigar o condutor a reduzir a velocidade, exemplo disso é o recurso a rotundas.

Com as rotundas garante-se uma melhoria ao nível de segurança rodoviária, contudo os estudos existentes para avaliar o impacto energético e ambiental de rotundas cingem-se a soluções convencionais de uma via e de várias vias de circulação.

A presente dissertação propõe-se fazer uma análise em termos de capacidade e de emissões de uma rotunda com uma via de circulação localizada na cidade de Coimbra, que apresentava congestionamento num dos seus ramos de acesso, com posterior avaliação de duas alternativas para o mesmo local. A primeira, sugere-se a transformação da atual rotunda de uma via para uma rotunda tradicional de duas vias e, na segunda alternativa, propõe-se a implementação de uma turbo-rotunda. Para atingir os objetivos propostos, recorreu-se ao simulador de tráfego VISSIM para modelar o cenário de referência, que foi calibrado com dados recolhidos experimentalmente e posteriormente validado utilizando como parâmetros de avaliação os volumes de tráfego, os tempos de viagem e a velocidade média. Finalmente, quantificaram-se as emissões de poluentes, que foram estimadas utilizando a metodologia baseada no conceito de potência específica do veículo (VSP).

Com o cenário devidamente validado procedeu-se à análise comparativa dos três cenários, utilizando os tempos de viagem, a velocidade média, modos VSP e emissões dos poluentes CO₂, CO, NOx e HC.

Os resultados obtidos indicam que as duas soluções propostas apresentam melhorias a todos os níveis. Os tempos de viagem diminuíram em cerca de 14 % para ambos os cenários alternativos, consequência de um aumento de velocidade em cerca de 13%. No que diz respeito às emissões, a rotunda de duas vias apresentou-se como a melhor solução ambiental em termos de CO₂ e NOx, apresentando uma diminuição de 27% e 19%, respetivamente, face à rotunda de uma via. Por sua vez, a turbo-rotunda teve o melhor desempenho ambiental ao nível dos poluentes locais CO e HC, com 16% e 30%, respetivamente.

Conclui-se assim que se justifica a substituição da rotunda de uma via por uma rotunda de duas vias. A turbo-rotunda não se afigura a melhor alternativa, uma vez que ocorrem elevadas percentagens de viragem à esquerda a partir do ramo mais congestionado. Assim sendo, a opção por esta alternativa faria mais sentido se houvesse mais veículos a realizarem viragens na primeira saída.

Keywords

Roundabout, Microsimulation, VISSIM, VSP, Emissions.

Abstract

The implementation of traffic calming mechanisms has been important to avoid road accidents, where one of the main causes is excessive speed. One solution is to implement physical obstacles (such as roundabouts) in order to compel the driver to reduce vehicle speed.

Roundabouts can lead to an improvement in road safety, but existing studies to assess the impact on energy and emissions is confined to single and two-lane roundabouts.

This dissertation proposes to make an analysis in terms of capacity and emissions caused by a single lane roundabout in the city of Coimbra, with traffic congestion in one of its branches. Subsequently, the results were compared with two alternatives for the same place: a two-lane roundabout and a turbo-roundabout. To achieve the proposed objectives, traffic simulator VISSIM was used to model the reference scenario, which was calibrated with experimentally collected data. The evaluation parameters (such as traffic volumes, travel times, average speed) were subsequently validated. Finally, emissions were estimated using the methodology "Vehicle Specific Power" (VSP).

After the validation of the reference scenario there was a comparative analysis of the three scenarios, using travel times, average speed, modes VSP and emissions of pollutants CO₂, CO, NO_x and HC.

The results indicate that the two solutions lead to improvements at all levels. Travel times decreased about 14% since there was an existing speed increase of 13%. Two-way roundabout is the best solution in terms of CO₂ and NO_x emissions, showing a decrease of 27% and 19%, respectively, compared to the single lane roundabout. Turbo-roundabout had the best performance in terms of CO and HC, with a reduction of 16% and 30%, respectively.

The main conclusion is that the replacement of this single lane roundabout by a two-lane roundabout can be justified, due to its advantages. The turbo-roundabout leads to a worse traffic performance in this study due to the fact that high percentages of left turn from the more congested branch occurred. Thus, the choice of this alternative would be preferred if there were more vehicles choosing the first exit.

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas.....	vii
Nomenclaturas.....	ix
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	2
1.2. Objetivos da dissertação	3
1.3. Estrutura da dissertação	4
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Modelos de simulação de tráfego.....	6
2.1.1. Modelos macroscópicos.....	7
2.1.2. Modelos mesoscópicos	8
2.1.3. Modelos microscópicos.....	8
2.1.4. Comparação entre modelos.....	10
2.2. Calibração e Validação de modelos de simulação	11
2.3. Consumos e emissões de poluentes em rotundas.....	12
3. Metodologia	15
3.1. Modelação de tráfego.....	18
3.1.1. Base de dados para a simulação	19
3.1.1.1. Funções da aceleração e desaceleração	19
3.1.1.2. Distribuição da velocidade desejada.....	20
3.1.1.3. Tipo, classe e categoria de veículos	21
3.1.1.4. Comportamento dos condutores.....	22
3.1.2. Rede de tráfego.....	22
3.1.2.1. Mudança da velocidade desejada.....	23

3.1.2.2.	Tráfego automóvel	23
3.1.2.3.	Regras de prioridade	23
3.1.2.4.	Áreas de conflito	24
3.1.3.	Dados de saída	25
3.2.	Modelação dos consumos energéticos e emissões	25
3.3.	Estudo de caso	29
3.4.	Medições experimentais	32
3.4.1.	Características da dinâmica do veículo e das vias.....	32
3.4.2.	Volumes de tráfego e matrizes origem-destino.....	34
3.5.	Modelação do cenário de referência	36
3.5.1.	Modelação da rede	36
3.5.2.	Calibração e Validação do Modelo.....	43
3.6.	Definição dos cenários	46
3.6.1.	Rotunda de duas vias	46
3.6.2.	Turbo-Rotunda	47
4.	Análise de Resultados	49
4.1.	Avaliação do modelo para a situação de referência	50
4.1.1.	Volumes de tráfego	50
4.1.2.	Tempos de viagem	51
4.1.3.	Velocidade média.....	52
4.1.4.	Modos VSP e Emissões.....	53
4.2.	Avaliação dos cenários alternativos	56
4.2.1.	Tempos de viagem	56
4.2.2.	Velocidade média.....	57
4.2.3.	Modos VSP e Emissões.....	58
5.	Conclusão e Trabalhos Futuros	61

Referências Bibliográficas	65
Anexos	71
Anexo A – Fatores de emissão dos poluentes para os respectivos modos VSP	72
Anexo B – Cálculo das taxas de desaceleração	74
Anexo C – Resultados da avaliação dos modos VSP do cenário referência	75
Anexo D – Resultados da avaliação dos modos VSP dos cenários alternativos.....	78

Índice de Figuras

Figura 1 – Classificação dos modelos relativamente ao nível de detalhe dos elementos modelados (adaptado (9)).	7
Figura 2 – Fluxograma da estrutura da dissertação.	17
Figura 3 – Distribuição da velocidade desejada. (23).	21
Figura 4 – Exemplo de uma regra de prioridade num cruzamento (adaptado (23)).	24
Figura 5 – Exemplo de uma área de conflito numa rotunda (23).	25
Figura 6 – Taxas de emissão média modal para um veículo ligeiro de passageiros a gasolina em função dos modos VSP: a) CO; b) CO ₂ ; c) HC; d) NO _x (adaptado (19)).	28
Figura 7 – Taxas de emissão média modal para dois veículos ligeiros a gasóleo em função dos modos VSP: a) CO; b) CO ₂ ; c) HC; d) NO _x (adaptado (20)).	29
Figura 8 – Estudo de caso relativo à Rotunda do Choupal (28).	30
Figura 9 – Domínio do estudo de caso (28).	31
Figura 10 – Veículo usado durante a monitorização experimental.	33
Figura 11 – GPS Qstarz BT-1000 XT (30).	34
Figura 12 – Câmara de vídeo.	35
Figura 13 – Taxa de desaceleração (m/s ²) em função da velocidade inicial na desaceleração (km/h) (31).	38
Figura 14 – Modelação do domínio do estudo no VISSIM (28).	40
Figura 15 – Rotunda em plena simulação (28)	41
Figura 16 – Demonstração de exemplos da colocação de áreas de redução de velocidade (28).	42
Figura 17 – Demonstração de exemplos da colocação das regras de cedência de passagem (28).	43
Figura 18 – Simulação da rotunda de duas vias.	46
Figura 19 – Simulação da turbo-rotunda.	47
Figura 20 – Comparação dos cenários em termos do tempo total de todo o domínio de estudo.	57

Figura 21 – Comparação dos cenários em termos da velocidade média de todo o domínio de estudo.....	58
Figura 22 – Comparação dos cenários em termos dos modos VSP de todo o domínio de estudo.	59
Figura 23 – Comparação dos cenários em termos de emissões dos poluentes de todo o domínio de estudo: a) CO ₂ ; b) CO; c) NO _x ; d) HC.	60

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Comparação de Modelos Macroscópicos e Microscópicos (12).	10
Tabela 2 – Calendarização de tarefas.....	18
Tabela 3 – Definição dos modos VSP para veículos ligeiros (19).	27
Tabela 4 – Características do Toyota Auris (29).....	33
Tabela 5 – Volumes de tráfego observados numa 1h15, usados para calibração.....	36
Tabela 6 – Volumes de tráfego observados numa 1h15, usados para validação.	36
Tabela 7 – Coeficiente de fricção lateral (f) em função da velocidade (km/h) (31).....	38
Tabela 8 – Resultados da avaliação dos fluxos de tráfego estimados.	51
Tabela 9 – Resultados da avaliação dos tempos de viagem estimados.....	52
Tabela 10 – Resultados da avaliação da velocidade média estimada.....	53
Tabela 11 – Resultados da avaliação em termos de CO ₂ resultante da simulação.....	54
Tabela 12 – Resultados da avaliação em termos de CO resultante da simulação.....	54
Tabela 13 – Resultados da avaliação em termos de HC resultante da simulação.	55
Tabela 14 – Resultados da avaliação em termos de NO _x resultante da simulação.....	55

Nomenclaturas

a: aceleração/desaceleração instantânea;

c: volume de tráfego observado;

CO: Monóxido de carbono;

CO₂: Dióxido de carbono;

f: Coeficiente de fricção lateral;

GEH: Geoffrey E. Havers;

HC: Hidrocarbonetos;

m: Volume de tráfego estimado;

N: Número de simulações;

NO_x: Óxidos de azoto;

R: Raio interior da curva;

RMSE: Valor do erro quadrático médio;

Rota 1-1: Inicia-se em 1 (N111) dá a volta à rotunda do choupal e volta para 1;

Rota 1-2: Inicia-se em 1 (N111) e na rotunda do choupal vai para 2 (estação Coimbra-b/Coimbra centro);

Rota 1-3: Inicia-se em 1 (N111) e na rotunda do choupal vai para 3 (centro de Coimbra);

Rota 2-1: Inicia-se em 2 (estação Coimbra-b/Coimbra centro) e na rotunda do choupal vai para 1 (N111);

Rota 2-2: Inicia-se em 2 (estação Coimbra-b/Coimbra centro) e na rotunda do choupal volta para 2;

Rota 2-3: Inicia-se em 2 (estação Coimbra-b/Coimbra centro) e na rotunda do choupal vai para 3 (centro de Coimbra);

Rota 3-1: Inicia-se em 3 (centro de Coimbra) e na rotunda do choupal vai para 1 (N111);

Rota 3-2: Inicia-se em 3 (centro de Coimbra) e na rotunda do choupal vai para 2 (estação Coimbra-b/Coimbra centro);

Rota 3-3: Inicia-se em 3 (centro de Coimbra) e na rotunda do choupal volta para 3.

s: Sobrelevação;

v: Velocidade Instantânea;

VISSIM: Verkehr In Stadten SIMulation;

VSP: Vehicle Specific Power;

%RMSE: Percentagem do Erro Quadrático Médio.

1. Introdução

1.1. Motivação

Ao longo do último século, as autoridades nacionais e regionais têm implementado várias medidas com o objetivo de aumentar a capacidade das instalações rodoviárias.

Contudo, devido aos elevados índices de mortalidade e sinistralidade rodoviária que Portugal apresenta (em 2012 apresentou 2264 acidentes com vítimas mortais e/ou feridos graves) tendo como a causa mais comum o excesso de velocidade, torna-se imperativo reduzir as velocidades de circulação, promovendo a acalmia de tráfego (1). Esta privilegia a compatibilização dos comportamentos dos diferentes modos de transporte, através da redução das velocidades para valores adequados às funções que a via desempenha e ainda com a natureza das atividades que se realizam na sua envolvente.

A aplicação de medidas de acalmia de tráfego é feita pela introdução de alterações físicas das infraestruturas, de modo a que o condutor seja obrigado a reduzir a velocidade. Estas medidas, quando aplicadas de forma correta, demonstram que para além da redução de velocidade, leva à diminuição do número e da gravidade dos acidentes, à diminuição do ruído, da poluição do ar e a uma melhoria da qualidade de vida (2). Contudo por vezes, em algumas situações, os objetivos desejados não são atingidos, pois o efeito final é diferente ao que inicialmente se pretendia, talvez porque o processo de avaliação relativo à implementação destas soluções tenha sido inadequado.

Existem dois grupos de medidas de acalmia de tráfego: alterações dos elementos horizontais (estrangulamentos, gincanas, rotundas ou estreitamento das estradas nas interseções) ou alterações dos elementos verticais (bandas sonoras ou lombas) (2). Do primeiro grupo destacam-se a utilização de rotundas. Estas são indicadas para vias com elevados índices de sinistralidade, pois conferem um aumento de segurança devido às seguintes razões (3):

- ❖ As rotundas apresentam menos pontos de conflito entre veículos em comparação com os cruzamentos prioritários. Sendo que o potencial para os conflitos de elevada gravidade (a 90 graus), como choques frontais, é bastante reduzido com o uso da rotunda;
- ❖ As velocidades baixas praticadas em rotundas aumentam o tempo de reação dos condutores perante potenciais conflitos;
- ❖ Enquanto atravessam as rotundas, os peões só precisam de atravessar um sentido de tráfego de cada vez, em comparação aos cruzamentos tradicionais onde têm que

atravessar os dois sentidos. Isto faz com que os pontos de conflito entre os pedestres e os veículos sejam mais reduzidos.

Outra razão que leva à utilização de rotundas prende-se com grande volume de tráfego, pois as rotundas de uma via e de duas vias permite suportar um Tráfego Médio Diário (TMD) até cerca de 25000 e 45000 veículos, respetivamente (3). As rotundas apresentam ainda vantagens ao nível da fluidez do tráfego e mostram-se muito eficientes na marcação da alteração do ambiente rodoviário, nomeadamente nas entradas das localidades (4). Também promovem a equidade de acesso à interseção para todos os condutores.

Assim, a rotunda assume um papel extremamente importante na promoção da acalmia de tráfego. Existem vários modelos de rotundas, entre as quais de uma via ou multivia. Ainda sem implementação em Portugal, mas já testada em outros países, existe um modelo novo designado por turbo-rotunda. Contudo ainda existe poucos estudos ao nível desta rotunda, bem como a comparação entre diferentes soluções de rotunda para o mesmo local em termos das emissões de poluentes.

1.2. Objetivos da dissertação

O principal objetivo desta Dissertação de Mestrado consistiu em analisar cenários de tráfego numa rotunda e consequentes impactes ao nível energético e ambiental, bem como da capacidade da própria rotunda.

A aplicação deste trabalho focou-se no estudo de caso relativo a uma rotunda convencional de uma via localizada na cidade de Coimbra, a rotunda do Choupal. Para fazer a modelação do estudo de caso supracitado e a estimativa das emissões dos poluentes recorreu-se ao modelo de tráfego microscópico VISSIM e Vehicle Specific Power (VSP), respetivamente. A avaliação do modelo foi baseada em resultados experimentais realizados na rotunda selecionada, entre os quais foram utilizados os tempos de viagem, as velocidades médias e o valor do VSP calculado utilizando os dados obtidos. Os resultados relativos à rotunda de uma via foram comparados com uma rotunda tradicional de duas vias e com uma turbo-rotunda.

Através dos cenários de tráfego avaliados foi possível encontrar algumas soluções que tenham em consideração os impactos ao nível do tráfego, consumos e emissões.

A introdução desta Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica está de acordo com o estabelecido no relatório da “*American Society for Mechanical Engineers*” (5), no qual está bem presente a relevância do papel do Engenheiro Mecânico no desenvolvimento de soluções na área da energia, ambiente, transportes e segurança rodoviária.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta Dissertação de Mestrado está organizada em 5 capítulos:

No capítulo 1 é feita a introdução ao tema, explicando a importância da acalmia de tráfego nos dias de hoje, bem como a relevância do papel das rotundas. Neste capítulo são ainda descritos os objetivos gerais desta Dissertação.

No capítulo 2 é efetuada uma revisão bibliográfica sobre os modelos de simulação de tráfego e a sua validação, bem como a quantificação de consumos de combustível e emissões de poluentes em rotundas.

No capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada neste trabalho, com especial destaque para o processo de simulação do estudo de caso, para a modelação dos consumos energéticos e emissões e, ainda, para o estabelecimento de cenários de tráfego.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Aqui é feita a análise dos resultados para a validação do modelo, assim como a comparação dos resultados dos diferentes cenários estabelecidos.

No capítulo 5 são retiradas todas as conclusões desta Dissertação e feitas sugestões sobre possíveis trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Modelos de simulação de tráfego

Com o desenvolvimento tecnológico e a evolução das capacidades dos computadores, a resolução de problemas de grande escala foi sendo mais rápida, eficaz e simplificada. A utilização de modelos de simulação de tráfego tornou-se uma ferramenta eficaz para determinar os benefícios e os impactos dos projetos no setor dos transportes. Estas ferramentas apresentam como principais vantagens o seu custo e tempo de execução de um dado sistema real (6).

Contudo, também apresentam algumas desvantagens como a complexidade da construção dos modelos, a aquisição de dados suficientes para a conceção de modelos e ainda adequados processos de calibração e validação.

Assim sendo, o recurso à simulação como ferramenta de estudo é feita quando os objetivos visam proporcionar melhor compreensão sobre a natureza de um processo, identificar problemas específicos ou pontos críticos dentro de um sistema e, por último, testar projetos antes da sua implementação (7).

Uma vez que existem vários modelos de simulação de tráfego, é necessário que estes sejam classificados de formas distintas. Podem classificar-se quanto ao processo de escolha de trajetos, ou seja, determinísticos ou estocásticos. Quanto à forma como são obtidas as soluções, neste caso, analíticos ou de simulação. Quanto à opção relativamente à incorporação de efeitos dinâmicos do tráfego, são estáticos ou dinâmicos. Por último, podem ser classificados relativamente ao nível de detalhe dos elementos modelados. Neste caso são classificados como modelos macroscópicos, modelos mesoscópicos e modelos microscópicos (8).

Seguidamente é feita uma descrição sumária dos diferentes modelos classificados em função do critério relativo ao nível de detalhe dos elementos modelados.

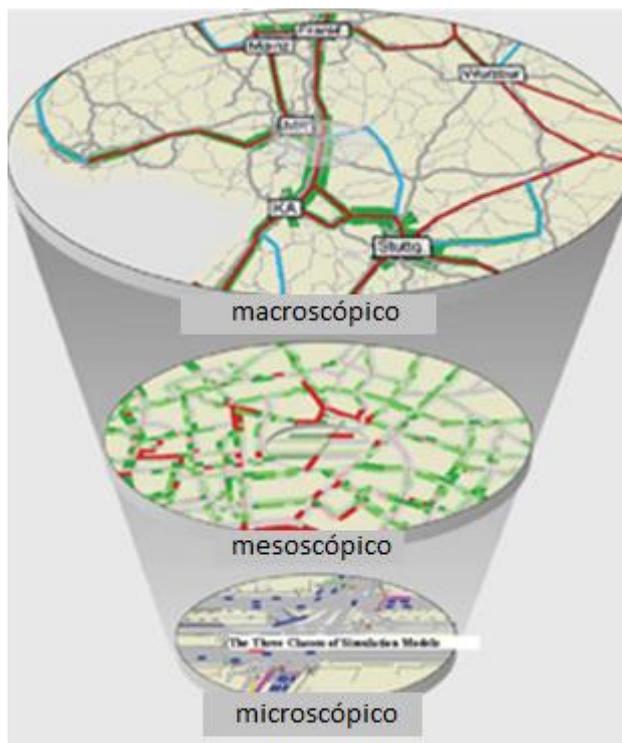


Figura 1 – Classificação dos modelos relativamente ao nível de detalhe dos elementos modelados (adaptado (9)).

2.1.1. Modelos macroscópicos

Na análise macroscópica, em vez do interesse pelo movimento de cada veículo, o tráfego é considerado como um fluxo contínuo, que escoa através dos arcos de uma rede viária considerando grandezas características como o fluxo, densidade e velocidade (8).

Dentro desta categoria distinguem-se os modelos de simulação e os modelos analíticos. Os primeiros, onde os tempos de trajeto nos arcos são calculados iterativamente através de curvas fluxo-velocidade, são conhecidos como “modelos convencionais” sendo que em certas situações ignoram os efeitos de congestionamento da rede. Relativamente aos modelos analíticos, estabelecem relações, mais ou menos complexas, entre as variáveis fundamentais das correntes de tráfego, representando a variação das condições de circulação ao longo do tempo (8).

Comparando os dois modelos, os modelos analíticos apresentam algumas vantagens, tais como a obtenção de soluções com propriedades bem compreendidas e definidas, permitindo uma atuação prescritiva e, ainda, terem um tempo de execução curto, possibilitando a aplicação em

tempo real. Todavia, a sua aplicação em estradas com várias vias de circulação (exemplo: autoestradas) é difícil devido à modelação da dinâmica dos veículos (8).

Alguns exemplos de modelos macroscópicos são: *DYNEV*, *Emme/2*, *OREMS*, *TransCAD*, entre outros (10).

2.1.2. Modelos mesoscópicos

De acordo com a Figura 1, pode-se observar que os modelos mesoscópicos possuem um nível de detalhe intermédio, incorporando aspetos dos modelos macroscópicos e microscópicos.

O começo do desenvolvimento deste tipo de modelos resultou das limitações dos modelos macroscópicos no âmbito da análise de redes urbanas nas quais as interseções assumem um papel fundamental. Estas interrupções de tráfego têm um efeito considerável ao nível dos tempos de viagem dos veículos que em modelos macroscópicos não são tidos em consideração (8).

Os modelos mesoscópicos concentram-se em alguns aspetos de áreas urbanas, tais como, por exemplo, bairros residenciais. Neste tipo de modelo as manobras de mudança de via podem ser representadas para cada veículo individualmente, embora este movimento esteja associado a um pequeno grupo de veículos agregado, pois o seu critério de decisão está relacionado com as densidades da via em que está inserido. As atividades e interações entre veículos são descritas com um nível de detalhe reduzido (11).

Estes modelos têm a vantagem de descrever o comportamento individual dos veículos, sem necessitarem de descrever o comportamento ao longo do tempo e do espaço. Porém, são constituídos por uma grande quantidade de parâmetros, que dificultam a sua calibração e aplicabilidade em tempo real, tal como acontece com modelos microscópicos (12).

Para modelos mesoscópicos são utilizados o *Cube Avenue*, *DYNASMART*, *TRANSIMS*, entre outros (10).

2.1.3. Modelos microscópicos

Os modelos microscópicos de simulação foram criados para facilitar a tarefa de análise de sistemas de tráfego e são muito úteis a testar novos sistemas de controlo de tráfego e políticas de

gestão. Na última década, estes modelos têm vindo a ganhar uma grande popularidade como ferramentas de análise de tráfego, pois os modelos anteriormente descritos apresentam o tráfego como blocos homogêneos que obedecem a relações simples entre fluxo e velocidade, que é insuficiente para uma avaliação mais pormenorizada dos sistemas.

A utilização de modelos de simulação microscópica tem por base a descrição dos elementos com grande detalhe. Estes modelos dependem do comportamento dos condutores e das características dos veículos, sendo que as variáveis mais utilizadas são a velocidade, o tempo e a distância entre veículos (12).

Através destes modelos garante-se uma completa descrição do tráfego e uma representação mais próxima da realidade. Porém, o maior nível de detalhe e complexidade exige um maior tempo dispendido nos diferentes passos da conceção do modelo: aquisição dos dados, calibração e validação (12).

Os modelos microscópicos utilizam três submodelos (8):

- ❖ “Seguimento do carro”, mais conhecido por *car-following*, e representa a movimentação longitudinal dos veículos na via. O “Seguimento do carro” descreve os padrões de aceleração e desaceleração como resultado de uma dada decisão do veículo, de acordo com o movimento do veículo que se encontra à sua frente e dos fatores que interferem na sua velocidade;
- ❖ “Intervalo de aceitação”, ou *gap-acceptance*, que determina a decisão de aceitação ou rejeição do avanço do veículo numa dada interseção. A decisão depende do intervalo de tempo disponível pelo veículo em causa para entrar em segurança na corrente de tráfego;
- ❖ “Mudança de via”, ou *lane-changing*, que como o próprio nome indica trata-se da motivação e possibilidade para um condutor mudar de via. Esta mudança pode ser obrigatória ou opcional, sendo que no primeiro caso acontece quando o condutor necessita de mudar de direção e, no segundo, quando a mudança seja justificada pelo desejo de aumento de velocidade.

Atualmente alguns dos modelos microscópicos mais usados são: VISSIM, PARAMICS, AIMSUN, entre outros (10).

2.1.4. Comparação entre modelos

Tendo em conta o que foi referido anteriormente, a Tabela 1 apresenta uma breve comparação entre as principais características dos modelos macroscópicos e microscópicos.

Tabela 1 – Comparação de Modelos Macroscópicos e Microscópicos (12).

	Macroscópico	Microscópico
Global	Os veículos e as rotas são modelados em grupos;	Os veículos e as rotas são modelados individualmente;
	Os volumes de tráfego são reproduzidos em modelos estáticos, sendo o resultado representado por um valor médio;	Simulação dinâmica em tempo real;
	Tempos de simulação são curtos;	Usualmente, tempos de simulação longos;
Velocidade	Todas as viagens partilham a mesma velocidade em determinados elementos da rede;	Cada viagem/veículo possui uma velocidade individual;
	Não é possível avaliar o congestionamento da rede e a velocidade é uma função estritamente dependente do volume;	Pode reproduzir pontos de congestionamento e geração de filas de espera;
Nível de detalhe	A interseção é modelada como um ponto sem geometria;	Cada interseção é representada ao detalhe por vários elementos;

A escolha do modelo está relacionada com a natureza do problema, devendo-se optar pelo modelo que responda de modo mais fácil e rápido. A complexidade do modelo deve ser apenas a estritamente necessária, pois quanto mais complexo, mais recursos são necessários e que por sua vez conduz a maiores probabilidades de ocorrência de erros (12).

Os modelos macroscópicos são muitas vezes os escolhidos, uma vez que são mais rápidos e simples, quando comparados com os microscópicos. No entanto, para situações como o estudo de caso da presente dissertação o uso dos modelos microscópicos justifica-se, visto que conseguem representar com grande nível de detalhe e são capazes de simular a interação entre veículos individuais (12).

2.2. Calibração e Validação de modelos de simulação

Na calibração, as variáveis do modelo são ajustáveis de modo a melhorar a capacidade de reprodução ao nível do comportamento dos condutores e das características da rede. Para avaliar o desempenho é necessário definir as variáveis utilizadas durante a calibração e comparar os valores observados com os que resultam da aplicação do modelo à rede, ou seja, os valores estimados (13).

O processo que determina quando é que o modelo está suficientemente próximo do sistema real é usualmente designado por validação do modelo. Esta fase é bastante importante para todos os modelos de simulação, porque o principal objetivo quando se utiliza uma abordagem de microsimulação é a obtenção de valores que sejam próximos das condições de tráfego locais (12) e ainda que o modelo seja o suficientemente robusto para caracterizar as especificidades do domínio de estudo analisado.

Este processo consiste num método iterativo que envolve a calibração dos parâmetros do modelo e a ainda, a comparação do mesmo com o sistema real. Estas duas fases são fundamentais para assegurar a credibilidade do modelo construído. Por cada iteração do processo de validação, o modelo de simulação será executado e sempre que os resultados forem considerados inaceitáveis, será necessário repetir a calibração de alguns aspetos do modelo de simulação, ou seja, ajustar os parâmetros, de modo a minimizar o erro admissível (12).

Segundo a literatura (14), não existe um procedimento padrão que seja capaz de validar todo e qualquer tipo de modelo, pois a escolha da metodologia depende sempre da natureza do problema.

Os programas informáticos de modelos microscópicos de simulação possuem um conjunto de variáveis que podem ser definidas e alteradas pelo utilizador do programa para possibilitar a calibração do modelo para as condições padrão. O programa já inclui alguns valores por defeito, a fim de facilitar o trabalho do modelador, contudo devem ser efetuados alguns testes de calibração para verificar se estes se adequam às condições do estudo de caso analisado (12).

Assim sendo, pode-se afirmar que o processo de validação é constituído por duas fases: a escolha das variáveis a validar e os testes a realizar às variáveis escolhidas (12).

De acordo com Shannon (15), nenhum modelo é absolutamente correto no sentido de não ter uma correspondência direta entre o mesmo e a realidade.

2.3. Consumos e emissões de poluentes em rotundas

Focalizando no caso de estudo desta Dissertação, a utilização de uma rotunda cumpre o principal objetivo, que diz respeito à imposição de redução de velocidade, sendo esta uma vantagem da perspectiva de acalmia de tráfego. Contudo os constantes ciclos de acelerações e desacelerações fazem com que os consumos e os níveis de emissão de poluentes aumentem. Isto é particularmente visível quando os níveis de congestionamento aumentam (16).

De modo a estimar os consumos e as emissões de poluentes, existem muitos estudos utilizando o VSP (*Vehicle Specific Power*), que é uma metodologia bastante completa em termos de parâmetros de condução e capaz de estimar os poluentes para diferentes modos de operação do motor (aceleração, baixa velocidade e paragem, desaceleração, velocidade constante). O VSP mostra-se bastante eficaz para estimar as emissões de poluentes para viaturas ligeiras a gasolina (17; 18; 19) e mais tarde testes conduzidos por Coelho et al. (20) revelaram que também é aplicável em veículos a gasóleo.

Coelho et al. (16) quantificaram os impactes ambientais das rotundas de uma via de circulação em ambientes urbanos. Neste estudo, o tráfego foi caracterizado com base em dados experimentais e as emissões estimadas a partir da metodologia VSP. A estrutura deste estudo teve na base as medições que foram efetuadas numa rotunda em Lisboa (Portugal) e em Raleigh (Carolina do Norte, Estados Unidos). Com estes valores distinguiram três perfis de velocidade: I) sem paragens na entrada da rotunda, II) uma paragem completa antes de o veículo entrar na zona de circulação da rotunda, III) o veículo efetua várias paragens antes de entrar na zona de circulação da rotunda. A fim de saber qual a percentagem da ocorrência de cada um dos três perfis de velocidade em função do tráfego de entrada e de conflito foram estabelecidos modelos de regressão. Posteriormente, os autores calcularam os modos VSP para cada perfil e obtendo assim as emissões. Neste estudo concluíram que as emissões aumentam à medida que aumenta o tráfego de conflito e, ainda, que as emissões também aumentam à medida que a diferença entre a velocidade de cruzeiro e a de circulação se torna maior.

Mais recentemente, um estudo protagonizado por Salamati et al. (21) em 2012, procurou avaliar as emissões de poluentes em várias rotundas multivia em Aveiro quando a entrada da rotunda é feita pela via da direita e esquerda. A metodologia abrangeu três fases. A primeira consistiu no desenvolvimento de um modelo de regressão para estimar a percentagem total de veículos em cada perfil de velocidade referido no estudo anterior. A segunda fase focou-se na especificação de cada perfil de velocidades (I, II e III) representativo em cada via de circulação na entrada da rotunda (esquerda e direita). Na terceira fase foi calculada a distribuição dos modos VSP para cada tipo de trajetória, identificada anteriormente. O estudo concluiu que para baixos níveis de congestionamento os veículos na via da direita emitem mais poluentes porque têm velocidades médias mais altas e taxas de acelerações e desacelerações acentuadas. Enquanto em altos níveis de congestionamento, se as taxas de fluxo da esquerda e da direita forem iguais, os veículos da esquerda produzem mais emissões visto que a frequência de pára-arrancas é maior à verificada quando a entrada da rotunda é feita pela via da direita.

Já este ano de 2013 Anya et al. (22) realizou um estudo onde avaliou, em termos de emissões, a substituição de uma interseção por uma rotunda multivia. Para tal recorreu à metodologia VSP para estimar a emissão de cada poluente. Concluiu que, com a referida substituição, existia uma melhoria de tráfego, uma redução no tempo de viagem, bem como uma significativa redução nas emissões dos poluentes.

Na sequência dos estudos supramencionados, a presente Dissertação dá continuação à utilização da metodologia VSP, com o objetivo de estimar as emissões dos poluentes para o estudo de caso e para as respectivas alternativas.

3. Metodologia

A metodologia seguida neste trabalho será explicada neste capítulo com recurso ao fluxograma presente na Figura 2, bem como a descrição dos modelos VISSIM e VSP utilizados para a realização do estudo de caso e ainda, a caracterização de todos os cenários propostos.

Na primeira fase deste trabalho foi feita uma revisão bibliográfica sobre o tema, de modo a perceber quais as vantagens e limitações dos modelos de simulação de tráfego, bem como conhecer o estado de arte ao nível de modelos de emissões aplicadas em rotundas.

Posteriormente foi feita a recolha de dados reais, como velocidade instantânea, volumes de tráfego, tempos de viagem e características da via, que vieram possibilitar a modelação do tráfego do estudo de caso. Com a modelação feita procedeu-se à calibração/validação recorrendo a parâmetros como volumes de tráfego, tempos de viagem, velocidade média, modos VSP e emissões.

Seguidamente procedeu-se à modelação dos cenários alternativos, ou seja, transformação da rotunda de uma via numa rotunda convencional de duas vias e um segundo no qual se implementou uma turbo-rotunda.

Por último, foram apresentados e discutidos os resultados obtidos e auferidas as principais conclusões.

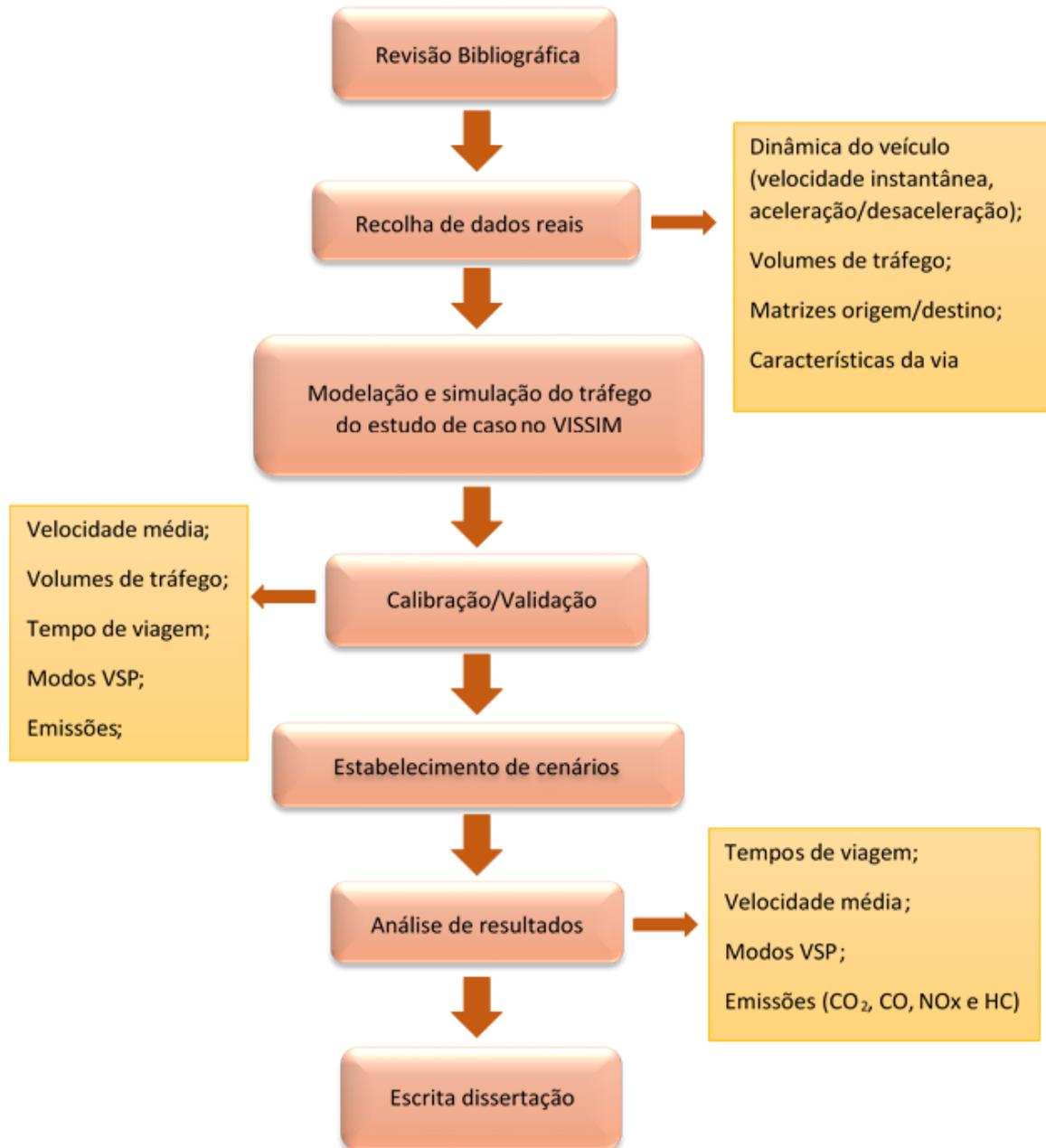


Figura 2 – Fluxograma da estrutura da dissertação.

A calendarização seguida neste trabalho foi a seguinte:

Tabela 2 – Calendarização de tarefas.

2013									
Tarefa	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.
Revisão bibliográfica									
Modelação de tráfego									
Modelação de consumos e emissões									
Estabelecimento de cenários									
Análise de resultados									
Escrita da Dissertação									

3.1. Modelação de tráfego

Com o intuito de avaliar a situação da rotunda do Choupal recorreu-se ao modelo de micro-simulação VISSIM (*Verkehr In Stadten SIMulation*).

Este simulador microscópico de tráfego foi desenvolvido na década de 70 pela Universidade de Karlsruhe (Alemanha) e comercializado desde 1993 através Planung Transport Verkehr, tendo como versão mais recente a 6 (PTV AG).

Este modelo de tráfego foi selecionado pela sua capacidade em definir diferentes parâmetros, em analisar operações de restrições de transporte público e privado, como a configuração da via, a composição de tráfego, os sinais de trânsito, as paragens, entre outras. É assim uma ferramenta útil para a avaliação de várias alternativas com base em engenharia de transportes e medidas de planeamento de eficácia (23). Para além disto, o VISSIM tem-se mostrado útil em estudos de casos reais, como é o caso de Fontes et al. (24), de Mahomod et al. (25) e de Bandeira et al. (26). De realçar também que os parâmetros de saída deste modelo de simulação como a velocidade e

aceleração, em passos de tempo de 1 segundo, permitem fazer estimativas mais precisas das emissões.

O modelo VISSIM pode ser aplicado numa grande variedade de situações, entre as quais se destacam (23):

- ❖ Avaliação, desenvolvimento e testes de interseções semaforizadas;
- ❖ Avaliação e testes das operações de tráfego em corredores de sinais luminosos;
- ❖ Viabilidade do impacto da integração de sistemas de tráfego ferroviário ligeiro em meio urbano;
- ❖ Comparação de diversas alternativas para um dado projeto;
- ❖ Análise simultânea de diferentes modos de transporte num mesmo estudo de caso;
- ❖ Avaliação de cenários de restrição de tráfego;
- ❖ Modelação e simulação de modos de transporte não motorizados (peões e ciclistas);
- ❖ Estudos de cariz ambiental.

Este programa de micro-simulação é considerado muito completo em termos de detalhe de precisão das informações sobre o estado de cada variável. Apresenta algumas vantagens como modelar com elevado grau de realismo o comportamento de convergência dos veículos e como a representação do comportamento de incidentes (23).

3.1.1. Base de dados para a simulação

Uma vez que o VISSIM apresenta uma enorme variedade de especificações que podem ser configuradas, nesta secção apenas são descritas as mais revelantes para a realização do estudo de caso da presente Dissertação.

3.1.1.1. Funções da aceleração e desaceleração

O VISSIM utiliza funções representativas que dependem da velocidade instantânea e não de um intervalo de valores para a aceleração e desaceleração. Para cada tipo de veículo existem quatro gráficos, dois de aceleração e dois de desaceleração, que definem as funções específicas das mesmas (23):

- ❖ Aceleração máxima: valor máximo tecnicamente viável da aceleração. Porém é somente considerada em situações onde esta é maior que a aceleração desejada, de modo manter a velocidade em declives;
- ❖ Aceleração desejada: usada para qualquer outra situação;
- ❖ Desaceleração máxima: valor máximo tecnicamente viável da desaceleração. É ajustado em declives de $0,1 \text{ m/s}^2$ por cada 1% de inclinação positiva e $-0,1 \text{ m/s}^2$ por cada 1% de inclinação negativa.
- ❖ Desaceleração desejada: se o valor for inferior à desaceleração máxima, então o valor da desaceleração desejada é utilizado como valor máximo para desaceleração. Pode ser causado por uma decisão de velocidade desejada, ou no caso pára/arranca, ou no caso de distância lateral insuficiente, ou ainda numa situação em que o veículo efetua uma paragem de emergência.

3.1.1.2. Distribuição da velocidade desejada

Para qualquer tipo de veículo a distribuição da velocidade é um parâmetro importante, que tem uma influência significativa na capacidade da via e nas velocidades de circulação. Se a viagem não for dificultada por outros veículos, o condutor vai viajar com a velocidade desejada. No entanto, se houver interferência de outros veículos e a ultrapassagem for possível/permitida, qualquer veículo com uma velocidade superior à sua velocidade desejada vai verificar quando tem a oportunidade de ultrapassagem (23). Contudo o VISSIM e à semelhança do que acontece com outros programas de micro-simulação não permite ultrapassagens numa estrada com duas vias (uma por sentido) com oposição de tráfego.

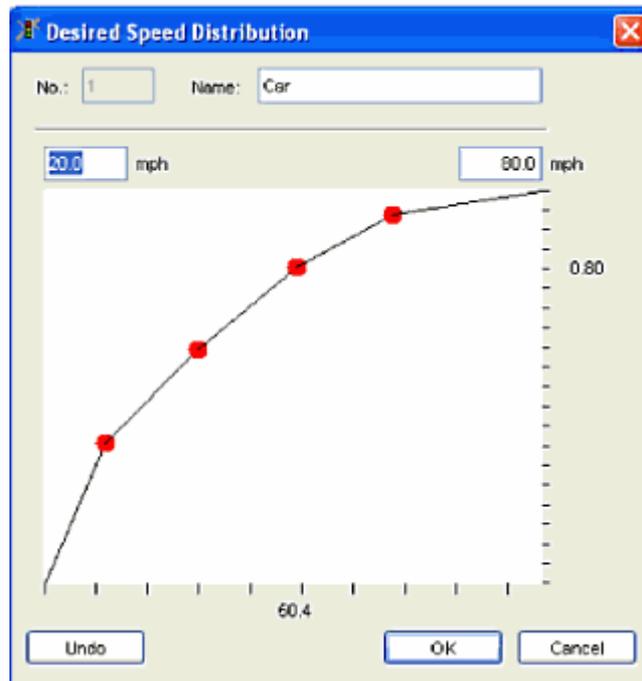


Figura 3 – Distribuição da velocidade desejada. (23)

Na Figura 3 pode-se observar a distribuição da velocidade desejada, onde eixo horizontal mostra a velocidade desejada, enquanto o eixo vertical mostra a probabilidade cumulativa de 0,0 e 1,0.

3.1.1.3. Tipo, classe e categoria de veículos

O VISSIM utiliza um conceito hierárquico para definir e proporcionar a informação do veículo a três níveis diferentes (23).

O primeiro está relacionado com o tipo de veículo, onde estão um grupo de veículos com as mesmas características técnicas e de comportamento de condução física. Os tipos de veículos existentes são: veículos ligeiros de passageiros, veículos pesados de mercadorias, autocarros, elétricos, bicicletas e peões.

O segundo nível é a classe de veículo, em que um ou mais tipos de veículos são agrupados por classes, ou seja, agrupa aqueles que têm a mesma distribuição de velocidade, comportamento de escolha de rotas, entre outros.

Por último, os veículos podem ainda se classificar ao nível da semelhança do seu comportamento.

3.1.1.4. Comportamento dos condutores

O VISSIM utiliza uma análise psico-física do modelo de análise microscópica de veículo a veículo para o movimento longitudinal dos mesmos e contém um algoritmo baseado na regra de mudança de via para os movimentos laterais, desenvolvido por *Wiedemann* (23). Na ideia básica do modelo de *Wiedemann* o condutor pode estar num dos seguintes modos de condução (23):

- ❖ Condução livre: o comportamento do condutor não é influenciado por outros veículos. Neste modo, o condutor pretende alcançar e manter uma determinada velocidade;
- ❖ Aproximação: o condutor adapta a sua velocidade quando segue atrás de um veículo mais lento, desacelerando até que a diferença de velocidades entre os dois veículos seja zero, atingindo a distância de segurança desejada;
- ❖ Seguimento: neste modo, o condutor segue o carro sem qualquer aceleração ou desaceleração. Ele mantém a distância de segurança mais ou menos constante, mas devido ao imperfeito controlo do acelerador a diferença de velocidade oscila em torno de zero;
- ❖ Travagem: este modo ocorre se a distância para o veículo que segue à sua frente for inferior à distância de segurança desejada, aplicando elevadas taxas de desaceleração.

3.1.2. Rede de tráfego

O elemento base de uma rede de tráfego VISSIM é uma ligação (“*link*”) que representa um segmento de uma ou múltiplas vias de circulação, que tem uma direção de fluxo de tráfego. Uma rede pode ser construída unindo as ligações através de conectores (“*connectors*”) (23).

A rede gráfica do VISSIM é constituída por dados estáticos que permanecem inalterados ao longo da simulação (ligações, conectores, zonas de redução de velocidade), ou por dados dinâmicos que retêm todas as informações sobre o tráfego simulado (volumes de tráfego, localização dos pontos de escolha de rotas, regras de prioridade) (23).

3.1.2.1. Mudança da velocidade desejada

Sempre que houver uma alteração da velocidade na rede VISSIM, é definida uma mudança de distribuição de velocidade. Existem duas formas de definir essas mudanças na distribuição de velocidade (23):

- ❖ Mudanças de velocidade usando áreas de redução de velocidade, como curvas, reduções momentâneas da largura da estrada, cruzamentos ou rotundas;
- ❖ Mudanças de velocidade utilizando limitadores de velocidade, como sinais de limitação de velocidade ou indicação de uma curva.

3.1.2.2. Tráfego automóvel

Com a rede de tráfego já modelada, é necessário implementar as informações referentes ao volume do tráfego. Este processo é sequencial e divide-se em três passos (23):

- ❖ Composição dos veículos, ou seja, definir os veículos que fazem parte da rede modelada. Para cada composição inserida na rede, são configurados o tipo de veículo, a percentagem relativa de cada um e a distribuição de velocidades;
- ❖ Dados do volume de tráfego, que se traduz na especificação do número de veículos a partir dos centróides (entradas da rede) num dado intervalo de tempo e para um tipo de veículos específico. Se o volume de tráfego exceder a capacidade definida para a ligação, os veículos são mantidos nos centróides, até a rede estar disponível;
- ❖ Definição das rotas, onde as decisões do percurso de uma dada classe de veículos podem ser fixas ou aleatórias. Ou seja, se forem fixas são estipuladas rotas específicas para uma determinada classe de veículos, enquanto se as decisões forem aleatórias é introduzido no ramo o número de veículos e depois o trajeto feito por eles é escolhido aleatoriamente pelo programa. Para que as decisões sejam fixas, o VISSIM tem uma função chamada “Dynamic Traffic Assignment”, onde se introduz uma matriz origem-destino que contém os valores dos volumes de tráfego para cada rota.

3.1.2.3. Regras de prioridade

As regras de prioridade consistem numa linha de paragem identificada por uma barra vermelha e em vários marcadores de conflitos identificados por barras verdes. A decisão de paragem dos

veículos quando se aproximam da barra vermelha depende de duas condições nos marcadores de conflitos, que dizem respeito à distância e ao tempo (23).

A distância mínima é geralmente definida como o comprimento mínimo da área de conflito. Se a distância do veículo que se aproxima da barra vermelha for menor que a distância mínima, este imobiliza.

Quanto ao tempo mínimo de decisão, este é determinado através do passo de tempo que o veículo necessita para alcançar a barra verde à sua velocidade.

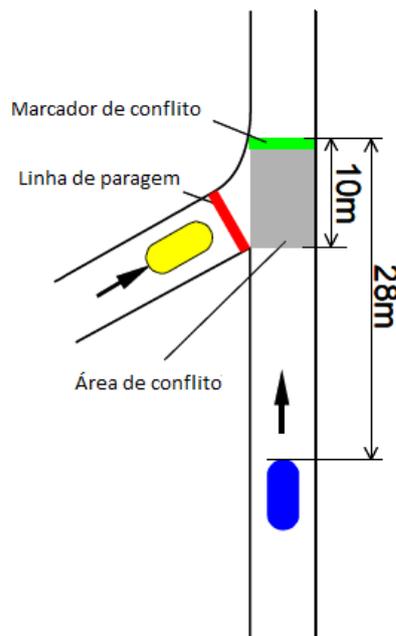


Figura 4 – Exemplo de uma regra de prioridade num cruzamento (adaptado (23)).

3.1.2.4. Áreas de conflito

As áreas de conflito são uma alternativa às regras de prioridade em interseções. Na maioria dos casos são a melhor solução a aplicar, devido à sua facilidade em termos de modelação e comportamento do veículo é mais próximo da realidade (23).

No VISSIM as áreas de conflito definem-se através de uma zona retangular a vermelho, para o veículo que cede a passagem, e a verde para o veículo que tem prioridade, conforme é ilustrado na Figura 5.

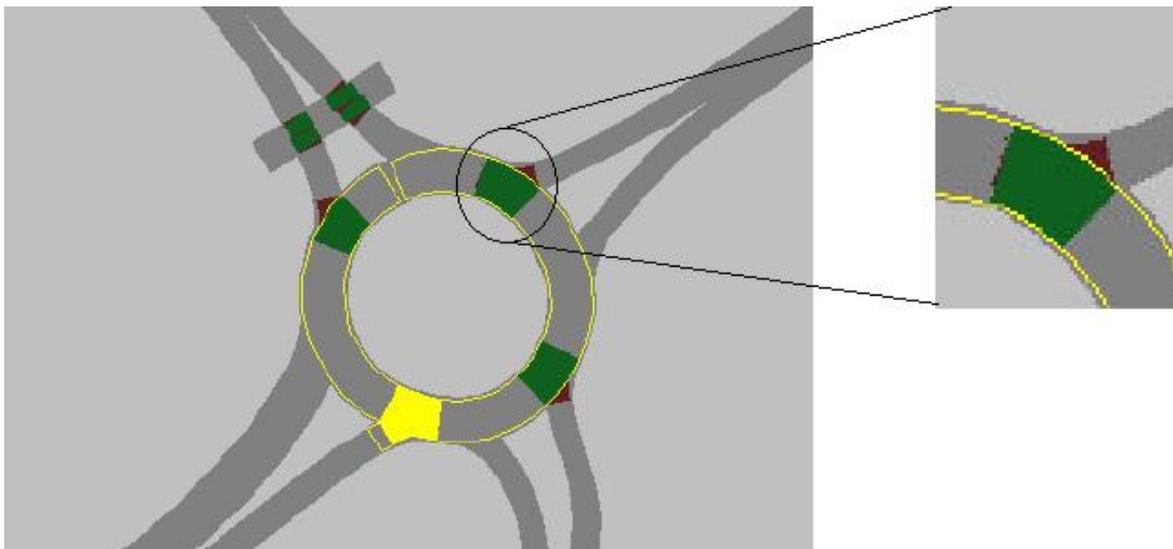


Figura 5 – Exemplo de uma área de conflito numa rotunda (23).

Existem fatores que influenciam o perfil de aceleração para os veículos que se aproximam da zona de conflito. As situações diferem conforme o tipo de atributo que é definido, devido à alteração de velocidade. Os atributos essenciais para as situações de conflito são a visibilidade, a aceitação frontal, a aceitação da retaguarda e, ainda, o fator de segurança (23).

3.1.3. Dados de saída

Este programa de micro-simulação oferece uma grande variedade de parâmetros de saída que resultam em dados apresentados durante a simulação. Esses dados incluem a velocidade, aceleração, consumo de combustível, emissões de poluentes, número e tipo de veículos, número médio de paragens e tempos de atraso (23), entre outros.

3.2. Modelação dos consumos energéticos e emissões

No que concerne à modelação dos consumos energéticos e de emissões de poluentes recorreu-se à metodologia “Vehicle Specific Power” (VSP). O VSP é um modelo microscópico baseado na velocidade instantânea, aceleração/desaceleração e declive da via, onde estes parâmetros

representam a potência do motor, permitindo o cálculo das emissões de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de azoto (NO_x) e hidrocarbonetos (HC). Para concretizar o método VSP, é necessário obter o perfil de velocidades segundo a segundo. A Equação 1 permite obter o VSP para um veículo ligeiro de passageiros (19).

$$VSP = v \times [1.1 \times a + 9.81 \times \sin(\arctan(\text{grade})) + 0.132] + 0.000302 \times v^3 \quad [1]$$

Onde:

- ❖ VSP – Potência específica do veículo (kW/ton);
- ❖ v – Velocidade instantânea (m/s);
- ❖ a – Aceleração/desaceleração instantânea (m/s^2);
- ❖ grade – declive da via (%).

Calculada a potência específica em cada segundo, é necessário identificá-la com um dos modos VSP. Para veículos ligeiros de passageiros o VSP divide-se em 14 modos que estão associados a fatores de emissão dos diferentes poluentes.

Na Tabela 3 pode-se observar os diferentes modos em função do valor do VSP apresentado na Equação 1.

Tabela 3 – Definição dos modos VSP para veículos ligeiros (19).

Modo VSP	Definição (kW/ton)
1	VSP < -2
2	-2 <= VSP < 0
3	0 <= VSP < 1
4	1 <= VSP < 4
5	4 <= VSP < 7
6	7 <= VSP < 10
7	10 <= VSP < 13
8	13 <= VSP < 16
9	16 <= VSP < 19
10	19 <= VSP < 23
11	23 <= VSP < 28
12	28 <= VSP < 33
13	33 <= VSP < 39
14	39 <= VSP

Os modos 1 e 2 correspondem a situações de desacelerações ou de percursos em descida, enquanto o modo 3 diz respeito a situações de paragem do veículo e/ou baixa velocidade. Finalmente, os modos 4 a 14 indicam valores crescentes de VSP, resultantes de velocidades e/ou acelerações elevadas ou ainda subidas com declive significativo.

O último passo consiste no cálculo dos fatores de emissão para cada poluente em função do modo respetivo. A Figura 6 ilustra os fatores de emissão para o CO₂, CO, NO_x e HC para veículos ligeiros a gasolina com cilindrada menor que 1400 cm³ (19).

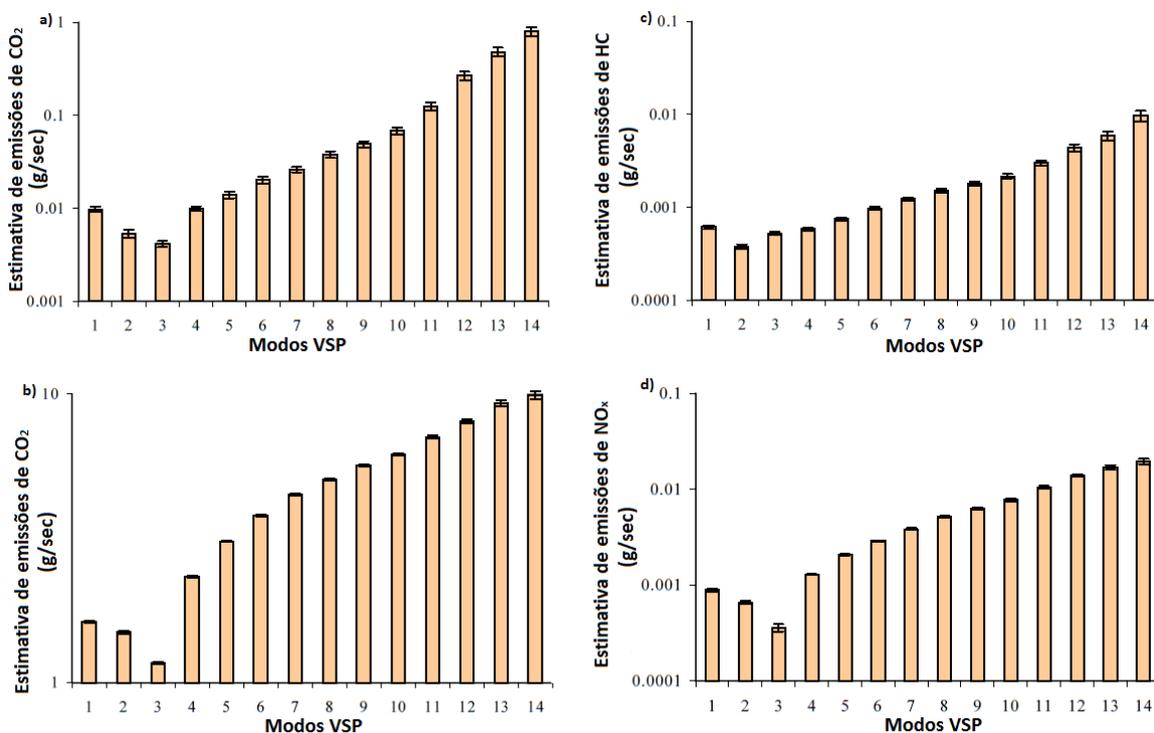


Figura 6 – Taxas de emissão média modal para um veículo ligeiro de passageiros a gasolina em função dos modos VSP: a) CO; b) CO₂; c) HC; d) NO_x (adaptado (19)).

Na Figura 7, são apresentados os fatores de emissão de CO, CO₂, HC e NO_x para veículos ligeiros de passageiros a gasóleo em função dos modos VSP (20).

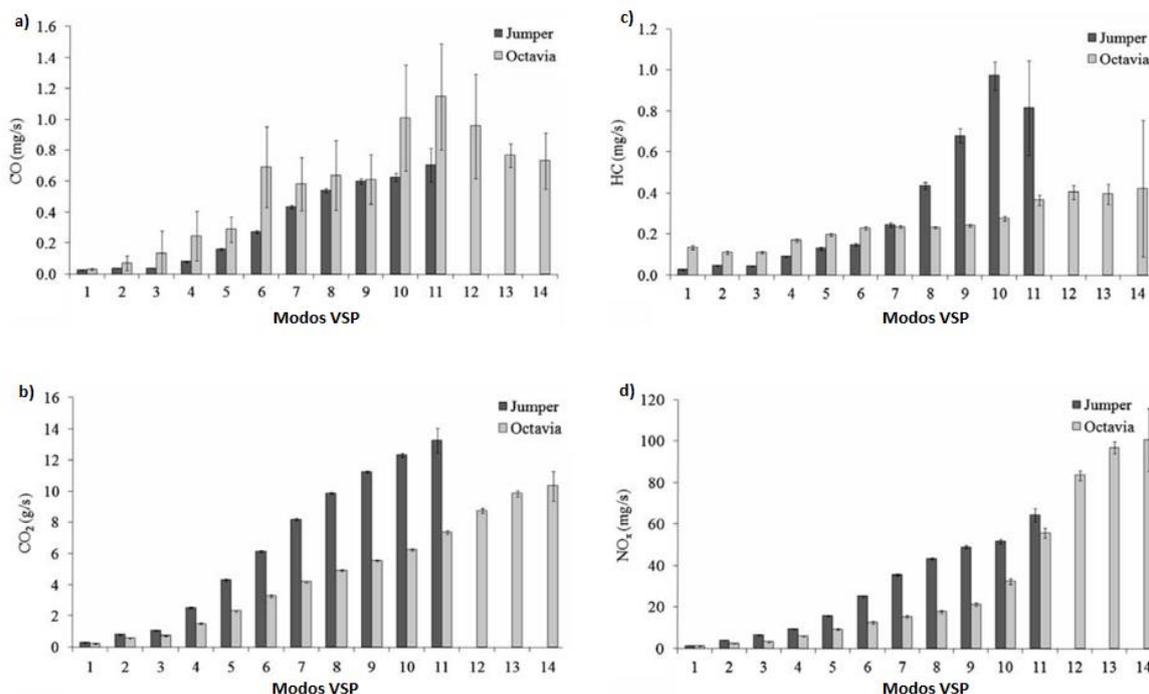


Figura 7 – Taxas de emissão média modal para dois veículos ligeiros a gásóleo em função dos modos VSP: a) CO; b) CO₂; c) HC; d) NO_x (adaptado (20)).

No Anexo A são apresentados os fatores de emissão de NO_x, HC, CO e CO₂ em função dos modos VSP para veículos ligeiros de passageiros a gasolina e gásóleo.

Na presente dissertação e, como já foi referido, foram estimadas as emissões segundo a segundo, considerando cada poluente individualmente e para cada percurso. As emissões totais corresponderam ao somatório de todos os segundos do percurso efetuado.

3.3. Estudo de caso

Para efetuar o estudo de caso na presente dissertação selecionou-se a rotunda do Choupal, localizada na cidade de Coimbra.

A rotunda escolhida tem um diâmetro da ilha central de 42 metros (27), largura do anel de circulação de aproximadamente 8 metros e é composta por uma via de circulação, com quatro ramos de entrada e saída. A entrada 2 (Este) possui uma via segregada de viragem à direita em direção ao ramo de saída 1 (Norte). Está localizada próxima da Estação de Caminhos de Ferro de Coimbra-B e é um ponto de entrada importante para a cidade de Coimbra, sendo que apresenta

alguns períodos de congestionamento durante a hora de ponta de tarde e de manhã, onde os veículos circulam com uma velocidade média aproximada de 14km/h.

Através da Figura 8, pode-se observar a geometria da rotunda e os seus ramos respetivos. O ramo 1 corresponde à Estrada Nacional N111 e caracteriza-se por elevados períodos de congestionamento durante a hora de ponta de manhã (7-9h), no sentido Norte-Sul. Relativamente ao ramo 2, permite aceder à estação de caminhos-de-ferro de Coimbra-B e ainda é um dos pontos de entrada e saída do centro da cidade de Coimbra. O ramo 3 permite aceder igualmente à zona centro de Coimbra. Finalmente, o ramo 4 está direcionado para um tráfego local, dando acesso à mata do Choupal.

A seleção deste estudo de caso justifica-se pelo elevado nível de congestionamento no ramo de entrada 1 durante a hora de ponta de manhã. Especificamente, os comprimentos das filas atingem aproximadamente 4 km ao longo da N111. Face a isto, o domínio de estudo considerado correspondeu não só a rotunda do choupal, mas estendeu-se até os referidos 4km, como se pode visualizar na Figura 9.



Figura 8 – Estudo de caso relativo à Rotunda do Choupal (28).



Figura 9 – Domínio do estudo de caso (28).

Segundo o domínio do estudo de caso, foram estipuladas várias rotas para a posterior monitorização experimental. As rotas estabelecidas foram as seguintes:

- ❖ Rota 1-1: Inicia-se no ramo de entrada 1 (N111), dá a volta à rotunda e segue para o ramo de saída 1;
- ❖ Rota 1-2: Inicia-se no ramo de entrada 1 (N111) e na rotunda do choupal segue para o ramo de saída 2 (estação Coimbra-b/Coimbra centro);
- ❖ Rota 1-3: Inicia-se no ramo de entrada 1 (N111) e na rotunda do choupal segue para o ramo de saída 3 (centro de Coimbra);
- ❖ Rota 2-1: Inicia-se no ramo de entrada 2 (estação Coimbra-b/Coimbra centro) e na rotunda do choupal segue para o ramo de saída 1 (N111);
- ❖ Rota 2-2: Inicia-se no ramo de entrada 2 (estação Coimbra-b/Coimbra centro) e na rotunda do choupal segue para o ramo de saída 2;
- ❖ Rota 2-3: Inicia-se no ramo de entrada 2 (estação Coimbra-b/Coimbra centro) e na rotunda do choupal segue para o ramo de saída 3 (centro de Coimbra);
- ❖ Rota 3-1: Inicia-se no ramo de entrada 3 (centro de Coimbra) e na rotunda do choupal segue para o ramo de saída 1 (N111);
- ❖ Rota 3-2: Inicia-se para o ramo de entrada 3 (centro de Coimbra) e na rotunda do choupal segue para a rotunda de saída 2 (estação Coimbra-b/Coimbra centro);

- ❖ Rota 3-3: Inicia-se no ramo de entrada 3 (centro de Coimbra) e na rotunda do choupal segue para o ramo de saída 3.

No que diz respeito ao ramo 4, não foram consideradas rotas pois o volume de tráfego, quer na entrada quer na saída, é pouco expressivo.

3.4. Medições experimentais

Para proceder à modelação do estudo de estudo foram feitas medições experimentais relativas à obtenção das características da dinâmica dos veículos e das vias do estudo de caso e ainda foram medidos volumes de tráfego para construção de matrizes origem-destino (O-D). Nas seções seguintes é feita a descrição de cada um dos passos.

3.4.1. Características da dinâmica do veículo e das vias

O veículo utilizado nos testes experimentais foi um *Toyota Auris*, de 2012, com motor a gasóleo, cortesia da *Toyota* que disponibilizou o veículo.

De modo a reduzir os erros sistemáticos, as medições foram obtidas em três dias, em vários períodos do dia e usando dois condutores, num total de 67 ensaios realizados. Na Tabela 4 estão evidenciadas as principais características do veículo utilizado.



Figura 10 – Veículo usado durante a monitorização experimental.

Tabela 4 – Características do Toyota Auris (29).

Características		
Motor	Cilindrada (cm ³)	1364
	Binário Máximo (Nm)	205
	Potência Máxima (CV)	90
Desempenho ambiental	Consumo em ambiente urbano (l/100 km)	4,4
	Emissões CO ₂ (g/km)	99
	Tipo de Combustível	Gasóleo
Desempenho ao nível da dinâmica	Velocidade Máxima (km/h)	180
	Aceleração 0-100 km/h	12,5

Para a obtenção dos dados da dinâmica do veículo (velocidade, aceleração/desaceleração) e das características da via (declive, longitude, latitude, entre outros) foi usado um Global Positioning System (GPS), o Qstarz BT-1000 XT (30), conforme é ilustrado na Figura 11.



Figura 11 – GPS Qstarz BT-1000 XT (30).

Recorreu-se a este material devido à sua compatibilidade e versatilidade. Contém na sua interface um interruptor vermelho que permite ao utilizador assinalar determinado instante, ficando marcado no registo e facilitando, posteriormente, na análise de dados.

Colocou-se este equipamento no interior do carro enquanto se procedia aos ensaios. Depois ligando o GPS através de cabo ao computador pessoal, obteve-se o registo de coordenadas de localização em tempo real e o registo das velocidades instantâneas.

3.4.2. Volumes de tráfego e matrizes origem-destino

Para a obtenção dos volumes de tráfego e matrizes origem-destino (O-D), foi colocada uma câmara de vídeo (Figura 12) num ponto estratégico do estudo de caso. A escolha deste ponto obedeceu a critérios de visibilidade no qual fosse possível gravar todas as entradas e saídas da rotunda, a fim de contabilizar o número de veículos para cada trajeto.



Figura 12 – Câmara de vídeo.

As matrizes origem-destino que traduzem os volumes de tráfego da rotunda encontram-se representados na Tabela 5, onde os dados foram usados posteriormente para calibração do modelo, e na Tabela 6, onde foram utilizados para proceder à validação. A obtenção dos dados destas duas tabelas foram recolhidos em dias diferentes, mais concretamente nos dias 1 das 6h às 10h30, 21 das 18h30 às 20h e 22 das 8h30 às 10h de março de 2013.

Tabela 5 – Volumes de tráfego observados numa 1h15, usados para calibração.

	Saída 1	Saída 2	Saída 3	Saída 4	Total
Entrada 1	13	537	660	16	1226
Entrada 2	411	10	231	40	692
Entrada 3	204	189	4	19	416
Entrada 4	17	39	17	1	74
Total	645	775	912	76	2408

Tabela 6 – Volumes de tráfego observados numa 1h15, usados para validação.

	Saída 1	Saída 2	Saída 3	Saída 4	Total
Entrada 1	11	592	579	6	1188
Entrada 2	366	5	208	19	598
Entrada 3	199	108	1	12	320
Entrada 4	11	16	19	2	48
Total	587	721	807	39	2154

3.5. Modelação do cenário de referência

Nesta secção é descrito o processo de modelação do cenário de referência e de que forma os dados recolhidos na secção anterior foram inseridos no modelo. Para além disso, são apresentadas as etapas relativas aos processos de calibração e validação.

3.5.1. Modelação da rede

A modelação do cenário de referência corresponde à situação atual do estudo de caso, ou seja, a rotunda de uma via, constituída por quatro ramos de entrada e de saída. Não foram considerados veículos pesados de mercadorias, uma vez que representam menos de 1% do tráfego total da rede viária. De modo a refletir o atual parque automóvel português assumiu-se que 57% dos

veículos eram a gasolina e 43% dos veículos a gasóleo (24). No que diz respeito ao declive da via, este foi considerado zero devido ao facto de o domínio de estudo se situar numa zona plana.

A velocidade permitida e a velocidade praticada na via são outros dos parâmetros que devem ser tidos em conta durante o processo de modelação, pois estas velocidades vão influenciar muito o tempo total de viagem obtido nas simulações. Para esta análise é necessário conhecer os intervalos de velocidade que os condutores praticam nestes trajetos. Assim, com os valores recolhidos pelo GPS foi possível aplicar uma gama de velocidades adequada às condições do estudo de caso.

Outro aspeto considerado diz respeito às zonas de redução de velocidade. Estas zonas correspondem aos raios de entrada (provocadas pela deflexão dos movimentos de entrada) e também na zona de circulação central. Para o cálculo da respetiva velocidade foi utilizada a Equação 2 (31).

$$V_c = \sqrt{127.4021 \times R \times (s + f)} \quad [2]$$

Onde:

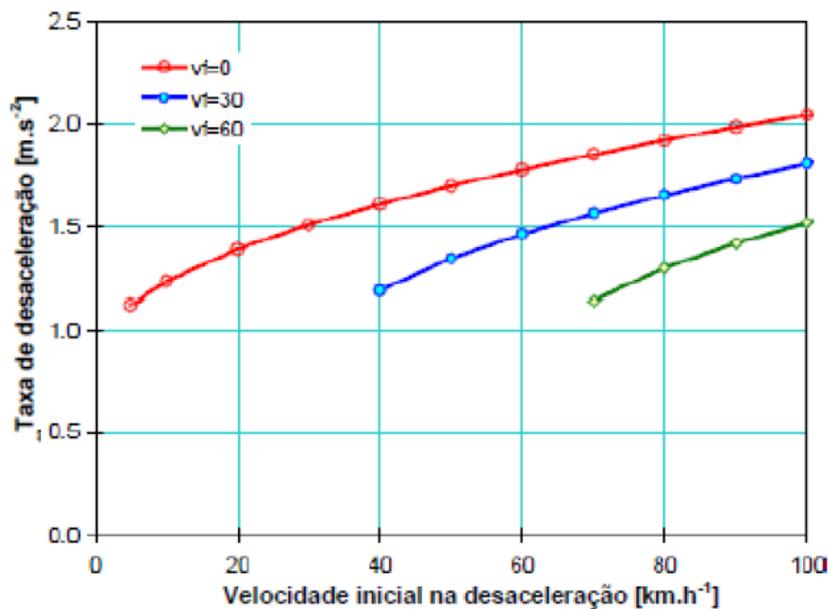
- ❖ V_c – Velocidade de circulação (km/h);
- ❖ R – Raio interior da curva (m);
- ❖ s – Sobrelevação ($m \cdot m^{-1}$);
- ❖ f – Coeficiente de fricção lateral.

Os raios de cada curva foram calculados utilizando o *Google Earth Pro* (27), em cada área onde se pretendeu obter o valor da redução de velocidade. Quanto ao coeficiente de sobrelevação (s), assumiu-se o valor de -0,02 quando se trata de zona de circulação em rotundas e o valor de 0,02 nas zonas de redução localizadas nos ramos de entrada e de saída (31). No que concerne ao coeficiente de fricção lateral (f), é função das velocidades de circulação, conforme é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Coeficiente de fricção lateral (f) em função da velocidade (km/h) (31).

Velocidade (km/h)	Coeficiente de fricção lateral (f)
30	0,2
40	0,18
50	0,16
60	0,15
70	0,15
80	0,14
90	0,14
100	0,13
120	0,11

Assim, calculado o valor da velocidade na zona de redução de velocidade foi possível determinar o valor da desaceleração do veículo em função da velocidade inicial. Para tal, utilizaram-se os perfis de velocidade da Figura 13.

Figura 13 – Taxa de desaceleração (m/s^2) em função da velocidade inicial na desaceleração (km/h) (31).

Esta metodologia foi aplicada a todo o domínio de estudo (duas rotundas e aos ramos de acesso). No Anexo B podem ser consultados os valores obtidos para estes pontos. Optou-se por esta abordagem em vez de se usar os dados do GPS devido a estes dados estarem sobrestimados, pois correspondem a velocidades influenciadas por outros veículos.

Com todos os dados reunidos foi possível proceder à modelação do cenário de referência, conforme pode ser visualizado na Figura 14.



Figura 14 – Modelação do domínio do estudo no VISSIM (28).

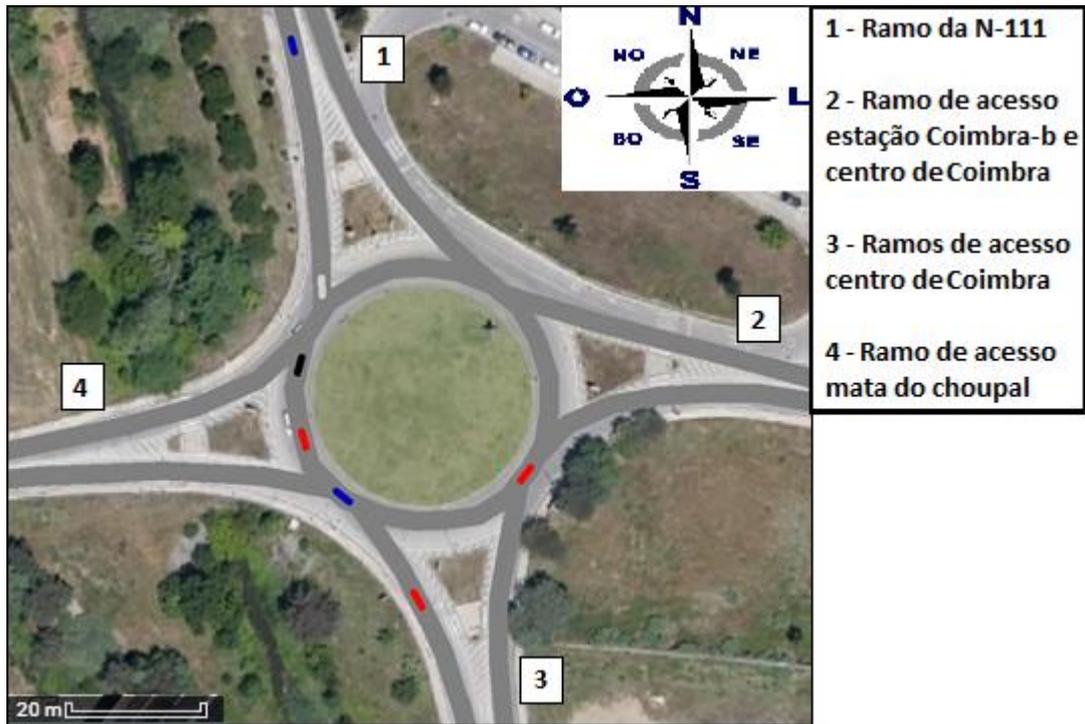


Figura 15 – Rotunda em plena simulação (28) .

Foram aplicadas áreas de redução de velocidade nos ramos de entrada e de saída em ambas as rotundas, nas zonas de circulação das mesmas e ainda em curvas (ver Figura 16). A desaceleração foi calculada conforme explicado anteriormente.



Figura 16 – Demonstração de exemplos da colocação de áreas de redução de velocidade (28).

No que concerne às interseções entre os ramos de acesso e a rotunda, foram definidas regras de prioridade para evitar potenciais situações de conflito entre veículos, conforme é ilustrado na Figura 17. Para calibrar essas regras de prioridade foi inserido no VISSIM um "minimum gap time" de 4.3(s). Assim como, para os parâmetros do condutor escolheu-se o modelo de *Wiedemann 74*, onde se utilizou "aditive part of safety distance" de 2m e "multiplicative part of safety distance" de 3m. Estes valores poderiam ter sido mais refinados, porém optou-se por utilizar os valores do estudo Li et al. (32).



Figura 17 – Demonstração de exemplos da colocação das regras de cedência de passagem (28).

3.5.2. Calibração e Validação do Modelo

Como foi referido na revisão bibliográfica, no caso dos modelos de micro-simulação de tráfego não existe um único procedimento que seja consensual para a calibração e validação das redes de tráfego, este processo depende de fatores como o tipo de análise a efetuar, a extensão do domínio de estudo, entre outros (24).

Para realizar a calibração foi introduzida uma matriz origem-destino de maneira a ajustar os volumes de tráfego. Também foram introduzidas as velocidades de circulação nos respetivos troços, bem como áreas de redução de velocidade, regras de cedência de passagem, de modo a aproximar o modelo da realidade. Este é um processo iterativo de ajuste dos parâmetros até se obter resultados próximos do que se observou, dentro de um intervalo de confiança.

De realçar ainda, que como referido anteriormente foi utilizado duas tabelas de dados de volumes de tráfego observados. Uma das tabelas foi utilizada para fazer a calibração do modelo e a outra para realizar a validação.

Para a validação do modelo realizado no VISSIM, foram escolhidos como termos de comparação dos valores observados e estimados os seguintes parâmetros: 1) volumes de tráfego; 2) tempos

de viagem 3) a velocidade média 4) distribuição dos modos do VSP e respetivas emissões de CO₂, CO, NO_x e HC.

A fim de se proceder à apreciação dos resultados do modelo começou-se por marcar na modelação as rotas que foram estipuladas anteriormente (rota 1-1, rota 1-2, rota 1-3, rota 2-1, rota 2-2, rota 2-3, rota 3-1, rota 3-2 e rota 3-3) e depois efetuou-se 15 simulações para cada rota. Este número de simulações corresponde ao número que normalmente varia entre 10 e 20, segundo o método sugerido por Hale (33) que utiliza a variância da amostra relativa ao parâmetro estimado considerado, e ainda no respetivo intervalo de confiança baseado na distribuição t-Student, para averiguar se o número de simulações requeridas é menor ou igual ao valor inicial.

Depois de realizar as simulações para cada rota, comparou-se os valores observados e estimados dos volumes de tráfego, utilizando o teste estatístico proposto por Geoffret E. Havers (*GEH*), cuja fórmula empírica é dada pela equação 3 (34).

$$GEH = \sqrt{\frac{2(m-c)^2}{m+c}} \quad [3]$$

Onde:

- ❖ *GEH*: Índice de Geoffrey E. Havers;
- ❖ *m*: Volume de tráfego estimado;
- ❖ *c*: Volume de tráfego observado.

Os valores de *GEH* podem ser avaliados através do seguinte critério (34):

- ❖ $GEH < 5$: o fluxo de tráfego é considerado bom;
- ❖ $5 < GEH < 10$: o fluxo de tráfego necessita de ser ajustado;
- ❖ $10 < GEH$: o fluxo de tráfego não pode ser considerado.

Sendo que é aceitável que 85% dos pontos de contagem do domínio de estudo apresentem um *GEH* menor que 5 (34).

Seguidamente, a fim de analisar a precisão dos dados obtidos do volume de tráfego, das velocidades médias e dos tempos de viagem recorreu-se ao *RMSE* “*Root Mean Squared Error*”. O valor aceitável para o mesmo é de 20%, sendo que é obtido através das seguintes equações (35).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (c-m)^2}{N}} \quad [4]$$

$$\% RMSE = \frac{RMSE}{\left(\frac{\sum_{i=1}^N c}{N}\right)} \quad [5]$$

Onde:

- ❖ *RMSE*: Valor do erro quadrático médio;
- ❖ *m*: Volume de tráfego estimado;
- ❖ *c*: Volume de tráfego observado.
- ❖ *N*: Número de simulações;
- ❖ *%RMSE*: Percentagem do erro quadrático médio.

No que concerne à distribuição dos modos VSP, calculados através das velocidades obtidas anteriormente, recorreu-se ao teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) para duas amostras independentes. Este teste é usado para determinar se duas distribuições de probabilidade pertencem à mesma distribuição. Para efetuar o teste K-S, é inicialmente calculada a frequência absoluta de cada modo VSP e respetiva frequência relativa. Este procedimento é feito quer para os valores observados quer para os valores estimados. Seguidamente, são calculadas e comparadas as frequências cumulativas através dos desvios, modo a modo. Retirando o maior valor de desvio de todos os modos, este tem que ser menor que o valor crítico do teste K-S (36). Esta comparação dos modos VSP é importante nesta análise, visto que é possível controlar os valores das acelerações/desacelerações que em muito influenciam as emissões de alguns poluentes, nomeadamente CO e NOx. Como tal, potenciais valores sobrestimados da aceleração do modelo são identificados e diminuídos.

O último passe consiste na comparação das emissões estimadas e observadas de CO₂, CO, NO_x e HC. Assim sendo, os valores médios supracitados para ambas as amostras foram submetidos a um teste estatístico, *t-student*. Este teste é dos métodos mais utilizados para avaliar as diferenças entre as médias das duas amostras. Neste caso foi utilizado um intervalo de confiança de 95%, ou seja as diferenças entre as médias dos valores observados e estimados devem ter um *p-value* maior que 0,05, correspondente a um nível de significância de 5% (37).

3.6. Definição dos cenários

3.6.1. Rotunda de duas vias

No primeiro cenário, estudou-se a possibilidade de aumentar a capacidade da rotunda para duas vias de circulação, mantendo o mesmo volume de tráfego.

A passagem de uma via para duas foi feita com o recurso ao VISSIM e o resultado obtido está presente na Figura 18, onde o foco está apenas na rotunda visto que o alargamento para duas vias só foi feito na rotunda do choupal e nas proximidades dos ramos. Esta nova rotunda seguiu os critérios de dimensionamento estipulados para rotundas em Portugal (38). Manteve-se a ilha central e acrescentou-se outra via de circulação com a largura de 3,5m. A extensão das duas vias prolongou-se por cerca de 100m nos ramos 1, 3 e 4, enquanto no ramo 2 por cerca de 50m.

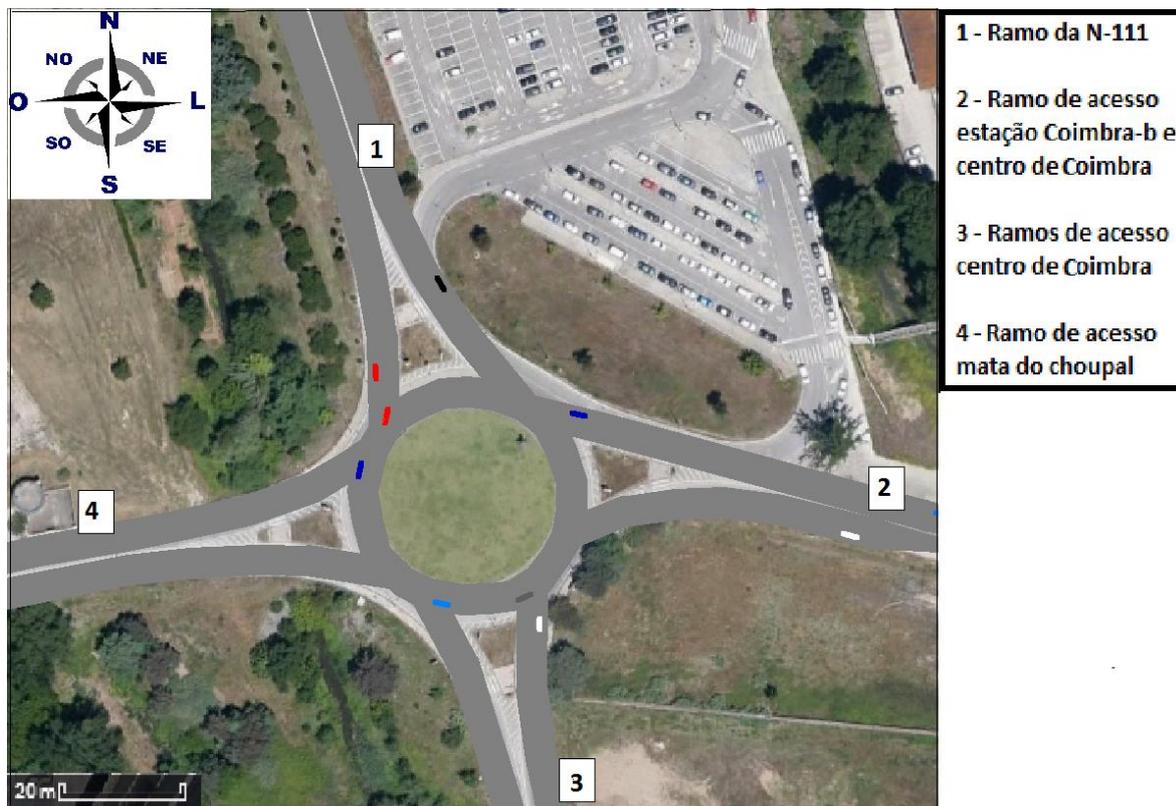


Figura 18 – Simulação da rotunda de duas vias.

3.6.2. Turbo-Rotunda

O segundo cenário consistiu na conversão da rotunda de uma via para uma turbo-rotunda. Esta é uma solução que ainda não foi implementada em Portugal. A principal diferença desta solução face às rotundas convencionais de duas vias é que a canalização dos movimentos é feita através de lancis desde a entrada dos veículos até à sua saída, de forma contínua e mais precisa, evitando entrecruzamentos no anel de circulação. A sua utilização permite uma melhor fluidez, sendo que o principal objetivo é promover maior segurança e consequentemente haver uma diminuição de acidentes (39; 40). Para realizar uma modelação fidedigna recorreu-se a diretrizes de publicações como “*Roundabouts – Application and Design*” (41), “*Turborotondes*” (42) e um estudo protagonizado por Silva et al. (39).

O resultado da modelação deste cenário alternativo é visível na Figura 19, onde está evidenciada a rotunda em plena simulação.

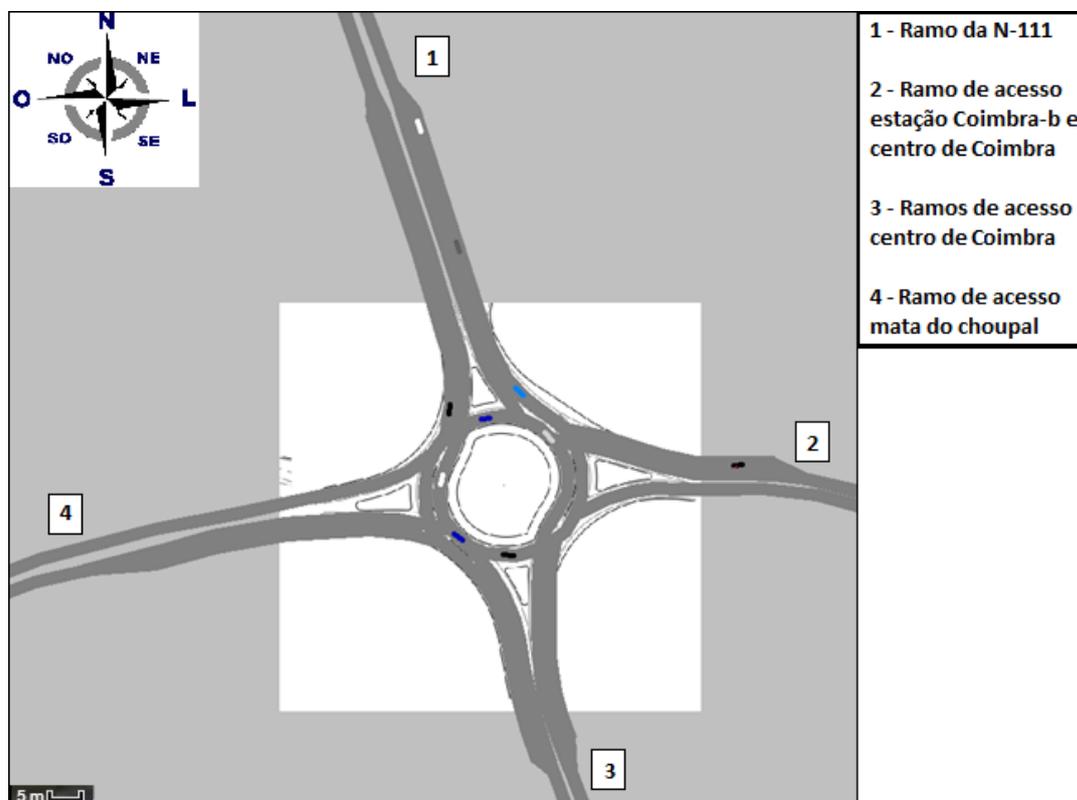


Figura 19 – Simulação da turbo-rotunda.

4. Análise de Resultados

4.1. Avaliação do modelo para a situação de referência

Nesta seção são apresentados os resultados relativos à avaliação do modelo para a situação referência, de modo a que este fosse validado. Para tal realizou-se 15 simulações e os seus resultados permitiram que fossem comparados os valores observados nas medições experimentais com os estimados pelo VISSIM.

4.1.1. Volumes de tráfego

Os resultados da avaliação dos volumes de tráfego, presentes na Tabela 8, são bastante satisfatórios, pois os valores estimados pelo modelo estão próximos dos observados. Nesta análise salienta-se que todos os valores do teste *GEH* foram inferiores a 5 (34). No que concerne ao erro quadrático médio (%RMSE), todas as entradas e saídas da rede apresentaram valores deste parâmetro inferiores a 20%, à exceção do ramo 4. Contudo este ramo não tem grande relevância no estudo de caso específico devido à baixa procura de tráfego na sua entrada e saída. Assim sendo, os valores dos volumes de tráfego foram validados cumprindo os dois testes estatísticos.

Tabela 8 – Resultados da avaliação dos fluxos de tráfego estimados.

	Observado	Estimado	GEH	%RMSE
Entrada 1	1188	1142	1,35	4,1
Saída 1	587	562	1,05	4,8
Entrada 2	598	647	1,95	7,6
Saída 2	721	683	1,43	5,8
Entrada 3	320	386	3,49	17,1
Saída 3	807	803	0,15	1,5
Entrada 4	48	69	2,77	30,8
Saída 4	39	69	4,14	44,0

4.1.2. Tempos de viagem

Quanto aos resultados da avaliação dos tempos de viagem nas diferentes rotas que foram realizadas durante a monitorização experimental, os resultados foram igualmente satisfatórios uma vez que o RMSE ficou abaixo dos 20% (ver Tabela 9). Em todas as rotas os valores ficaram muito abaixo do limite aceitável, sendo que a rota 1-1 apresentou o valor mais baixo com 2% e a rota 3-2 o valor mais elevado com 11%.

Tabela 9 – Resultados da avaliação dos tempos de viagem estimados.

Rota	Tempo (seg)		
	Observado	Estimado	%RMSE
1-1	461(±42)	464 (±7)	2
1-2	293 (±13)	281 (±10)	6
1-3	310 (±18)	299 (±12)	6
2-1	255 (±7)	235 (±3)	8
2-2	37 (±3)	34 (±2)	8
2-3	50 (±2)	47 (±2)	7
3-1	265 (±11)	259 (±5)	3
3-2	45 (±11)	43 (±4)	11
3-3	69 (±1)	69 (±3)	5

4.1.3. Velocidade média

No que diz respeito à velocidade média dos veículos verificou-se que os valores observados e os estimados obtiveram RMSE menores que 20% (ver Tabela 10). À semelhança do que aconteceu com os tempos de viagem, a rota 1-1 apresentou o valor mais baixo (2%) e a rota 3-2 o valor mais elevado, com 11%. De um modo geral, todas as percentagens obtidas nos tempos de viagem foram iguais ou muito próximas ao obtido nas velocidades, o que demonstra alguma coerência nos resultados obtidos.

Tabela 10 – Resultados da avaliação da velocidade média estimada.

Rota	Velocidade média (km/h)		
	Observado	Estimado	%RMSE
1-1	63 (± 14)	63 (± 1)	2
1-2	53 (± 2)	55 (± 2)	4
1-3	53 (± 3)	54 (± 2)	5
2-1	58 (± 2)	62 (± 1)	8
2-2	38 (± 4)	41 (± 2)	9
2-3	47 (± 2)	49 (± 2)	6
3-1	61 (± 2)	61 (± 1)	2
3-2	49 (± 10)	47 (± 5)	11
3-3	52 (± 1)	50 (± 2)	5

4.1.4. Modos VSP e Emissões

Esta secção apresenta a comparação dos modos VSP e respetivas emissões. Primeiramente obteve-se os modos VSP, através do cálculo do VSP com os valores da velocidade medidos experimentalmente (observados), bem como com os valores obtidos pela simulação do VISSIM (estimados). Os resultados da comparação dos modos VSP, que podem ser consultados no Anexo C, demonstram que praticamente para todas as rotas os valores observados e estimados encontram-se próximos cumprindo assim o teste K-S. A exceção foi a rota 1-1 no qual os resultados do teste indicam que as amostras observadas e estimadas não provêm da mesma distribuição. No entanto, o tráfego que utiliza esta rota é inferior a 0,5% do tráfego do domínio de estudo.

Tendo os modos VSP calculados e com os fatores de emissão referidos anteriormente, foi possível calcular o valor das emissões observadas (resultante dos dados recolhidos experimentalmente) e das estimadas (resultante da simulação). Nas próximas tabelas podem ser consultados os resultados obtidos.

Tabela 11 – Resultados da avaliação em termos de CO₂ resultante da simulação.

CO₂ (g/veículo)			
Rota	Observado	Estimado	P-value
1-1	1310,1	1280,8	0,60
1-2	598,9	600,6	0,96
1-3	640,8	639,6	0,93
2-1	642,0	654,9	0,82
2-2	65,2	63,2	0,64
2-3	112,9	112,7	0,84
3-1	673,9	681,4	0,86
3-2	81,9	84,2	0,81
3-3	157,3	158,2	0,93

Tabela 12 – Resultados da avaliação em termos de CO resultante da simulação.

CO (g/veículo)			
Rota	Observado	Estimado	P-value
1-1	1,0911	1,0192	0,47
1-2	0,4830	0,4834	0,99
1-3	0,5087	0,5473	0,17
2-1	0,5170	0,5513	0,58
2-2	0,0521	0,0576	0,63
2-3	0,0807	0,0879	0,84
3-1	0,5394	0,5675	0,86
3-2	0,0655	0,0702	0,67
3-3	0,1263	0,1533	0,32

Tabela 13 – Resultados da avaliação em termos de HC resultante da simulação.

HC (g/veículo)			
Rota	Observado	Estimado	P-value
1-1	0,2055	0,2077	0,72
1-2	0,1019	0,1026	0,90
1-3	0,1082	0,1085	0,78
2-1	0,1030	0,1054	0,60
2-2	0,0114	0,0111	0,67
2-3	0,0172	0,0187	0,84
3-1	0,1062	0,1036	0,86
3-2	0,0144	0,0144	0,99
3-3	0,0261	0,0261	0,98

Tabela 14 – Resultados da avaliação em termos de NOx resultante da simulação.

NOx (g/veículo)			
Rota	Observado	Estimado	P-value
1-1	2,635	1,978	0,23
1-2	0,885	0,941	0,63
1-3	0,965	1,072	0,07
2-1	1,077	1,201	0,69
2-2	0,094	0,104	0,51
2-3	0,152	0,176	0,84
3-1	1,036	1,188	0,86
3-2	0,117	0,143	0,25
3-3	0,269	0,284	0,76

Como se pode verificar através das tabelas anteriores, os valores médios estimados e observados do CO₂, CO, HC e NO_x, apresentaram valores do *p*-value do teste estatístico *t-student* superiores a 0,05 para um nível de significância de 5%, ou seja, um nível de confiança de 95%. De salientar que era importante que o poluente CO apresentasse bons resultados, pois este é muito sensível às acelerações e como já foi referido, no VISSIM, não é possível estipular valores de acelerações/desacelerações da mesma maneira que se faz para a velocidade.

Posto isto, podemos afirmar que o modelo está devidamente validado, pois todos os testes apresentaram resultados satisfatórios nos parâmetros que foram utilizados para validação,

aproximando assim o modelo da realidade. Para além disso, o número de simulações consideradas (15) foi adequada para a comparação dos diferentes cenários.

4.2. Avaliação dos cenários alternativos

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos em 15 simulações de 1 hora, relativos à comparação ambiental e ao nível do desempenho do tráfego entre o cenário de referência (rotunda de uma via de circulação) e os dois cenários alternativos, um substituindo por uma rotunda de duas vias de circulação e o outro por uma turbo-rotunda.

4.2.1. Tempos de viagem

O primeiro parâmetro utilizado como meio comparativo entre os diferentes cenários foi os tempos de viagens ao longo do domínio de estudo. Os seus resultados estão ilustrados na Figura 20. De um modo geral, verificaram-se poupanças de tempo nas duas alternativas apresentadas, que foram quantificadas em 14% na rotunda tradicional de duas vias e de 13% na turbo-rotunda. Assim sendo, ambas as alternativas apresentam uma poupança nos tempos de viagem, com uma ligeira vantagem para a rotunda de duas vias.

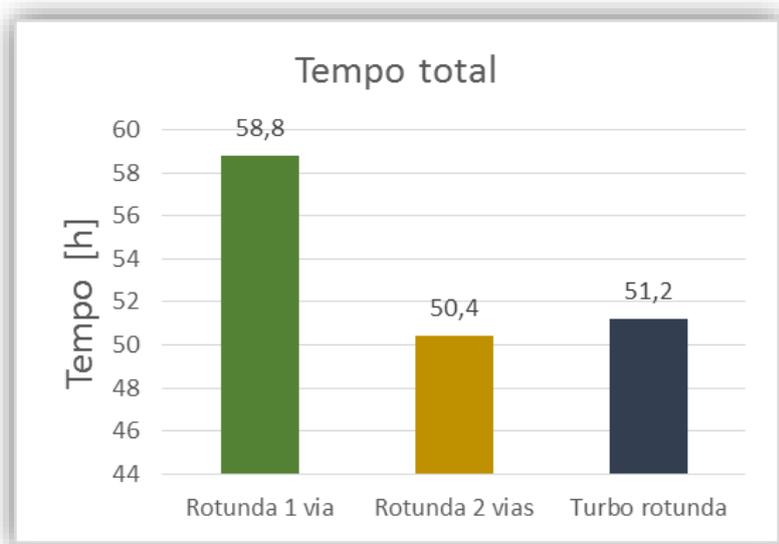


Figura 20 – Comparação dos cenários em termos do tempo total de todo o domínio de estudo.

4.2.2. Velocidade média

O segundo parâmetro de comparação dos cenários foi relativo à velocidade média, cujos resultados estão expressos na Figura 21.

Analisando os dados confirma-se um aumento da velocidade média em 13% e 12% na rotunda de duas vias e na turbo-rotunda, respetivamente. Este aumento está relacionado com os tempos de viagem discutidos anteriormente, pois aumentando a velocidade leva a que os tempos de viagem sejam mais curtos e com isto indica que existiu maior fluidez de tráfego.

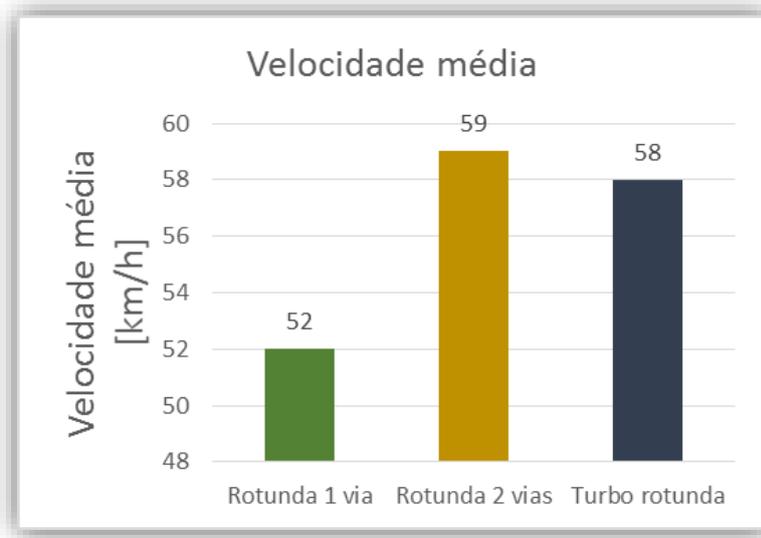


Figura 21 – Comparação dos cenários em termos da velocidade média de todo o domínio de estudo.

4.2.3. Modos VSP e Emissões

Esta secção apresenta os resultados relativos à distribuição dos modos VSP, que seguidamente foram utilizados para estimar as emissões de poluentes geradas para cada cenário estudado.

Na Figura 22 estão ilustradas as percentagens das frequências relativas que cada modo teve para cada domínio de estudo analisado e no Anexo D estão apresentados os respetivos valores absolutos. Examinando os dados da referida figura é perceptível que, de um modo geral, para ambos os cenários propostos, bem como para o cenário referência os modos 1, 2, 3 e 4 foram os mais utilizados. Estes modos correspondem às situações nas quais os veículos desacelerarem quando se aproximam da rotunda (modos 1 e 2), entram na sua zona de circulação a uma velocidade baixa (modo 3) e aceleram quando se dirigem ao respetivo ramo de saída desta (modo 4). Em particular, a rotunda de uma via apresentou uma maior percentagem de modos 3 (30%) em comparação com a rotunda tradicional de duas vias e a turbo-rotunda, com 22% e 25%, respetivamente. Refira-se ainda que a rotunda de duas vias apresentou taxas de aceleração e desaceleração mais elevadas face à turbo-rotunda. A maior percentagem relativa dos modos 1 (11%) e 4 (35%) confirmam estes resultados.

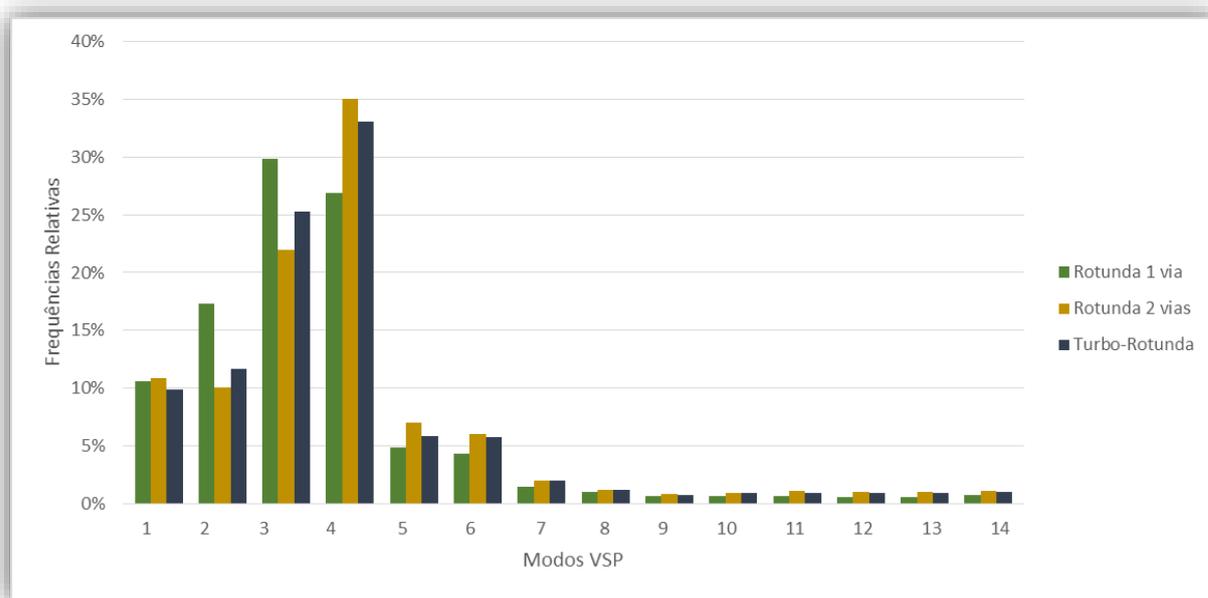


Figura 22 – Comparação dos cenários em termos dos modos VSP de todo o domínio de estudo.

Através dos modos VSP calculados foi possível estimar as emissões dos poluentes CO₂, CO, NO_x e HC. Na Figura 23 a-d, estão ilustrados os valores dos poluentes supracitados para os diferentes cenários analisados.

No caso das emissões de CO₂ (ver Figura 23-a), e tendo em conta o valor total estimado para o domínio de estudo com a rotunda de uma via, cada veículo emitiu em média 147 gCO₂/km. No caso da rotunda tradicional de duas vias, foi registada uma poupança de 27%, o que se traduziu em emissões médias de 107 gCO₂/km por cada veículo da rede. No que diz respeito à da turbo-rotunda, a poupança seria de 20%, correspondente a 117 gCO₂/km em média.

No entanto, a turbo-rotunda mostrou-se como melhor opção ao nível das emissões de CO (ver Figura 23-b). Assim sendo, esta solução permitiu uma diminuição de CO em 16% face à rotunda tradicional de uma via enquanto na rotunda de duas vias a diferença cifrou-se em 12%. Esta diferença entre os dois cenários propostos pode ser explicado pelas menores taxas de aceleração e desaceleração registadas na turbo-rotunda (ver Figura 22). Saliente-se que as emissões de CO são bastante influenciadas pelas taxas de acelerações e desacelerações dos veículos.

Para o poluente NO_x (ver Figura 23-c), e à semelhança das emissões de CO₂, a rotunda de duas vias apresentou melhor desempenho ambiental do que a turbo-rotunda, pois teve uma diminuição de 19% face à situação atual (rotunda de uma via) e a turbo-rotunda possuiu 15%.

Considerando as emissões de HC, observou-se uma diminuição de 21% na rotunda tradicional de duas vias e de 30% na turbo-rotunda face ao cenário de referência.

A justificação do menor desempenho ambiental da turbo-rotunda face à rotunda de duas vias (nomeadamente para as emissões de CO₂ e NO_x) é devido à considerável percentagem de viragens à esquerda a partir do ramo de entrada 1, que é de 50% no período considerado. Um estudo anterior (43) confirma que quando as percentagens de viragem à esquerda são elevadas, a turbo-rotunda é menos eficaz, tanto ao nível da capacidade como ao nível das emissões. Os resultados obtidos neste trabalho confirmam esses factos.

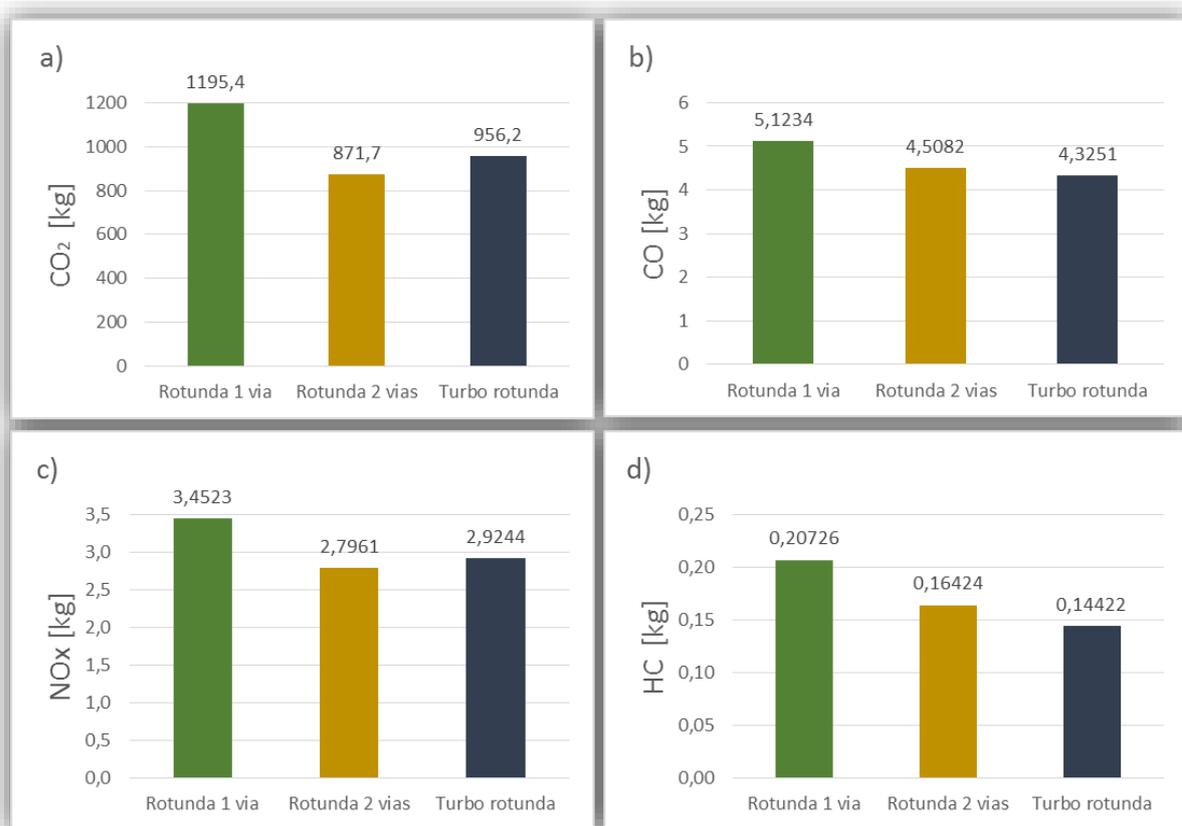


Figura 23 – Comparação dos cenários em termos de emissões dos poluentes de todo o domínio de estudo: a) CO₂; b) CO; c) NO_x; d) HC.

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

O trabalho realizado nesta Dissertação de Mestrado consistiu na análise energético-ambiental de uma rotunda de uma via, localizada em Coimbra, através da comparação com uma rotunda tradicional de duas vias e uma turbo-rotunda a serem implementadas no mesmo local. Para atingir os objetivos pretendidos, foi usado o modelo de simulação de tráfego VISSIM e o modelo de emissões VSP. Refira-se ainda que a comparação das três soluções foi feita durante a hora de ponta de manhã.

Começando pela análise da rotunda existente (cenário de referência), foi necessário proceder a um processo de monitorização experimental que foi executada durante vários dias recorrendo a dois condutores. Esta limitação da amostra de condutores faz com que os resultados obtidos não se possam extrapolar ao universo global de condutores, pois seria necessário uma maior variedade de condutores, de modo a abranger diversos modos de condução. Os dados recolhidos foram relativos aos volumes de tráfego, matrizes origem-destino (O-D), dinâmica do veículo (velocidade, aceleração e desaceleração) e ao nível das características da via.

Através destes dados recolhidos foi possível calibrar e validar o modelo de tráfego VISSIM. Para o processo de validação foram utilizados os testes estatísticos *GEH*, *RSME*, *t-student* e de Kolmogorov-Smirnov (K-S) a fim de comparar os valores observados nas medições com os estimados pelo modelo, de acordo com o parâmetro de saída selecionado. Os parâmetros de comparação utilizados foram os volumes de tráfego, os tempos de viagem, as velocidades médias, os modos VSP e respetivas emissões.

Com o cenário de referência devidamente validado, foi possível proceder à comparação dos resultados do mesmo com as duas alternativas propostas 1) conversão da rotunda de uma via em uma rotunda convencional de duas vias e 2) implementação de uma turbo-rotunda. Para fazer a comparação foram utilizados os parâmetros relativos aos tempos de viagem, velocidade média, modos VSP e emissões de CO₂, CO, NO_x e HC.

Os resultados indicaram que relativamente aos tempos de viagem, ambos os cenários alternativos propostos apresentaram uma diminuição superior a 10% quando comparados com a rotunda de uma via, enquanto as velocidades médias aumentaram mais de 10%. Isto deveu-se ao facto de tanto a rotunda de duas vias como a turbo-rotunda apresentarem duas vias, auferindo uma maior capacidade face à rotunda de uma via o que diminui o congestionamento. No que diz respeito às emissões, ambas as soluções mostraram-se mais eficazes que a solução existente. Considerando como critério as emissões de CO₂ e NO_x, a rotunda tradicional de duas vias é a melhor solução ambiental, pois registou uma diminuição de 27% e 19% respetivamente, quando comparada com

a rotunda de uma via. No que diz respeito à turbo-rotunda, as diminuições foram de 20% e 15% no CO₂ e NO_x, respetivamente

No entanto, a turbo-rotunda permitiu uma redução mais significativa das emissões de CO e HC face à rotunda de duas vias. Os resultados indicaram uma redução de 16% no CO e de 30% no caso das emissões de HC, em comparação ao cenário de referência. Por sua vez, a rotunda de duas vias teve uma diminuição de 12% CO e 21% HC. Este valor de CO foi mais baixo que o ocorrido na turbo-rotunda, devido à rotunda tradicional de duas vias ter acelerações mais elevadas, o que faz com que existisse uma diminuição menor deste poluente.

Como síntese, pode-se evidenciar a potencialidade das soluções apresentadas ao nível do desempenho do tráfego e ainda nas emissões de poluentes. A turbo-rotunda mostrou-se eficaz no âmbito das maiores reduções de CO, explicada pela obrigatoriedade de os veículos selecionarem uma via específica para atingirem o ramo de saída que pretendem e que presumivelmente afeta as acelerações. Porém, a turbo-rotunda revelou-se menos eficaz nas emissões de CO₂ e de NO_x devido as elevadas viragens à esquerda por parte dos veículos, nomeadamente a partir do ramo mais congestionado.

Seguidamente, são sugeridos alguns trabalhos futuros de modo a aprofundar e comparar os resultados obtidos nesta dissertação:

- ❖ Comparar os resultados obtidos usando o modelo de tráfego VISSIM com outros modelos microscópicos (ex. AIMSUN, PARAMICS) de modo a identificar potenciais diferenças ao nível da dinâmica do veículo e suas implicações nas emissões de poluentes;
- ❖ Utilizar a metodologia usada neste trabalho para comparar o impacto ambiental de uma sequência de rotundas no mesmo corredor, seja pela sua substituição das rotundas existentes por outras soluções de rotundas (exemplo uma turbo-rotunda), seja pela utilização de cruzamentos com sinais luminosos;
- ❖ Desenvolver modelos de regressão empíricos para turbo-rotundas de modo a validar os resultados obtidos nesta dissertação.

Referências Bibliográficas

- (1) Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária (ANSR). Sinistralidade Rodoviária - Relatório Anual. Portugal: Observatório de Segurança Rodoviária; 2012 [citado em 2013 Março]. Disponível em:
<http://www.ansr.pt/LinkClick.aspx?fileticket=szAd34aelrU%3D&tabid=402&mid=1338&language=pt-PT>

- (2) Seco AM, Ribeiro NA, Macedo J, Silva AMC. Manual do Planeamento de Acessibilidades e Transportes: Acalmia de Tráfego. Portugal: Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte (CCDR-N); 2008 [citado em 2013 Março]. Disponível em:
http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/vasconcelos/Documentos/ManualdeAcessibilidades/ManuaisCCDRNmiolo_AF/10Acalmia_AF.pdf

- (3) National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). Roundabouts: An Informational Guide. 2 ed. Washington, D. C.: Transportation Research Board; 2010.

- (4) Silva AMCB, Seco ÁJM, Marques JS, Marques P, Santos GGD. Potencialidades das Técnicas de Acalmia de Tráfego na Regulação do Atravessamento de Localidades. Lisboa: III Congresso Rodoviário Português (CRP). 2004 [citado em 2013 Março]: Disponível em:
http://www.crp.pt/docs/A11S98-seguranca_04.pdf

- (5) ASME. 2028 Vision for Mechanical Engineering – A report of the Global Summit on the Future of Mechanical Engineering. Nova Iorque: American Society of Mechanical Engineers; 2008.

- (6) Neto T. Desenvolvimento de um sig de código aberto para simulação microscópica de tráfego urbano [Tese Mestrado]. Belo Horizonte: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais; 2009 [citado em 2013 Março]. Disponível em:
<http://www.mmc.cefetmg.br/info/downloads/D048-TuffiSalibaNeto.pdf>

- (7) Moreira R. Uma contribuição para avaliação do modelo "CORSIM" em simulações de tráfego urbano no Rio de Janeiro [Tese Mestrado]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2005 [citado em 2013 Abril]. Disponível em:
http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetailheObraForm.do?select_action=&co_o_bra=127273

- (8) Vasconcelos A. Modelos de Atribuição/Simulação de Tráfego: O Impacto na Qualidade dos Resultados de Erros no Processo de Modelação [Tese Mestrado]. Coimbra: Universidade de Coimbra; 2004 [citado em 2013 Abril]. Disponível em:
<http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/vasconcelos/Documentos/Modelos%20de%20atribuição%20e%20simulação%20de%20tráfego.%20O%20impacto%20na%20qualidade%20dos%20resultados%20de%20erros%20no%20processo%20de%20modelação.pdf>
- (9) RITA. Integrated Corridor Management. Washington, DC: US DOT; [atualizado em 2013; citado em 2013 Abril]. Disponível em:
http://www.its.dot.gov/icms/docs/knowledgebase/html/news_winter08.htm
- (10) Hardy M, Dodge L, Smith T, Vasconez KC, Wunderlich KE. Evacuation Management Operations Modeling Assessment: Transportation Modeling Inventory. 15th World Congress on Intelligent Transport Systems and ITS America's 2008 Annual Meeting, Nova Iorque. 2008; p. 17.
- (11) Figueiredo L. Sistemas Inteligentes de Transporte [Tese Doutoramento]. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; 2005 [citado em 2013 Março]. Disponível em:
http://ave.dee.isep.ipp.pt/~gris/private/Teses/Thesis_PhD_Lino2005.pdf
- (12) Vilarinho C. Calibração de Modelos Microscópicos de Simulação de Tráfego em Redes Urbanas [Tese Mestrado]. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; 2008 [citado em 2013 Março]. Disponível em:
<http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/65792/2/951101.pdf>
- (13) Spiegelman C, Park ES, Rilett LR. Transportation Statistics and Microsimulation. Taylor & Francis; 2010.
- (14) Silva PCM, Tyler N. Sobre a validação de modelos microscópicos de simulação de tráfego. Transportes. 2002; 2237-1346.
- (15) Rao L, Owen L, Goldsman D. Development and Application of a Validation Framework for Traffic Simulation Models. Simulation Conference Proceeding. 1998; 2: 1079-1086.
- (16) Coelho MC, Farias TL, Roupail NM. Effect of roundabout operations on pollutant emissions. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2006; 11(5): 333-343.

- (17) Frey HC, Roupail NM, Zhai H. Speed and Facility – Specific Emission Estimates for On-Road Light-Duty Vehicles based on Real-World Speed Profiles. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2006; 1987: 128-137.
- (18) Jimenez-Palacios J. Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing [Tese Doutorado]. Massachusetts Institute of Technology; 1999 [citado em 2013 Abril]. Disponível em:
http://zanran_storage.s3.amazonaws.com/cires.colorado.edu/ContentPages/81873500.pdf
- (19) USEPA. Methodology for Developing Modal Emission Rates for EPA's Multi-Scale Motor Vehicle & Equipment Emission System. Raleigh, NC: North Carolina State University; 2002 [citado em 2013 Abril]. Disponível em:
<http://www.epa.gov/otaq/models/ngm/r02027.pdf>
- (20) Coelho MC, Frey HC, Roupail NM, Zhai H, Pelkmans L. Assessing methods for comparing emissions from gasoline and diesel light-duty vehicles based on microscale measurements. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2009; 14(2): 91-99.
- (21) Salamati K, Coelho MC, Fernandes PJ, Roupail NM, Frey HC, Bandeira JB. Emission Estimation at Multilane Roundabouts: Effect of Movement and Approach Lane. Apresentado na 92ª Conferência Anual do Transportation Research Board, Washington DC. 2013; p.19.
- (22) Anya AR, Roupail NM, Frey HC, Liu B. Method and Case Study for Quantifying Local Emissions Impacts of Transportation Improvement Project Involving Road Realignment and Conversion to Multilane Roundabout. Apresentado na 92ª Conferência Anual do Transportation Research Board, Washington DC. 2013.
- (23) PTV AG. ptv vision VISSIM 5.20 User Manual. Karlsruhe: ptv; 2009
- (24) Fontes T, Fernandes P, Rodrigues H, Bandeira J, Pereira SR, Khattak AJ, Coelho MC. Are Ecolanes a Sustainable Option to Reduce Emissions in a Medium-Sized European City?. Apresentado na 92ª Conferência Anual do Transportation Research Board, Washington. 2013; p.19.
- (25) Mahmod M, van Arem B, Pueboobpaphan R, Igamberdiev M. Modeling Reduced Traffic Emissions in Urban Areas: The Impact of Demand Control, Banning Heavy Duty Vehicles, Speed Restriction and Adaptive Cruise Control. Apresentado na 89ª Conferência Anual do Transportation Research Board, Washington DC. 2010; p.16.

- (26) Bandeira J, Pereira SR, Fontes T, Fernandes P, Khattak AJ, Coelho MC. An “Eco-traffic” assignment tool. Apresentado na 16ª Conferência Anual do Euro Working Group on Transportation, Porto. 2013; 4-6/09.
- (27) Google. Google Earth Pro. 2013 [citado em 2013 Abril]. Disponível em:
<http://www.google.com/enterprise/mapsearch/products/earthpro.html>
- (28) Google. Google Maps. 2013 [citado em 2013 Março]. Disponível em:
<https://www.google.pt/maps/preview>
- (29) Toyota Caetano Portugal. Auris. 2013 [citado em 2013 Abril]. Disponível em:
http://www.toyota.pt/cars/new_cars/auris/index.tmex
- (30) Qstarz International CO. Qstarz Beyond Navigation. 2013 [citado em 2013 Maio]. Disponível em:
<http://www.qstarz.com/Products/CommercialGPS%20Products/BT-Q1000XTC-F.htm>
- (31) Rodrigues H. Sistemas inteligentes de transportes – impacte nos consumos e emissões [Tese Mestrado]. Aveiro: Universidade de Aveiro; 2012 [citado em 2013 Abril]. Disponível em:
<http://ria.ua.pt/bitstream/10773/9939/1/6846.pdf>
- (32) Li Z, DeAmico M, Chitturi MV, Bill AR, Noyce DA. Calibration of VISSIM Roundabout Model: A Critical Gap and Follow-up Headway Approach. Apresentado na 92ª Conferência Anual do Transportation Research Board. 2013; p.23.
- (33) Hale D. How many NETSIM Runs are Enough?. McTrans Newsletter. 1997; 11: 9.
- (34) Dowling R, Skabardonis A, Alexiadis V. Traffic Analysis Toolboz Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software. Washington D.C.: U.S. Department of Transportation; 2004 [citado em 2013 Março]. Disponível em:
http://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysistools/tat_vol3/vol3_guidelines.pdf
- (35) TMIP. Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual. 2 ed. Cambridge: Cambridge Systematics, Inc; 2010.

- (36) Wikipedia. Kolmogorov-Smirnov test. 2013 [atualizado em 2013 Novembro; citado em 2013 Novembro]. Disponível em:
http://en.wikipedia.org/wiki/Kolmogorov-Smirnov_test
- (37) Wikipedia. Student's t-test. 2013 [atualizado em 2013 Outubro; citado em 2013 Outubro]. Disponível em:
http://en.wikipedia.org/wiki/Student's_t-test
- (38) Silva A, Seco ÁJM. Dimensionamento de Rotundas – Documento Síntese. Portugal: INIR – Instituto de Infraestruturas Rodoviárias; 2012 [citado em 2013 Março]. Disponível em:
<http://www.inir.pt/portal/LinkClick.aspx?fileticket=jXR89w1LhYw%3D>
- (39) Silva AB, Santos S, Gaspar M. Turbo-roundabout use and design. CITTA 6th Annual Conference on Planning Research, Coimbra. 2013 [citado em 2013 Junho]. Disponível em:
<http://around-fct.weebly.com/uploads/1/3/3/4/13343017/turbo-roundaboutuseanddesign.pdf>
- (40) Vasconcelos L, Silva AB, Seco Á. Safety analysis of turbo-roundabouts using the SSAM technique. CITTA 6th Annual Conference on Planning Research, Coimbra. 2013 [citado em 2013 junho]. Disponível em:
http://around-fct.weebly.com/uploads/1/3/3/4/13343017/safety_analysis_of_turbo-roundabouts_using_the_ssam_technique.pdf
- (41) DHV, Royal Haskoning. Roundabouts – Application and Design. Ministry of Transport, 518 Public Works and Water management; 2009.
- (42) CROW. Turborotondes. Dutch Information and Technology Platform; 2008.
- (43) Vasconcelos L, Silva AB, Seco ÁM, Fernandes P, Coelho MC. TURBO-ROUNDABOUTS: A MULTI-CRITERIA ASSESSMENT ON INTERSECTION CAPACITY, SAFETY AND EMISSIONS. Aceite para apresentação na 93ª Conferência Anual do Transportation Research Board. 2014

Anexos

Anexo A – Fatores de emissão dos poluentes para os respetivos modos VSP

Neste anexo são apresentados os fatores de emissão de NO_x , HC, CO e CO_2 em função dos modos VSP para veículos ligeiros de passageiros a gasolina e gasóleo, respetivamente.

Tabela A. 1 – Modos VSP e respetivos fatores de emissão para veículos ligeiros de passageiros a gasolina com cilindrada menor que 1400 cm^3 (19).

Modo VSP	VSP (kW/ton)	Fatores de Emissão (g/s)			
		NO_x	HC	CO	CO_2
1	VSP < - 2	0.0009	0.004	0.0078	1.6711
2	- 2 <= VSP < 0	0.0006	0.003	0.0039	1.458
3	0 <= VSP < 1	0.0003	0.004	0.0033	1.1354
4	1 <= VSP < 4	0.0012	0.0004	0.0083	2.2333
5	4 <= VSP < 7	0.0017	0.0005	0.011	2.9199
6	7 <= VSP < 10	0.0024	0.0007	0.017	3.5253
7	10 <= VSP < 13	0.0031	0.0008	0.02	4.1075
8	13 <= VSP < 16	0.0042	0.001	0.0292	4.635
9	16 <= VSP < 19	0.0051	0.0011	0.0355	5.1607
10	19 <= VSP < 23	0.0059	0.0014	0.0551	5.6325
11	23 <= VSP < 28	0.0076	0.0021	0.1138	6.5348
12	28 <= VSP < 33	0.0121	0.0034	0.2076	7.5852
13	33 <= VSP < 39	0.0155	0.0049	0.4418	9.0242
14	39 <= VSP	0.0179	0.0109	0.8823	10.0884

Tabela A. 2 – Modos VSP e respetivos fatores de emissão (NO_x, HC, CO e CO₂) para veículos ligeiros de passageiros a gasóleo (19).

Modo VSP	VSP (kW/ton)	Fatores de Emissão (g/s)			
		NO _x	HC	CO	CO ₂
1	VSP < - 2	0.001294	0.000135	0.00003	0.206
2	- 2 <= VSP < 0	0.002623	0.000113	0.00007	0.608
3	0 <= VSP < 1	0.003377	0.000112	0.00014	0.728
4	1 <= VSP < 4	0.006047	0.000117	0.00025	1.504
5	4 <= VSP < 7	0.009364	0.000198	0.00029	2.343
6	7 <= VSP < 10	0.012533	0.00023	0.00069	3.287
7	10 <= VSP < 13	0.015481	0.000236	0.00058	4.2
8	13 <= VSP < 16	0.017818	0.000233	0.00064	4.936
9	16 <= VSP < 19	0.021216	0.000242	0.0061	5.574
10	19 <= VSP < 23	0.032526	0.000277	0.00101	6.262
11	23 <= VSP < 28	0.055746	0.000367	0.00115	7.396
12	28 <= VSP < 33	0.083511	0.000405	0.00096	8.757
13	33 <= VSP < 39	0.096899	0.000396	0.00077	9.866
14	39 <= VSP	0.100746	0.000422	0.00073	10.361

Anexo B – Cálculo das taxas de desaceleração

Neste anexo é apresentado os valores das desacelerações que foram aplicadas na modelação, através do cálculo da velocidade de circulação.

Tabela B. 1 – Taxas de desaceleração aplicada aos pontos do estudo de caso.

Localização	Raio (m)	Velocidade de circulação (km/h)	Desaceleração (m/s ²)
Ilha da rotunda	21	19,4	1,4
Entrada 1	17,4	17,6	1,3
Entrada 4	18	17,9	1,3
Entrada 3	20	18,9	1,35
Entrada 2	9	12,7	1,1
Curva entre duas rotundas	10	15,1	1,2
Entrada Norte da 2 ^a rotunda	19	18,4	1,35
Saída Sul da 2 ^a rotunda	14	15,8	1,2
Entrada Sul da 2 ^a rotunda	15	16,4	1,25
Saída Norte da 2 ^a rotunda	20	18,9	1,35
Ilha da 2 ^a rotunda	15	16,4	1,25

Anexo C – Resultados da avaliação dos modos VSP do cenário referência

Neste anexo são apresentados os resultados dos modos VSP do cenário referência comparando com o estimado pelo VISSIM, de acordo com as rotas que foram estipuladas.

Tabela C. 1 – Resultados da avaliação em termos de modos VSP para as rotas 1-1, 1-2 e 1-3.

	Rota 1-1		Rota 1-2		Rota 1-3	
	Observado	Estimado	Observado	Estimado	Observado	Estimado
Modo 1	54	122	52	68	52	61
Modo 2	40	60	65	50	56	47
Modo 3	20	31	40	15	37	21
Modo 4	58	39	59	35	68	62
Modo 5	110	39	30	25	41	22
Modo 6	96	17	21	59	23	54
Modo 7	39	22	9	20	16	19
Modo 8	22	34	8	4	8	6
Modo 9	11	40	8	2	3	3
Modo 10	9	31	6	1	3	2
Modo 11	2	31	4	1	1	1
Modo 12	0	4	2	0	2	0
Modo 13	0	3	2	0	1	0
Modo 14	0	2	1	0	2	0
Total	461	474	303	281	310	299
Desvio máximo	0.209		0.119		0.098	
Teste K-S	Valor Crítico 99%	0.107		0.135		0.132

Tabela C. 2 – Resultados da avaliação em termos de modos VSP para as rotas 2-1, 2-2 e 2-3.

	Rota 2-1		Rota 2-2		Rota 2-3		
	Observado	Estimado	Observado	Estimado	Observado	Estimado	
Modo 1	42	48	4	4	7	8	
Modo 2	29	43	10	12	7	11	
Modo 3	29	9	7	4	5	5	
Modo 4	39	21	11	3	10	4	
Modo 5	32	29	4	5	5	2	
Modo 6	31	9	2	2	5	5	
Modo 7	22	20	0	1	2	5	
Modo 8	11	25	1	1	0	3	
Modo 9	7	21	0	1	1	2	
Modo 10	5	6	0	0	2	1	
Modo 11	7	2	0	0	1	1	
Modo 12	1	1	0	0	0	0	
Modo 13	2	1	0	0	0	0	
Modo 14	1	0	1	0	1	0	
Total	255	235	37	34	48	47	
Desvio	0.109		0.147		0.171		
Teste K-S	Valor Crítico 99%	0.147		0.387		0.334	

Tabela C. 3 – Resultados da avaliação em termos de modos VSP para as rotas 3-1, 3-2 e 3-3.

	Rota 3-1		Rota 3-2		Rota 3-3	
	Observado	Estimado	Observado	Estimado	Observado	Estimado
Modo 1	42	45	8	8	16	16
Modo 2	21	45	9	9	7	14
Modo 3	14	14	11	5	9	8
Modo 4	68	31	5	7	10	5
Modo 5	54	45	3	8	7	6
Modo 6	22	8	4	3	6	6
Modo 7	12	17	3	1	2	4
Modo 8	8	31	1	1	1	5
Modo 9	7	14	0	0	2	2
Modo 10	6	5	1	0	1	1
Modo 11	3	3	1	0	0	1
Modo 12	3	1	0	0	0	0
Modo 13	2	1	0	0	2	0
Modo 14	3	0	0	0	3	0
Total	265	259	45	43	67	69
Desvio	0.112		0.117		0.172	
Teste K-S	Valor Crítico 99%	0.142		0.347		0.278

Anexo D – Resultados da avaliação dos modos VSP dos cenários alternativos

Tabela D. 1 - Resultados da avaliação em termos de modos VSP de todo o domínio de estudo para todos os cenários.

	Rotunda 1 via	Rotunda 2 vias	Turbo-rotunda
Modo 1	28484	27308	24004
	11%	11%	10%
Modo 2	46610	25165	28378
	17%	10%	12%
Modo 3	80274	55362	61485
	30%	22%	25%
Modo 4	72505	88077	80404
	27%	35%	33%
Modo 5	12947	17615	14189
	5%	7%	6%
Modo 6	11653	15099	13952
	4%	6%	6%
Modo 7	3884	5033	4730
	1%	2%	2%
Modo 8	2590	3020	2838
	1,0%	1,2%	1,2%
Modo 9	1812	2013	1837
	0,7%	0,8%	0,8%
Modo 10	1682	2391	2297
	0,6%	1,0%	0,9%
Modo 11	1606	2768	2128
	0,6%	1,1%	0,9%
Modo 12	1554	2516	2299
	0,6%	1,0%	0,9%
Modo 13	1580	2420	2296
	0,6%	1,0%	0,9%
Modo 14	2072	2710	2352
	0,8%	1,1%	1,0%
Total	269253	251497	243189