



**INÊS SILVA
CERQUEIRA**

**Análise Comparativa de Diferentes Tipos de
Interseções em Meio Urbano**



**INÊS SILVA
CERQUEIRA**

**Análise Comparativa de Diferentes Tipos de
Interseções em Meio Urbano**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

aos meus pais e irmã.

o júri

Presidente

Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
Professora Associada da Universidade de Aveiro

Professor Doutor António Luís Pimentel Vasconcelos
Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Viseu – Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Professor Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao Professor Doutor Joaquim Macedo, pela excelente e rigorosa orientação, pela dedicação, disponibilidade, e interesse permanente, pelas valiosas sugestões e pela compreensão. O meu muito obrigada pois sem a sua preciosa ajuda este trabalho não teria sido possível.

À Câmara Municipal de Matosinhos, em especial ao Eng^o António Gonçalves, Chefe da Divisão de Fiscalização de Obras, por toda ajuda e disponibilidade prestada.

À Tecnifeira – Engenharia e Construção, SA., empresa encarregue da empreitada a que diz respeito o caso de estudo, em particular ao Eng.^o Sérgio Vilas Boas pela prontidão na partilha de informação e prestabilidade.

Aos professores da Faculdade de Engenharia de Sorocaba, em particular ao Professor Renato Gianolla, pela cooperação e partilha de informação, e a todos os meus colegas e amigos durante o período de intercâmbio no Brasil.

A todos os meus professores, colegas e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

À TSS suport pela prontidão de resposta, face a dúvidas relacionadas com o *software* utilizado, e pela cooperação no desenvolvimento do modelo.

À Soltráfego, em especial ao Senhor Carlos Oliveira, por ter disponibilizado os contadores de tráfego e por toda a ajuda prestada.

A toda a minha família pelo incentivo e pelo apoio demonstrado.

Aos meus pais por me terem ajudado e incentivado sempre, por terem estado sempre do meu lado em todo o meu percurso académico, vibrando com as minhas vitórias e incentivando a ir mais longe.

À minha irmã pela colaboração, por estar sempre do meu lado em todos os acontecimentos da minha vida, pela paciência e pelo amor.

Aos meus amigos.

A todos, o meu sincero obrigada!

palavras-chave

Rotundas; interseções semaforizadas; indicadores de desempenho; microssimulação; AIMSUN

resumo

Atualmente, devido à melhoria das condições de vida das sociedades modernas tem-se verificado um crescimento do uso do transporte rodoviário, nomeadamente do transporte individual. Por esta razão, o controlo de tráfego nas interseções urbanas tornou-se mais exigente e importante, afetando com isso a capacidade, o tempo de viagem, a eficiência de desempenho e segurança de toda a rede de tráfego.

Esta dissertação pretende contribuir para o estudo e avaliação da substituição de uma interseção semaforizada por uma rotunda em Perafita (Matosinhos), avaliando o desempenho de ambas as interseções e comparando-as.

Para a comparação e caracterização do desempenho de ambas as interseções foi necessário recorrer a indicadores de desempenho, que se basearam no volume de tráfego que chega à interseção. Desta forma, foram utilizados como indicadores, a capacidade, o grau de saturação, o atraso médio por veículo e o comprimento das filas de espera.

Para estimar os valores desses indicadores foram utilizadas metodologias específicas para cada interseção (TRL, SETRA, FCTUC e HCM) e um software de simulação de tráfego, o AIMSUN. Primeiramente, os resultados da simulação foram comparados com os resultados dos modelos clássicos, ficando patente as vantagens do recurso à microssimulação. Em segundo, o impacto da substituição da interseção semaforizada pela rotunda, utilizando os resultados obtidos pelo software, determinaram que a rotunda, para aquela localização e condições de tráfego, apresenta um melhor desempenho previsto, uma vez que, a simulação da rotunda face à interseção semaforizada apresentou maior capacidade, menor atraso médio, menor comprimento de filas de espera, menor grau de saturação, menor tempo de viagem e menor tempo de paragem por veículo. O que demonstra que em termos de condições operacionais, a rotunda traz mais vantagens para todo o tipo de veículos.

keywords

Roundabout; signal intersection; performance indicators; microsimulation; AIMSUN

abstract

Currently, due to the improvement of the living conditions of modern societies is possible to verify an increase in the road transport utilization, particularly the individual transport. For this reason, traffic control at urban intersections has become more demanding and crucial, influencing the capacity, travel time, performance efficiency and safety of the entire road network.

This thesis intends to contribute to the study and evaluation of the replacement of an intersection with traffic lights by a roundabout in Perafita (Matosinhos), assessing the performance of both intersections and comparing them.

For comparison and description of the performance of both intersections, it was necessary to use performance indicators, which were based on the volume of traffic that reaches the intersection. In this way, the capacity, degree of saturation, average delay per vehicle and length of waiting queues were used as indicators.

To estimate the values of these indicators, specific methodologies were used for each intersection (TRL, SETRA, FCTUC, and HCM) and the traffic simulation software, AIMSUN. Firstly, the results of the simulation were compared with the results of the classical models, where the advantages of the use of microsimulation were noticeable. Secondly, the impact of the replacement of the traffic light intersection by the roundabout, using the results obtained by the software, determined that the roundabout, due to its location and traffic conditions, has a better predicted performance. Since the simulation of the roundabout compared with the traffic light intersection showed higher capacity, lower average delay, shorter queue length, lower saturation, shorter travel time and shorter vehicle downtime is possible to conclude that in terms of operating conditions, the roundabout brings more advantages for all types of vehicles.

Índice

Índice de Figuras	xiii
Índice de quadros.....	xv
Simbologia.....	xvii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento.....	3
1.2. Motivação do Caso de Estudo	4
1.3. Objetivos.....	5
1.4. Estrutura da Dissertação	5
2. Rotunda versus Interseção SemafORIZADA	7
2.1. Introdução	9
2.2. Caracterização das Interseções em Estudo	10
2.2.1. Interseções SemafORIZADAS.....	10
2.2.2. Rotundas	13
2.2.3. Análise Comparativa	16
2.3. Critérios de Seleção	17
2.3.1. Volume de Tráfego.....	18
2.3.2. Integração na Rede Viária	18
2.3.3. Custo/Benefício	19
2.4. Apresentação de Casos – Análises Comparativas Semelhantes à Efetuada.....	20
3. Avaliação de desempenho	23
3.1. Introdução.....	25
3.2. Objetivo	25
3.3. Indicadores de Desempenho.....	26
3.4. Métodos de Cálculo de Indicadores de Desempenho - Rotundas	26
3.4.1. Método do TRL	27
3.4.1.1. Atraso Médio	29
3.4.2. Método do SETRA	34
3.4.3. Modelo FCTUC.....	35
3.4.4. Atraso Médio	36
3.4.5. Filas de Espera.....	37
3.5. Métodos de Cálculo de Indicadores de Desempenho – Interseção SemafORIZADA ...	38
3.5.1. Fluxo de Saturação	38
3.5.1.1. Estimação do Débito de Saturação	40
3.5.2. Expressão do Cálculo de Capacidade.....	46
3.5.3. Grau de Saturação.....	46
3.5.4. Atraso Médio	47

3.5.5. Filas de Espera	48
3.6. Modelos de Microsimulação de Tráfego	49
3.6.1. Aplicações dos Modelos de Microsimulação de Tráfego	51
3.6.2. Desenvolvimento de um Modelo de Microsimulação	52
3.6.3. Simulador de Tráfego AIMSUN	52
3.6.3.1. Calibração.....	53
3.6.3.2. Validação.....	55
4. Caso de Estudo	57
4.1. Introdução.....	59
4.2. Localização do caso de estudo	59
4.3. Descrição da Situação Existente	60
4.4. Recolha de Dados.....	63
4.5. Metodologia Utilizada.....	66
4.5.1.3. Construção do Modelo	67
4.6. Custo das Soluções.....	70
5. Análise de Resultados.....	71
5.1. Interseção SemafORIZADA	73
5.1.1. Análise Segundo Metodologias Convencionais.....	73
5.1.1.1. Capacidade	73
5.1.1.2. Grau de Saturação	74
5.1.1.3. Atraso Médio por Ramo.....	75
5.1.1.4. Filas de Espera	75
5.1.2. Análise de Desempenho da Interseção SemafORIZADA Usando a Microsimulação	76
5.1.2.1. Capacidade	76
5.1.2.2. Grau de Saturação	77
5.1.2.3. Atraso Médio por Ramo.....	77
5.1.2.4. Fila de Espera.....	78
5.1.3. Comparação dos Resultados Obtidos pelas Duas Metodologias	78
5.1.3.1. Capacidade	78
5.1.3.2. Grau de Saturação	79
5.1.3.3. Atraso Médio por Ramo.....	79
5.1.3.4. Filas de Espera	80
5.2. Rotunda	80
5.2.1. Análise Segundo Metodologias Convencionais.....	81
5.2.1.1. Capacidade	81
5.2.1.2. Grau de Saturação	83
5.2.1.3. Atraso Médio por Ramo.....	84
5.2.1.4. Filas de Espera	84
5.2.2. Análise de Desempenho da Rotunda Usando a Microsimulação	85

5.2.2.1. Capacidade.....	85
5.2.2.2. Grau de Saturação.....	86
5.2.2.3. Atrasos Médio por Ramo.....	87
5.2.2.4. Filas de Espera.....	87
5.2.3. Comparação dos Resultados Obtidos pelas Duas Metodologias.....	87
5.2.3.1. Capacidade.....	87
5.2.3.2. Grau de Saturação.....	88
5.2.3.3. Atraso Médio por Ramo	89
5.2.3.4. Filas de Espera.....	89
5.3. Comparação dos Resultados das Duas Interseções	90
5.3.1. Capacidade.....	90
5.3.2. Grau de Saturação.....	91
5.3.3. Atraso Médio por Ramo	91
5.3.4. Filas de espera	92
5.3.5. Tempo de Viagem	92
5.3.6. Tempo de paragem por veículo	93
5.3.7. Custo das Interseções.....	94
6. Considerações finais	97
6.1. Conclusões.....	99
6.2. Perspetivas Futuras	100
Referências Bibliográficas	101
Anexos.....	A-1
Anexo A: Projeto da Rotunda.....	A-3
Anexo B: Regulação do Sistema Luminoso	A-5

Índice de Figuras

Figura 1: Exemplos de fluxos de tráfego independentes	11
Figura 2: Pontos de conflito em rotundas	15
Figura 3: parâmetros geométricos - Modelo TRL	28
Figura 4: Parâmetros geométricos para o cálculo do atraso geométrico.	33
Figura 5: Parâmetros geométricos – Modelo SETRA	35
Figura 6: Padrões reais e conceptuais de partidas	39
Figura 7: Desenvolvimento de um modelo	52
Figura 8: Fotografia aérea da interseção semaforizada em estudo (gmaps, 2015).....	59
Figura 9: Representação da interseção semaforizada atual (Câmara Municipal de Matosinhos, 2013)	60
Figura 10: Filas de espera na interseção em estudo (gmaps, 2015)	61
Figura 11: Filas de espera na interseção em estudo (gmaps, 2015)	61
Figura 12: Fase A da interseção semaforizada em estudo (Câmara Municipal de Matosinhos, 2013)	62
Figura 13: Fase B da interseção semaforizada em estudo (Câmara Municipal de Matosinhos, 2013)	62
Figura 14: Fase C da interseção semaforizada em estudo (Câmara Municipal de Matosinhos, 2013)	63
Figura 15: Contador de tráfego.....	64
Figura 16: Volume de tráfego, ao longo dos três dias de análise das 9h às 20h	64
Figura 17: Média de volume de tráfego dos três dias analisados	65
Figura 18: Modelo da interseção semaforizada, realizado no <i>software</i>	67
Figura 19: Modelo da rotunda, realizado no <i>software</i>	68
Figura 20: Representação da interseção semaforizada e distinção dos movimentos direcionais.....	73
Figura 21: Grau de saturação por ramo	74
.....	76
Figura 22: Capacidade por entrada em veíc./h	76
Figura 23: Grau de saturação por entrada.....	77
Figura 24: Capacidade por ramo em Veíc./h, calculada pelo método TRL	81
Figura 25: Capacidade por ramo em Veíc./h, calculada pelo método SETRA	82

Figura 26: Capacidade por ramo em Veíc./h, calculada pelo método FCTUC.....	82
Figura 27: Capacidade por ramo em Veíc./h, calculada pelos três métodos.....	83
Figura 28: Grau de saturação por ramo e por método.....	83
Figura 29: Capacidade por ramo em veíc./h	86
Figura 30: Grau de saturação por ramo	86

Índice de quadros

Quadro 1: Análise comparativa da interseção semaforizada e rotunda.....	17
Quadro 2: Relação entre a hierarquia viária e a tipologia dos cruzamentos.....	19
Quadro 3: Percentagens do tráfego total por par origem/destino Manhã	66
Quadro 4: Percentagens do tráfego total por par origem/destino Tarde.....	66
Quadro 5: Valores dos parâmetros para calibração da interseção semaforizada no <i>software</i>	68
Quadro 6: Valores dos parâmetros para calibração da rotunda no <i>software</i>	69
Quadro 7: Valores médio dos parâmetros para calibração de ambas as interseções no software	69
Quadro 8: Débito de saturação por entrada em Veíc./h.....	74
Quadro 9: Capacidade por entrada em Veíc./h.....	74
Quadro 10: Atraso por ramo em segundos	75
Quadro 11: Fila de espera por entrada em metros	75
Quadro 12: Atraso médio por ramo em segundos	77
Quadro 13: Fila de espera por ramo em metros	78
Quadro 14: Comparação da capacidade por ramo em veíc./h	78
Quadro 15: Comparação do grau de saturação por ramo	79
Quadro 16: Comparação do atraso por ramo em segundos	80
Quadro 17: Comparação das filas de espera por entrada em metros.....	80
Quadro 18: Atraso médio por ramo e por método, em segundos	84
Quadro 19: Fila de espera por ramo e por método, em metros	84
Quadro 20: Atraso médio por ramo em segundos	87
Quadro 21: Fila de espera por ramo em metros	87
Quadro 22: Comparação da capacidade por ramo em veíc./h	88
Quadro 23: Comparação do grau de saturação por ramo	88
Quadro 24: Comparação dos atrasos por ramo em segundos	89
Quadro 25: Comparação das filas de espera por ramo em metros	90
Quadro 26: Comparação da capacidade entre as duas interseções, em veíc./	91
Quadro 27: Comparação do grau de saturação entre as duas interseções	91
Quadro 28: Comparação do atraso médio entre as duas interseções, em segundos	92
Quadro 29: Comparação da fila de espera entre as duas interseções, em metros.....	92

Quadro 30: Comparação do tempo de viagem entre as duas interseções, em segundos.....	93
Quadro 31: Comparação do tempo de paragem entre as duas interseções, em segundos...	93
Quadro 32: Orçamento da rotunda, em euros	94
Quadro 33: Orçamento da interseção semaforizada, em euros	94

Simbologia

- a_{AB} Valor de desaceleração na aproximação da rotunda
 a_{CD} Valor da aceleração na saída da rotunda
 AIMSUN Advance Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban
 ANN Largura do anel de circulação em torno da ilha central
 C Duração do ciclo
 $c_{m,x}$ Capacidade real do movimento x
 d Atraso por veículo
 D Atraso total
 d_1 Distância entre o centro da rotunda e a entrada
 d_2 Distância entre o centro da rotunda e a saída
 d_{AB} Distância na qual ocorre a desaceleração na aproximação da rotunda
 d_{BC} Distância percorrida dentro da rotunda
 d_{CD} Distância na qual ocorre desaceleração à saída da rotunda
 DCI Diâmetro do círculo inscrito
 D_{geo} Atraso geométrico do movimento direcional
 d_j Espaçamento médio dos veículos e fila
 d_m Distância máxima à linha de paragem
 e Largura efetiva da entrada junto à linha de cedências de prioridade e na perpendicular ao lancil
 E_i Coeficiente de equivalência dos veículos da classe i
 ENA Ângulo de entrada
 ENT Largura da entrada medida na traseira do primeiro veículo parado na linha de cedência de prioridade
 ER Raio de entrada
 EXA Ângulo de saída
 EXR Raio de saída
 F Parâmetro dependente das características geométricas da entrada e da rotunda
 f_c Parâmetro dependente das características geométricas da entrada e da rotunda
 FCTUC Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
 f_d Fator de ajustamento devido à mudança de direção
 f_i Fator de ajustamento devido ao declive da via

- F_n Comprimento da fila de espera
- f_p Fator de ajustamento devido à localização da via
- f_t Fator de ajustamento devido à composição da corrente de tráfego
- f_w Fator de ajustamento devido à largura da via
- f_z Fator de ajustamento devido à localização do cruzamento
- g Tempo de verde útil da corrente de tráfego não prioritária
- G Tempo real verde
- g_{op} Tempo de verde útil
- g_s Tempo de verde útil saturado
- g_u Tempo de verde útil não saturado
- HCM *Highway Capacity Manual*
- i Declive da via
- JS Velocidade dentro da rotunda
- K Parâmetro dependente das características geométricas da entrada e da rotunda
- L Comprimento médio da fila de espera
- l Comprimento da fila de espera de equilíbrio
- l' Comprimento médio efetivo do leque
- L_0 Comprimento da fila de espera no início do intervalo de tempo
- N Número de veículos chegados no vermelho mais verde saturado
- N_0 Número de veículos em fila após fim de verde
- n_f Número de partidas após o fim do tempo de verde
- n_s Número máximo de veículos retidos no cruzamento
- N_u Número de veículos chegados no vermelho
- p_i Proporção de veículos da classe i
- q Débito de chegadas
- Q Capacidade
- Q_c Tráfego conflituante
- Q_e Capacidade de entrada
- q_{ji} Índice de carga da corrente j
- q_{op} Débito de chegadas da corrente de tráfego oposta
- Q_s Fluxo de saída do ramo em análise
- Q_t Fluxo de circulação e que atravessa frontalmente a entrada em estudo
- r Raio de entrada medido no ponto de menor curvatura

- s Débito de saturação
- SD Distância de visibilidade
- SEP Largura do ilhéu separador
- SETRA Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements
- s_i Débito de saturação do movimento i
- s_{op} Débito de saturação da corrente de tráfego prioritária
- s_u Débito de saturação da corrente de tráfego não prioritária, durante o tempo g_u
- t Intervalo de tempo
- T Período de análise
- t_0 Tempo inicial
- t_{ap} Tempo adicional de passagem
- T_f Período em horas em que existe o débito q
- t_{pa} Tempo perdido no arranque
- TRL *Transportation Research Laboratory*
- v Largura da via na aproximação da rotunda
- V_A Velocidade na aproximação
- V_D Velocidade de partida
- V_x Débito de chegadas do movimento x
- w Largura da via
- x Grau de saturação
- x_{op} Grau de saturação da corrente de tráfego oposta
- Y Índice de carga do cruzamento
- y_i Índice de carga da fase i
- α Intervalo crítico de aceitação
- ρ Raio da curva
- μ Capacidade de entrada
- β_1 Intervalo mínimo entre veículos prioritários
- β_2 Intervalo mínimo entre partidas de veículos não prioritários
- φ Ângulo de entrada

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Atualmente, a maioria dos países desenvolvidos enfrentam problemas de congestionamento, não só pela diversidade do tipo de tráfego, como também pelo aumento do volume de veículos particulares, pesados e transportes públicos, em parte, estes últimos no sentido de reduzir a pegada ecológica. Este aumento do volume de tráfego está a desafiar os sistemas de tráfego urbano (Deo & Ruskin, 2014). Por isso, o controlo de tráfego nas interseções urbanas tornou-se mais exigente e importante, afetando com isso a capacidade, o tempo de viagem, a eficiência de desempenho e de segurança de toda a rede de tráfego (Yimei & Kefei, 2005).

A seleção do tipo de interseção mais apropriada para a regulação do tráfego é um processo complexo, onde devem ser considerados aspetos económicos, ambientais, operacionais e de segurança. Este processo tem por base a identificação dos vários tipos de interseções (interseções de nível e desniveladas) e as possíveis configurações geométricas que cada tipo permite, consoante os objetivos previamente estabelecidos (Macedo, 2005; Macedo & Benta, 2013). Para garantir a escolha do tipo de interseção mais adequado numa determinada situação em estudo, é necessário ter em conta critérios de seleção. Os critérios habitualmente considerados são diversos e estão relacionados com o desempenho previsto para a interseção, isto é, com a determinação de indicadores de desempenho, bem como com a integração das interseções numa lógica de hierarquização viária, garantia de níveis mínimos de segurança, flexibilidade e adaptabilidade das soluções, condições de operação, relação entre custo da solução e respetivo benefício (Macedo & Benta, 2013; Macedo, 2005; Moniz, 2007).

Dentro dos critérios mencionados, um dos mais importantes a ter em conta no processo de seleção da solução é a procura, isto é, os volumes de tráfego, quer de veículos, quer de peões. Deste modo, a solução de interseção deve ser capaz de regular o volume de tráfego ao qual a solução solicitada vai estar sujeita, de forma a minimizar problemas de segurança e congestionamento (Macedo, 2005; Anjana & Anjaneyulu, 2015).

A quantidade de veículos pesados é também um fator que pode ter repercussões nas condições de tráfego, uma vez que, pela tendência de se deslocarem a uma velocidade inferior e por apresentarem maiores dimensões e menor manobrabilidade, quanto maior for a quantidade de veículos pesados presente numa estrada, menor será a capacidade desta.

Consequentemente, conclui-se que é necessário ter em conta vários critérios para a escolha da melhor interseção para cada local (Macedo & Benta, 2013; Moniz, 2007).

Neste contexto, surge esta dissertação que tem por base um caso de estudo. Este surge no âmbito de um projeto de alteração de uma interseção semaforizada por uma rotunda na freguesia de Perafita, concelho de Matosinhos. O trabalho a realizar no âmbito da dissertação, para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, tem como principal objetivo analisar as duas soluções de interseção, semaforizada (atual) e rotunda (projetada), de uma forma comparativa relativamente ao fluxo de tráfego e capacidade de cada solução.

1.2. Motivação do Caso de Estudo

O caso de estudo analisado nesta dissertação consiste numa interseção localizada em meio urbano onde se pretende comparar a utilização de dois tipos de interseções, semaforizada e rotunda, em Perafita (Matosinhos), de forma a perceber-se qual destes dois tipos se enquadra melhor nas condições de tráfego do local em estudo. Atualmente esse local possui uma interseção semaforizada, no entanto um projeto da iniciativa da Câmara Municipal de Matosinhos (ver anexo A) definiu e projetou uma rotunda para substituir essa interseção.

A possibilidade de integração num projeto público real e numa área específica da engenharia civil permite que alguém de fora do contexto do projeto analise a decisão tomada de forma objetiva. Há uma tendência a ter pensamentos lineares quando se possui um conhecimento bastante completo da situação atual e de situações anteriores aplicadas na interseção em questão. E por isso não ter uma visão moldada sobre as interseções em questão, permite ter uma perspetiva arrojada e um interesse na análise comparativa dos dois tipos de interseções, a atual semaforizada e a futura rotunda.

Para além disso, a partir deste estudo consegue-se determinar se a decisão tomada de substituir uma interseção semaforizada por uma rotunda foi adequada para a resolução do problema de filas de espera naquele local. Isto é, se a construção de uma rotunda permite que a circulação seja mais fluída, com maior circulação de veículos do que num ciclo de semáforos, com menos conflitos (viragens à esquerda e direita cruzadas) e menos paragens, diminuindo assim o tempo de espera, que o fluxo de tráfego, o tipo de veículos e a interseção semaforizada criam. E, também, a análise através de estudos empíricos,

permite o aumento do conhecimento da caracterização de ambas as interseções, e por conseguinte das suas vantagens e desvantagens neste caso de estudo.

1.3. Objetivos

O caso de estudo que irá ser desenvolvido no âmbito desta dissertação de mestrado integrado em Engenharia Civil tem como principal objetivo efetuar uma análise comparativa de duas soluções de interseção uma do tipo semaforizada e outra do tipo rotunda, particularmente no que concerne ao comportamento do tráfego de cada solução. Pretende-se, assim, identificar as vantagens e desvantagens da utilização de uma das interseções nesta situação específica localizada no concelho de Matosinhos, distrito do Porto.

Para isso, nesta dissertação pretendeu-se caracterizar o funcionamento das duas soluções de interseção, quer pela utilização de uma ferramenta de microsimulação de tráfego, quer através de análises baseadas em metodologias clássicas.

1.4. Estrutura da Dissertação

A estrutura do trabalho assenta em duas grandes partes que se desenvolvem ao longo de seis capítulos.

A primeira, onde são apresentados os dois tipos de interseções que se vão abordar no caso de estudo e, por isso, é caracterizado o seu funcionamento, a aplicabilidade e os principais critérios para a sua seleção e uma segunda parte onde se descrevem os métodos de cálculo utilizados neste trabalho e se apresentam os resultados obtidos aplicando aos dois tipos de interseção.

No atual capítulo, o primeiro, fez-se um enquadramento ao tema da dissertação, apresentam-se os principais objetivos a atingir e a organização da dissertação.

No segundo capítulo trata-se de apresentar os dois tipos de interseções abordados e a caracterização do seu modo de funcionamento, aplicabilidade e critérios de seleção.

O terceiro capítulo consiste na descrição das metodologias utilizadas, para a comparação das duas interseções em estudo.

A caracterização do caso de estudo encontra-se ao longo do quarto capítulo.

No quinto capítulo apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos através da aplicação das metodologias descritas no terceiro capítulo.

No sexto e último capítulo, são descritas as principais conclusões deste trabalho, bem como as perspectivas futuras do mesmo.

2. Rotunda versus Interseção SemafORIZADA

2.1. Introdução

As interseções correspondem aos locais de qualquer rede rodoviária, onde duas ou mais vias de tráfego se cruzam (Macedo, 2005; Moniz, 2007; Macedo & Benta, 2013). Estas são pontos críticos dessas redes, uma vez que ocorrem conflitos de diversos tipos (convergência, divergência, interseção entre cruzamentos) originando assim problemas quer relativamente à segurança rodoviária, quer no que respeita à capacidade (fluxo de tráfego). Nesse sentido, para solucionar e regularizar os conflitos e, conseqüentemente, minimizar acidentes e garantir maior comodidade aos utentes, é importante ter em conta as regras predefinidas para cada tipo de interseção (Macedo, 2005; Macedo & Benta, 2013; Moniz, 2007; Ferreira, Macedo, Benta, & Silva, 2010)

A escolha do tipo de interseção depende de vários fatores, como fatores humanos, de tráfego, socioeconómicos e físico-geométricos. É ainda necessário atender à hierarquia das vias ao volume de tráfego de cada uma das vias que constituem a interseção (Moniz, 2007).

As interseções podem ser divididas em dois grandes grupos (Macedo, 2005; Moniz, 2007):

- Interseções de nível;
- Interseções desniveladas.

Relativamente às interseções de nível, dependendo da sua configuração geométrica, tipo de sinalização e modo de funcionamento podem ser classificados em:

- Interseções de prioridade à direita;
- Interseções prioritárias;
- Rotundas;
- Interseções semaforizadas

As interseções de nível são as mais utilizadas, por serem mais económicas e devido à sua maior adaptabilidade aos espaços. As interseções desniveladas, por eliminarem conflitos entre movimentos direcionais que se cruzam, são utilizadas para permitir maior fluidez do tráfego, aumentando assim a capacidade e reduzindo a probabilidade de acidentes. Porém, é uma solução que envolve um investimento maior (sobretudo na construção) e é de difícil adaptabilidade ao espaço, nomeadamente em meios urbanos pois exigem uma área considerável para a sua implantação (Moniz, 2007; Machado, 2009). Deste modo, deve-se

analisar e verificar os problemas e todas as soluções possíveis para que se encontre a solução que melhor se adapta.

Relativamente às interseções de nível, nos últimos anos a solução mais escolhida para regularizar o tráfego na interseção de duas ou mais estradas tem sido a rotunda (Machado, 2009).

Sendo a presente dissertação relativa à comparação de duas interseções de nível, interseção semaforizada e rotunda, de seguida serão abordadas com maior detalhe as suas características, modo de funcionamento, condições de implementação e aplicabilidade.

2.2. Caracterização das Interseções em Estudo

2.2.1. Interseções Semaforizadas

As interseções semaforizadas ou com sinais luminosos são soluções de gestão de tráfego, onde o tráfego é regulado por intermédio de semáforos (Macedo, 2005; Tan, 2001). Estas interseções dividem-se em dois tipos, caracterizados pela forma como a regulação dos sinais luminosos pode ser feita, ou seja, através de sinais luminosos de tempo fixo ou sinais luminosos ativados pelo tráfego (micro-regulação). Estes dois tipos de regulação procuram responder aos dois tipos de variações de tráfego, isto é, às variações regulares e previsíveis e às variações excecionais e aleatórias (Macedo, 2005; Moniz, 2007).

A interseção semaforizada, devido à sua grande flexibilidade e adaptabilidade às condições locais, quer em termos de características geométricas (configuração e ocupação do solo), quer pelas características do tráfego (fluxo e divisão direcional), é uma solução muito utilizada em meios urbanos, só comparável às rotundas (Macedo, 2005).

Nestas interseções, um movimento ou conjunto de movimentos constitui uma fase. Ou seja, a fase representa o estado do sinal luminoso durante o qual um ou vários fluxos de tráfego têm direito de avançar, estando as outras impedidas de o fazer (Costa A. H., 1987; Macedo, 2005). Cada uma das fases tem determinada duração e sequência, que dependem de fatores como a geometria da interseção, o número de movimentos a desempenhar, a composição do fluxo de tráfego e do fluxo de cada ramo (Moniz, 2007). Em geral, um fluxo de tráfego utiliza uma única via dum ramo de entrada, esta pode ser exclusiva a um movimento ou partilhada por dois ou mais movimentos (Figura 1) (Costa, Seco, & Vasconcelos, 2008).



Fonte: adaptado de Costa, *et al.* (2008)

Figura 1: Exemplos de fluxos de tráfego independentes

Como esta interseção garante fluidez de tráfego, por dividir fluxos através de uma segregação temporal dos conflitos, permite evitar os congestionamentos e melhorar a segurança, diminuindo o risco de acidentes. Mais concretamente, esta interseção permite a criação e implementação de políticas e estratégias de regulação consoante o tráfego local, possibilitando, ainda, a coordenação com outras interseções semaforizadas adjacentes (Moniz, 2007).

Esta tipologia cria níveis elevados de capacidade, semelhantes aos atingíveis pelas rotundas. Porém, esta diminui com o aumento do número de fases devido à necessidade de resolver os conflitos criados pelos movimentos de mudança de direção à esquerda (Macedo, 2005).

Em termos de intervenientes específicos do tráfego, como peões, transportes públicos e veículos de emergência, é uma solução capaz de favorecer as suas necessidades, conferindo-lhes melhor qualidade. No entanto, implica uma redução significativa dos níveis globais de capacidade (Moniz, 2007).

Por ser constituído por fases, leva ao aumento de atrasos, principalmente quando a interseção é regulada a tempos fixos (Macedo, 2005).

Esta interseção está associada a uma fácil otimização e minimização da utilização do espaço necessário para a implementar (Macedo, 2005; Moniz, 2007).

É possível definir planos com ciclos diferenciados para determinados períodos, caso os fluxos de tráfego não se mantenham constantes ao longo do dia, como horas de ponta, fora das horas de ponta, fins-de-semana, etc. Estes planos podem mudar automaticamente a uma determinada hora do dia (que é a forma mais comum) ou manualmente, respondendo às necessidades visualizadas através de um circuito de câmaras (Moniz, 2007).

Se pelo contrário os fluxos variam de um dia para o outro e estas variações são acompanhadas de flutuações significativas ao longo do dia é melhor optar por sinais

luminosos atuados pelo tráfego (micro-regulação) (Costa, *et al.*, 2008). Neste caso, não há planos pré-definidos, este procura ajustar os sinais à procura, modificando os tempos de cada fase ou mesmo a sequência das mesmas no ciclo, o que proporciona vantagens, como a inexistência de mudanças súbitas nas durações/seqüências dos ciclos. Este sistema é constituído pelo sinal luminoso propriamente dito, por um mecanismo de controlo e por detetores que podem ser ativados pela passagem ou pela presença de um veículo. Pode ainda ter mecanismos especiais de ativação a partir da procura, como botoneiras para peões, *transponders* para transportes públicos, veículos prioritários, entre outros (Moniz, 2007).

A implementação de sinais luminosos numa interseção depende das condições locais, de tráfego e geométricas. O'Flaherty (1997) definiu características da interseção que se deve ter em conta para a implementação de semáforos, nomeadamente: o tipo de cruzamento; proximidade da interseção seguinte e se esta se encontra regulada por sinais luminosos; o número e tipo de acidentes registados até à data naquele local; a velocidade, volume e composição do tráfego; a divisão direcional do tráfego; número de peões e ciclistas que circulam pela interseção; topografia do local; e o espaço disponível (Macedo, 2005).

Ainda, o *Manual on Uniform Traffic Control Devices* (MUTCD, 2003) determinou onze critérios, onde a instalação de sinais luminosos só é justificável se num cruzamento pelo menos um destes critérios de instalação for satisfeito. Tal como, volume de veículos mínimo, tráfego contínuo em ramo principal, volume de peões mínimo, travessia de peões junto a escolas, progressão das correntes de tráfego, sinistralidade, gestão de rede rodoviária, combinação de critérios, volume de veículos em 4 horas, atrasos na hora de ponta e volume de veículos na hora de ponta. No entanto, cumprir um ou mais critérios não determina a necessidade da instalação de sinais luminosos, mas que é uma solução a ponderar na regulação do tráfego da interseção em estudo (Costa, *et al.*, 2008).

A implementação desta solução apresenta um custo de investimento moderado. No entanto, os custos de manutenção do equipamento, de exploração do sistema e monitorização das operações são relativamente elevados (Macedo, 2005).

As interseções são aplicadas em situações com necessidade de separar correntes de tráfego em conflito, de forma a assegurar um maior nível de segurança (Moniz, 2007).

2.2.2. Rotundas

Rotunda ou interseção giratória é um tipo de interseção que é caracterizado por possuir uma ilha central, normalmente de forma circular, em torno da qual é estabelecido um sentido único de circulação e estão associados um conjunto de diversos ramos de entrada e de saída de fluxos (Tan, 2001; Bastos Silva & Seco, 2004a; Macedo, 2005; Moniz, 2007; Machado, 2009). Segundo o regime de prioridade definido no Código da Estrada de Portugal¹ (artigos 29º, 30º e 69º), o tráfego que circula na rotunda tem prioridade sobre o tráfego que pretenda entrar na rotunda através dos ramos de entrada (Macedo, 2005; Moniz, 2007; Machado, 2009). Um condutor quando chega a uma interseção deve respeitar os seguintes princípios:

- Ceder a passagem aos veículos que se lhe apresentem pela direita;
- Sempre que sobre ele recaia o dever de ceder a passagem, deve abrandar a marcha e se necessário parar, ou no caso de cruzamento de veículos, recuar, por forma a permitir a passagem do outro veículo, sem que este sofra qualquer alteração de velocidade ou direção;
- Apenas entrar no cruzamento, ainda que tenha prioridade, depois de se certificar que a intensidade do tráfego não o obrigará a ficar imobilizado no seu interior.

O objetivo deste tipo de interseções é diminuir a velocidade dos veículos, dar prioridade a quem circula no seu interior, eliminando, neste caso, a prioridade à direita e por fim reduzir os tempos de espera (Moniz, 2007; Ferreira, *et al.*, 2010).

As rotundas podem-se dividir em diferentes tipos em função da sua dimensão geral, das características geométricas e da sua potencial aplicação, sendo que estas versões alternativas possuem diferentes funções, vantagens e desvantagens (Bastos Silva & Seco, 2008).

As soluções mais utilizadas são: a rotunda normal, que deve acomodar as necessidades de qualquer veículo sem que este precise de recorrer à transposição da ilha central; rotunda normal semi-galgável, que está dimensionada para os veículos ligeiros, podendo os veículos pesados ter que recorrer à faixa galgável que circunda a ilha central; mini-rotunda com ilha central materializada, que salvaguarda as necessidades dos veículos ligeiros,

¹ Código da Estrada (CE) - Decreto-Lei nº 114/94 de 3 de Maio, alterado pelos Decretos-Lei nº 214/96, de 20 de novembro, nº 2/98, de 3 de janeiro, nº 265-A/2001, de 28 de setembro, nº 44/2005, de 23 de fevereiro, nº 82/2011, de 20 de junho, nº 138/2012, de 5 de julho nº 72/2013 de 3 de Setembro, e pelo nº40/2016, de 29 de Julho.

enquanto os veículos pesados precisarão de galgar a ilha central, para a mini-rotunda com a ilha central pintada os veículos ligeiros podem ter que galgar, também, a ilha central; rotunda desnivelada, o movimento considerado prioritário é salvaguardado (normalmente o movimento mais procurado), sendo assim este movimento não está sujeito a qualquer demora pelo que atravessa a interseção de forma desnivelada; rotunda dupla, esta rotunda tem uma geometria que proporciona interseções com múltiplas entradas, atenuando o efeito das viragens à esquerda; e rotunda semaforizada, que como o próprio nome indica, a acessibilidade e circulação da mesma é regulada por sinais luminosos (Bastos Silva & Seco, 2008).

A redução das velocidades nas rotundas é conseguida através de uma correta conceção geométrica, tendo como um dos seus princípios base de conceção o de facilitar as saídas e dificultar as entradas na rotunda. Também é uma solução associada a um menor número de acelerações e de travagens, existindo, assim, uma redução do nível de ruído, bem como de consumos de combustível e de emissões. Esta solução tem contribuído também para uma melhor integração no meio ambiente, nomeadamente através da integração paisagística que possibilita (Moniz, 2007; Machado, 2009).

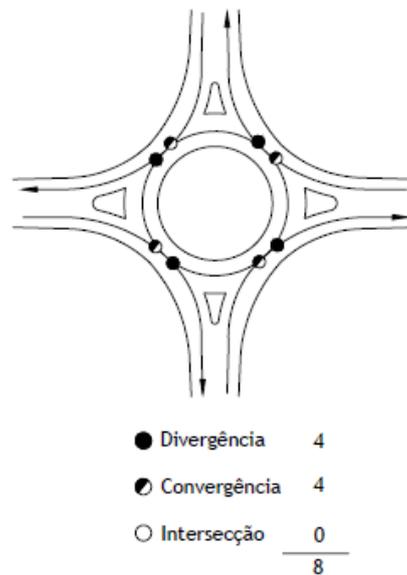
No entanto, há a desvantagem de demonstrar alguma incompatibilidade com o fluxo de peões e de dificultar a cedência de prioridade a transportes públicos ou veículos prioritários (Moniz, 2007; Brabander & Vereeck, 2007).

As rotundas sustentam um nível maior de capacidade e melhoram as condições de fluidez, adaptando-se bem a níveis de tráfego diferenciados desde valores muito baixos até valores próximos da sua capacidade, o que traduz também numa diminuição de tempos de espera. Também são a única solução com a inversão do sentido de marcha. (Macedo, 2005; Machado, 2009).

As rotundas são ainda excelentes soluções para a entrada de zonas urbanas, obrigando assim o condutor a diminuir a velocidade e adaptar-se às novas condições de circulação e também na marcação de transições entre ambientes rodoviários bastante distintos. A sua utilização em áreas residenciais faz com que haja acalmia de tráfego (O'Flaherty, 1997; Bastos Silva & Seco, 2004a).

A implementação de uma solução do tipo rotunda permite melhorar a segurança rodoviária, reduzindo significativamente o número de pontos de conflito (os habituais 32 pontos em interseções prioritárias para 8 pontos de convergência/divergência em rotundas,

como demonstrado na figura 2) e eliminando dos conflitos de interseção, homogeneizando comportamentos, reduzindo as velocidades de circulação, simplificando o processo de tomada de decisão à entrada e eliminando as viragens à esquerda (Hydén & Várhelyi, 2000; Bastos Silva & Seco, 2004b; Kusuma & Koutsopoulos, 2011). Segundo Bastos Silva e Seco (2004b), bem como Brabander e Vereeck (2007) a construção de rotundas é uma opção eficaz para melhorar a segurança do tráfego rodoviário, onde se verifica uma redução significativa dos acidentes (dependendo dos países em 40 a 60%) e da sua gravidade em comparação com outros tipos de interseções.



Fonte: adaptado de FHWA, (2000) (Macedo, 2005)

Figura 2: Pontos de conflito em rotundas

Como abordado anteriormente, a implementação das rotundas faz com que o nível de segurança seja mais elevado, sendo justificável a colocação de rotundas em alguns locais com sinistralidade elevada. Ou seja, ainda pode ser adequado implementar uma rotunda em locais onde os condutores têm comportamentos inadequados, que circulam com velocidade excessiva, com propensão para a realização de manobras perigosas, onde haja elevados índices de sinistralidade por viragens à esquerda, travessia de peões, locais com má visibilidade e interseções com geometrias complexas (Bastos Silva & Seco, 2004a; Macedo, 2005).

A implementação das rotundas requer um custo inicial superior à das outras soluções, com a exceção das interseções desniveladas. Mas dentro das rotundas o valor também varia, pois depende do local da implementação, da área de pavimentação, do custo de aquisição dos terrenos (se for necessário alargar a área de implantação), entre outros. O custo das rotundas pode ser superior ao das interseções semaforizadas, pois há locais em que a colocação de semáforos não altera a solução existente em termos geométricos, enquanto numa rotunda esta situação é impossível. Porém, esta apresenta a vantagem de ter custo de exploração e operacional inferior ao das interseções semaforizadas, podendo isto fazer com que as rotundas sejam uma solução mais económica a longo prazo (MSHA, 1995).

Por possuírem uma grande diversidade de soluções e uma ampla aplicabilidade, este tipo de solução é frequentemente utilizada, mas não possui uso generalizado. As rotundas são adequadas em locais com elevados níveis de sinistralidade ou de insegurança rodoviária, quando os volumes de tráfego na estrada secundária são elevados, se os volumes ou a proporção de viragens à esquerda são elevados, se há grande variação dos níveis de procura ao longo do dia e com picos horários muito acentuados, numa interseção que possua mais de quatro ramos, quando há variabilidade elevada do ângulo de inserção dos ramos, caso não seja necessário atribuir a prioridade ao tráfego em algum ramo em particular, se houver alteração súbita das características geométricas de uma estrada e se há a necessidade de manobras de inversão de marcha (O’Flaherty, 1997; Bastos Silva & Seco, 2004b; Moniz, 2007).

A aplicação desta solução não se adequa em locais onde: o espaço disponível para a sua implementação não seja o mais adequado ou a topografia não seja favorável; os volumes de tráfego na estrada afluentes sejam desequilibrados, em que as inclinações longitudinais dos ramos provoquem má visibilidade; haja volumes de tráfego excessivos e elevada circulação de peões e ciclistas. Também não é adequada a sua implementação onde haja interseções semaforizadas perto, para não haver congestionamento da rotunda durante o sinal vermelho, bloqueando assim alguma saída (O’Flaherty, 1997; Macedo, 2005).

2.2.3. Análise Comparativa

Em síntese, face ao descrito anteriormente pode-se diferenciar os dois tipos de interseções em análise, a partir das suas características (quadro 1).

Quadro 1: Análise comparativa da interseção semaforizada e rotunda

	Interseção SemafORIZADA	Rotunda
Capacidade	Níveis elevados de capacidade, diminui com fases que impliquem movimentos de mudança de direção à esquerda e com movimentos prioritários	Níveis elevados de capacidade
Atrasos	Por ser constituído por fases, leva ao aumento de atrasos médios	Menores atrasos médios.
Integração na rede viária	Permite estabelecer hierarquias viárias	Não permite favorecer determinado movimento direcional ou modo de transporte
Passagem de Peões	Acomodam as necessidades dos peões	Não favorece as necessidades dos peões
Segurança	Baixo risco de acidentes	Baixo risco de acidentes
Ambiente	Integração no meio ambiente moderada	Melhor integração de ambiente
Área ocupada	Espaço de necessário mínimo.	Necessita de maior ocupação de espaço
Custos	Custo moderado.	Elevado custo.

2.3. Critérios de Seleção

Quando se pretende implementar uma solução para um cruzamento é fundamental que essa solução satisfaça um conjunto de objetivos, tais como ser segura, eficiente, barata, não agressiva para o ambiente e sustentável. Assim sendo, torna-se essencial a existência de um processo de seleção, para que se efetue a melhor escolha da solução a adotar.

O processo de seleção é efetuado com base em critérios de seleção, que têm em consideração vários princípios, desde a determinação de indicadores de desempenho, caracterização da procura, a integração das interseções numa lógica de hierarquização viária, condições de operações e análise de custo-benefício (comparando os custos de construção e de manutenção com a segurança rodoviária), bem como a redução dos tempos de viagem que cada solução permite (Macedo, 2005).

Atendendo aos princípios de seleção, existe um conjunto de critérios que auxiliam a escolha da mais adequada tipologia de interseção a implementar.

2.3.1. Volume de Tráfego

O volume de tráfego, quer de veículos quer de peões, é um dos critérios mais importante a ter em consideração. Este representa o nível de procura à qual a interseção vai estar sujeito durante a sua vida útil, para isso a solução a implementar deve ser eficaz na regulação desse tráfego, sem que ocorram problemas, tais como de segurança e congestionamento. Desta forma, primeiro procede-se à caracterização espectável da procura, sabendo que o grau de incerteza associado à quantificação da evolução da procura é elevado. Geralmente, a caracterização da procura é quantificada através do cenário mais provável, traduzindo-se na quantificação dos volumes previstos por sentido e horário para períodos da hora de ponta para o ano horizonte do projeto. Caso a interseção já exista, pode-se recorrer a contagens de tráfego para caracterizar a procura, onde se pretende determinar os volumes de tráfego nos quinze minutos mais carregados da hora de ponta num dia normal de semana, para depois extrapolar para o ano horizonte do projeto. Posto isto, com base na caracterização da procura, é possível escolher o tipo de interseção mais indicado ao caso em estudo e, depois, dimensionar a solução final (Macedo, 2005).

2.3.2. Integração na Rede Viária

A integração na lógica de funcionamento pretendida para o conjunto da rede viária é também um elemento importante na determinação do tipo de interseção a selecionar. Usualmente, a classificação utilizada para as diferentes classes de vias que constituem a rede viária é uma classificação funcional, tendo por base dois conjuntos de funções complementares entre si. Uma é a função circulação, onde estão associadas as deslocações de média e grande dimensão, correspondendo a condições de circulação fluida, rápida e segura. A outra função é de acessibilidade, permite garantir o acesso do tráfego aos espaços urbanos e locais de estacionamento (Seco, Antunes, & Costa, 2001; Macedo, 2005).

De um modo simplista, face à classificação funcional das vias, pode-se considerar quatro tipologias de vias (HMSO, 1987). Cada classe de vias é adequada para determinadas proporções das funções circulação e acessibilidade. As classes podem ser distinguidas em vias coletoras e vias distribuidoras principais, onde nestas duas classes a função circulação prevalece com diferentes proporções e que constituem a rede viária estruturante, e em vias

distribuidoras locais e vias de acesso local, onde predomina a função acessibilidade aos espaços urbanos e que constituem as redes viárias locais (Macedo, 2005).

Desta forma, é possível definir o tipo de interseção a eleger, tendo em conta os diferentes tipos de vias que se intersectam, através da caracterização funcional de cada rede viária, bem como a determinação das características geométricas e físicas das vias que as constituem, conforme é apresentado no quadro 2 (Seco, *et al.*, 2001).

Quadro 2: Relação entre a hierarquia viária e a tipologia dos cruzamentos

	COLECTORAS	DISTRIBUIDORAS PRINCIPAIS	DISTRIBUIDORAS LOCAIS	ACESSO LOCAL
COLECTORAS	<ul style="list-style-type: none"> □ A - D □ a - Rd, S, Rn 	<ul style="list-style-type: none"> □ A - D, Rd □ a - Rn, S 	<ul style="list-style-type: none"> □ A - D, Rd, S □ a - P 	-
DISTRIBUIDORAS PRINCIPAIS		<ul style="list-style-type: none"> □ A - S, Rn □ a - D, Rd 	<ul style="list-style-type: none"> □ A - S, Rn □ a - P 	<ul style="list-style-type: none"> □ A - S, P □ a - Rn
DISTRIBUIDORAS LOCAIS			<ul style="list-style-type: none"> □ A - Rn, P □ a - S 	<ul style="list-style-type: none"> □ A - P □ a - Rn, Pd
ACESSO LOCAL				<ul style="list-style-type: none"> □ A - P, Pd

Legenda:

A - Recomendável
a - Aceitável

D - Desnívelado
S - SemafORIZADO

Rd - Rotunda desnívelada
Rn - Rotunda normal

P - Prioritário
Pd - Prioridade à direita

Fonte: Seco, *et al.*, 2001

2.3.3. Custo/Benefício

Por último, outro dos critérios mais importantes na seleção da tipologia da interseção é a relação custo e benefício da solução. Este tem por base uma análise e comparação económica das diferentes soluções, de forma que a solução escolhida seja a economicamente mais vantajosa (Macedo, 2005).

Geralmente, a análise custo-benefício é realizada comparando a variação de benefício entre duas soluções com a variação de custos entre essas mesmas soluções (FHWA, 2000). No entanto, é necessário, primeiramente, a quantificação quer dos benefícios quer dos custos de cada solução. Os benefícios subdividem-se em três tipos: benefícios na segurança, que correspondem a ganhos económicos resultantes da redução da sinistralidade rodoviária causada pela implementação de determinada solução; benefícios operacionais, considerado

um ganho económico para a sociedade, por permitir a redução do atraso com a introdução de uma dada solução; e benefícios ambientais, que representam ganhos ao nível da redução no consumo de combustíveis e da melhoria da qualidade do ar, graças à redução das emissões de gases poluentes (Macedo, 2005).

Relativamente aos custos estes dividem-se em custos de investimento ou de construção e os custos de operação e manutenção. Os primeiros correspondem ao valor total que é gasto com a construção da interseção, desde pavimentação, muros de suporte, sinalização, entre outros. Os custos de operação e manutenção variam em função da tipologia de interseção e são custos anuais associados aos gastos de energia elétrica para iluminação ou para o funcionamento, como por exemplo, dos sistemas semaforicos, gastos na limpeza da interseção e reparação de danos (Macedo, 2005).

Alguns destes critérios estão relacionados entre si, todavia outros são contraditórios. Então na prática e para cada um em concreto, é necessário proceder a uma hierarquização dos critérios, definindo os que são mais importantes, no sentido de a solução implementada cumpra de forma eficiente as funções a que se destina. No entanto, existe um conjunto de condições relacionadas com as características do tráfego, do local da implementação e da configuração geométrica própria de cada tipo de interseção, que podem justificar a aplicação de uma determinada solução em detrimento de outras (Macedo, 2005).

2.4. Apresentação de Casos – Análises Comparativas Semelhantes à Efetuada

Na literatura, são vários os estudos que comparam e caracterizam interseções, no entanto abaixo apenas destacamos três estudos, que apresentam casos de estudo semelhantes ao que se propõe apresentar nesta dissertação.

Uma vez que existem diferentes *softwares* de microssimulação no mercado e estes, por sua vez, apresentam resultados diferentes, Chen, Jin e Yang (2013) efetuaram um estudo para contribuir para o fornecimento de referências no momento da escolha do *software*. Neste estudo, foram analisados dois *softwares*, VISSIM e SIDRA, para interseções semaforizadas, no sentido de avaliar a facilidade de utilização e a precisão dos resultados, tendo em conta os valores reais. Deste estudo, verificou-se que o SIDRA apresenta uma melhor operacionalidade em termos de construção do modelo face ao VISSIM. Pelo

contrário o VISSIM, com base no indicador de desempenho atraso médio por veículo, fornece valores mais precisos e mais próximos do valor real (Chen, Jin, & Yang, 2013).

Outro estudo que compara o desempenho de duas ferramentas de simulação de tráfego é o de Shaaban e Kim (2015). As ferramentas utilizadas foram o SimTraffic e o VISSIM, no entanto para a modelação de rotundas de dupla e de tripla faixa em diferentes cenários. Os fatores considerados neste estudo foram o volume de tráfego, proporção de movimento direcionais para a esquerda e proporção de veículos pesados no fluxo de tráfego. No geral, as ferramentas de simulação não mostraram diferenças estatisticamente significativas, contudo o estudo sensibilizou para o risco da utilização de apenas uma ferramenta, devido ao facto de sob diferentes condições de tráfego os resultados obtidos poderem ser diferentes (Shaaban & Kim, 2015).

Num estudo realizado por Yin e Qiu (2012), sobre a viabilidade da substituição de interseções semaforizadas por rotundas, foram analisados cinco casos de estudo, que apresentavam atrasos longos, assim como limitações a nível operacional e de segurança. Para as análises do tráfego, foram utilizadas ferramentas de microssimulação, tal como neste presente estudo, no entanto os *softwares* utilizados foram o Synchro, SIDRA e VISSIM. Este estudo refere que a construção de uma rotunda é viável quando esta apresenta uma boa capacidade, uma boa segurança operacional e o valor económico é superior às alternativas. Especificamente para os casos de estudo analisados, concluíram que geralmente as rotundas são mais seguras, mas os resultados demonstraram que, quanto à capacidade, foram as interseções semaforizadas que apresentaram melhor eficiência. Relativamente aos custos de construção, apesar de estes serem superiores para as rotundas, numa análise económica efetuada verificaram que o valor que se poupa ao reduzir o número de sinistros numa rotunda pode compensar o custo de construção da mesma (Yin & Qiu, 2012).

3. Avaliação de desempenho

3.1. Introdução

No capítulo anterior foram abordadas as principais características, capacidades funcionais e condições de aplicação que distinguem os dois tipos de interseções em estudo, a atual semaforizada e a futura rotunda.

Quando se pretende implementar uma solução para uma interseção é essencial que a mesma satisfaça um conjunto de objetivos, tal como, eficácia, segurança, relação custo-benefício. E, deste modo, passar por um processo de seleção para que a solução seja a melhor a implementar.

Neste caso, a tipologia de interseção já foi escolhida, alterar a interseção semaforizada pela rotunda, por isso neste capítulo propõe-se a utilização de um critério, volume de tráfego, bem como de metodologias que permitam, com base nesse mesmo critério, comparar o desempenho operacional de ambos os tipos, de forma a verificar se a adoção da solução satisfaz os níveis de procura exigidos.

De referir que as características do tráfego (volume de tráfego, tipologia dos veículos, tempos de espera) da interseção enquanto interseção semaforizada foram determinadas e pré-definidas como condições de tráfego para avaliar o desempenho previsto da futura rotunda.

3.2. Objetivo

O caso de estudo a realizar vai consistir na comparação do desempenho de uma interseção semaforizada com o desempenho previsto de uma futura rotunda, de forma a verificar se a alteração desta interseção semaforizada para uma rotunda foi a decisão que melhor regula a circulação do tráfego da interseção em estudo, situada em Matosinhos. Para isso, critérios de seleção foram utilizados.

Os indicadores de desempenho das interseções são estimados recorrendo a métodos analíticos categorizados em estatísticos (empíricos), probabilísticos e determinístico. Os primeiros são métodos que correlacionam a geometria e atuais medidas de capacidade, a partir de observações de campo. Relativamente aos métodos probabilísticos, estes baseiam-se essencialmente na teoria do intervalo crítico (*gap acceptance theory*), isto é, na compreensão do comportamento do condutor e características de tráfego, adequando-se ao

estudo de interseções prioritárias e de rotundas. E os modelos determinísticos utilizados para interseções semaforizadas, onde um conjunto de dados de entrada resulta num único conjunto de resultados (Ferreira, *et al.*, 2010; Macedo & Benta, 2013; Yap, Gibson, & Waterson, 2013; Vasconcelos, 2014). A maioria das ferramentas analíticas/determinísticas implementam os procedimentos descritos no *Highway Capacity Manual* (HCM) (TRB, 2010).

Recentemente, tem-se verificado um crescimento da utilização de modelos de microssimulação de tráfego, por possibilitar a análise de vários cenários num ambiente controlado, que pelos métodos tradicionais seria difícil obter. Estes modelos permitem avaliar os possíveis benefícios de cada interseção, por construir vários cenários, conforme as configuração geométrica a avaliar e reproduzir a dinâmica do tráfego de cada uma (Ferreira, *et al.*, 2010; Macedo & Benta, 2013; Yap, *et al.*, 2013; Vasconcelos, 2014).

3.3. Indicadores de Desempenho

Os indicadores de desempenho, como a capacidade, podem contribuir para a análise da qualidade e viabilidade das condições de funcionamento de uma interseção. No entanto, a capacidade, só por si não é a total reveladora do desempenho da interseção.

Para as rotundas o nível de desempenho geral, que reflete o nível de serviço da infraestrutura, é avaliado em função da capacidade dada por cada uma das entradas. Para a qualificação desta solução, para além do estudo da capacidade, pode ser relevante a análise de indicadores complementares, como a grau de saturação, comprimento das filas de espera e atrasos.

Deste modo, também para as interseções semaforizadas, é recomendado que o estudo da capacidade seja acompanhado pelo comprimento das filas de espera e atrasos médios por veículos.

3.4. Métodos de Cálculo de Indicadores de Desempenho - Rotundas

Os indicadores de desempenho escolhidos para analisar as duas interseções foram: capacidade, grau de saturação, filas de espera e atraso médio por veículo.

Para a rotunda, a capacidade de entrada foi calculada através de três tipos de métodos

estatísticos, o método do TRL, o método de SETRA e pelo método da FCTUC. De seguida os mesmos métodos serão descritos com maior detalhe.

3.4.1. Método do TRL

O método do TRL (*Transportation Research Laboratory*), descrito por Kimber (1980), é o modelo empírico mais completo e preciso para calcular a capacidade de entrada em rotundas. Para a sua formulação foram observadas cerca de 86 rotundas e 35 geometrias em circuito, correspondentes a 11.000 minutos de observação. Deste modo, assenta num modelo de base estatística, tendo em conta técnicas de regressão múltipla não linear, a formulação resultante é uma função linear. Esta relaciona a capacidade da entrada, Q_e , com o fluxo/tráfego conflituante, Q_c , onde os coeficientes K , F e f_c , representam parâmetros dependentes da geometria da entrada e da interseção. De seguida, apresentam-se as equações correspondentes à formulação geral do método, bem como a figura 3 que representa as características geométricas utilizadas nas equações (Vasconcelos, 2014; Kimber, 1980; Bastos Silva & Seco, 2008).

$$Q_e = K(F - f_c * Q_c) \quad \text{se} \quad f_c * Q_c < F$$

ou,

$$Q_e = 0 \quad \text{se} \quad f_c * Q_c > F \tag{1}$$

onde:

Q_e é a capacidade da entrada;

Q_c é o fluxo conflituante (aqui considerado como tráfego de circulação no anel);

F e f_c são parâmetros dependentes das características geométricas da entrada e da rotunda, tal que:

$$K = 1 - 0,00347(\varphi - 30) - 0,978\left(\frac{1}{r} - 0,05\right) \tag{2}$$

$$F = 303X_2 \tag{3}$$

$$f_c = 0,21t_p(1 + 0,2X_2) \tag{4}$$

$$t_p = 1 + \frac{0,5}{1+M} \tag{5}$$

$$M = \exp\left(\frac{DCI-60}{10}\right) \quad (6)$$

$$X_2 = v + \frac{e-v}{1+2S} \quad (7)$$

$$S = \frac{1,6(e-v)}{l'} \quad (8)$$

onde (figura 2),

v é a largura da via na aproximação da rotunda;

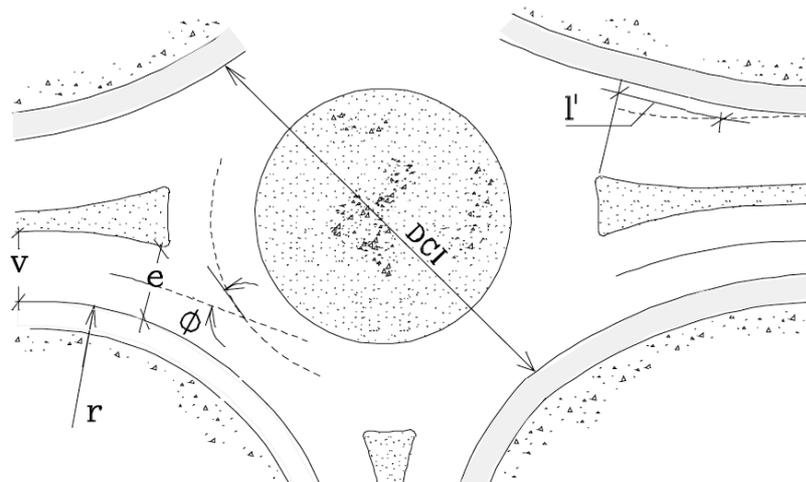
e é a largura efetiva da entrada junto à linha de cedências de prioridade e na perpendicular ao lancil;

l' é o comprimento médio efetivo do leque;

r é o raio de entrada medido no ponto de menor curvatura;

DCI é o diâmetro do círculo inscrito;

φ é o ângulo de entrada.



Fonte: (Vasconcelos, 2014)

Figura 3: parâmetros geométricos - Modelo TRL

É ainda apresentada uma variante ao modelo, adaptada à previsão de capacidades em rotundas desniveladas em que:

$$Q_e = K(1,11F - 1,4f_c * Q_c), \quad (9)$$

onde o significado das diferentes variáveis é o mesmo do apresentado anteriormente.

Estas duas formulações são compostas por duas componentes fundamentais: a primeira representativa do peso das características geométricas e a segunda do peso do tráfego conflituante.

Caso se verifique $Q_c=0$, isto é a inexistência de qualquer tráfego conflituante, a segunda componente da equação anula-se, obtendo-se a designada capacidade geométrica como a correspondente à capacidade máxima da entrada, que se encontra sujeita apenas à influência das características geométricas da interseção.

3.4.1.1. Atraso Médio

Para este método e este tipo de interseção, o atraso médio por veículo determina-se a partir da soma de duas componentes distintas do atraso. Sendo estas distinguidas pelo atraso sofrido pelo veículo, devido à formação de filas de espera, e pelo atraso geométrico, causado pela necessidade de contornar a rotunda.

Atraso devido às filas de espera

Como os volumes de tráfego variam com o período do dia, o cálculo dos atrasos e dos comprimentos das filas de espera é realizado segundo a teoria de formação de filas de espera dependente do tempo. No método do TRL é a partir da equação proposta por Kimber e Hollis em 1979 que o atraso devido às filas de espera é calculado (Kimber & Hollis, 1979; Semmens, 1985).

O cálculo do atraso baseia-se na distribuição de probabilidade dos diferentes comprimentos da fila de espera em função do tempo para, depois se conseguir determinar o comprimento médio da fila de espera que, por sua vez, é utilizado no cálculo do atraso médio ocorrido devido às filas de espera (Macedo, 2005).

Tendo em conta, um curto intervalo de tempo, t , durante o qual o volume de chegada, q , e a capacidade, μ (valor aproximado à capacidade da entrada, Q_e , cujo a fórmula de cálculo foi apresentada anteriormente), podem ser assumidos como sendo aproximadamente constantes, é possível a existência de diversas situações. Estas situações dependem do rácio volume/capacidade, ρ ($\rho=q/\mu$), e caso ρ for menor que 1, dependem, ainda, dos valores relativos de L_0 , comprimento da fila de espera no início do intervalo de tempo considerado, e de l ($l=\rho/(1-\rho)$), comprimento da fila de espera de equilíbrio.

Sendo F_n o comprimento da fila de espera em função de x (variável tempo), então esta pode ser definida da seguinte forma:

$$F_n(x) = 0,5(\sqrt{(\mu x(1 - \rho) + 1)^2 + 4\rho\mu x} - \mu x(1 - \rho) + 1) \quad (10)$$

Assim, o comprimento médio da fila de espera, L , após um intervalo de tempo, t , é dado pelas seguintes expressões:

Para $\rho \geq 1$,

$$L(t) = F_n(t + t_0) \quad \text{onde, } t_0 = \frac{L_0(L_0+1)}{\mu(\rho(L_0+1)-L_0)} \quad (12)$$

Para $\rho < 1$,

$$L(t) = F_n(t + t_0) \quad \text{onde, } t_0 = \frac{L_0(L_0+1)}{\mu(\rho(L_0+1)-L_0)} \quad \text{Se, } 0 \geq L_0 < l \quad (13)$$

$$L(t) = l \quad \text{Se, } L_0 = l \quad (14)$$

$$L(t) = 2l - F_n(t + t_0) \quad \text{onde, } t_0 = \frac{(2l-L_0)(2l-L_0+1)}{\mu(\rho(2l-L_0+1)-(2l-L_0))} \quad \text{Se, } l < L_0 \leq 2l \quad (15)$$

$$L(t) = \begin{cases} L_0 + \left(\frac{\rho-L_0}{L_0+1}\right)\mu t, & \text{se } 0 \leq t \leq t_c \\ 2l - F_n(t - t_c), & \text{se } t > t_c \end{cases} \quad \text{onde, } t_c = \frac{2l-L_0}{\mu\left(\frac{\rho-L_0}{L_0+1}\right)} \quad \text{Se, } L_0 > 2l \quad (16)$$

O atraso total, D , no intervalo de tempo, t , pode ser obtido por:

$$D = \frac{1}{t} \int_0^t L(t) dt \quad (17)$$

Atraso geométrico

O atraso geométrico é o atraso sofrido por um veículo quando contorna a rotunda, deste modo este atraso existe sempre, mesmo na ausência de quaisquer outros veículos. Isto porque os veículos necessitam de reduzir a sua velocidade para atravessarem a interseção, desviam-se do seu trajeto e, ainda depois de a percorrer, têm de acelerar para recuperar a velocidade que circulavam anteriormente (Semmens, 1985; Macedo, 2005).

Para cada movimento direcional, este atraso assume um valor constante, aplicável a todos os veículos e não variável com os níveis de tráfego ou com o período do dia. Este atraso é mais significativo nas rotundas do que noutros tipos de interseções, uma vez que existe um aumento significativo da distância percorrida provocada pela presença da rotunda (Semmens, 1985; Macedo, 2005).

A formulação, proposta por McDonald, *et al.* (1984), que é utilizada no método TRL e que integra o programa ARCADY foi baseada numa experiência observacional. O atraso para cada veículo que realiza um determinado movimento direcional, é calculado através da diferença entre: o tempo gasto no percurso, que inclui a rotunda e que está entre os pontos onde se inicia a desaceleração e finaliza a aceleração do veículo; e o tempo gasto no percurso entre esses pontos, mas caso não existisse a rotunda. Ambos dependem da velocidade de chegada e de partida do veículo e de determinados parâmetros geométricos da rotunda (Macedo, 2005).

O atraso geométrico de um movimento direcional específico numa rotunda é dado por:

$$D_{geo} = \frac{V_A - JS}{a_{AB}} + \frac{V_D - JS}{a_{AB}} + \frac{d_{BC}}{JS} - \frac{d_1 + d_{AB}}{V_A} - \frac{d_2 + d_{CD}}{V_D} \quad (18)$$

em que:

D_{geo} - atraso geométrico do movimento direcional, em segundos;

V_A - velocidade na aproximação, medida num ponto em que não haja influência da rotunda, em m/s;

V_D - velocidade de partida, medida num ponto em que não haja influência da rotunda, em m/s;

JS - velocidade dentro da rotunda, em m/s;

a_{AB} - valor da desaceleração na aproximação da rotunda, em m/s^2

$$a_{AB} = \frac{1,06(V_A - JS)}{V_A} + 0,23 \quad (19)$$

a_{CD} - valor da aceleração na saída da rotunda, em m/s^2

$$a_{CD} = \frac{1,11(V_D - JS)}{V_D} + 0,02 \quad (20)$$

d_{BC} - Distância percorrida dentro da rotunda, em metros;

d_1 - Distância entre o centro da rotunda e a entrada, em metros;

d_2 - Distância entre o centro da rotunda e a saída, em metros;

d_{AB} – Distância na qual ocorre a desaceleração na aproximação da rotunda, em metros;

$$d_{AB} = \frac{V_A^2 - JS^2}{2a_{AB}} \quad (21)$$

d_{CD} - Distância na qual ocorre a desaceleração à saída da rotunda, em metros;

$$d_{CD} = \frac{V_D^2 - JS^2}{2a_{CD}} \quad (22)$$

A velocidade dentro da rotunda (JS) depende do movimento direcional em causa.

Assim, para o movimento de viragem à direita vem:

$$JS = 0,84(\sqrt{ER} + \sqrt{EXR}) \quad (23)$$

onde,

ER – Raio de entrada, em metros;

EXR – Raio de saída, em metros;

Para o movimento de atravessamento (ou de ida em frente), onde $0,5(ENA+EXA) \leq 20^\circ$:

$$JS = 0,47Y + 0,035SD - 1,18 \quad (24)$$

em que,

ENA – Ângulo de entrada, em graus;

EXA – Ângulo de saída, em graus;

Y – $0,5(V_A + V_D)$, em m/s;

SD - Distância de visibilidade, medida desde um ponto situado a 15m da linha de paragem e a uma altura de 1,05m até ao ponto em que se encontra o veículo que circula no anel mais distante e que o condutor consegue ver, medido ao longo do bordo exterior do anel de circulação, em metros.

Em caso de a distância de visibilidade não seja conhecida:

$$JS = 0,40Y + 2,43 \quad (25)$$

Para os movimentos de viragem à esquerda ou de atravessamento, onde $0,5(ENA+EXA) > 20^\circ$:

$$JS = 0,96\sqrt{DCI} + 2,03 \quad (26)$$

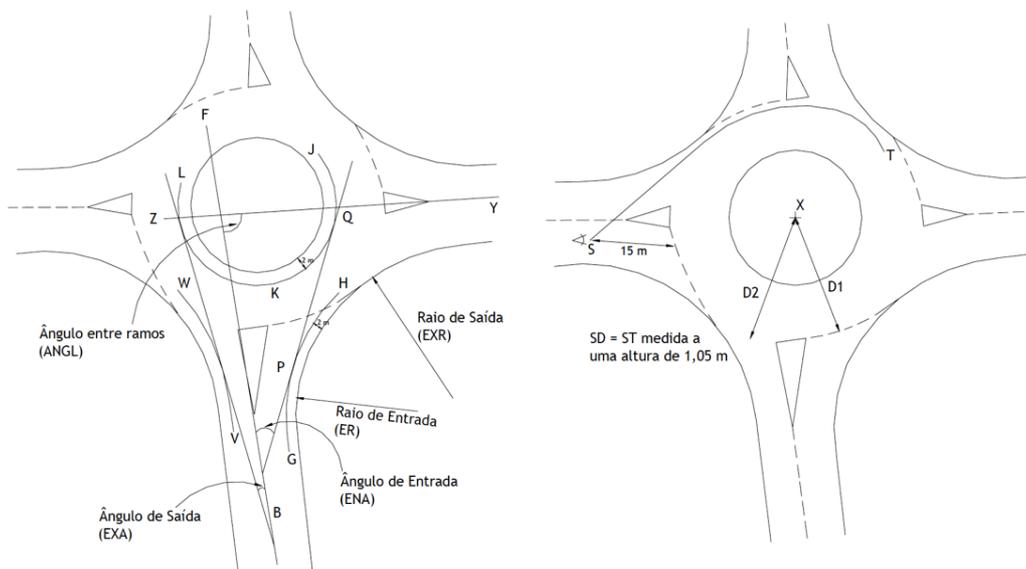
onde,

DCI - Diâmetro do círculo inscrito, em metros.

De notar que:

- Se $JS > V_A$ então $JS = V_A$ e $d_{AB} = 0$;
- Se $JS > V_D$ então $JS = V_D$ e $d_{CD} = 0$;
- Se $JS > V_A$ e $JS > V_D$, então $JS = 0,5(V_A + V_D)$;
- Se o atraso calculado for menor que 0, então o atraso é igual a 0.

Na Figura 4 estão demonstrados os parâmetros geométricos necessários ao cálculo do atraso geométrico nas rotundas.



Fonte: adaptado de Semmens, 1985 (Macedo, 2005)

Figura 4: Parâmetros geométricos para o cálculo do atraso geométrico.

Desta forma, verifica-se que o atraso geométrico é maior quanto maior for o tamanho da rotunda e o grau de viragem. Logo, as viragens à direita estão sujeitas a menores atrasos do que movimentos de atravessamento e estes, por sua vez, sofrem menor atraso que os movimentos de viragem à esquerda.

Resumindo, o atraso total sofrido por um veículo corresponde à soma do valor do atraso devido às filas de espera com o valor do atraso geométrico a que está sujeito.

3.4.2. Método do SETRA

O modelo francês SETRA foi desenvolvido em 1980 e tem vindo a melhorar progressivamente. Este modelo estatístico, à semelhança do método TRL, é traduzido por uma função linear que determina a capacidade da entrada Q_e a partir das suas características geométricas, isto é, a largura de entrada medida na parte de trás do primeiro veículo parado na linha de cedência de prioridade ENT , em metro, e o seu tráfego conflituante Q_c , em uvle/h. O tráfego conflituante é uma combinação do tráfego de circulação que atravessa frontalmente a entrada em estudo Q_t com o tráfego que de saída do ramo em análise Q_s , ambos em uvle/h, tendo em conta a largura do anel de circulação em torno da ilha central ANN , e a largura do ilhéu separados SEP , ambos em metros. O modelo SETRA encontra-se ilustrado nas seguintes equações e figura 5 (Seco & Bastos Silva, 2010; Bastos Silva & Seco, 2008).

$$Q_e = (1330 - 0,7Q_c)(1 + 0,1(ENT - 3,5)), \quad (27)$$

onde:

$$Q_c = \left(Q_t + \frac{2}{3}Q_s \left(1 - \frac{SEP}{15} \right) \right) (1 - 0,085(ANN - 8)) \quad (28)$$

Q_e é a capacidade da entrada

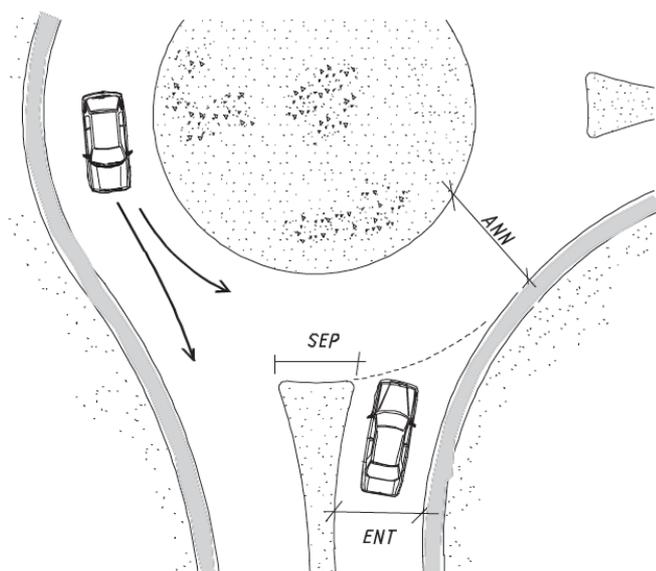
Q_s é o fluxo de saída do ramo em análise (uvle/h)

Q_t é o fluxo de circulação e que atravessa frontalmente a entrada em estudo (uvle/h)

ENT é a largura da entrada medida na traseira do primeiro veículo parado na linha de cedência de prioridade (m)

ANN é a largura do anel de circulação em torno da ilha central (m)

SEP é a largura do ilhéu separador (m)



Fonte: Seco & Bastos Silva (2010)

Figura 5: Parâmetros geométricos – Modelo SETRA

3.4.3. Modelo FCTUC

A partir de análises comparativas dos resultados de capacidade real obtidos por um conjunto de modelos desenvolvidos noutros países, concluíram que os modelos de base estatística representam melhor o comportamento das curvas da capacidade em Portugal. Concluindo-se, assim, que o modelo do TRL é o que mais se aproximou da capacidade geométrica observada, enquanto o modelo do SETRA é o que melhor representa a importância do tráfego conflituante (Bastos Silva & Seco, 2008; Seco & Bastos Silva, 2010).

Neste sentido, o modelo FCTUC consiste na calibração do método TRL, adaptado às condições de circulação e às características dos condutores portuguesas (Bastos Silva, 1997). Sendo assim, também permite estimar os fluxos globais de entrada em função dos fluxos conflituantes para cada entrada (Bastos Silva & Seco, 2008).

Deste modo, a formulação geral deste método para o cálculo da capacidade de entrada Q_e é em função do fluxo conflituante Q_c , considerando o tráfego de circulação no anel, e em função dos parâmetros K , F , f_c , t_p , M , X_2 e S , que representam as expressões apresentadas anteriormente no método TRL. A mesma encontra-se de seguida apresentada:

$$Q_e = K(F - f_c * Q_c) \quad (29)$$

com,

$$K = 1 - 0,00347(\varphi - 30) - 3,431 \left(\frac{1}{r} - 0,05 \right) \quad (30)$$

$$F = 335,47X_2 \quad (31)$$

$$f_c = 0,611t_d(-0,457 + 0,2X_2) \quad (32)$$

$$t_d = 1 + \frac{0,983}{1+M} \quad (33)$$

$$M = \exp\left(\frac{DCI-60}{10}\right) \quad (34)$$

$$X_2 = v + \frac{e-v}{1+2S} \quad (35)$$

$$S = \frac{1,6(e-v)}{l'} \quad (36)$$

onde (ver figura 3, a mesma que o TRL):

v é a largura da via na aproximação da rotunda

e é a largura efetiva da entrada junto à linha de cedências de prioridade e na perpendicular ao lancil

l' é o comprimento médio efetivo do leque

r é o raio de entrada medido no ponto de menor curvatura

DCI é o diâmetro do círculo inscrito

φ é o ângulo de entrada

Segundo um estudo efetuado utilizando o FCTUC, este método de cálculo em interseções giratórias pode ser aplicado em diferentes tipos de soluções (Seco & Bastos Silva, 2010). Havendo, desta forma, tabelas que asseguram o processo de cálculo para mini-rotundas, rotundas normais de pequenas, médias e grandes dimensões. Estas podem ser consultadas no Manual do planeamento de acessibilidades e transportes (Bastos Silva & Seco, 2008).

3.4.4. Atraso Médio

A análise dos atrasos é um complemento importante à definição do desempenho de uma interseção.

Para cada interseção existem vários modelos propostos na literatura que podem ser aplicados para a determinação do atraso.

Apesar do método de cálculo depender do tipo de interseção, de uma forma simplificada, o atraso é a diferença entre o tempo necessário à passagem de um veículo considerando que tem prioridade absoluta e o tempo que o mesmo necessita para atravessar a rotundas nas condições de controlo prevaletentes (por exemplo, cedências de passagem).

O cálculo do atraso médio de uma rotunda, a partir da metodologia proposta no HCM (TRB, 2010), é determinado de acordo com a seguinte equação:

$$d = \frac{3600}{c_{m,x}} + 900T \left[\frac{V_x}{c_{m,x}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{V_x}{c_{m,x}} - 1\right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_{m,x}}\right)\left(\frac{V_x}{c_{m,x}}\right)}{450T}} \right] + 5 \quad (37)$$

em que:

d - Atraso médio, em seg./veíc.;

V_x - Débito de chegada do movimento x, em veíc./h;

$C_{m,x}$ - Capacidade real do movimento x, em veíc./h;

T - Período de análise (T=0,25, considera-se geralmente 15 minutos);

“+5” – representa o atraso devido à geometria da interseção.

3.4.5. Filas de Espera

Para o cálculo das filas de espera, também existem diferentes modelos propostos.

O modelo proposto pelo HCM (TRB, 2010) faz uma estimativa em termos fila espera, num intervalo de confiança de 95%, de acordo com a seguinte equação:

$$Q_{95} = 900T \left[\frac{V_x}{c_{m,x}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{V_x}{c_{m,x}} - 1\right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_{m,x}}\right)\left(\frac{V_x}{c_{m,x}}\right)}{450T}} \right] \left(\frac{c_{m,x}}{3600}\right) \quad (38)$$

Onde:

Q_{95} – Fila de espera estimada num intervalo de confiança de 95%

V_x - Débito de chegada do movimento x, em veíc./h;

$C_{m,x}$ - Capacidade real do movimento x, em veíc./h;

T - Período de análise (T=0,25, considera-se geralmente 15 minutos).

3.5. Métodos de Cálculo de Indicadores de Desempenho – Interseção SemafORIZADA

Tendo em conta os mesmos pressupostos para a análise comparativa das duas interseções, isto é os indicadores de desempenho escolhidos para analisar foram a capacidade, grau de saturação, filas de espera e atraso médio por veículo. Para a interseção semaforizada foi utilizado o modelo de estimação de débito de saturação e a partir desta estimativa foram obtidos a capacidade, as filas de espera e atraso médio por veículo.

De seguida os mesmos métodos serão descritos com maior detalhe.

3.5.1. Fluxo de Saturação

Fluxo de saturação corresponde ao fluxo estável máximo de veículos que pode atravessar uma determinada interseção, sob determinadas condições, admitindo que aquele grupo de fluxo de tráfego dispõe de 100% de tempo de verde, necessário para calcular a capacidade. Este conceito é também conhecido por débito de saturação e está relacionado com a capacidade do ramo de entrada, consequentemente é aplicado na análise de interseções reguladas por sinais luminosos (Costa, *et al.*, 2008).

Ciclo, como já referido, é a sequência de fases mínima, que proporciona o direito de avançar a todos os fluxos de tráfego. Sabendo isto, definir as fases e a respetiva sequência deve atender às expectativas dos condutores, e os fluxos de tráfego agrupados numa mesma fase devem apresentar índices de carga semelhantes. O índice de carga traduz a necessidade de sinal verde para a correspondente fase. Assim, a fase com índice de carga superior, considerada crítica, condicionará a distribuição dos tempos de verde nas restantes fases. Segundo Costa, *et al.*, (2008), o índice de carga de uma fase j é definido por:

$$y_i = \max\left(\frac{q_{ji}}{s_{ji}}\right) = \max(y_{cj}) \quad (39)$$

onde,

y_i – índice de carga da fase i

q_{ji} – índice de carga da corrente de tráfego j

s_{ji} – débito de chegadas da corrente de tráfego j que avança na fase i

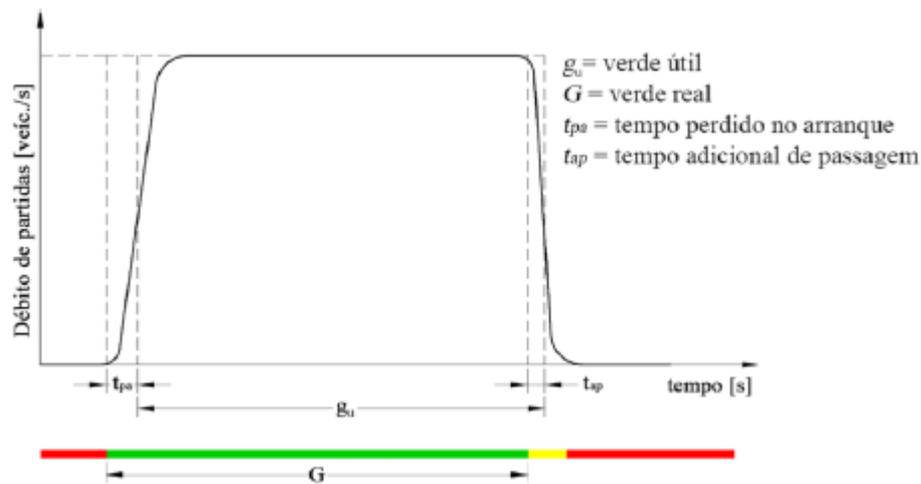
y_{cj} – débito de saturação da corrente de tráfego j que avança na fase i

Relativamente ao índice de carga da interseção, este é calculado a partir da soma dos índices de carga de todas as suas fases, ou seja, por:

$$Y = \sum y_i. \tag{40}$$

Para avaliar a viabilidade da utilização dessa interseção e, por conseguinte, calcular o débito de saturação é fundamental a caracterização do volume de tráfego (procura) que chega à interseção e de como se processam as partidas dos veículos, que influenciam na capacidade de escoamento do cruzamento (Costa, *et al.*, 2008).

Ainda, em relação à partida dos veículos, esta só pode ocorrer durante o tempo de verde e amarelo, e o ritmo de partidas é geralmente considerado praticamente constante, excluindo os períodos inicial e final, como demonstrado no diagrama de partidas da Figura 6. A figura representa o fluxo de partidas de uma corrente de tráfego que apresenta permanentemente veículos para avançarem, ou seja o tempo de verde está saturado (Costa, *et al.*, 2008).



Fonte: adaptado de Costa, *et al.* (2008)

Figura 6: Padrões reais e conceptuais de partidas

Pela figura, verifica-se que o ritmo de partidas é lento no início do tempo de verde, devido à perda de tempo no arranque. O intervalo de tempo entre veículos sucessivos diminui com o avançar do tempo verde, estabilizando num valor mínimo (geralmente na passagem do quarto/quinto veículo), ocorrendo nesse instante o fluxo máximo de passagem, designado por fluxo ou débito de saturação, *s*. Parâmetro este necessário para o dimensionamento do

plano de regulação. Quando surge o amarelo, o fluxo de partidas vai diminuindo até se anular (Costa, *et al.*, 2008).

Então, sendo que a figura 5 é limitada pela linha que representa a variação do débito de saturação, formando um retângulo, onde a altura corresponde ao débito de saturação e o comprimento da base define o tempo de verde útil, g . Deste modo, o número máximo de veículos que podem passar durante um ciclo é obtido pela área do retângulo acima referido, ou seja resulta do produto de g por s (Costa, *et al.*, 2008).

O tempo perdido no arranque, t_{pa} , é o tempo compreendido entre os instantes iniciais do verde real e do verde útil. O tempo entre os instantes finais do verde real e do verde útil designa-se por tempo adicional de passagem, t_{ap} (Costa, *et al.*, 2008).

O débito de saturação depende das condições operacionais em que se processam as partidas, principalmente das características geométricas da entrada. Geralmente o débito de saturação é obtido por via, deste modo caso exista uma corrente de tráfego que utilize mais do que um via, o respetivo débito de saturação é obtido pela soma dos débitos de saturação associados a cada uma das vias (Costa, *et al.*, 2008).

Para quantificar o débito de saturação podem ser seguidas duas abordagens: a) estimação através de fórmulas; b) medições no local. Preferencialmente, o valor deve ser obtido por esta ultima abordagem, no entanto nem sempre é possível fazê-lo e para ultrapassar essa dificuldade recorre-se a modelos de estimação (Costa, *et al.*, 2008).

3.5.1.1. Estimação do Débito de Saturação

Os vários modelos de estimação do débito de saturação devem refletir de forma mais fiel a partida dos veículos, o qual depende de um conjunto de características geométricas e condições de circulação. No entanto, é necessário selecionar os fatores que mais afetam a partida dos veículos, para que se conheça com suficiente rigor a respetiva influência (Costa, *et al.*, 2008).

As correntes de tráfego, para este modelo de estimação, podem ser agrupadas em correntes de tráfego sem oposição e com oposição, dependendo se os veículos não têm ou têm de dar prioridade a veículos de outras correntes de tráfego, respetivamente. Nestes dois grupos, ainda, se pode considerar se a via é exclusiva ou se é partilhada pela presença de dois ou mais movimentos de veículos (Costa, *et al.*, 2008).

Neste caso, apenas foi necessário considerar os cenários de corrente de tráfego sem oposição em via exclusiva e em via partilhada, bem como corrente de tráfego com oposição em via exclusiva (Costa, *et al.*, 2008).

Para uma corrente de tráfego sem oposição em via exclusiva, Costa, *et al.* (2008) propõe a estimação deste indicador, através da seguinte expressão:

$$s = s_0 f_w f_i f_z f_p f_t f_d \quad (41)$$

onde,

s – débito de saturação (uvl/h)

s_0 – débito de saturação base (uvl/h)

f_w – fator de ajustamento devido à largura da via

f_i – fator de ajustamento devido ao declive da via

f_z – fator de ajustamento devido à localização da interseção

f_p – fator de ajustamento devido à localização da via

f_t – fator de ajustamento devido à composição da corrente de tráfego

f_d - fator de ajustamento devido à mudança de direção

O valor de débito de saturação base considerado é de 1900 uvl/h, quando se verificam as seguintes condições: via exclusiva para movimento em frente sem oposição; corrente de tráfego constituída apenas por veículos ligeiros; largura da via igual a 3.3 metros numa extensão que garanta uma permanente partida de veículos; perfil longitudinal da via em patamar; e localização do cruzamento em zona de características médias e via afastada do passeio (Costa, *et al.*, 2008).

A largura da via w (m) é uma das condições geométricas que mais afeta a partida dos veículos. Deste modo, o fator de ajustamento f_w obtém-se a partir da seguinte fórmula:

$$f_w = \begin{cases} 0,105w + 0,653 & 2,5 < w < 3,3 \\ 0,053w + 0,826 & 3,3 < w < 5,0 \end{cases} \quad (42)$$

O declive da via i pode ter um efeito positivo ou negativo no débito de saturação, dependendo se a via esteja a descer, facilitando a partida dos veículos, ou a subir, dificultando-a (Costa, *et al.*, 2008).

O fator de ajustamento f_i pode ser determinado segundo a seguinte equação:

$$f_i = 1 - 2i \quad (43)$$

onde i é o declive da via (formato decimal), sendo positivo nas subidas e negativo nas descidas.

Segundo Costa, *et al.*, (2008), a influência da localização da interseção dada pelo fator f_z é obtida pela classificação da localização tendo em conta conjunto de fatores divididos em classes:

- Classe A ($f_z=1.1$), corresponde a uma área residencial ou suburbana, onde a visibilidade é boa, onde as restrições à liberdade de manobra dos condutores nulas ou reduzidas e provocadas pela presença de peões, rotatividade do estacionamento ou paragens de autocarros.
- Classe B ($f_z=1.0$) corresponde a uma zona de características médias, onde as perturbações à partida dos veículos são moderadas.
- Classe C ($f_z=0.9$) corresponde às zonas centrais, onde quer o elevado volume de peões, quer as múltiplas manobras de estacionamento, paragem para a entrada e saída de passageiros, bem como para as operações de carga e descarga produzem um efeito sensível no escoamento do tráfego.

O fator de ajustamento devido à localização da via f_p toma o valor de 0.95 sempre que a via de tráfego se situe junto ao lancil (Costa, *et al.*, 2008).

O fator de ajustamento f_t é necessário para a conversão dos débitos homogeneizados em débitos reais e, assim, adequar o valor base do débito de saturação, expresso em uvl/h, a cada classe do veículo (Costa, *et al.*, 2008). Este fator, que diz respeito à composição do tráfego, é calculado por:

$$f_t = \frac{1}{1 - \sum p_i + \sum p_i E_i} \quad (44)$$

em que,

p_i – proporção de veículos da classe i (exceto veículos ligeiros)

E_i – coeficiente de equivalência dos veículos de classe i (exceto veículos ligeiros)

Os coeficientes de equivalência a adotar são: veículo comercial médio e pesado o valor de 1.5 e 2.3, respetivamente; autocarro é de 2.0; veículo de duas rodas com motor é 0.4; e para bicicleta 0.2 (Costa, *et al.*, 2008).

Quando há mudanças de direção os veículos avançam a velocidade mais baixas (Costa, *et al.*, 2008). Para este efeito é determinado o fator de ajustamento devido à mudança de direção f_d , dado por:

$$f_d = \frac{1}{1+1,5/\rho} \quad (45)$$

sendo, ρ o raio da curva (m) descrita pelo veículo na manobra de viragem

Quando a via é partilhada por dois ou mais movimentos sem oposição, o respetivo débito de saturação é, segundo Costa, *et al.* (2008), estimado por:

$$s = \frac{\sum p_i}{\sum \frac{p_i}{s_i}} \quad (46)$$

onde, s_i e p_i são o débito de saturação e a proporção do movimento i , respetivamente.

Desta forma, para a estimação do débito de saturação da via partilhada, primeiro estima-se o débito de saturação de cada um dos movimentos que incorporam a corrente de tráfego, admitindo que dispõem de via exclusiva (Costa, *et al.*, 2008).

Quando existe conflito entre correntes de tráfego, a estimação do débito de saturação torna-se mais complexa, isto porque a partida de veículos tem que obedecer a regimes diferentes conforme haja ou não veículos prioritários a impedir as manobras (Costa, *et al.*, 2008).

A estimativa do débito de saturação para a corrente de tráfego com oposição em via exclusiva é obtida de uma forma semelhante ao raciocínio utilizado na apresentação do conceito de débito de saturação, isto é, segundo Costa, *et al.* (2008) obtém-se pela seguinte fórmula:

$$s = \frac{s_u g_u + n f}{g} \quad (47)$$

com,

s_u – débito de saturação da corrente de tráfego não prioritária, durante o tempo g_u

g_u – tempo de verde útil não saturado

n_f – número de partidas após o fim do tempo de verde

g – tempo de verde útil

O valor de s_u pode ser obtido utilizando a fórmula de Tanner (Costa, *et al.*, 2008), uma das mais conhecidas e utilizadas no cálculo da capacidade em interseções prioritárias:

$$s_u = q_{op} \frac{q_{op}(1-\beta_1 q_{op})}{\exp[q_{op}(\alpha-\beta_1)][1-\exp(-\beta_2 q_{op})]} \quad (48)$$

com,

q_{op} – débito de chegadas da corrente de tráfego prioritária

α - intervalo de aceitação crítico dos veículos não prioritários

β_1 - intervalo mínimo entre veículos prioritários

β_2 – intervalo mínimo entre partidas de veículos não prioritários

No entanto, também se pode utilizar a seguinte expressão simplificada, onde as variáveis representam o mesmo que a expressão anterior:

$$s_u = q_{op} \frac{\exp(-\alpha q_{op})}{1-\exp(-\beta_2 q_{op})} \quad (49)$$

Os valores dos parâmetros α , β_1 e β_2 devem ser, preferencialmente, medidos no local. Caso não seja possível, pode-se utilizar para α o valor de 5s, β_1 é de 1.8s e β_2 de 3s (Costa, *et al.*, 2008).

O valor de g_u obtém-se, para a corrente de tráfego prioritária, pela diferença entre o tempo de verde útil, g_{op} e o tempo de verde saturado, g_s isto é:

$$g_u = g_{op} - g_s \quad (50)$$

Para determinar o tempo de verde saturado para a corrente de tráfego prioritário utiliza-se a seguinte equação:

$$g_s s_{op} = q_{op}(C - g_{op} + g_s) \quad (51)$$

onde,

g_s – tempo de verde saturado para a corrente de tráfego prioritária

s_{op} – débito de saturação da corrente de tráfego prioritária

q_{op} – débito de chegadas da corrente de tráfego prioritária

C – duração do ciclo

g_{op} – tempo de verde útil da corrente de tráfego prioritária

Por substituição da equação de g_s na fórmula de cálculo do tempo de verde útil não saturado, obtém-se:

$$g_u = \frac{g_{op}s_{op} - q_{op}C}{s_{op} - q_{op}} \quad (52)$$

O número de veículos n_f que, em média, podem avançar após o fim do tempo de verde será significativa, caso sejam escassas as oportunidades de avanço na corrente de tráfego prioritária (Costa, *et al.*, 2008). Para o cálculo deste valor recomenda-se a medição local, no entanto a estimativa pode ser obtida a partir da seguinte expressão:

$$n_f = n_s F \quad (53)$$

em que,

n_s – representa o espaço disponível no interior do cruzamento, expresso em veículos, para reter os veículos não prioritários

F - representa a probabilidade que existam veículos a ocupar este espaço

Esta última variável, F , é calculada através de:

$$F = x_{op}^{0,2} \quad (54)$$

com,

$$x_{op} = C \frac{q_{op}}{s_{op}g_{op}} \quad (55)$$

onde, x_{op} é um parâmetro designado por grau de saturação.

3.5.2. Expressão do Cálculo de Capacidade

O desempenho operacional de uma interseção é frequentemente avaliado através da sua capacidade de escoamento de tráfego. Segundo o HCM (TRB, 2010), capacidade pode ser definida como o “máximo fluxo sustentável com que pessoas ou veículos conseguem atravessar um ponto ou um segmento uniforme de uma via ou estrada durante um determinado período de tempo, sob as condições geométricas, de tráfego, ambientais e de operação prevalentes”. Ou seja, é o número máximo de veículos que passam por unidade de tempo e, por isso, a capacidade é normalmente associada às correntes de tráfego. Deste modo, sendo s o débito de saturação, g o tempo de verde útil e C a duração do ciclo, a capacidade Q é dada por:

$$Q = s \frac{g}{c} \quad (56)$$

Nesta expressão assume-se que existe uma fila constante antes da interseção e um débito de passagens constante e máximo (equivalente ao débito de saturação) durante o período de verde. Contudo, na realidade esse fluxo é variável e, por isso, no cálculo da capacidade acima indicado considera-se um período fictício de verde útil, g .

Esta expressão tem aplicação no cálculo da capacidade de uma corrente de tráfego destinada a movimentos sem conflito nos movimentos de viragem.

3.5.3. Grau de Saturação

Grau de saturação x , normalmente expresso em percentagem, é a relação entre o fluxo de chegada, durante um determinado período de tempo, e a capacidade. Este indicador pode ser determinado ao nível do ramo de entrada ou desagregado por via (Costa, *et al.*, 2008).

Sendo assim, o grau de saturação de uma entrada ou via obtém-se a partir da seguinte expressão:

$$x = \frac{qC}{sg} \quad (57)$$

em que,

q é o débito de chegadas (veíc./h)

C é a duração do ciclo

g é o tempo de verde útil

s é o débito de saturação

Esta expressão pode ser aplicada para entrada de rotundas como para fluxos de tráfego de interseções semaforizadas.

Quando os valores de grau de saturação são superiores a 1, significa que existe uma procura superior à capacidade da solução e, portanto, conduz a uma situação de congestionamento.

3.5.4. Atraso Médio

Para as interseções semaforizadas, o modelo desenvolvido por Webster (Costa, *et al.*, 2008), com auxílio de uma simulação em computador, determinou que o valor do atraso médio por veículo é dado por:

$$d = \frac{c(1-\frac{g}{c})^2}{2(1-x\frac{g}{c})} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65x \left(\frac{c}{q^2}\right)^{1/3} \left(2 + 5\frac{g}{c}\right) \quad (58)$$

com,

d - atraso médio por veículo

C – duração do ciclo

g - tempo de verde útil

x - grau de saturação

q – débito de chegadas

Sendo a expressão simplificada:

$$d = 0,9 \frac{c(1-\frac{g}{c})^2}{2(1-x\frac{g}{c})} + \frac{x^2}{2q(1-x)} \quad (59)$$

3.5.5. Filas de Espera

Os modelos mais simples admitem um comportamento determinista do tráfego, quer no que se refere ao processo de chegadas, quer às partidas (Costa, *et al.*, 2008). Sendo assim, admitindo que o ciclo é não saturado, ou seja que a fila de espera extingue-se antes de terminar o tempo de verde, a fila de espera máxima N_u que surgirá no início do verde é igual ao número de veículos que chegam durante o tempo em que não pode haver partidas, expressamente é:

$$N_u = q(C - g) \quad (60)$$

onde,

q – débito de chegadas

C – duração do ciclo

g – tempo de verde útil

Caso haja ciclos saturados e não saturados, ao valor de N_u , calculado pela fórmula anterior, deverá ter que se somar N_0 (Costa, *et al.*, 2008), que corresponde ao número médio de veículos presentes no início do verde, cujo valor por ser determinado pela seguinte expressão:

$$N_o = \frac{QT_f}{4} \left(z + \sqrt{z^2 + \frac{12(x-x_0)}{QT_f}} \right) \quad (61)$$

onde,

N_o - número total de veículos retidos em fila de espera após o verde

Q – capacidade (veíc./h)

T_f - período de tempo (h) em que existe o débito q

x - grau de saturação

$$z = x - 1 \quad (62)$$

$$x_0 = 0,67 + s \frac{g}{600} \quad (63)$$

O valor de N_0 é considerado nulo para valores do grau de saturação inferiores a x_0 . Para valores de $x < 0.9$, o T_f não tem efeito significativo. Por outro lado, a influência do tempo T_f é grande quando o débito excede a capacidade, ou seja para valores de $x > 1$ (Costa, *et al.*, 2008).

Para além do número máximo de veículos na fila de espera é importante conhecer a distância que o último veículo, retido na fila de espera, fica da linha de paragem (Costa, *et al.*, 2008). O valor máximo da distância da linha de paragem é determinado em função do número de veículos N que chegam durante o tempo de vermelho e o tempo de verde saturado, isto é, com fila de espera:

$$N = q(C - g + g_s) \quad (64)$$

em que,

q - débito de chegadas

C - duração do ciclo

g - tempo de verde útil

g_s - tempo de verde útil saturado

Sendo d_j o espaçamento médio dos veículos alinhados na fila, a distância máxima d_m à linha de paragem é calculada por:

$$d_m = qd_j \left(C - g + y \frac{C-g}{1-y} \right) \quad (65)$$

As últimas duas expressões dizem respeito ao total de veículos e caso o fluxo de tráfego disponha de mais do que uma via é necessário dividir as expressões anteriores pelo o número das mesmas (Costa, *et al.*, 2008).

3.6. Modelos de Microssimulação de Tráfego

Os modelos de microssimulação de tráfego são ferramentas que pretendem representar a circulação de veículos individuais o mais realista possível, ao longo de uma rede rodoviária (Macedo, Benta, & Santos, 2011).

Existe uma grande variedade e quantidade de ferramentas de simulação microscópica de tráfego, sendo que algumas têm como finalidade a investigação e as outras são produtos comerciais. O projeto europeu SMARTTEST, identificou cinquenta e oito microssimuladores de tráfego, em que os mais conhecidos e utilizados são o AIMSUN, CORSIM, MITSIM, PARAMICS E VISSIM (SMARTTEST, 2000; Macedo, *et al.*, 2011).

Existe um conjunto de componentes que possibilitam ao modelador representar as condições da rede e do tráfego que nela circula, as características do caso em análise, a execução da simulação e a análise dos seus resultados (Macedo, *et al.*, 2011).

Para que um modelo de microssimulação de tráfego seja capaz de levar a cabo análises de tráfego deve possuir componentes mínimos (Brambila, 2008), tais como a representação da rede viária, a definição do tipo de veículos, a definição do tipo de condutores, a especificação da procura, o plano de controlo do tráfego, a modelação detalhada do comportamento individual dos veículos e condutores, a animação gráfica da simulação e, por fim, os resultados da simulação (Macedo, *et al.*, 2011).

As principais vantagens associadas à simulação de tráfego são as seguintes (May, 1990):

- Facilitar a realização de experiências;
- Possibilitar a simulação de cenários alternativos ao real;
- Permitir um melhor conhecimento das variáveis envolvidas no problema e das suas relações;
- Obter como resultado da modelação informações referenciadas no tempo e no espaço (desagregadas);
- Possibilidade de ser estudado em tempo real, tempo estendido ou tempo reduzido;
- Experiências com riscos de segurança podem ser simuladas sem quaisquer riscos para os utilizadores do sistema real;
- Reprodução das condições iniciais para servirem de base de comparação entre alternativas;
- Permitir estudar os efeitos de mudanças operacionais nos sistemas estudados;
- Proporcionar a variação da procura ao longo do tempo e do espaço.

Estas vantagens fazem com que as ferramentas de microssimulação de tráfego sejam um instrumento importante na resolução de problemas de tráfego (Macedo, *et al.*, 2011).

3.6.1. Aplicações dos Modelos de Microsimulação de Tráfego

As ferramentas de microsimulação de tráfego são capazes de simular um conjunto alargado de situações devido às várias funcionalidades, tais como coordenação de sinais luminosos, sinais luminosos atuados, afetação de percursos dinâmicos, controlo de acesso nas rampas de ligação (*ramp metering*), informação aos viajantes através de painéis de mensagem variável, prioridade a uma determinada classe de veículos (transportes públicos, veículos de emergência, etc.), deteção de veículos através de detetores e gestão de incidentes (SMARTTEST, 1997; Macedo, *et al.*, 2011).

Estas ferramentas apresentam um campo de aplicação bastante amplo devido à sua flexibilidade, precisão e clareza. Existem situações em que é bastante vantajoso a aplicação destas ferramentas, tais como (Transport for London, 2003):

- Esquemas de operação de tráfego complexos.
- Existência de conflitos significativos entre diferentes utilizadores (peões, ciclistas, autocarros, entre outros);
- Trabalhos nas estradas;
- Elaboração de projetos politicamente sensíveis;
- Planeamento e projeto de empreendimentos de elevado valor, nos quais os modelos de microsimulação podem auxiliar na escolha das soluções a implementar;
- Emulação da operação de sistemas dinâmicos de controlo de tráfego;
- Estudos de tráfego em centros urbanos;
- Análises da operação de redes de elétrico ou metro ligeiro.

Os modelos de microsimulação de tráfego também são muito úteis na resolução de problemas onde, por exemplo, as metodologias convencionais não podem ser aplicadas (Macedo, *et al.*, 2011).

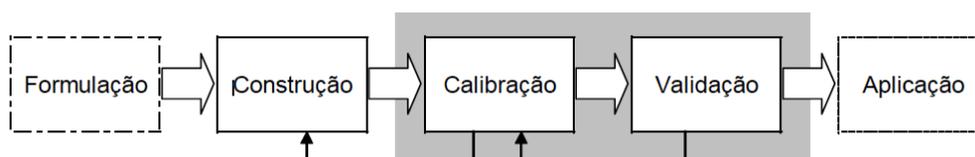
Como qualquer método de modelação, os modelos de microsimulação de tráfego também apresentam algumas limitações devido ao facto de serem representações simplificadas da realidade. Para este tipo de modelação é necessário ter um maior conhecimento do sistema em estudo do que para outros métodos alternativos, que por vezes é de difícil obtenção. A microsimulação de tráfego obriga a realização de alguns procedimentos, tais como verificação, calibração e validação, que se não forem realizados de forma satisfatória podem pôr em causa a utilidade do modelo (Macedo, *et al.*, 2011).

3.6.2. Desenvolvimento de um Modelo de Microssimulação

O desenvolvimento de um modelo consiste num conjunto de etapas: inicia-se pela formulação, esta etapa faz-se a enunciação do problema e clarificação dos objetivos a atingir; depois a construção, onde se realiza a recolha de dados, a codificação da rede e a verificação da mesma; passando depois para a calibração, que se ajusta os valores das variáveis de modo a que os valores de saída (os resultados) se aproximem o mais possível dos observados na realidade; depois realiza-se a validação, aqui testa-se a capacidade de previsão do modelo através da adoção de critérios, com base em informação diferente da utilizada na fase de calibração; por último, termina-se com a sua aplicação, após o modelo estar validado, segue-se o projeto de experiências e análises de resultados.

Especificamente, a validação é a etapa mais delicada de todas as que constituem o desenvolvimento do modelo e a que obriga a frequentes reanálises das fases anteriores (Tavares, 2003; Macedo, *et al.*, 2011).

A Figura 7 representa as diferentes etapas que constitui o processo de desenvolvimento de um modelo.



Fonte: Tavares, 2003

Figura 7: Desenvolvimento de um modelo

3.6.3. Simulador de Tráfego AIMSUN

O AIMSUN, sigla que provém do inglês *Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks*, é um simulador de tráfego e foi criado e desenvolvido pelo Laboratório de Investigação Operacional e Simulação (LIOS), grupo de investigação que pertence ao Departamento de Estatística e Investigação Operacional da Universidade Politécnica da Catalunha, em Espanha. Este foi comercializado pela empresa Transport Simulation Systems (TSS) com sede em Barcelona, Espanha (Barceló, 2001). O AIMSUN é um *software* capaz de reproduzir as condições reais de tráfego (TSS, 2010a).

Este, como o próprio nome indica, consiste num simulador microscópico de tráfego, tendo como principal objetivo a simulação de tráfego em redes urbanas e interurbanas, para isso contém um conjunto abrangente de sistemas avançados em telemática de transportes. Este modelo foi desenvolvido e implementado como uma ferramenta de apoio aos engenheiros de tráfego de modo a poderem analisar e projetar modelos de tráfego (SMARTTEST, 1997; Macedo & Benta, 2013).

O AIMSUN realiza a modelação microscópica do movimento individual dos veículos recorrendo a um modelo de seguimento (Gipps, 1981; Gipps, 1986a) e um modelo de mudança de via baseados no modelo proposto por Gipps (1986a; 1986b). Os modelos existentes no AIMSUN e a sua arquitetura permitem modelar detalhadamente uma rede viária, permitindo distinguir diferentes tipos de veículos e simular a velocidade dos mesmos, modelar a procura de tráfego pelo volume de tráfego, proporções de viragens e a escolha de percursos. Proporciona a consideração de vários tipos de estradas, desde vias urbanas até autoestradas, consegue modelar sistemas semaforizados e, ainda, o impacto de incidentes. O modelo permite também estimar o impacte ambiental das emissões de poluição atmosférica e a energia consumida pelos veículos (Macedo & Benta, 2013).

Segundo o manual do programa (TSS, 2010a; TSS, 2010b), o AIMSUN tem provado ser muito útil no teste de novos sistemas de controlo de tráfego e na gestão de políticas baseadas na tecnologias tradicionais ou na implementação de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS - Intelligent Transport Systems) .

O AIMSUN permite, também, a recolha de dados com qualquer tipo de detalhe (Xiao, Ambadipudi, Hourdakis, & Michalopoulos, 2005).

3.6.3.1. Calibração

Experimentalmente, a credibilidade dos resultados obtidos através de um modelo de microsimulação de tráfego depende, diretamente, da sua capacidade de representar com exatidão o comportamento do sistema. No entanto, um modelo de microsimulação não está igualmente adaptado para as possíveis diferentes condições reais de tráfego. Neste sentido, o *software* utilizado, AIMSUN, possui um conjunto de variáveis (com valores definidos por defeito) que podem ser definidas e alteradas pelo utilizador com o objetivo de melhor ajustar o modelo às condições locais existentes. Desta forma, a construção de um modelo que reproduza de forma fiável e automática um sistema real de estudo e a sua

interação com os diferentes intervenientes, necessita de ser testado e calibrado para que seja válido (Barceló, Perarnau, & Torday, 2007).

A calibração trata-se de um processo iterativo onde, com base na análise da comparação entre os valores das amostras recolhidas a partir do sistema real (valores observados) e os dados de saída fornecidos pelos testes realizados com recurso da aplicação do modelo de simulação à rede (valores simulados), são ajustados os parâmetros do modelo de microssimulação com o intuito de reproduzir com maior fiabilidade as condições locais reais, comportamento dos condutores e as características da rede (Vilarinho, 2008).

O AIMSUN abrange um conjunto de parâmetros suscetíveis de calibração, caracterizados por globais (rede), locais (secção) ou individuais (veículo), descritas no manual do programa (TSS, 2010a). As primeiras abrangem o tempo de reação, o tempo de reação parado, a velocidade de saída de fila de espera, os parâmetros do modelo de mudança de via e parâmetros do modelo “*Two lane Car-Following*”, tal como o número de veículos, a distância, a máxima diferença de velocidades. Os parâmetros locais ou de secção influenciam todos os veículos independentemente do tipo que circulam numa determinada secção de rede, e compreendem a velocidade máxima do local, a velocidade de viragem, a distância de visibilidade e a distância das zonas de mudança de via. Por último, os parâmetros individuais englobam um conjunto de variáveis que influenciam todos os veículos de determinado tipo quando conduzidos em qualquer parte da rede, sendo assim são características do próprio veículo, como a velocidade e aceleração máxima, a desaceleração normal e máxima, a aceitação da velocidade, o comprimento do veículo, a distância mínima entre veículos e o intervalo crítico. Estes parâmetros têm como objetivo principal, contribuir para a consistência do modelo representativo de microssimulação de tráfego. O processo de calibração tem assim o objetivo de encontrar os valores destes parâmetros que irão tornar possível produzir um modelo válido.

Resumidamente, calibração de um modelo é, portanto, o processo através do qual são ajustados os valores das variáveis responsáveis pela representação das suas condições de operação, com o objetivo de que as simulações realizadas reflitam valores reais e que o grau de credibilidade do modelo seja tanto maior quanto maior for a robustez do processo de calibração. Caso contrário a simulação não terá qualquer utilidade (Barceló, *et al.*, 2007).

3.6.3.2. Validação

A validação é um processo efetuado para determinar se o modelo de simulação representa a realidade com uma exatidão satisfatória. Este é um método iterativo que envolve a calibração de parâmetros e a comparação do modelo com o comportamento do sistema real. O processo de validação é constituído por duas fases, a primeira envolve a escolha das variáveis e a segunda consiste na realização dos testes face às variáveis anteriormente selecionadas (Rao, Owen, & Goldsam, 1998). Estes testes são repetidos quantas vezes as necessárias, até que os resultados sejam aceitáveis. Cada vez que seja necessário repetir, o modelo de simulação é executado novamente, tendo em conta uma nova calibração, onde os parâmetros foram ajustados (Vilarinho, 2008).

A validação de um modelo de simulação depende do grau de certeza pretendido que varia consoante o propósito do modelo. Segundo Rao, *et al.* (1998), nenhum modelo é absolutamente correto, uma vez que é difícil atingir a correspondência direta entre ele próprio e a realidade. Isto é, os modelos de simulação não são réplicas da realidade, mas sim uma aproximação (Vilarinho, 2008).

4. Caso de Estudo

4.1. Introdução

Como referido anteriormente o caso de estudo analisado nesta dissertação consiste numa interseção localizada em meio urbano, atualmente, esse local possui uma interseção semaforizada com sinais luminosos de tempos fixos. De uma análise prévia a essa interseção, através de um estudo conduzido pela Câmara Municipal de Matosinhos, verificou-se que o fluxo de tráfego tem vindo a aumentar, levando a congestionamento que se traduz em elevados tempos de espera por parte dos condutores. Estes tempos de espera são, ainda, mais agravados pela sazonalidade do volume de tráfego durante o dia e pela presença constante da circulação de veículos pesados que, por norma, quando se encontram parados demoram mais tempo a arrancar que um veículo

Deste modo, este caso de estudo avalia a viabilidade da substituição da interseção semaforizada por uma rotunda, relativamente aos tempos de espera que o fluxo de tráfego que este local possui.

4.2. Localização do caso de estudo

A interseção em estudo situa-se no cruzamento da Avenida Mário Brito com a Rua Oriental. Na Figura 8 encontra-se representada a interseção atual retirada a partir do Google Maps, enquanto a Figura 9 é a mesma interseção mas representada em Autocad, com a representação dos semáforos.

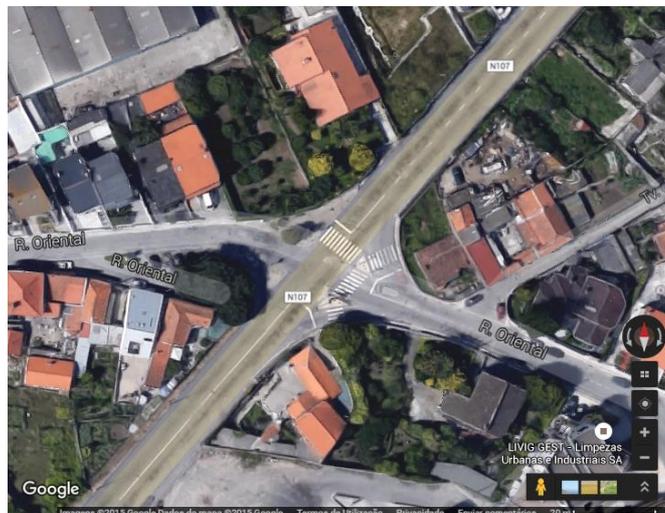


Figura 8: Fotografia aérea da interseção semaforizada em estudo (gmaps, 2015)

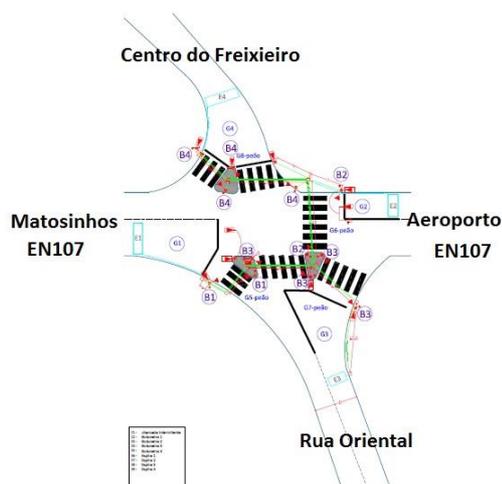


Figura 9: Representação da interseção semaforizada atual (Câmara Municipal de Matosinhos, 2013)

4.3. Descrição da Situação Existente

A proposta de intervenção na Rua Mário Brito surge na sequência da intenção de introdução da linha do Metro do Porto nesta artéria, estabelecendo a ligação de Matosinhos/Leça da Palmeira ao Aeroporto Francisco Sá Carneiro.

O arruamento apresenta uma grande afluência de tráfego de atravessamento e acesso aos diversos serviços existentes na zona, tais como, escola pública, restaurantes, correios, bancos, postos de abastecimento, aeroporto. É, ainda, uma zona de elevados volumes de tráfego, designadamente tráfego pesado.

Para resolver os pontos de maior conflito viário, serão introduzidas duas rotundas. Uma localizada nos terrenos do atual Horto Municipal, onde se encontra prevista a ligação à Avenida Fernando Távora. A outra situa-se no cruzamento com a Rua Oriental, para supressão dos semáforos atualmente existentes, eliminando assim este ponto de grande congestionamento de tráfego.

Dada a sua localização, junto ao aeroporto do Porto, esta interseção sofre de graves problemas de filas de espera nas horas de ponta, da parte da manhã e da tarde como se pode verificar na Figura 10 e 11. Ambas as figuras representam Av. Mário Brito quando a interseção semaforizada nesta fase se encontra com o sinal luminoso a vermelho.



Figura 10: Filas de espera na interseção em estudo (gmaps, 2015)



Figura 11: Filas de espera na interseção em estudo (gmaps, 2015)

Como referido anteriormente a interseção encontra-se regulada por sinais luminosos regulada por tempos fixos. O plano de regulação é composto por três fases, A, B e C.

Na Fase A (Figura 12) encontram-se as deslocações na N107, sentido Aeroporto-Matosinhos, Matosinhos-Aeroporto, Aeroporto-Rua Oriental e Matosinhos-Rua Oriental. Nesta fase detetou-se um conflito no sentido Aeroporto-Rua Oriental, o que faz com que o tempo de espera aumente e, conseqüentemente, um aumento de filas de espera.

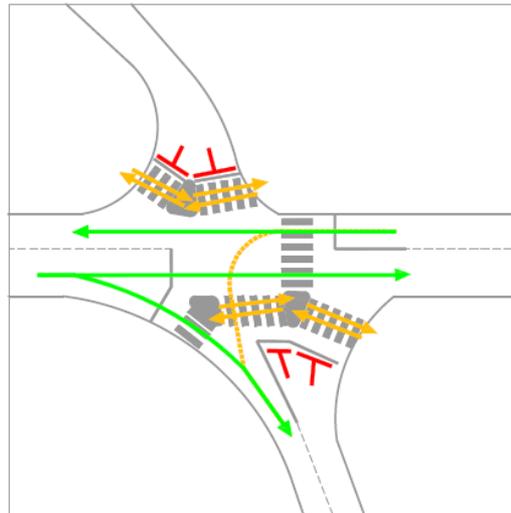


Figura 12: Fase A da interseção semaforizada em estudo (Câmara Municipal de Matosinhos, 2013)

Na Fase B (Figura 13) dão-se as deslocações do Centro Freixieiro para todos os ramos, tal como N107 direção Aeroporto, N107 direção Matosinhos e para a Rua Oriental. Nesta fase não são observáveis conflitos.

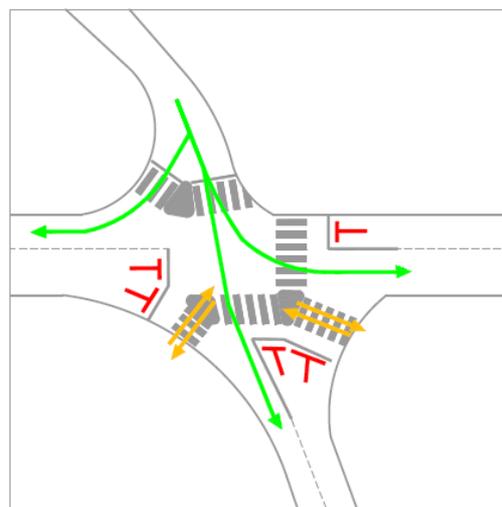


Figura 13: Fase B da interseção semaforizada em estudo (Câmara Municipal de Matosinhos, 2013)

Na Fase C (Figura Figura 14) da interseção temos o deslocamento da Rua Oriental para a N107 em ambas as direções (Aeroporto e Matosinhos).

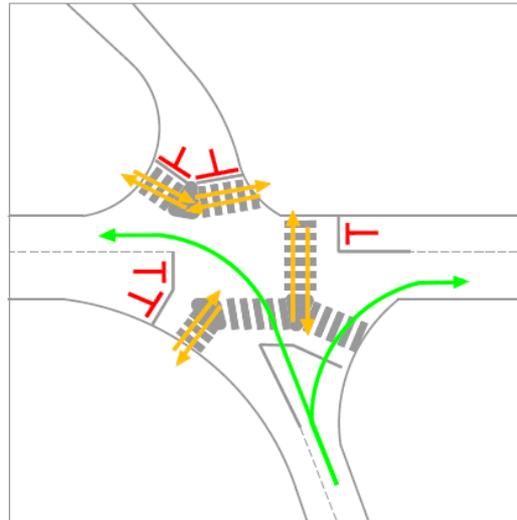


Figura 14: Fase C da interseção semaforizada em estudo (Câmara Municipal de Matosinhos, 2013)

Em termos geométricos, todas estas vias apresentam um perfil transversal do tipo de estrada de duas vias, ou seja, uma faixa de rodagem com uma via de tráfego em cada sentido com larguras por via que variam entre os 3.5 e os 5.0m.

A grande maioria do tráfego que circula nesta interseção nas horas de ponta deve-se à existência de uma escola e do Aeroporto. Nas restantes horas os fluxos são mais reduzidos, embora mantenha sempre um nível bastante elevado de procura.

A solução adotada para este problema irá ser a implementação de uma rotunda. E, é nesse sentido, que este caso de estudo se baseia, na verificação se a rotunda é a solução mais eficaz para a interseção em questão, a partir de uma análise comparativa dos dois tipos de interseções, relativamente ao fluxo de tráfego associadas a ambas.

4.4. Recolha de Dados

Para a realização do presente estudo foi necessário proceder à recolha de dados de tráfego. Esta recolha de dados foi conseguida por intermédio de um contador (figura 15), que foi colocado nas quatro entradas do cruzamento. O sistema deste contador mede o número, o comprimento e a velocidade dos veículos, estes dados de tráfego são armazenados na memória interna do radar para posterior transferência através de cabo, Bluetooth ou modem GSM.

Figura 15: Contador de tráfego²

De acordo com Valdes (1988), para o correto funcionamento de uma estrada deve ser avaliada a capacidade para intensidades em horas de ponta, e não para intensidades médias de tráfego. Portanto, o valor utilizado neste estudo é referente ao pico máximo de quinze minutos, pelo que para a sua melhor identificação é importante dispor de um intervalo de contagem que necessariamente o abranja. Dito isto, a contagem foi efetuada durante três dias da semana (de terça-feira dia 28 de Julho a quinta-feira dia 30 de Julho de 2015) como mostra o gráfico da figura 16. Esta apenas foi efetuada das 9h às 20h de cada dia, uma vez que se recorreu a contadores fornecidos por uma empresa, ficando sujeitos à disponibilidade da mesma.

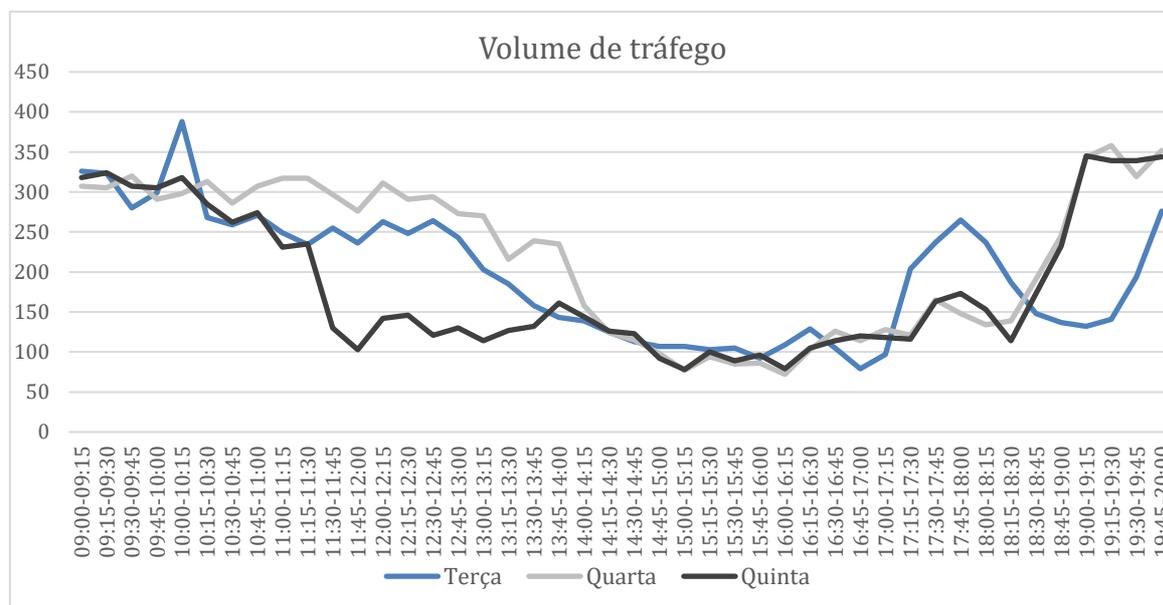


Figura 16: Volume de tráfego, ao longo dos três dias de análise das 9h às 20h

² Soltráfego (2011). *Viacount*. Acesso em 28 de Setembro de 2016, disponível em Soltráfego – Soluções de Trânsito, Estacionamento e Comunicações, S.A.: <http://www.soltrafego.pt/node/53>

A partir do volume de tráfego dos três dias, fez-se uma média de forma a obter melhores resultados, tal como se observa no gráfico da figura 17. Da média de veículos dos três dias determinou-se o pico para a parte da manhã e para a parte da tarde.

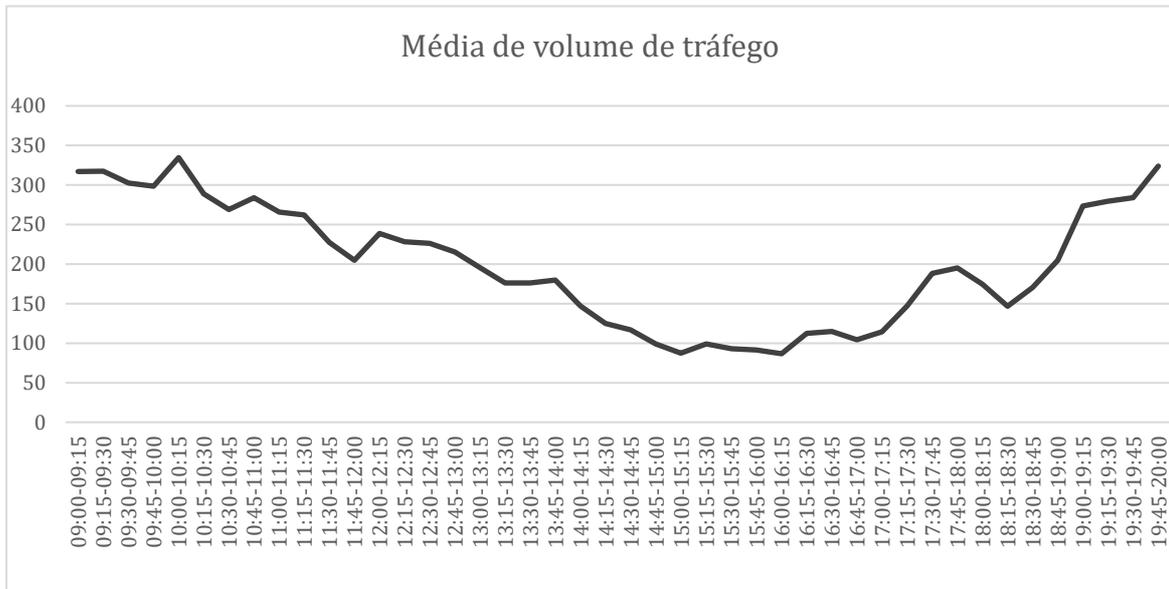


Figura 17: Média de volume de tráfego dos três dias analisados

A hora de ponta verificada para de manhã foi entre as 10h e as 11h, e para de tarde foi entre as 19h e as 20h. Especificamente, entre estas horas, o intervalo de quinze minutos onde se verificou maior volume de tráfego, foi da parte da manhã e da tarde entre as 10h e as 10h15 e entre as 19h45 e as 20h, respetivamente. Dada essa informação, foi determinado o pior cenário, a partir do cálculo do défice de cada intervalo de quinze minutos.

No quadro 3 encontram-se as percentagens da distribuição do volume de tráfego total da hora de ponta da manhã para cada um dos pares origem/destino (distribuição direcional do tráfego na interseção), para um volume de 1 369 veíc./h dos quais 1 115 são veículos ligeiros e 254 veículos pesados. Estas representam a percentagem do volume de tráfego total que entra a partir de um determinado ramo e realizam um certo movimento direcional. Estes movimentos direcionais, bem como a matriz, foram obtidos a partir de uma leitura no local durante uma hora e em dois dias da semana.

Quadro 3: Percentagens do tráfego total por par origem/destino Manhã

	A	B	C	D	Total
A	0%	32%	0%	3%	35%
B	26%	0%	0%	2%	28%
C	3%	10%	0%	6%	19%
D	6%	12%	0%	0%	18%
Total	35%	54%	0%	11%	100%

Legenda:

A - N107 sentido Matosinhos-Aeroporto

B - N107 sentido Aeroporto-Matosinhos

C - Centro Freixieiro

D - Rua Oriental

A distribuição do volume de tráfego, em percentagem, da hora de ponta da tarde para um volume de 1 275 veíc./h encontra-se representada no quadro 4. Dos 1 275 veíc./h, 1 105 são veículos ligeiros e 170 veículos pesados .

Quadro 4: Percentagens do tráfego total por par origem/destino Tarde

	A	B	C	D	Total
A	0%	41%	0%	3%	44%
B	24%	0%	0%	2%	26%
C	3%	8%	0%	6%	16%
D	5%	9%	0%	0%	14%
Total	32%	58%	0%	10%	100%

Legenda:

A - N107 sentido Matosinhos-Aeroporto

B - N107 sentido Aeroporto-Matosinhos

C - Centro Freixieiro

D - Rua Oriental

4.5. Metodologia Utilizada

De forma a acrescentar informação às análises obtidas a partir de metodologias tradicionais (descritas no capítulo anterior), outra metodologia a seguir neste estudo passará pela utilização de uma ferramenta de microssimulação, o simulador microscópico de tráfego AIMSUN, para analisar e comparar o impacto da alteração no desempenho e avaliar se a

solução escolhida é a que melhor se ajusta às limitações geométricas e de tráfego locais. Posto isto, foram considerados os dois cenários, o atual e o previsto, que foram posteriormente codificados e simulados.

4.5.1.3. Construção do Modelo

O processo de modelação dos vários cenários teve início com a sua codificação no simulador AIMSUN. Para esse efeito utilizaram-se fotografias aéreas disponíveis na plataforma Google Maps para o cenário existente e os ficheiros em DWG cenário proposto pela Câmara de Matosinhos, este procedimento facilitou a codificação de toda a configuração geométrica das duas interseções.

No processo de construção do modelo AIMSUN para a interseção semaforizada (Figura 18), definiu-se as vias, os nós, centróides e o plano semafórico. De seguida foi introduzida a procura de tráfego registada em forma de matrizes O/D.

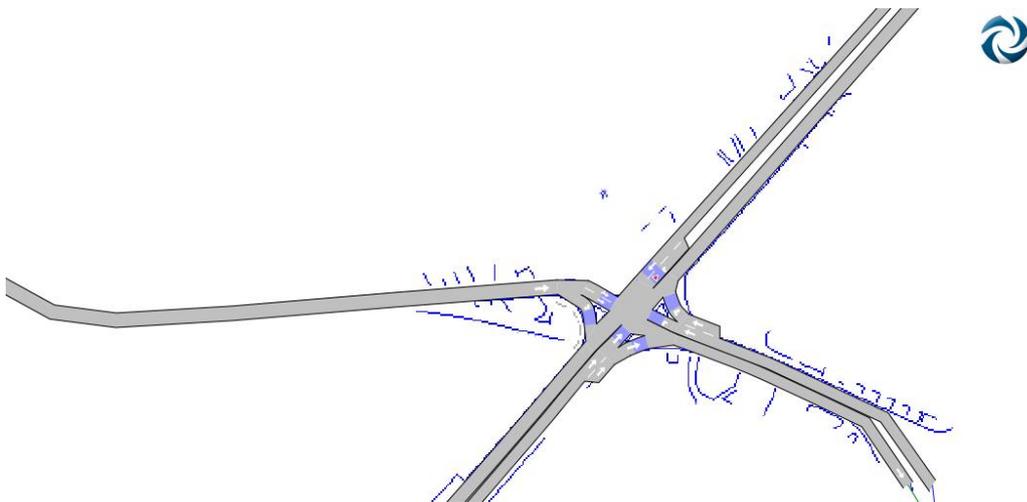


Figura 18: Modelo da interseção semaforizada, realizado no *software*

Para que a simulação da interseção semaforizada se torne mais fidedigna efetuou-se a calibração do modelo, no entanto como a obra já se encontrava em curso no momento da dissertação não foi possível recorrer aos dados reais da interseção em estudo. Face a esta escassez de dados, para se realizar a calibração, adotou-se parâmetros para o veículo ligeiro e para o veículo pesado, obtidas das referências Edholm, Kosonen e Davidsson (1998), Barceló e Prado (2006), Martins (2002), Oliveira (2016), fazendo com que a simulação se aproxime da realidade portuguesa, tal como mostra o quadro 5.

Quadro 5: Valores dos parâmetros para calibração da interseção semaforizada no *software*

Parâmetros	Veículo Ligeiro	Veículo Pesado
Comprimento (m)	4,4	12,0
Largura (m)	1,8	2,0
Aceleração Máxima (m/s ²)	2,340	1,6
Desaceleração Normal (m/s ²)	1,9	1,7
Desaceleração Máxima (m/s ²)	3,2	3,0
“Aceitação da velocidade”	1,3	1,3
Distância Mínima entre veículos (m)	0,940	1,5
Tempo de reação (s)	0,994	-
Tempo de reação em stop (s)	1,659	-

Fonte: adaptado de (Edholm, *et al.*, 1998; Barceló & Prado, 2006; Martins, 2002; Oliveira, 2016).

Para o tempo de reação e o tempo de reação em stop para o veículo pesado, os valores utilizados foram os valores pré-definidos pelo próprio *software*, uma vez que não foram encontradas referências que efetuassem a calibração destes dois parâmetros.

Relativamente, à construção do modelo AIMSUN para a Rotunda (Figura 19) definiu-se as vias, os nós e os centróides. De seguida foi introduzida a procura de tráfego registada em forma de matrizes O/D.

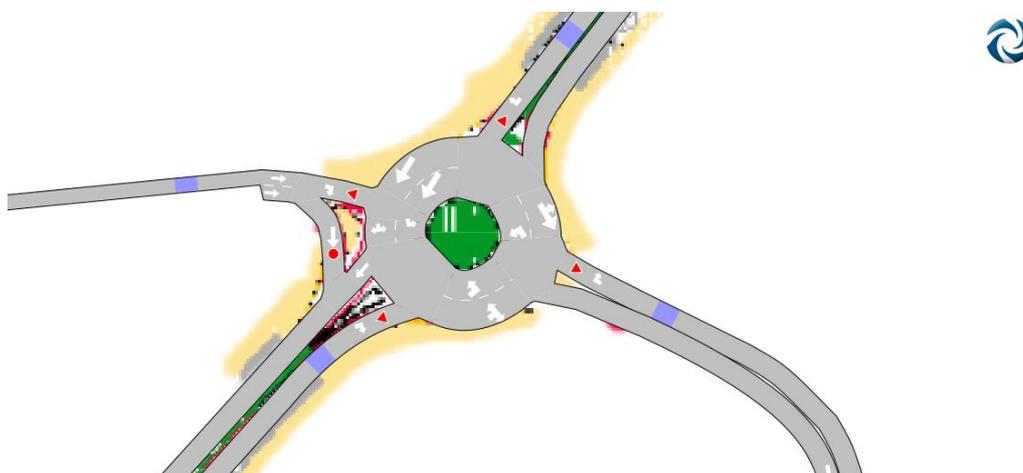


Figura 19: Modelo da rotunda, realizado no *software*

Tal como na interseção semaforizada foi efetuada uma calibração do modelo para que a simulação se torne mais fidedigna. Como a obra não estava concluída, adotou-se parâmetros para o veículo ligeiro e para o veículo pesado, obtidas das referências Edholm,

et al. (1998), Barceló & Prado (2006), Martins (2002), Oliveira (2016), fazendo com que a simulação se aproxime da realidade portuguesa, tal como mostra o quadro 6.

Quadro 6: Valores dos parâmetros para calibração da rotunda no *software*

Parâmetros	Veículo Ligeiro	Veículo Pesado
Comprimento (m)	4,4	12,0
Largura (m)	1,8	2,0
Aceleração Máxima (m/s ²)	2,433	1,6
Desaceleração Normal (m/s ²)	1,9	1,7
Desaceleração Máxima (m/s ²)	3,2	3,0
“Aceitação da velocidade”	0,977	1,3
Distância Mínima entre veículos (m)	0,937	1,5
Intervalo Crítico (s)	2,042	5,0
Tempo de reação (s)	0,581	-
Tempo de reação em stop (s)	0,92	-

Fonte: adaptado de (Edholm, *et al.*, 1998; Barceló & Prado, 2006; Martins, 2002; Oliveira, 2016).

Semelhantemente à calibração para a interseção semaforizada o tempo de reação e o tempo de reação em stop para o veículo pesado, os valores utilizados foram os valores pré-definidos pelo próprio *software*, uma vez que não foram encontradas referências que efetuassem a calibração destes dois parâmetros.

Para que a comparação das duas interseções seja mais fiável, visto que existe alguma discrepância de valores de calibração dos parâmetros entre as interseções, efetuou-se a média desses valores como mostra o quadro 7.

Quadro 7: Valores médio dos parâmetros para calibração de ambas as interseções no *software*

Parâmetros	Veículo Ligeiro	Veículo Pesado
Comprimento (m)	4,4	12,0
Largura (m)	1,8	2,0
Aceleração Máxima (m/s ²)	2,387	1,6
Desaceleração Normal (m/s ²)	1,9	1,7
Desaceleração Máxima (m/s ²)	3,2	3,0
“Aceitação da velocidade”	1,1385	1,3
Distância Mínima entre veículos (m)	0,9385	1,5
Tempo de reação (s)	0,7875	-
Tempo de reação em stop (s)	1,2895	-

Fonte: adaptado de (Edholm, *et al.*, 1998; Barceló & Prado, 2006; Martins, 2002; Oliveira, 2016).

A validação, método para confirmar a calibração efetuada, onde se compara o resultado de variáveis obtidas no modelo com as mesmas variáveis obtidas no sistema real, não foi realizada para nenhum dos cenários simulados. No momento da realização desta dissertação a obra estava em curso, desta forma nem para a interseção semaforizada nem para a rotunda foi possível efetuar a validação, ou seja, verificar se o comportamento dos modelos representavam com uma exatidão admissível os sistemas reais.

4.6. Custo das Soluções

Um dos critérios mais importantes para seleção da tipologia de uma interseção a utilizar é o custo da solução. Este consiste na comparação das diferentes soluções através da realização de uma análise económica entre essas soluções de modo a que a solução escolhida seja a economicamente mais vantajosa.

Esta análise económica segue no próximo capítulo.

5. Análise de Resultados

5.1. Interseção Semaforizada

5.1.1. Análise Segundo Metodologias Convencionais

O primeiro passo no estudo da interseção semaforizada consistiu na análise do seu desempenho à luz de metodologias ditas convencionais (modelos estatísticos e probabilísticos).

A Figura 20 representa mais uma vez a interseção semaforizada, no entanto distingue e caracteriza os movimentos direcionais da mesma.

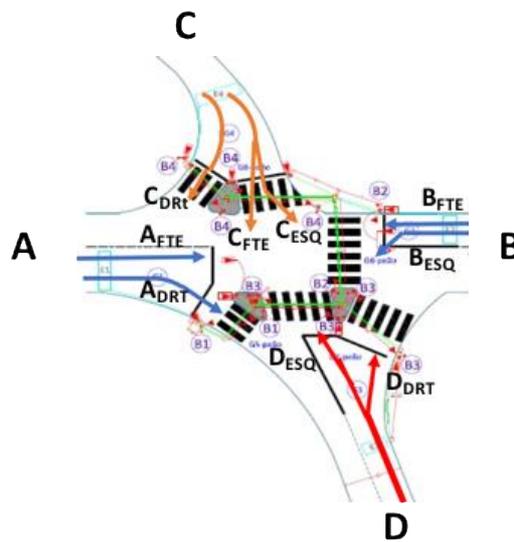


Figura 20: Representação da interseção semaforizada e distinção dos movimentos direcionais

Legenda:

- A, B, C e D: ramos de entrada
- AFTE – Ramo A, movimento direcional frente
- ADTA – Ramo A, movimento direcional direita
- BFTE – Ramo B, movimento direcional frente
- BESQ – Ramo B, movimento direcional esquerda
- CFTE – Ramo C, movimento direcional frente
- CESQ – Ramo C, movimento direcional esquerda
- CDTA – Ramo C, movimento direcional direita
- DDTA – Ramo D, movimento direcional direita
- DESQ – Ramo D, movimento direcional esquerda

5.1.1.1. Capacidade

Para o cálculo da capacidade foi necessário determinar o valor de débito de saturação, estes valores encontram-se no quadro 8.

Quadro 8: Débito de saturação por entrada em Veíc./h

Débito de saturação (Veíc./h)	A		B		C			D	
	A _{FTE}	A _{DTA}	B _{FTE}	B _{ESQ}	C _{FTE}	C _{ESQ}	C _{DTA}	D _{DTA}	D _{ESQ}
Manhã	1395		1428	484	1253			1149	
Tarde	1608		1572	455	1104			1274	

Para o cálculo da capacidade obteve-se os resultados do quadro 9.

Quadro 9: Capacidade por entrada em Veíc./h

Capacidade (Veíc./h)	A		B		C			D	
	A _{FTE}	A _{DTA}	B _{FTE}	B _{ESQ}	C _{FTE}	C _{ESQ}	C _{DTA}	D _{DTA}	D _{ESQ}
Manhã	659		675	229	592			543	
Tarde	759		743	215	522			602	

A partir destes resultados, verificou-se que os ramos A e B têm maior capacidade que os restantes ramos. Isto era expectável, na medida em que o tempo de verde da fase A, fase que engloba os ramos de entrada A e B, é superior às restantes fases, tal como é demonstrado no Anexo B. E, ainda, porque os ramos C e D apresentam movimentos direcionais que envolvem mais manobras.

5.1.1.2. Grau de Saturação

Sabendo o valor da capacidade e do volume de tráfego, determinou-se o grau de saturação para cada ramo, os quais encontram-se representados no gráfico da figura 21.

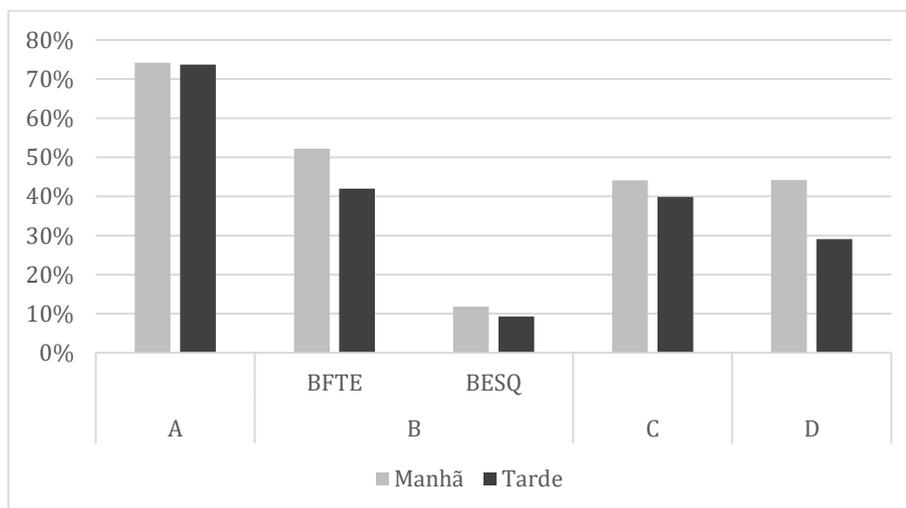


Figura 21: Grau de saturação por ramo

Os ramos A e B são os que apresentam um maior grau de saturação, isto deve-se ao facto de apresentarem um maior volume de tráfego. Apesar destes ramos apresentarem um grau de saturação mais elevado do que as entradas C e D, os resultados são satisfatórios, pois todos os ramos estão abaixo do valor de referência de 85% para o grau de saturação. Isto significa que existe uma procura inferior à capacidade do ramo.

5.1.1.3. Atraso Médio por Ramo

Com base nos valores das capacidades dos ramos, calculou-se o indicador de desempenho referente ao atraso médio por veículo, verificando-se os valores dispostos no quadro 10.

Quadro 10: Atraso por ramo em segundos

Atraso (s)	A		B		C			D	
	A _{FTE}	A _{DTA}	B _{FTE}	B _{ESQ}	C _{FTE}	C _{ESQ}	C _{DTA}	D _{DTA}	D _{ESQ}
Manhã	23	16	21	17	17	16	18	17	18
Tarde	24	16	20	17	17	16	18	17	17

O ramo C é o que apresenta maior atraso, isto pode acontecer devido a ser o ramo com maior possibilidade de movimento direcional por parte dos condutores, ou seja depende do comportamento dos condutores, como também é um dos ramos que apresenta menor capacidade.

5.1.1.4. Filas de Espera

Também foi calculado o indicador de desempenho relativo às filas de espera, uma vez que o sistema do contador mede o número, o comprimento e a velocidade dos veículos e não nos fornece qualquer informação sobre as filas de espera. O quadro 11 apresenta os resultados obtidos.

Quadro 11: Fila de espera por entrada em metros

Fila de espera (m)	A		B		C			D	
	A _{FTE}	A _{DTA}	B _{FTE}	B _{ESQ}	C _{FTE}	C _{ESQ}	C _{DTA}	D _{DTA}	D _{ESQ}
Manhã	165	18	132	10	31	17	49	30	60
Tarde	197	13	117	7	27	12	38	22	43

O desempenho de cada ramo para as filas de espera, indica que as entradas A e B são as que apresentam um maior comprimento de filas de espera, tanto para o pico da manhã como para o da tarde, facto que se deve ao maior volume de tráfego destas entradas.

5.1.2. Análise de Desempenho da Interseção SemafORIZADA Usando a Microssimulação

A análise de desempenho da interseção semafORIZADA através da microssimulação tem como base a construção de um modelo que reflita a realidade.

O modelo AIMSUN apresenta a funcionalidade de exportação dos resultados sob o formato de Microsoft Access, que são posteriormente transferidos para as folhas de cálculo, onde ocorre o tratamento de dados e a respetiva representação gráfica.

5.1.2.1. Capacidade

Dado que o *software* de microssimulação não fornece diretamente o valor da capacidade, para a determinação do mesmo foi utilizado um método que consistiu na introdução de uma elevada quantidade de veículos e de um detetor por ramo de entrada. O número de veículos dessa entrada que conseguiram efetuar o movimento a que estava proposto para os diferentes períodos de ponta diz respeito ao valor da capacidade (figura 22).

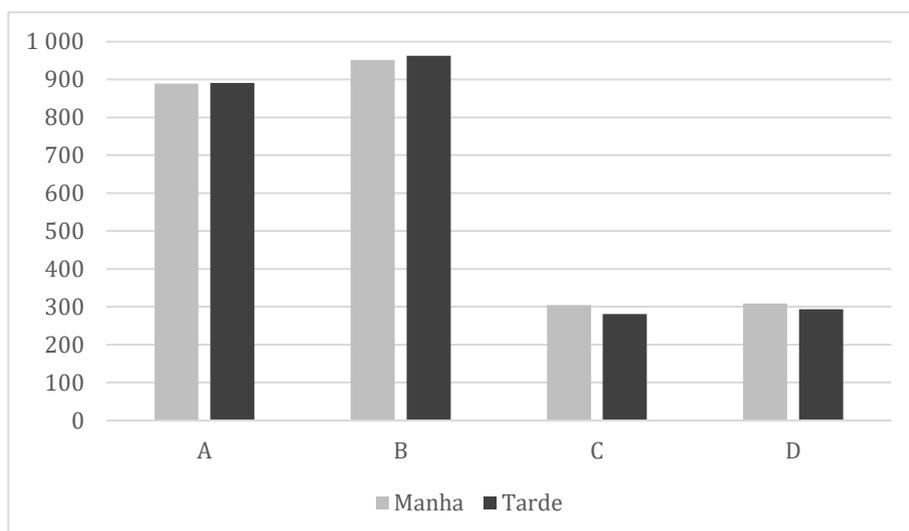


Figura 22: Capacidade por entrada em veíc./h

Verifica-se que os ramos A e B apresentam a maior capacidade, corroborando com o método tradicional. Isto deve-se ao facto de o tempo de verde ser maior e ter menos movimentos direcionais que impliquem manobras.

5.1.2.2. Grau de Saturação

O gráfico da figura 23 apresenta o grau de saturação para cada ramo, calculado a partir dos dados fornecidos pelo *software*.

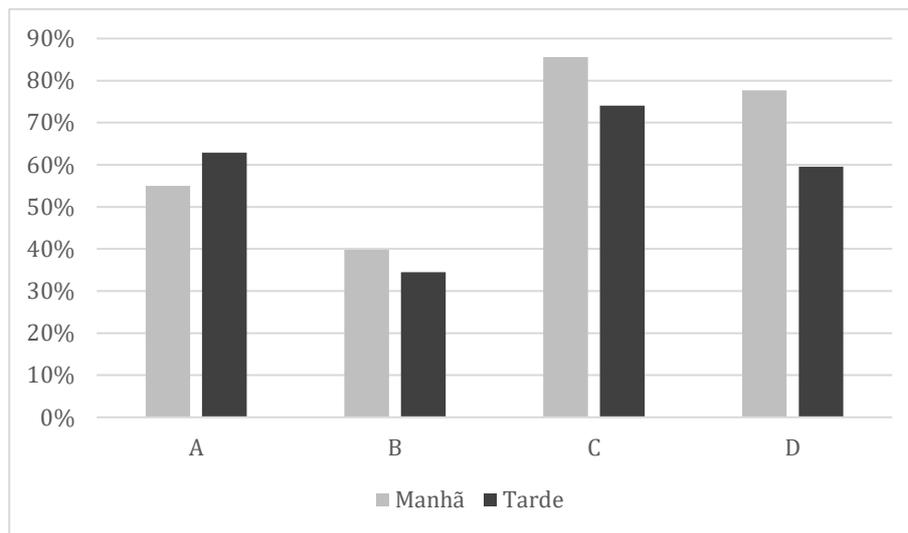


Figura 23: Grau de saturação por entrada

Através deste gráfico consegue-se observar que os ramos C e D são os que apresentam maior grau de saturação, os valores de fluxo de tráfego e de capacidade estão próximos um do outro o que faz com que o grau de saturação seja elevado.

5.1.2.3. Atraso Médio por Ramo

O atraso médio por ramo resultante do *software* de microssimulação encontra-se demonstrado no quadro 12.

Quadro 12: Atraso médio por ramo em segundos

Atraso (s)	A	B	C	D
Manha	20	22	56	50
Tarde	20	19	32	32

Através destes dados, verificou-se que os ramos C e D apresentam maior atraso médio.

5.1.2.4. Fila de Espera

As filas de espera por ramo fornecidas pelo *software* apresentam-se no quadro 13.

Quadro 13: Fila de espera por ramo em metros

Fila de espera (m)	A	B	C	D
Manha	62	49	53	105
Tarde	63	42	34	64

Pelo *software*, os ramos que apresentam maior fila de esperas são o A e o D, quer na parte da manhã quer na parte de tarde.

5.1.3. Comparação dos Resultados Obtidos pelas Duas Metodologias

Após a apresentação dos resultados para cada um dos métodos, apresenta-se, de seguida, a comparação desses resultados para as capacidades por entrada, grau de saturação, atrasos e filas de espera, de acordo com a média dos períodos de ponta.

5.1.3.1. Capacidade

O quadro 14 apresentam os valores obtidos pelos dois métodos estudados.

Quer pelos métodos analíticos quer pelo *software* de microsimulação, os dados obtidos para as capacidades por ramo demonstram que para os ramos A e B possuem uma maior capacidade e com pouca diferença entre os dois métodos. No entanto, nos ramos C e D há uma discrepância significativa de valores entre os métodos, onde os métodos analíticos apresentam uma maior capacidade.

Quadro 14: Comparação da capacidade por ramo em veíc./h

Capacidade (veíc./h)		A	B	C	D
Métodos analíticos	Manhã	659	903	592	543
AIMSUN		889	952	305	309
Métodos analíticos	Tarde	759	957	522	602
AIMSUN		891	963	281	294

A discrepância dos valores pode ser justificada pelo facto de nos métodos analíticos não haver distinção do tipo de veículo, pelo contrário na microsimulação essa distinção já é possível.

Como, também, os métodos analíticos são padronizados, enquanto que o *software* permite a calibração, tendo em conta as condições do sistema real.

5.1.3.2. Grau de Saturação

Os graus de saturação determinados (quadro 15) revelam que nos ramos com maior fluxo (A e B) o modelo de microsimulação apresenta uma saturação mais baixa do que os métodos analíticos, ao contrário das entradas com menor fluxo, em que as entradas C e D apresentam uma maior saturação em relação os modelos tradicionais.

Os resultados obtidos revelam que ao nível da capacidade, com a leitura dos graus de saturação, que apenas o ramo C para a microsimulação se encontra a cima do valor de referência de 85%, mesmo assim pode-se concluir que a interseção semaforizada em estudo apresenta um bom nível de capacidade.

Quadro 15: Comparação do grau de saturação por ramo

Grau de Saturação		A	B	C	D
Métodos analíticos	Manhã	74%	64%	44%	44%
AIMSUN		55%	40%	86%	78%
Métodos analíticos	Tarde	74%	51%	40%	29%
AIMSUN		63%	34%	74%	60%

5.1.3.3. Atraso Médio por Ramo

Os ramos C e D detêm maior atraso médio que os ramos A e B, em ambos o métodos de cálculo. É de referir que os valores dos primeiros são os que apresentam menores diferenças entres os métodos. Tal como, demonstrado no quadro 16.

O ramo C é o que tem maior atraso médio, o que pode ser justificado pelo facto de neste ramo possuir três opções de movimento direcional.

Quadro 16: Comparação do atraso por ramo em segundos

Atraso (s)		A	B	C	D
Métodos analíticos	Manhã	40	38	51	36
AIMSUN		20	22	56	50
Métodos analíticos	Tarde	40	36	51	34
AIMSUN		20	19	32	32

5.1.3.4. Filas de Espera

Relativamente às filas de espera, os ramos A e B apresentam diferenças significativas entre os métodos. Para além disso, a conclusão quanto às filas de espera entre os dois métodos é incoerente (quadro 17). Enquanto para os métodos analíticos o ramo com maior fila de espera é o A, para o *software* é o ramo D.

Quadro 17: Comparação das filas de espera por entrada em metros

Filas de espera (m)		A	B	C	D
Métodos analíticos	Manhã	183	142	98	90
AIMSUN		62	49	53	105
Métodos analíticos	Tarde	209	124	78	65
AIMSUN		63	42	34	64

Tal como referido anteriormente, estas diferenças significativas podem ter a ver com a forma de cálculo de ambos os métodos, onde o método de microsimulação distingue os tipos de veículos, enquanto os métodos analíticos não o fazem.

5.2. Rotunda

O primeiro passo no estudo da rotunda consistiu na análise do seu desempenho através de metodologias ditas convencionais (modelos estatísticos e probabilísticos).

Para tal foram utilizados os métodos TRL, FCTUC e SETRA para o cálculo das capacidades das entradas, sendo que para o cálculo dos indicadores de desempenho, atrasos e filas de espera, recorreu-se ao método TRL e HCM.

De seguida, e para a obtenção dos mesmos indicadores de desempenho, foi criado um modelo de microsimulação da rotunda a partir do *software* AIMSUN.

5.2.1. Análise Segundo Metodologias Convencionais

5.2.1.1. Capacidade

Para o cálculo das capacidades por entrada, foram utilizados os dados obtidos a partir das matrizes origem/destino para o período de ponta de manhã e tarde, determinados inicialmente pelo contador de tráfego.

Os resultados obtidos da capacidade segundo o método TRL estão representados no gráfico da figura 24.

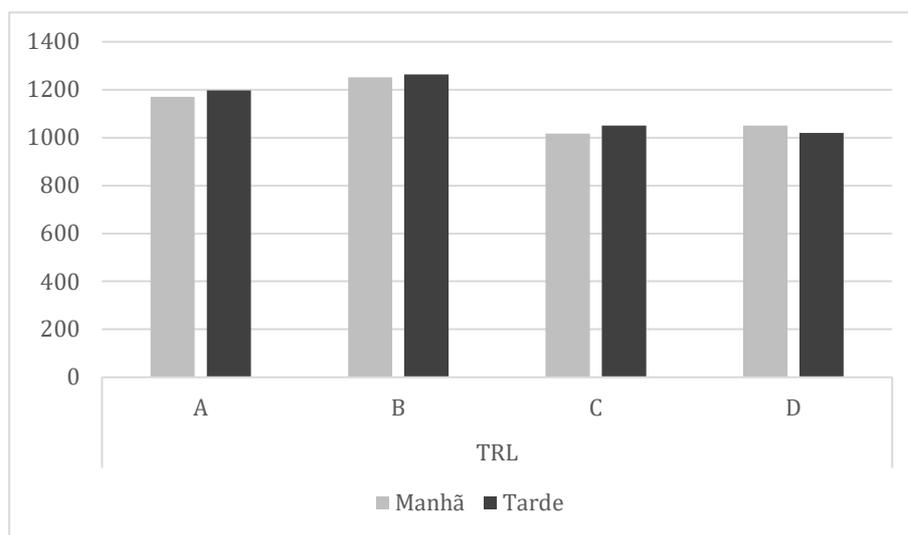


Figura 24: Capacidade por ramo em Veíc./h, calculada pelo método TRL

Da leitura dos resultados, pode-se observar que os ramos A e B apresentam maior capacidade, facto que se deve ao menor volume de tráfego conflituante. Pelo contrário, as restantes entradas (C e D) sofrem com o maior volume de tráfego conflituante, apresentando assim uma menor capacidade.

Relativamente ao modelo SETRA, os resultados obtidos para a capacidade estão demonstrados no gráfico da figura 25.

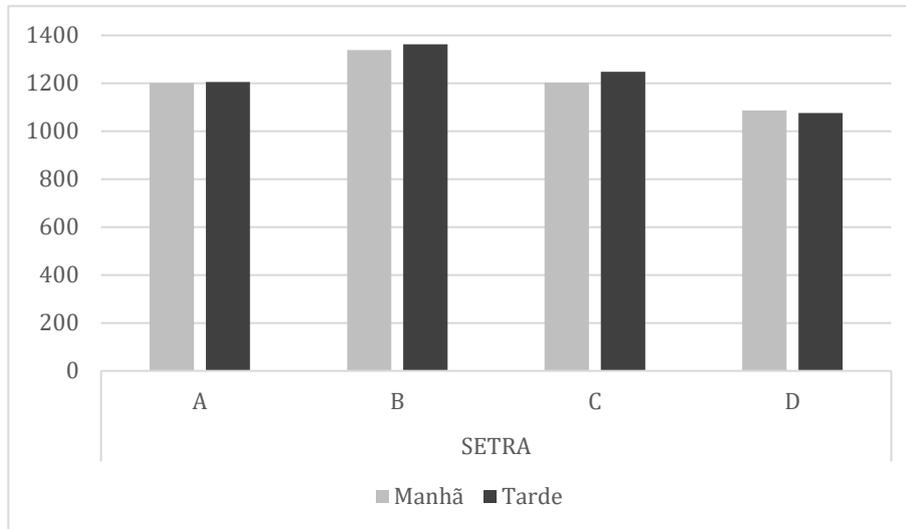


Figura 25: Capacidade por ramo em Veíc./h, calculada pelo método SETRA

Deste modelo constatou-se que são os ramos B e C que apresentam maior capacidade. Por último, da capacidade calculada através do modelo FCTUC (gráfico da figura 26) verificou-se que, tal como no método TRL, os ramos A e B têm maior capacidade. Estes ramos possuem menor tráfego conflituante, enquanto as restantes saídas, C e D, maior volume de tráfego conflituante, justificando a menor capacidade determinada.

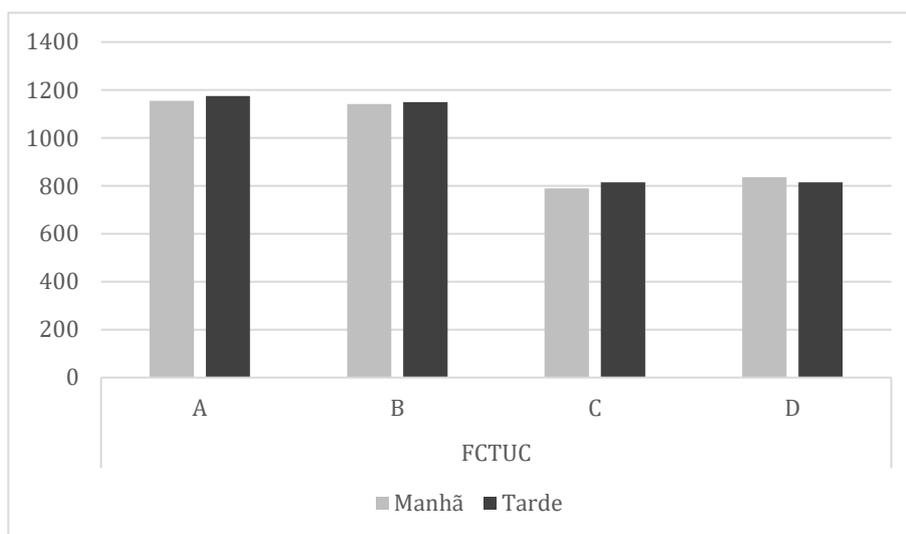


Figura 26: Capacidade por ramo em Veíc./h, calculada pelo método FCTUC

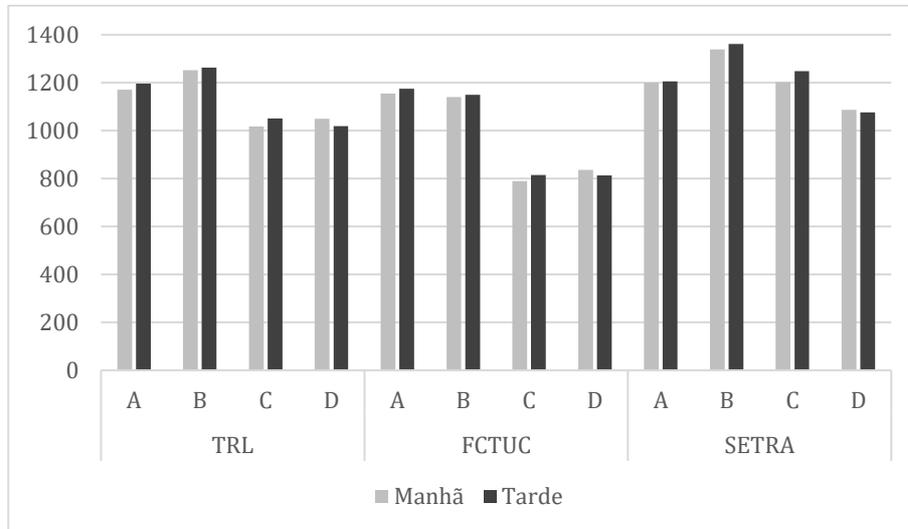


Figura 27: Capacidade por ramo em Veíc./h, calculada pelos três métodos

O método SETRA apresenta em todos os ramos maior capacidade do que os outros métodos e não existem grandes diferenças entre os ramos, tal como no método de FCTUC. Como o FCTUC é um método que apresenta resultados de capacidade que se identificam melhor com as condições reais de tráfego de Portugal, uma vez que foi desenvolvido para essa mesma realidade. Podemos referir que os ramos A e B apresentam maior capacidade do que os ramos C e D.

5.2.1.2. Grau de Saturação

O gráfico da figura 28 representa o grau de saturação de cada entrada e para cada método utilizado.

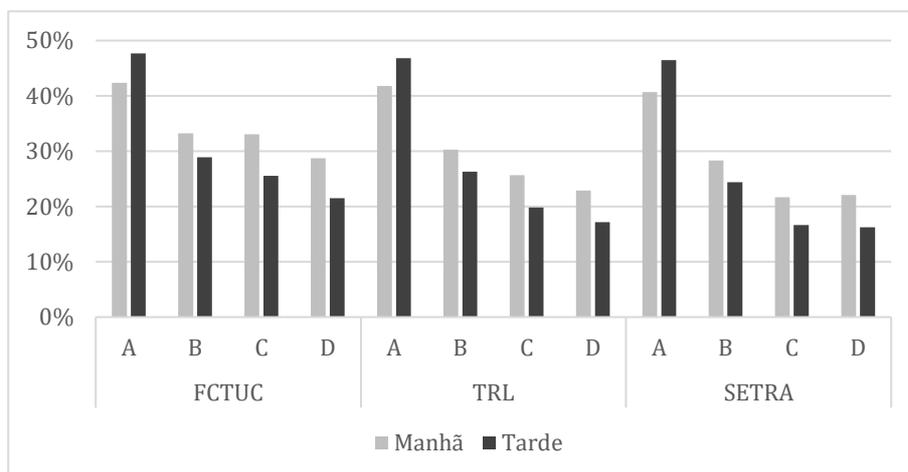


Figura 28: Grau de saturação por ramo e por método

O gráfico demonstra que o maior grau de saturação está presente nos ramos A e B, isto deve-se ao facto de terem um maior volume de tráfego associado. Mesmo que os valores sejam superiores para os ramos A e B, os resultados são satisfatórios, pois todas os ramos estão abaixo do valor de referência de 85% para o grau de saturação.

5.2.1.3. Atraso Médio por Ramo

Com base nos valores das capacidades dos ramos, calculou-se o indicador de desempenho referente ao atraso médio por veículo.

Os resultados para os atrasos médios por veículo, segundo os métodos tradicionais, para cada entrada e para ambas as horas de ponta foram obtidos pelo método do HCM2000 e pelo modelo de TRL, como se vê no quadro 18.

Quadro 18: Atraso médio por ramo e por método, em segundos

Atraso (s)		A		B		C		D	
		Manhã	Tarde	Manhã	Tarde	Manhã	Tarde	Manhã	Tarde
HCM	FCTUC	10	11	10	9	12	11	11	11
	TRL	10	11	9	9	10	9	9	9
	SETRA	10	11	9	8	9	8	9	9
TRL		6	7	5	5	6	6	5	5

5.2.1.4. Filas de Espera

Tal como para o atraso médio, os valores para as filas de espera, segundo os métodos tradicionais, para cada ramo e para ambas as horas de ponta foram obtidos pelo método do HCM2000 e pelo modelo de TRL, como se vê no quadro 19.

Quadro 19: Fila de espera por ramo e por método, em metros

Filas de espera (m)		A		B		C		D	
		Manhã	Tarde	Manhã	Tarde	Manhã	Tarde	Manhã	Tarde
HCM	FCTUC	10	12	7	6	6	4	5	4
	TRL	10	12	7	6	5	4	4	3
	SETRA	10	10	6	5	4	3	4	3
TRL		12	13	10	9	9	9	9	8

O valores de filas de espera calculados pelo HCM, para os vários modelos, não apresentam variações significativas entre os diferentes modelos. Pelo contrário, quando comparando o método de cálculo do HCM e do próprio modelo TRL os valores apresentam algumas diferenças, principalmente nos ramos B, C e D.

A partir do cálculo das filas de espera pelo próprio modelo TRL as diferenças entres os ramos não são significativas.

No entanto, em todos os métodos podemos constatar que o comprimento de fila de espera é maior no ramo A.

5.2.2. Análise de Desempenho da Rotunda Usando a Microssimulação

A análise de desempenho da rotunda através da microssimulação tem como base a construção de um modelo que reflita a realidade.

5.2.2.1. Capacidade

Para a obtenção da capacidade, dado que o programa de microssimulação não a fornece diretamente, foi utilizado um método que consistiu na introdução de uma grande quantidade de veículos por ramo de entrada alternadamente, mantendo o tráfego conflituante a que esse ramo estava sujeito. A capacidade resultou no número de veículos dessa entrada, que conseguiu efetuar o movimento a que estava proposto para os diferentes períodos de ponta, como demonstrado nos gráficos da figura 29.

No gráfico, os ramos A e B são as que apresentam maior capacidade. Isto deve-se ao facto de ter um número reduzido de tráfego conflituante.

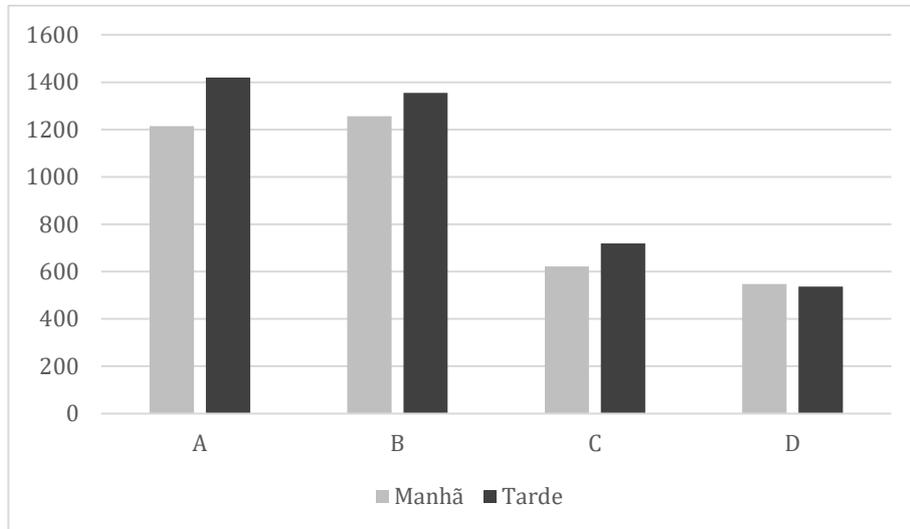


Figura 29: Capacidade por ramo em veíc./h

5.2.2.2. Grau de Saturação

O gráfico da figura 30 apresenta o grau de saturação para cada ramo, calculado a partir dos dados fornecidos pelo *software*.

É possível constatar que o ramo D destaca-se como o que possui maior grau de saturação, os valores de fluxo de tráfego e de capacidade estão próximos um do outro o que faz com que o grau de saturação seja elevado.

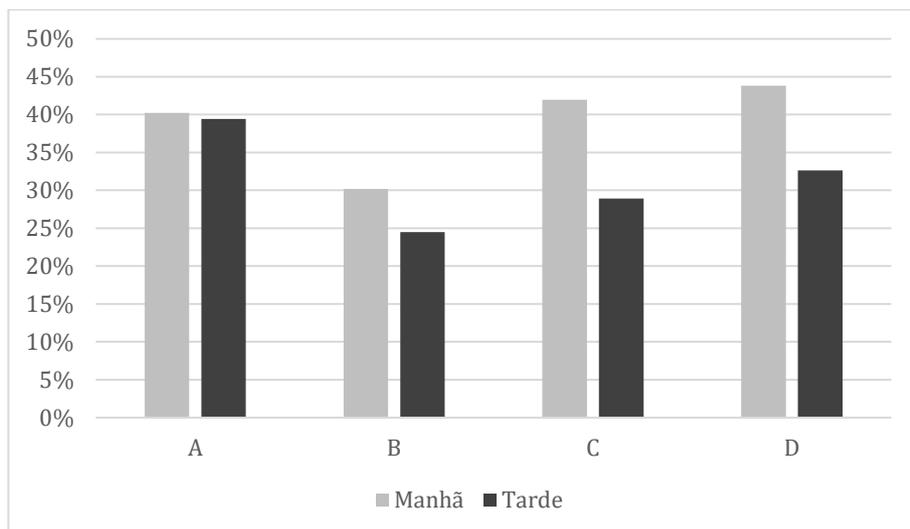


Figura 30: Grau de saturação por ramo

5.2.2.3. Atrasos Médio por Ramo

O atraso médio por ramo resultante do *software* de microsimulação encontra-se demonstrado no quadro 20.

Através destes dados, verificou-se que o ramo D apresenta maior atraso médio.

Quadro 20: Atraso médio por ramo em segundos

Atraso (s)	A	B	C	D
Manha	6	2	3	15
Tarde	5	2	2	11

5.2.2.4. Filas de Espera

O comprimento das filas de espera por ramo fornecidas pelo *software* são demonstradas no quadro 21.

Dos ramos em análise, os que possuem maior comprimento das filas de espera são o A e D, quer na parte da manhã quer na parte de tarde.

Quadro 21: Fila de espera por ramo em metros

Fila de espera (m)	A	B	C	D
Manha	57	17	18	54
Tarde	43	18	11	34

5.2.3. Comparação dos Resultados Obtidos pelas Duas Metodologias

Após a apresentação dos resultados para cada um dos métodos, apresenta-se, de seguida, a comparação desses resultados para as capacidades por entrada, grau de saturação, atrasos e filas de espera, de acordo com a média dos períodos de ponta.

5.2.3.1. Capacidade

A partir dos dados obtidos para a capacidade, revelam que os ramos A e B tem valores próximos para todos os métodos utilizados, enquanto para os ramos C e D apenas o modelo FCTUC é o que mais se aproxima da microsimulação. Isto pode ser corroborado com o quadro 22.

Para todos os métodos, os ramos A e B apresentam maior capacidade, tal é devido ao número reduzido de tráfego conflituante nesses dois ramos de entrada.

Quadro 22: Comparação da capacidade por ramo em veíc./h

Capacidade (Veíc./h)		A	B	C	D
Manhã	FCTUC	1155	1141	790	836
	TRL	1171	1252	1017	1050
	SETRA	1201	1339	1203	1087
	AIMSUN	1215	1256	622	548
Tarde	FCTUC	1175	1149	815	814
	TRL	1196	1264	1051	1020
	SETRA	1206	1362	1248	1076
	AIMSUN	1420	1355	719	536

O FCTUC e o AIMSUN são os que apresentam maiores semelhanças relativamente aos valores de capacidade, uma vez que o primeiro foi desenvolvido para a realidade Portuguesa e o segundo faz a distinção da tipologia de veículos e é calibrado, aproximando-se mais da realidade do caso de estudo. Pelo contrário, os outros métodos analíticos são padronizados e não diferenciam os tipos de veículos.

5.2.3.2. Grau de Saturação

De acordo com o já referido anteriormente, quer para os métodos tradicionais quer para o de microsimulação, os ramos A e B têm um maior grau de saturação. E é nestes ramos que os métodos mais se aproximam, isto é, possuem menos discrepâncias (quadro 23).

Quadro 23: Comparação do grau de saturação por ramo

Grau de saturação		A	B	C	D
Manhã	FCTUC	42%	33%	33%	29%
	TRL	42%	30%	26%	23%
	SETRA	41%	28%	22%	22%
	AIMSUN	40%	30%	42%	44%
Tarde	FCTUC	48%	29%	26%	21%
	TRL	47%	26%	20%	17%
	SETRA	46%	24%	17%	16%
	AIMSUN	39%	25%	29%	33%

5.2.3.3. Atraso Médio por Ramo

Ao utilizar o HCM para o cálculo do atraso médio dos três métodos convencionais em estudo, verifica-se bastantes semelhanças. No entanto, quando comparado com o método do TRL e AIMSUN este cenário modifica-se. O TRL e AIMSUN obtiveram resultados mais próximos, com exceção do ramo D.

Desta forma, não se consegue por unanimidade indicar qual o ramo com maior atraso médio. O quadro 24 representa um quadro resumo dos cálculos determinados para o atraso médio para cada ramo e método.

Quadro 24: Comparação dos atrasos por ramo em segundos

Atraso médio (s)		A	B	C	D	
Manhã	HCM	FCTUC	10	10	12	11
		TRL	10	9	10	9
		SETRA	10	9	9	9
	TRL		6	5	6	5
	AIMSUN		6	2	3	15
Tarde	HCM	FCTUC	11	9	11	11
		TRL	11	9	9	9
		SETRA	11	8	8	9
	TRL		7	5	6	5
	AIMSUN		5	2	2	11

5.2.3.4. Filas de Espera

Relativamente à determinação do comprimento das filas de espera (quadro 25), da mesma forma como para o atraso médio, o modelo HCM para os vários métodos é semelhante, destacando-se o ramo A com maior comprimento.

Para o método do TRL e AIMSUN, é o ramo B que apresenta maior comprimento de fila de espera, apesar de serem valores muito diferentes.

Este dados podem ser justificados pelo facto de ser os ramos A e B possuírem maior volume de tráfego.

Quadro 25: Comparação das filas de espera por ramo em metros

Filas de espera (m)		A	B	C	D	
Manhã	HCM	FCTUC	10	7	6	5
		TRL	10	7	5	4
		SETRA	10	6	4	4
	TRL	6	12	10	9	
	AIMSUN	56	21	18	54	
Tarde	HCM	FCTUC	12	6	4	4
		TRL	12	6	4	3
		SETRA	10	5	3	3
	TRL	7	13	9	9	
	AIMSUN	43	18	10	34	

5.3. Comparação dos Resultados das Duas Interseções

Seguindo o objetivo principal desta dissertação, a comparação do desempenho de duas interseções em estudo, a interseção semaforizada e rotunda, a partir do modelo de microsimulação e tendo em conta os indicadores de desempenho, capacidade, grau de saturação, atraso médio, filas de espera, tempo de viagem e número de paragens por veículo, seguem-se os resultados obtidos.

5.3.1. Capacidade

Como se pode verificar, a partir do quadro 26, a rotunda apresenta maior capacidade que a interseção semaforizada.

Tal como Macedo (2005, 2009) mencionou, neste caso também, as rotundas sustentam um nível maior de capacidade e melhoram as condições de fluidez.

O facto de o nível de capacidade da interseção semaforizada ser mais baixo pode ser justificado, por neste caso estarmos perante uma interseção com fases que implicam movimentos de mudança de direção à esquerda, corroborando com o citado em Macedo (2005).

Quadro 26: Comparação da capacidade entre as duas interseções, em veíc./h

Capacidade	IS	R	IS	R	IS	R	IS	R
	A		B		C		D	
Manhã	889	1201	952	1256	305	622	309	548
tarde	891	1420	963	1355	281	719	294	536

Legenda:

IS – Interseção SemafORIZADA

R - Rotunda

5.3.2. Grau de Saturação

Relativamente ao grau de saturação, a interseção apresenta uma maior percentagem em todos os ramos de entrada (quadro 27), isto deve-se ao facto de apresentar menor capacidade que a rotunda.

Quadro 27: Comparação do grau de saturação entre as duas interseções

Grau de Saturação	IS	R	IS	R	IS	R	IS	R
	A		B		C		D	
Manhã	55%	40%	40%	30%	86%	42%	78%	44%
Tarde	63%	39%	34%	25%	74%	29%	60%	33%

Legenda:

IS – Interseção SemafORIZADA

R – Rotunda

5.3.3. Atraso Médio por Ramo

A interseção semafORIZADA, segundo os resultados obtidos para o atraso médio, possui maior atraso que a rotunda (quadro 28).

Tal como referido em Macedo (2005), este resultado pode ser justificado pela interseção semafORIZADA em estudo ser constituída por fases e por ser regulada a tempos fixo, levando ao aumento de atrasos médios. E as rotundas, como suportam um nível maior de capacidade e melhoram as condições de fluidez, apresentam uma diminuição de tempos de espera relativamente à outra interseção.

Quadro 28: Comparação do atraso médio entre as duas interseções, em segundos

Atraso médio (s)	IS	R	IS	R	IS	R	IS	R
	A		B		C		D	
Manhã	20	6	22	2	56	3	50	15
Tarde	20	5	19	2	32	2	32	11

Legenda:

IS – Interseção Semaforizada

R – Rotunda

5.3.4. Filas de espera

No geral para os vários ramos de entrada, pode-se constatar que a interseção semaforizada tem maiores filas de espera (quadro 29), corroborando com os resultados anteriores.

Quadro 29: Comparação da fila de espera entre as duas interseções, em metros

Fila de espera (m)	IS	R	IS	R	IS	R	IS	R
	A		B		C		D	
Manhã	62	56	49	21	53	18	105	54
Tarde	63	43	42	18	34	10	64	34

Legenda:

IS – Interseção Semaforizada

R – Rotunda

5.3.5. Tempo de Viagem

O cálculo do tempo de viagem a partir do *software* determinou que, para os vários movimentos direcionais, o tempo de viagem é superior para a interseção semaforizada (quadro 30). Uma vez que para a rotunda não existem tempos de espera, associados à condicionante dos sinais luminosos.

Quadro 30: Comparação do tempo de viagem entre as duas interseções, em segundos

Tempo de Viagem (s)	Manhã		Tarde	
	IS	R	IS	R
A → B	85	66	85	64
A → D	64	43	62	41
B → A	80	59	75	58
B → D	63	46	62	44
C → A	129	53	102	51
C → B	126	60	102	58
C → D	106	40	86	38
D → A	113	68	90	61
D → B	113	61	91	53

Legenda:

IS – Interseção Semaforzada

R – Rotunda

5.3.6. Tempo de paragem por veículo

O cálculo do tempo de paragem a partir do *software* determinou que, para os vários ramos de entrada, o tempo de paragem é superior para a interseção semaforzada (quadro 31).

Quadro 31: Comparação do tempo de paragem entre as duas interseções, em segundos

Tempo de paragem (s)	IS	R	IS	R	IS	R	IS	R
	A		B		C		D	
Manhã	15	3	18	0	52	1	46	14
Tarde	17	2	16	0	29	1	29+	10

Legenda:

IS – Interseção Semaforzada

R – Rotunda

Mais uma vez, sendo a interseção semaforzada regulada por sinais luminosos, o comportamento dos condutores depende dos mesmos, fazendo com que o tempo de paragem seja superior ao da rotunda.

5.3.7. Custo das Interseções

Relativamente aos custos de implementação de cada interseção, o custo da rotunda é cerca de 187 mil euros (quadro 32), enquanto o da interseção semaforizada corresponde a cerca de 44 mil euros (quadro 33). A rotunda apresenta maior custo devido às dimensões necessárias para a construção e exigências de todo o processo, tal como expropriações, demolições e reconstruções de muros.

A estes custos devem ser acrescentados os custos de manutenção, que para a interseção semaforizada são cerca de 350 euros por ano (200 euros para a energia e 150 euros para a manutenção dos equipamentos), a rotunda não apresenta custos de manutenção.

Quadro 32: Orçamento da rotunda, em euros

Av. Mário Brito - Perafita - Execução da rotunda norte		
Código artigo	Descrição	Total
1	Trabalhos preparatórios	328,00 €
2	Pavimentação e passeios	40 683,49 €
3	Muros de suporte em betão e em blocos	138 696,40 €
4	Sinalização de trânsito	3 989,93 €
5	Paisagismo - Revestimento vegetal	3 200,00 €
Total		186 897,82 €

Neste caso, a rotunda apresenta um valor acima da média, isto deve-se à necessidade de trabalhos acrescidos, como por exemplo construção de muros de suporte consequentes das expropriações. A construção de muros foi necessário no sentido em que a interseção se encontra rodeada por habitações ao nível inferior do nível da estrada, situação que não é corrente na maior parte das rotundas das estradas nacionais.

Quadro 33: Orçamento da interseção semaforizada, em euros

Av. Mário Brito - Perafita - Sistema Luminoso		
Código artigo	Descrição	Total
1	Trabalhos preparatórios	228,00 €
2	Pavimentação e passeios	20 015,59 €
3	Sinalização de trânsito	263,40 €
4	Travessias	7 164,00 €
5	Sistema luminoso	15 905,00 €
Total		43 575,99 €

Admitindo que o preço de manutenção de pavimentação (betuminoso e pinturas), ao longo de 20 anos seja igual para ambas as situações, para a interseção semaforizada o custo de energia e manutenção dos equipamentos seria de 7 mil euros, enquanto a rotunda não apresentaria nenhum custo acrescido.

6. Considerações finais

6.1. Conclusões

A presente dissertação tem por base um caso de estudo, decorrente de uma proposta de intervenção pela Câmara Municipal de Matosinhos, que pretende alterar a intersecção semaforizada entre a Rua Mário Brito e a Rua Oriental por uma rotunda. Como o projeto já foi avaliado em termos da dimensão ideal da rotunda para o local, o principal objetivo foi comparar as duas tipologias para a intersecção em estudo, na qual é recorrente problemas de congestionamento.

As intersecções são de grande importância em sistemas de tráfego, devido ao seu efeito na fluidez de movimento e na segurança do fluxo de tráfego.

A seleção e/ou avaliação de um determinado tipo de intersecção deve ser justificada por análises onde são tidos em conta aspetos económicos, ambientais, operacionais e de segurança. Para isso, é necessária a identificação das possíveis soluções compatíveis com os objetivos previamente estabelecidos.

Neste caso, para avaliar o desempenho operacional de ambos os tipos de intersecção foi escolhido o critério volume de tráfego. Deste modo, foram utilizadas metodologias convencionais e de microsimulação, para comparar as intersecções relativamente à capacidade, bem como de indicadores complementares como a grau de saturação, comprimento das filas de espera e atrasos.

Na análise efetuada através da microsimulação, foram construídos e testados vários cenários, utilizando um simulador microscópico de tráfego, o simulador AIMSUN.

Os resultados obtidos foram comparados entre si, tendo ficado patente as vantagens do recurso à microsimulação, apesar de ser uma ferramenta cuja utilização é mais onerosa, uma vez que permitiu a obtenção de indicações mais detalhadas sobre aquilo que é necessário fazer para melhorar a resposta da intersecção em análise para os níveis de tráfego considerados.

No geral, os resultados obtidos para os indicadores de desempenho analisados apresentam valores satisfatórios para a rotunda face à intersecção semaforizada. A rotunda prevista apresentam maior capacidade, menor atraso médio, menor comprimento de filas de espera, menor grau de saturação, menor tempo de viagem e menor tempo de paragem por veículo. Pelo contrário, o custo da intersecção semaforizada é mais baixo que a rotunda.

Concluindo que, apesar do custo ser mais elevado para a rotunda, os benefícios operacionais são superiores em comparação com a interseção semaforizada, corroborando com a decisão do projeto em análise, alterar a interseção semaforizada existente pela rotunda.

A principal dificuldade sentida foi a falta de informação necessária para a calibração e validação dos modelos, para dados como as velocidades de circulação dos veículos na situação em estudo, os atrasos e comprimentos reais de filas de espera.

6.2. Perspetivas Futuras

Futuramente, o que poderia acrescentar valor a este estudo, seria o desenvolvimento do cenário real, enquanto rotunda, para que a calibração do modelo de microssimulação construído reproduzisse da forma mais fiel e próxima da realidade os diferentes comportamentos dos condutores no cenário real (mudança de via, acelerações, travagens, agressividade, etc.), a interação entre veículos e peões.

Também, podia ser efetuado um estudo prévio à introdução da rotunda poderia passar pela avaliação da interseção com sinais luminosos regulados por tempos atuados, para perceber se a solução deste local passaria pela introdução deste tipo de interseção e não partir logo para uma solução mais dispendiosa, como a rotunda.

E, ainda, propor à autarquia a avaliação de projetos semelhantes, recorrendo à utilização das ferramentas utilizadas neste estudo. De forma a perceber, com mais casos de estudo, qual a influência da alteração de uma interseção semaforizada por uma rotunda, para que se opte pela solução custo/benefício mais viável.

Este local em estudo, nos próximos anos, terá condições para evoluir no sentido de se tornar numa zona mais comercial, industrial, serviços e habitacional, o que poderá, com a alteração do volume de tráfego e o tipo de veículos, levar à necessidade de selecionar e avaliar outros tipos de soluções, que solucionem os problemas resultantes dessa nova realidade.

Referências Bibliográficas

- Anjana, S., & Anjaneyulu, M. V. (2015). Safety analysis of urban signalized intersections under mixed traffic. *Journal of Safety Research*, 52, 9-14.
- Barceló, J. (2001). Microscopic Traffic Simulation: A tool for the Analysis and Assessment of ITS Systems. Highway Capacity Committee. *Half Year Meeting*. Lake Tahoe.
- Barceló, J., & Prado, S. (2006). *Methodological note on the calibration and validation of Microscopic Traffic Simulation Models*. AIMSUN Training Course.
- Barceló, J., Perarnau, J., & Torday, A. (2007). Automated Calibration Assistance Tools For Microscopic Traffic Simulators. *11th World Conference on Transport Research*, (p. 19). Berkeley, CA.
- Bastos Silva, A. M. (1997). *Aplicação e Concepção de Intersecções Giratórias nas Redes Viárias Urbana e Rural Portuguesas*. Tese de dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana. Coimbra: FCTUC - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Bastos Silva, A. M., & Seco, Á. (2008). *Manual do planeamento de acessibilidades e transportes - Rotundas* (Vol. 6). Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte.
- Bastos Silva, A., & Seco, A. (2004a). *Dimensionamento de Rotundas*. Coimbra: Textos Didáticos.
- Bastos Silva, A., & Seco, A. J. (2004b). *Análise Comparativa dos Manuais de Apoio à Concepção Geométrica de Rotundas*. Lisboa: Actas do III Congresso Rodoviário Português - Estrada 2004, Centro Rodoviário Português.
- Brabander, B. D., & Vereeck, L. (2007). Safety effects of roundabouts in Flanders: Signal type, speed limits and vulnerable road users. *Accident Analysis and Prevention*, 39, 591-599.
- Brambila, L. M. (2008). *Simulação Microscópica Distribuída de Tráfego*. Tese de Dissertação de Mestrado em Engenharia Eléctrica. Vitoria: Universidade Federal do Espírito Santo.
- Chen, T., Jin, S., & Yang, H. (2013). Comparative Study of VISSIM and SIDRA on Signalized Intersection. *Social and Behavioral Sciences*, 96, 2004-2010.
- Costa, A. H. (1987). *Cruzamentos Regulados por Sinais Luminosos*. Tese de Dissertação de Douturamento em Engenharia Civil. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Costa, A., Seco, Á., & Vasconcelos, A. L. (2008). *Manual do planeamento de acessibilidades e transportes - Sinais luminosos* (Vol. 7). Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte.
- Deo, P., & Ruskin, H. J. (2014). Urban signalised intersections: Impact of vehicle heterogeneity and driver type on cross-traffic manoeuvres. *Physica A*, 405, 140-150.
- Edholm, J., Kosonen, I., & Davidsson, F. (1998). *TPMA model 1 calibration draft report*. Stockholm: Royal Institute of Technology.

- Ferreira, G. B., Macedo, J. M., Benta, A. A., & Silva, L. A. (2010). O desempenho de rotundas analisado através da microsimulação - um caso de estudo. *4.º Congresso Luso-Brasileiro para o planeamento urbano, regional, integrado, sustentável*. Faro, Portugal: Pluris 2010.
- FHWA. (2000). *Roundabouts: An Informational Guide*. U.S. Virginia, U.S.A.: Department of Transport, Federal Highway Administration – Publication n° FHWA-RD-00-067.
- Gipps, P. G. (1981). A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 15(2), 105-111.
- Gipps, P. G. (1986a). MULTSIM: a model for simulating vehicular traffic on multi-lane arterial roads. *Math Computation Simulation*, 28, 291-295.
- Gipps, P. G. (1986b). A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 20(5), 403-414.
- HMSO. (1987). *Road Traffic in Urban Areas*. London, U.K.: Institution of Highways and Transportation & Department of Transport.
- Hydén, C., & Várhelyi, A. (2000). The effects on safety, time consumption and environment of large scale use of roundabouts in an urban area: a case study. *Accident Analysis and Prevention*, 32, 11–23.
- Kimber, R. M. (1980). *The traffic capacity of roundabouts*. TRRL Laboratory Report LR 942. Crowthorne, UK: Transport and Road Research Laboratory.
- Kimber, R. M., & Hollis, E. M. (1979). *Traffic Queues and Delays at Road Junctions*. Crowthorne, U.K.: TRRL Report Lr 909, Transport and Road Research Laboratory.
- Kusuma, A., & Koutsopoulos, H. N. (2011). Critical Gap Analysis of Dual Lane Roundabouts. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 16, 709–717.
- Macedo, J. (2005). *Seleção da Tipologia de Cruzamentos em Função da Procura*. Porto: Dissertação de Mestrado em Vias de Comunicação, FEUP.
- Macedo, J. M., & Benta, A. (2013). Seleção da Tipologia de uma Intersecção Utilizando um Simulador Microscópico de Tráfego—Um Caso de Estudo. *Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, Campus Universitário de Santiago, Portugal. Trento, setembro, Itália*.
- Macedo, J., Benta, A., & Santos, L. P. (2011). Potencialidades das ferramentas de simulação microscópica de tráfego. *CLME'2011 – IIICEM – 6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia*, (pp. 881-882). Maputo, Moçambique.
- Machado, A. (2009). *Projecto de instalação de um sistema de sinalização luminosa numa intersecção giratória*. Porto: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, especialização em Vias de Comunicação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Martins, N. (2002). *Planeamento e Traçado de Vias Urbanas*. Porto: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- May, A. (1990). *Traffic Flow Fundamentals*. Englewood Cliffs, N.J., EUA: Prentice-Hall.

- Mc Donald, M., Hounsell, N. B., & Kimber, R. M. (1984). *Geometric Delay at non-signalised Intersections*. Crowthorne, U.K.: TRRL Supplementary Report, Transport and Road Research Laboratory.
- Moniz, C. (2007). *O Congestionamento de Intersecções e o Uso de Vias Individualizadas Dinâmicas*. Lisboa: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- MSHA. (1995). *Roundabout Design Guidelines*. Maryland: State of Maryland Department of Transportation, State Highway Administration.
- MUTCD. (2003). *Manual on Uniform Traffic Control Devices*. . Washington D.C., U.S.A.: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- O’Flaherty, C. (1997). *Transport Planning and Traffic Engineering*. London, U. K.: Elsevier.
- Oliveira, S. F. (2016). *Calibração de modelos de microssimulação de tráfego para análise de interseções urbanas*. Viseu: Dissertação de Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação. Instituto Politécnico de Viseu.
- Rao, L., Owen, L., & Goldsam, D. (1998). *Development and Application of a Validation Framework for Traffic Simulation Models*. Proceedings of the Winter Simulation Conference.
- Seco, A. J., Antunes, A. J., & Costa, A. H. (2001). *Princípios Básicos de Organização de Redes Viárias*. Coimbra, Portugal: Textos didáticos – 1ª Edição, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Seco, Á., & Bastos Silva, A. M. (2010). *Disposições Normativas: Dimensionamento de Rotundas*. INIR, Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias.
- Semmens, M. C. (1985). *ARCADY2: An Enhanced Program to Model Capacities, Queues and Delays at Roundabouts*. TRRL Research Report 35, Transport and Road Research Laboratory.
- Shaaban, K., & Kim, I. (2015). Comparison of SimTraffic and VISSIM Microscopic Traffic Simulation Tools in Modeling Roundabouts. *Procedia Computer Science*, 52, 43-50.
- SMARTTEST. (1997). *SMARTTEST Project Deliverable D3*. European Commission, 4th Framework Programme, Transport RTD Programme, Contract N°: RO-97-SC.1059.
- SMARTTEST. (2000). *SMARTTEST Project Final Report*. University of Leeds.
- Tan, J.-a. (2001). Comparison of capacity between roundabout design and signalised junction design. *STRC, 1st Swiss Transport Research Conference*. Monte Verità / Ascona.
- Tavares, J. P. (2003). *Aplicabilidade e Robustez de Modelos de Afecção de Tráfego em Redes Urbanas*. Tese de Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Transport for London. (2003). *Micro simulation modeling guidance notes for Transport for London*. Transport for London.

- TRB. (2010). *HCM 2010: Highway Capacity Manual* (5 ed.). Washington D. C.: Transportation Research Board - National Research Council.
- TSS. (2010a). *Microsimulator and Mesosimulator Aimsun 6.1 User's Manual*. TSS-Transport Simulation Systems.
- TSS. (2010b). *AIMSUN 6.1 User's Manual*. TSS – Transporting Simulation Systems.
- Valdes, A., Rica, S., & Azcoiti, J. (1988). *Ingenieria de Trafico* (3ª Edição ed.). Madrid: Libreria Editorial Bellisco.
- Vasconcelos, A. L. (2014). *Avaliação do desempenho operacional de rotundas: modelos e aplicações*. Dissertação de doutoramento. Coimbra: FCTUC - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Vilarinho, C. A. (2008). *Calibração de Modelos Microscópicos de Simulação de Tráfego em Redes Urbanas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Porto: FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Xiao, H., Ambadipudi, R., Hourdakis, J., & Michalopoulos, P. (2005). *Methodology for Selecting Microscopic Simulators: Comparative Evaluation of AIMSUN and VISSIM*. Technical Report CTS 05-05, Department of Civil Engineering, Univ. of Minnesota.
- Yap, Y. H., Gibson, H. M., & Waterson, B. J. (2013). An Internacional Review of roundabout Capacity Modelling. *Transport Reviews*, 33(5), 593-616.
- Yimei, Z., & Kefei, Y. (2005). Application of SIDRA to Improving Urban Traffic Intersection[J]. *Computer and Communications*, 2(3), 20-23.
- Yin, D., & Qiu, T. Z. (2012). *Modern Roundabout or Signalized and Stop-Controlled Intersections?* Fredericton, Canada: Conference of the Transportation Association of Canada.

Anexos

Anexo A: Projeto da Rotunda

Estes anexos só estão disponíveis para consulta através do CD-ROM.
Queira por favor dirigir-se ao balcão de atendimento da Biblioteca.

Serviços de Biblioteca, Informação Documental e Museologia
Universidade de Aveiro