



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

Definição de Estratégias de Atravessamentos Pedonais em Rotundas

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação

Autor

Ana Rita Marques Ferreira

Orientadora

Professora Doutora Ana Maria César Bastos Silva

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, fevereiro, 2016

AGRADECIMENTOS

Este espaço é dedicado a todos aqueles que contribuíram para que esta dissertação fosse concretizada. Sendo um trabalho de carácter mais individual, reúne ainda assim contributos de inúmeras pessoas.

Primeiramente, agradeço à orientadora, Professora Doutora Ana Maria César Bastos Silva, Professora do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC), por todo o seu entusiasmo, força de incentivo, perfeccionismo e dedicação demonstrados ao longo deste trabalho. A disponibilidade oferecida, presencialmente ou via e-mail, não tenho forma como agradecer, foi incansável. Muito Obrigada!

Aos meus amigos, Marta, Luís, Carolina e José Miguel pela disponibilidade imediata na ajuda da recolha de dados para a concretização desta dissertação. Ao Pedro Magalhães e à Margarida Santos, que estiveram sempre prontos para escutar e tentar solucionar os meus problemas e por todos os bons momentos que passamos. Ao grupo dos “Presunto” tenho a agradecer todas aquelas longas noites de estudo e também de risos intermináveis. A todos os outros agradeço o vosso contributo que, de alguma forma, me ajudaram na concretização de todo o meu percurso académico.

Ao meu namorado que escutou atentamente todos os meus problemas, mesmo não entendendo nada do assunto nunca esgotou a sua paciência, tolerância e compreensão quando me “queixava” dos obstáculos que me iam surgindo. As suas palavras de incentivo foram fulcrais. Rodrigo, obrigada por todo o carinho, amor e apoio ao longo destes anos, principalmente durante esta fase tão importante para mim.

À minha família, em especial aos meus pais, Carlos Ferreira e Maria Ferreira, muito obrigada. Não sei como agradecer todo o amor, esforço e dedicação para que este sonho se tornasse realidade. Às minhas irmãs, Patrícia e Catarina, agradeço a confiança em mim depositada e a compreensão de todas as minhas ausências. Adoro-vos. À minha Avó Maria, um enorme obrigada e um beijinho do tamanho do mundo. A eles dedico este trabalho!

RESUMO

As rotundas são caracterizadas por assegurarem elevados níveis de desempenho global, revelando-se capazes de responder de forma adequada aos diferentes utilizadores da via pública, designadamente veículos e peões. Os modelos tradicionais de estimação de capacidades apenas têm em consideração o desempenho da solução, na sua resposta ao tráfego motorizado, o que dificulta a sua aplicação a rotundas localizadas em domínio urbano, onde a presença do peão é constante.

Atualmente, os novos desenvolvimentos tecnológicos vieram abrir novas perspetivas de investigação e as plataformas de microsimulação afiguram-se, cada vez mais, como a metodologia mais adequada ao estudo das interações entre diferentes utilizadores.

Nesta ótica, a presente dissertação insere-se na sequência de trabalhos desenvolvidos anteriormente e no âmbito da qual se procura melhorar o conhecimento sobre a influência que a existência de travessias pedonais assume no desempenho da rotunda. Recorrendo a técnicas de microsimulação foram testadas e avaliadas diferentes estratégias de atravessamento pedonal para uma passagem para peões tradicional, comparativamente a uma passagem de peões com sinalização luminosa do tipo *Pelican*. Foram definidos diferentes cenários de estudo tendo por base variações dos níveis de procura de tráfego automóvel e pedonal e a localização da travessia. Os trabalhos foram suportados pela construção de um modelo simulado no *software* AIMSUN, baseado num exemplo real, de modo a suportar os trabalhos de calibração e validação do modelo e desta forma salvaguardar a robustez dos resultados inferidos.

Os resultados obtidos demonstraram que o impacto causado pelo peão, independentemente da localização da travessia, apresenta relevância para níveis de saturação acima dos 80% e para níveis de procura pedonal superiores a 500 peões/h. Apenas para uma passagem para peões com sinalização luminosa onde o atravessamento ocorre em duas fases, o impacto faz-se sentir para níveis de saturação superiores a 100%, independentemente do fluxo pedonal.

Palavras-chave: Rotunda; atravessamentos pedonais; nível de desempenho; atravessamentos semaforizados.

ABSTRACT

Roundabouts are characterized by ensuring high levels of overall performance, which are able to respond appropriately to different road users, such as vehicles and pedestrians. The traditional capacity estimation models only take into account the performance of the solution given the motorized traffic, which make it hard to apply them on roundabouts located in the urban area, where the presence of pedestrians is constant.

Nowadays, technological developments brought new prospects for research and microsimulation platforms appear to be, increasingly, the most appropriate methodology for studying the interactions between different users.

From this perspective, this dissertation is part of the sequence of earlier works that seeks to improve the knowledge about the influence of the pedestrian crossings on the performance of the roundabout. Using microsimulation techniques, the traditional pedestrian crossing was compared to the pedestrian crossing with light signaling (Pelican type), by testing and evaluating them both. The defined scenarios took into consideration the variation, in demand levels, of car traffic and the location of the pedestrian crossing. The work was supported by the construction of a simulation model built with AIMSUN software, based on a real example, since it supports the calibration and model validation, thus safeguarding the robustness of the results.

The results showed that the impact of the pedestrian crossing, regardless of their location, is relevant to saturation levels above 80% for pedestrian demand levels over 500 pedestrians/h. As for a pedestrian crossing with light signaling where the crossing occurs in two stages, the impact was felt to saturation levels above 100%, regardless of the pedestrian flow.

Keywords: Roundabout; crossings pedestrians; performance levels; signalized crossings.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento do tema.....	1
1.2 Metodologia de abordagem.....	2
1.3 Estrutura da dissertação.....	3
2 TIPOLOGIAS DE ATRAVESSAMENTOS PEDONAIIS E MEDIDAS DE APOIO	4
2.1 Enquadramento geral.....	4
2.2 Medidas de apoio ao peão	6
2.2.1 Tipos de atravessamentos e critérios de aplicação	6
2.2.2 Passagens para peões.....	8
2.2.3 Passagens para peões com sinalização luminosa.....	9
2.2.3.1 Solução do tipo Pelican.....	11
2.2.3.2 Solução do tipo Puffin	12
2.2.3.3 Solução do tipo Toucan	14
2.2.3.4 Solução do tipo Pegasus.....	14
2.2.4 Passagens desniveladas.....	15
2.2.5 Outras medidas de apoio ao peão	17
2.3 Considerações Finais.....	19
3 IMPACTO DO PEÃO NO FUNCIONAMENTO DA ROTUNDA	20
3.1 Introdução.....	20
3.2 Efeito dos atravessamentos pedonais na capacidade.....	20
3.3 Segurança	26
3.4 Considerações Finais.....	28
4 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO	30
4.1 Introdução.....	30
4.2 Seleção do caso estudo.....	31
4.3 Construção do modelo de microsimulação.....	32

4.3.1 Definição das matrizes de procura de veículos	32
4.3.1.1 Recolha de dados	32
4.3.1.2 Tratamento dos dados	33
4.3.2 Construção do modelo simulado	35
4.4 Calibração e validação do modelo	36
4.4.1 Calibração	36
4.4.2 Validação	36
4.5 Definição dos cenários a estudar	38
4.5.1 Passagem para peões	38
4.5.2 Passagem para peões com sinalização luminosa	39
4.6 Considerações Finais	40
5 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE ATRAVESSAMENTOS PEDONAIS NA CAPACIDADE DA ROTUNDA.....	41
5.1 Introdução.....	41
5.2 Definição dos indicadores de desempenho	41
5.3 Análise dos resultados.....	42
5.3.1 Passagem para peões	42
5.3.2 Passagem para peões com sinalização luminosa	45
5.3.2.1 Atravessamento numa fase	46
5.3.2.2 Atravessamento em duas fases.....	49
5.3.2.3 Análise de sensibilidade – impacto da velocidade pedonal legal	52
5.4 Considerações Finais.....	54
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	57
6.1 Conclusões	57
6.2 Trabalhos Futuros.....	58
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
ANEXO A	A-1
ANEXO B	B-1
ANEXO C	C-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modelo geral de rotunda (adaptado de Almeida Roque, 2002).....	5
Figura 2.2 – Diferentes tipologias de rotundas (Fonte: InIR, 2009).....	5
Figura 2.3 – Adequação da tipologia de atravessamentos pedonais em zonas urbanas, baseada na expressão PV^2 (Fonte: DfT, 1979).....	7
Figura 2.4 – Exemplos de passagens para peões, em Coimbra	8
Figura 2.5 – Marcas rodoviárias em travessias (adaptado de RST, 1998).....	8
Figura 2.6 – Passagens para peões com regulação luminosa, em Coimbra.....	9
Figura 2.7 – Esquemas de marcação de passagens para peões com regulação luminosa (adaptado de HMSO, 1987).....	10
Figura 2.8 – Passagens do tipo Pelican (Fonte: PDS@2015).....	12
Figura 2.9 – Sequência de luzes para peões e condutores em travessia do tipo Pelican (Fonte: DTT@2015).....	12
Figura 2.10 – Passagem Puffin (Fonte: DTT@2015).....	13
Figura 2.11 – Zona típica de deteção (adaptado de VicRoads, 2004)	13
Figura 2.12 – Sequência de luzes para peões e condutores (Fonte: DTT@2015).....	14
Figura 2.13 – Passagem do tipo Pegasus (Fonte: DfT, 2003).....	15
Figura 2.14 – Passagens superiores para peões (adaptado de ODT, 1995)	16
Figura 2.15 – Passagens inferiores para peões (adaptado de ODT, 1995)	16
Figura 2.16 – Trajeto desejado do peão (adaptado de Telford, 2007)	18
Figura 2.17 – Campo de visão em raios de curvatura pequenos (adaptado de Telford, 2007).18	
Figura 2.18 – Alargamento dos passeios em cruzamentos (Fonte: FHWA, 2000).....	19
Figura 3.1 – Problemas a nível de armazenamento (a), limpeza (b) e armazenamento e limpeza em simultâneo (c) (adaptado de Tollazzi, 1999b))	21
Figura 3.2 – Elevado fluxo no anel circulatório	22
Figura 3.3 – Baixo fluxo no anel circulatório	22
Figura 3.4 – Fator de Redução da capacidade numa entrada com via única (Fonte: Hellinga & Sindi, 2012).....	23
Figura 3.5 – Atrasos em função dos diferentes níveis de procura pedestre e de veículos conflituantes (Fonte: Hellinga & Sindi, 2012).....	24
Figura 4.1 – Rotunda de estudo, Coimbra (Fonte: Google@2015).....	32
Figura 4.2 – Enquadramento da rotunda de estudo, Coimbra.....	32
Figura 4.3 – Recolha de dados na hora de ponta (8h00m às 9h00m)	33

Figura 4.4 – Recolha de dados fora da hora de ponta (15h10m às 16h10m).....	33
Figura 4.5 – Codificação da rotunda modelo e centróides.....	35
Figura 4.6 – Identificação da zona e dos centróides para o fluxo de peões.....	35
Figura 4.7 – Localizações da passagem para peões, no ramo C.....	39
Figura 4.8 – Movimento direcional A do peão.....	40
Figura 4.9 – Movimento direcional B do peão.....	40
Figura 5.1 – Identificação das secções de estudo.....	41
Figura 5.2 – Fluxo médio na entrada C (N=1).....	42
Figura 5.3 – Tempo médio de viagem na entrada C (N=1).....	42
Figura 5.4 – Fluxo médio na entrada C (N=2).....	43
Figura 5.5 – Tempo médio de viagem na entrada C (N=2).....	43
Figura 5.6 – Fluxo médio na entrada C (N=3).....	43
Figura 5.7 – Tempo médio de viagem na entrada C (N=3).....	43
Figura 5.8 – Fluxo médio na saída C (N=1).....	43
Figura 5.9 – Tempo médio de viagem na saída C (N=1).....	43
Figura 5.10 – Fluxo médio na saída C (N=2).....	44
Figura 5.11 – Tempo médio de viagem na saída C (N=2).....	44
Figura 5.12 – Fluxo médio na saída C (N=3).....	44
Figura 5.13 – Tempo médio de viagem na saída C (N=3).....	44
Figura 5.14 – Localizações da passagem semaforizada, no ramo A.....	46
Figura 5.15 – Fluxo médio na entrada A (N=1).....	47
Figura 5.16 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=1).....	47
Figura 5.17 – Fluxo médio na entrada A (N=3).....	47
Figura 5.18 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=3).....	47
Figura 5.19 – Fluxo médio na entrada A (N=5).....	47
Figura 5.20 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=5).....	47
Figura 5.21 – Fluxo médio na entrada A (N=1).....	49
Figura 5.22 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=1).....	49
Figura 5.23 – Fluxo médio na entrada A (N=3).....	49
Figura 5.24 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=3).....	49
Figura 5.25 – Fluxo médio na entrada A (N=5).....	50
Figura 5.26 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=5).....	50
Figura 5.27 – Fluxo médio na entrada A (N=1).....	50
Figura 5.28 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=1).....	50
Figura 5.29 – Fluxo médio na entrada A (N=3).....	51
Figura 5.30 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=3).....	51
Figura 5.31 – Fluxo médio na entrada A (N=5).....	51
Figura 5.32 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=5).....	51

Figura 5.33 – Fluxo médio na entrada A (N=1 ; v=0,4m/s)	53
Figura 5.34 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=1 ; v=0,4m/s).....	53
Figura 5.35 – Fluxo médio na entrada A (N=1 ; v=1m/s)	53
Figura 5.36 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=1 ; v=1m/s).....	53
Figura A.1 – Fluxo médio na saída A (N=1)	A-1
Figura A.2 – Tempo médio de viagem na saída A (N=1).....	A-1
Figura A.3 – Fluxo médio na saída A (N=3)	A-1
Figura A.4 – Tempo médio de viagem na saída A (N=3).....	A-1
Figura A.5 – Fluxo médio na saída A (N=5)	A-1
Figura A.6 – Tempo médio de viagem na saída A (N=5).....	A-1
Figura B.1 – Fluxo médio na saída A (N=1)	B-1
Figura B.2 – Tempo médio de viagem na saída A (N=1)	B-1
Figura B.3 – Fluxo médio na saída A (N=3)	B-1
Figura B.4 – Tempo médio de viagem na saída A (N=3).....	B-1
Figura B.5 – Fluxo médio na saída A (N=5)	B-1
Figura B.6 – Tempo médio de viagem na saída A (N=5)	B-1
Figura B.7 – Fluxo médio na saída A (N=1)	B-2
Figura B.8 – Tempo médio de viagem na saída A (N=1)	B-2
Figura B.9 – Fluxo médio na saída A (N=3)	B-2
Figura B.10 – Tempo médio de viagem na saída A (N=3).....	B-2
Figura B.11 – Fluxo médio na saída A (N=5)	B-2
Figura B.12 – Tempo médio de viagem na saída A (N=5)	B-2
Figura C.1 – Fluxo médio na entrada A (N=3).....	C-1
Figura C.2 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=3)	C-1
Figura C.3 – Fluxo médio na entrada A (N=5).....	C-1
Figura C.4 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=5)	C-1
Figura C.5 – Fluxo médio na saída A (N=1)	C-1
Figura C.6 – Tempo médio de viagem na saída A (N=1)	C-1
Figura C.7 – Fluxo médio na saída A (N=3)	C-2
Figura C.8 – Tempo médio de viagem na saída A (N=3).....	C-2
Figura C.9 – Fluxo médio na saída (N=5)	C-2
Figura C.10 – Tempo médio de viagem na saída A (N=5).....	C-2

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Tempo médio de atraso dos peões para uma e duas vias no anel de circulação (adaptado de Lu, Guan e Noyce, 2011)	26
Quadro 3.2 – Tempo médio de atraso dos veículos para uma e duas vias no anel de circulação (adaptado de Lu, Guan e Noyce, 2011)	26
Quadro 3.3 – Redução do número de acidentes em 181 cruzamentos convertidos em rotundas na Holanda (Fonte: Schoon & Minnen, 1993).....	27
Quadro 4.1 – Volumes de tráfego totais divididos em períodos de 15 minutos	34
Quadro 4.2 – Matriz O/D de veículos equivalentes, no período 8:00 – 8:15	34
Quadro 4.3 – Matriz O/D de veículos equivalentes, no período 8:15 – 8:30	34
Quadro 4.4 – Matriz O/D de veículos equivalentes, no período 8:30 – 8:45	34
Quadro 4.5 – Matriz O/D de veículos equivalentes, no período 8:45 – 9:00	34
Quadro 4.6 – Fluxos observados e modelados (uvl/h e peões/h), de períodos de 5 minutos extrapolados para 1 hora	37

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do tema

Em Portugal, principalmente a partir da década de 80, as rotundas têm-se tornado uma solução frequente por todo o país (Bastos Silva & Seco, 2004). Atualmente, as rotundas apresentam um campo de aplicação extremamente abrangente. O domínio urbano apresenta-se como o campo de aplicação privilegiado, embora as rotundas possam ser igualmente aplicadas em meio interurbano e sobretudo na marcação da transição entre ambientes rodoviários (Bastos Silva et al., 2013). A rotunda para além de ser uma das soluções mais eficazes ao nível da fluidez do tráfego e com elevados níveis de capacidade, garante também uma melhoria quer na segurança do peão quer na do condutor (Schoon & Minnen, 1993), comparativamente às interseções tradicionais.

O peão, pela sua natureza, possui uma grande liberdade de movimentos, podendo ocupar com facilidade diferentes posições nas infraestruturas rodoviárias. Por forma a delinear o caminho do peão e restringir os seus movimentos, existem medidas de apoio que oferecem ao peão segurança, comodidade, rapidez, coerência e atratividade (Seco, Macedo, & Pires da Costa, 2008).

A pesquisa bibliográfica relativa ao efeito que o peão causa numa rotunda mostra que o número de trabalhos científicos é ainda, em número, extremamente reduzido, pelo que continua a justificar-se o desenvolvimento de investigação complementar que permita avaliar, preferencialmente de forma quantificada, o efeito que a presença do peão assume no funcionamento deste tipo de interseção.

São inúmeros os modelos existentes na bibliografia da especialidade para a estimação da capacidade e dos atrasos em rotundas. No entanto, são raros os modelos que integrem o efeito da presença do peão. É comum subestimar ou mesmo negligenciar o efeito do peão (Hellings & Sindi, 2012), optando-se pelo recurso a métodos que não incluem o efeito do peão. O método tradicional americano, HCM 2010 (Highway Capacity Manual), é um dos poucos modelos adaptados para integrar a influência da presença pedonal. Contudo, essa influência é integrada a partir de um fator de redução da capacidade da rotunda.

A introdução dos modelos de simulação permite integrar o efeito do peão. Recorrendo ao modelo de microssimulação AIMSUN, construiu-se um modelo de simulação, baseado num exemplo real, calibrado e validado para o efeito. Na bibliografia estrangeira são referenciadas

diferentes soluções para passagens para peões com sinalização luminosa (*Pelican*, *Puffin*, *Toucan* e *Pegasus*). O modelo desenvolvido visa testar e avaliar diferentes cenários para uma passagem com regulação luminosa do tipo *Pelican*, comparativamente à solução base não semaforizada.

Nesse sentido, o presente trabalho centra-se na análise da influência que a presença de passagens para peões, localizadas a diferentes distâncias do anel de circulação, assume ao nível do desempenho geral da rotunda, particularmente em termos de capacidade e fluidez. Este trabalho visa colmatar a falha existente relativa ao número reduzido de trabalhos de investigação que existe tanto na bibliografia nacional como internacional.

1.2 Metodologia de abordagem

O desenvolvimento deste trabalho assenta na utilização do modelo de microssimulação *Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks* (AIMSUN - versão 7.0.4, Outubro 2012), disponibilizado pelo departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Esta aplicação afirma-se atualmente como uma das mais conceituadas plataformas de simulação disponíveis no mercado, possuindo as condições necessárias para a elaboração do presente trabalho. No âmbito do presente trabalho, a metodologia adotada foi suportada pela construção de um modelo de simulação baseado numa solução real, calibrado e validado para o efeito, e que passou pelas seguintes 5 fases: (i) construção do modelo; (ii) calibração do modelo; (iii) validação do modelo; (iv) definição dos cenários; (v) seleção dos indicadores de desempenho.

A construção do modelo baseou-se na cartografia local fornecida pela Câmara Municipal de Coimbra, o que permitiu codificar a rede atual de forma extremamente precisa. Por sua vez, a construção da matriz foi suportada pela realização de contagens direcionais de tráfego apresentadas de forma detalhada no ponto 4.3.

Os processos de calibração e validação do modelo, foram suportados por sessões de recolha de dados adicionais e individualizados e procuraram garantir que o modelo simulado, é capaz de representar de forma fidedigna a realidade observada. A validação do modelo assentou na comparação entre os valores simulados e observados, mediante a aplicação de testes estatísticos.

Os cenários adotados (iv) procuraram integrar diferentes fatores na análise:

- i. Tipo de atravessamento pedonal: passagem para peões (RST) ou com regulação luminosa do tipo *Pelican*.
- ii. Distância de atravessamento em relação à delimitação do anel da rotunda: foram contempladas 3 alternativas (5, 10 e 15 m) para a passagem para peões e outras 3 alternativas (5, 15 e 25 m) para os atravessamentos com regulação luminosa;

- iii. Nível de saturação da rotunda, tendo-se optado por incluir cenários de procura correspondentes a condições de funcionamento não saturadas (60 a 100%) e saturadas (100 a 120%);
- iv. Níveis de procura pedonal: 100, 300, 500 e 700 peões/h.

Optou-se ainda por considerar os seguintes indicadores de desempenho (v): fluxos médios de entrada e saída e tempos médios de viagem, registados num conjunto limitado de seções críticas.

1.3 Estrutura da dissertação

O presente trabalho encontra-se subdividido em 6 capítulos. O atual capítulo, 1, apresenta uma breve introdução sublinhando a importância do tema – Definição de Estratégias de Atravessamentos Pedonais em Rotundas – os objetivos e a metodologia adotada.

O capítulo 2 centra-se na apresentação do estado da arte, baseado em pesquisas bibliográficas relacionadas com o conteúdo do presente trabalho. Numa breve introdução é apresentado o conceito “rotunda”, assim como o seu domínio privilegiado de aplicabilidade. São apresentadas as diferentes tipologias, dando-se particular ênfase às tipologias inovadoras como é o caso da “turbo-rotunda”. Por fim, são ainda apresentadas as diferentes medidas de apoio ao peão particularmente voltadas para assegurar o atravessamento da faixa de rodagem em segurança, procurando identificar, os principais benefícios e limitações que lhe estão associadas.

No capítulo 3 são identificados alguns estudos que procuram avaliar a influência da presença do peão na capacidade e fluidez do tráfego da rotunda, assim como nos níveis de segurança oferecidos.

No capítulo 4 apresenta-se, de forma detalhada, a construção dos modelos de simulação, dando-se particular ênfase aos trabalhos de codificação da rede, construção da matriz origem/destino e aos trabalhos de calibração e de validação do correspondente modelo. São ainda apresentados os cenários de estudo que envolvem diferentes soluções e níveis de procura.

No capítulo 5 são discutidos e comparados os resultados associados aos diferentes cenários simulados. O capítulo termina com uma análise integrada dos resultados obtidos.

Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

2 TIPOLOGIAS DE ATRAVESSAMENTOS PEDONAIIS E MEDIDAS DE APOIO

2.1 Enquadramento geral

A rotunda é cada vez mais associada, pela comunidade técnica e científica, a uma solução eficiente, garantindo excelentes níveis de fluidez e de segurança. Segundo Brown (1995), o conceito de rotunda deve-se ao arquiteto francês, Eugène Hénard, que em 1877, definiu o conceito de rotunda onde integrava preocupações de arquitetura conjugadas com a gestão de trânsito. O conceito acabou por ser aplicado mais tarde, e materializado através da imposição de sentidos únicos de circulação em torno de uma ilha central que podiam ser simples quarteirões ou praças (Bastos Silva, 2004). O conceito de rotunda, em Portugal, surge no final do século XIX através do Engenheiro Frederico Ressano Garcia, urbanista da Câmara Municipal de Lisboa que veio a concluir o seu curso de Engenharia Civil na “École Imperiale des Ponts et Chaussées”, de Paris, em 1869 (Costa de Matos, 2011), onde teve a oportunidade de conhecer as ideias de Hénard.

As rotundas apresentam um campo de aplicação extremamente abrangente. O domínio urbano apresenta-se como o campo de aplicação privilegiado, embora as rotundas possam ser igualmente aplicadas em meio interurbano e sobretudo na marcação da transição entre ambientes rodoviários (Bastos Silva et al., 2013). Mas, o domínio urbano é porventura o espaço onde é mais frequente encontrar este tipo de soluções, maioritariamente integradas em espaços que respondem igualmente à presença pedonal. Importa assim conhecer o tipo de medidas de apoio ao peão existentes a nível nacional e internacional e que promovam os atravessamentos pedonais nas rotundas em segurança, sem influenciarem de forma significativa a sua capacidade (Bastos Silva et al., 2013). Neste contexto, este capítulo apresenta as medidas de apoio ao peão de uso mais generalizado em Portugal e no mundo, procurando-se identificar as potencialidades, debilidades e riscos associados a cada um.

Segundo o Código da Estrada Português (Lei n.º 72/2013, de 3 de setembro – Décima terceira alteração ao Código da Estrada, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 114/94, de 3 de maio, e primeira alteração ao Decreto-Lei n.º 44/2005, de 23 de fevereiro), uma “rotunda” é uma “praça formada por cruzamento ou entroncamento onde o trânsito se processa em sentido giratório e sinalizada como tal”. De forma a colmatar a definição proposta pelo Código da Estrada Português, Bastos Silva e Seco (2008) denominam uma rotunda como “um ordenamento geométrico onde todos os ramos, de sentido único ou não, convergem numa praça geralmente central, em torno da qual se impõe um sentido único de circulação considerado movimento prioritário em relação aos

movimentos de chegada”. As rotundas têm um domínio de aplicabilidade extremamente alargado, podendo ser usadas tanto em meio urbano como em meio interurbano devido a serem soluções com níveis de capacidade de tráfego elevados e permitem uma grande eficiência no escoamento do tráfego. São também soluções com elevados níveis de segurança (DfT, 1993; FHWA, 2000).

A Figura 2.1 apresenta sucintamente a geometria e a respetiva sinalização da rotunda de acordo com as disposições normativas impostas pelo Instituto de Infraestruturas Rodoviárias (InIR) (Almeida Roque, 2002). É habitual considerar-se a existência de quatro tipologias diferentes de rotundas (ver Figura 2.2): rotunda normal (a), mini-rotunda (b), rotunda desnivelada (c) e rotunda dupla (d) (Bastos Silva & Seco, 2008). Existem ainda as rotundas normais semi-galgáveis que se enquadram na tipologia de “rotundas normais” de dimensão compacta. As rotundas semi-galgáveis são dimensionadas com base nas exigências de uma boa circulação para veículos ligeiros, os veículos longos necessitam de recorrer à faixa galgável que circunda a ilha central.

Mais recentemente surgiu uma nova tipologia de rotunda, denominada por *turbo-rotunda*. O conceito de origem holandesa (Fortuijn, 2009) caracteriza-se como sendo uma rotunda que, recorrendo a lancis galgáveis, define trajetórias contínuas em espiral entre as entradas e os diferentes destinos, servindo de elemento de canalização para os veículos, evitando o entrecruzamento de veículos na zona de conflito, designadamente nas entradas, no anel de circulação e nas saídas (Bastos Silva, Santos & Gaspar, 2013). Este conceito teve a primeira aplicação na Holanda no final da década de 90, país que conta atualmente com mais de 200 aplicações e, com registo de excelentes resultados em termos de segurança (Bastos Silva, Santos & Gaspar, 2013). Já em termos de capacidade os resultados dos trabalhos de investigação não são ainda conclusivos, registando-se mesmo resultados contraditórios.

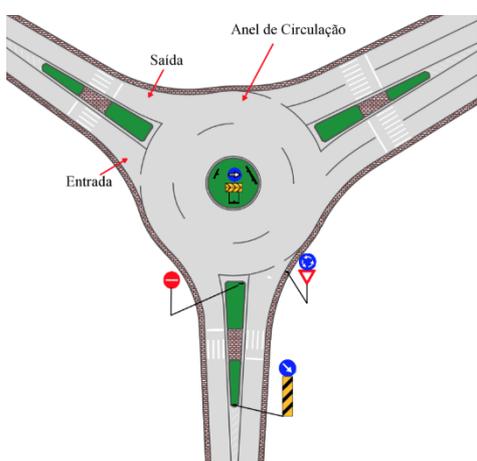


Figura 2.1– Modelo geral de rotunda (adaptado de Almeida Roque, 2002)

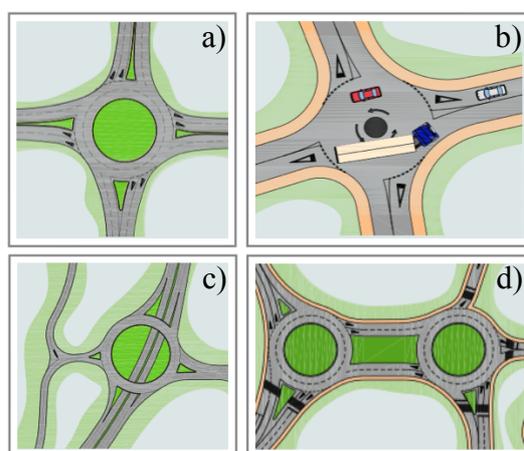


Figura 2.2 – Diferentes tipologias de rotundas (Fonte: InIR, 2009)

Qualquer uma destas tipologias é habitualmente associada à formalização de atravessamentos pedonais, identificando-se tipologias, dimensões e localizações diferenciadas, consoante o ambiente rodoviário em que se insere. Desconhece-se, contudo, a existência de regras/recomendações específicas que dependam da tipologia da rotunda.

2.2 Medidas de apoio ao peão

2.2.1 Tipos de atravessamentos e critérios de aplicação

O comportamento do peão é imprevisível designadamente em termos de percurso a adotar quando se desloca na via pública. É possível delinear o caminho dos peões e restringir alguns dos seus movimentos, mas a sua atitude e comportamento serão sempre aleatórios (Matos Coelho, 2011). Os peões, pela sua natureza, possuem uma grande liberdade de movimentos, podendo ocupar com facilidade diferentes posições nas infraestruturas rodoviárias. Contudo, a aptidão de movimentação de cada peão depende da idade, sexo e condição física (Seco et al., 2008). Apesar dessa imprevisibilidade, habitualmente o peão tende a procurar os trajetos mais curtos e diretos. Segundo Adams (2007), o peão é “o maior Pitágoras do mundo”, referindo-se ao facto do peão eleger, na maioria das vezes, o caminho mais curto e linear (correspondente à “hipotenusa”) mesmo não sendo este o caminho mais indicado e seguro (Hamilton-Baillie, 2008). Existindo estas diferenças de imprevisibilidades de reações e comportamento do peão, a implementação de travessias pedonais deve ser efetuada de modo a oferecer aos peões: segurança, comodidade, rapidez, coerência e atratividade (Seco et al., 2008).

As passagens para peões constituem pontos críticos da rede onde existe conflito entre veículos e peões, pelo que a minimização do risco de acidente deverá passar pela adoção de soluções que diminuam a exposição do peão interveniente ao risco. As passagens para peões podem ser subdivididas em passagens de nível ou desniveladas (Matos Coelho, 2011; Seco et al., 2008). As passagens de nível são, maioritariamente, usadas em meios urbanos em diferentes contextos e níveis de prioridade atribuídos ao peão. As passagens de nível podem ser reguladas por sinalização luminosa, opta-se por esta solução se o fluxo pedonal comprometer os níveis de serviço inicialmente pré-definidos para a via. As passagens desniveladas são soluções maioritariamente usadas para resolver os conflitos entre volumes elevados de tráfego e de peões, em vias coletoras ou distribuidoras principais, onde a presença do peão é totalmente desaconselhada, obrigando a uma segregação efetiva entre os dois sistemas (Matos Coelho, 2011). A implementação de uma passagem de peões deve passar por uma análise *a priori* da localização, características da via e do fluxo pedonal e viário.

As normas inglesas (TD 28/87) sugerem o uso de um indicador de exposição de risco (PV^2) para averiguar a adequação da tipologia de atravessamentos pedonais em zonas urbanas. A variável “P” representa o fluxo horário pedonal e “V” o fluxo de veículos registados ao longo

do período de 4 horas mais solicitado do dia. O ábaco que se segue serve apenas como instrumento de auxílio não devendo ser seguido rigorosamente, uma vez que a escolha do tipo de passagem de peões está dependente de uma diversidade de fatores aqui não contemplados como, por exemplo, o tipo de envolvente urbana, as características e função da via (ver Figura 2.3) (DfT, 1979).

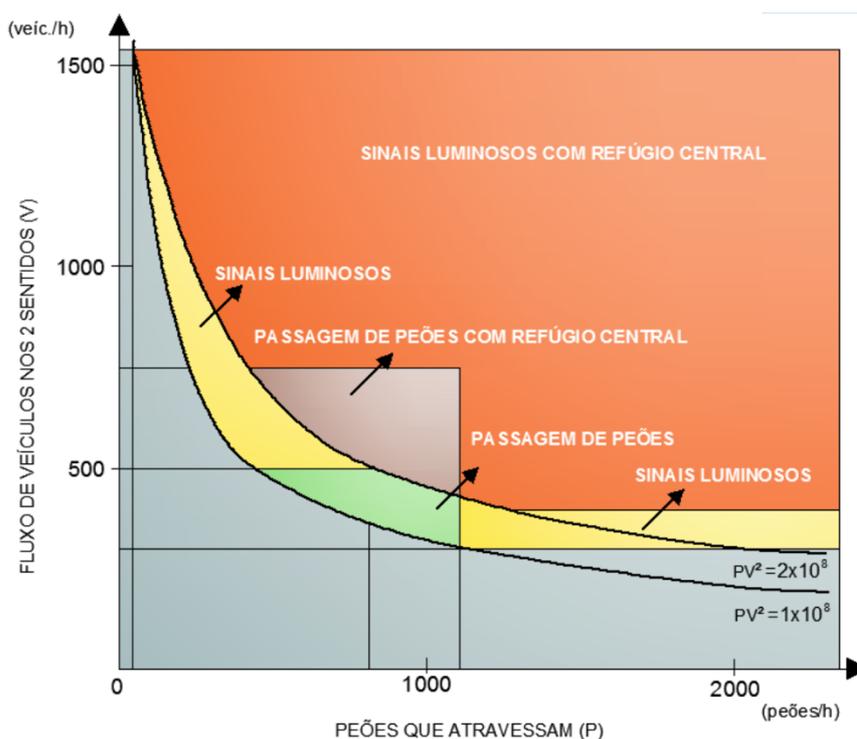


Figura 2.3 – Adequação da tipologia de atravessamentos pedonais em zonas urbanas, baseada na expressão PV^2 (Fonte: DfT, 1979)

A Figura 2.3 suscita os seguintes comentários gerais:

- ✓ para baixos níveis de fluxo de veículos e/ou peões não existe a necessidade de implementar qualquer tipo de medida de apoio, nem de formalização da travessia;
- ✓ para fluxos mais equilibrados entre veículos e peões a solução mais adequada tende a ser a passagem para peões;
- ✓ para fluxos rodoviário e/ou pedonal elevados é recomendada a implementação de passagens de peões associadas a regulação luminosa;
- ✓ quando o fluxo pedonal compromete os níveis de serviço pretendidos da via, recorre-se à passagem de peões com refúgio central, de maneira a que o atravessamento possa ser efetuado em duas fases. O refúgio central deverá ser criado sempre que as ruas disponham uma largura superior a 10 metros (DfT, 1979).

2.2.2 Passagens para peões

Com as travessias pedonais de nível procura-se disciplinar tanto o comportamento do peão como o dos automobilistas definindo locais estrategicamente seleccionados de forma a garantir as adequadas condições de segurança, de atratividade e de continuidade dos circuitos pedonais. Neste tipo de atravessamento o peão é, ao abrigo do código da estrada vigente, considerado o elemento prioritário. Assim, os peões devem ser induzidos a recorrer a estes pontos de atravessamento onde se garanta a segurança mesmo que à custa de um alongamento aceitável do percurso. São soluções implementadas no caso do fluxo de veículos e/ou peões não ser elevado e para velocidades praticadas inferiores a 50 km/h (Seco et al., 2008). Uma das grandes vantagens das passagens para peões centra-se no facto de serem de fácil implementação e com manutenção de baixo custo. Na Figura 2.4 são apresentados exemplos de passagens para peões aplicadas a diferentes tipologias de interseções. Na Figura 2.5 ilustra as marcas M11 e M11a (guias) usadas nas passagens de peões (RST, 1998).



Figura 2.4 – Exemplos de passagens para peões, em Coimbra

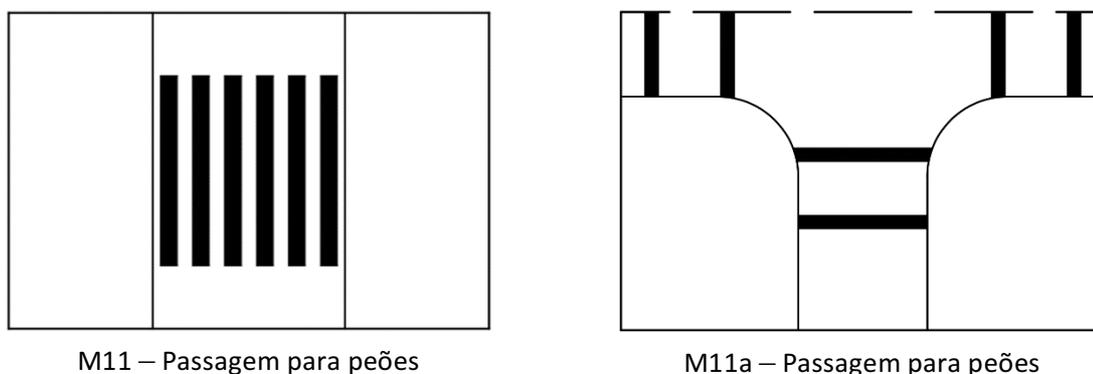


Figura 2.5 – Marcas rodoviárias em travessias (adaptado de RST, 1998)

A localização de passagens para peões localizadas nos ramos de acesso a rotundas devem salvaguardar a segurança e conforto do peão sem impor atrasos excessivos ao tráfego viário. Segundo Baranowski (2005), a passagem pedonal deve estar localizada, a pelo menos, 8 metros da delimitação do anel da rotunda, correspondendo aproximadamente, ao comprimento de um veículo (para uma rotunda com apenas um via). Para rotundas com duas vias, a distância mínima deve ser cerca de 15 metros da linha de entrada da rotunda (Baranowski, 2005). Bastos Silva e Seco (2004) recomendam a localização da passagem para peões entre 10 e 15 metros da linha de entrada da rotunda, de forma a minimizar o impacto do peão na capacidade de saída. Os valores recomendados pelos diferentes autores não são devidamente fundamentados, sendo a escassa existência de estudos que comprovem a influência destes valores na capacidade da rotunda (Bastos Silva & Vasconcelos, 2009).

2.2.3 Passagens para peões com sinalização luminosa

Relativamente às passagens de nível com regulação luminosa existe um comportamento adequado, tanto por parte dos peões como dos condutores, determinado pelas cores convencionais dos sinais luminosos. Os custos de instalação e de manutenção são superiores à solução apresentada anteriormente e a sua eficácia depende do plano de regulação dos sinais luminosos adotado. Na Figura 2.6 são apresentados exemplos de passagens de nível com regulação luminosa. Em termos de marcação, à semelhança das passagens pedonais, podem ser igualmente utilizadas as marcas M11 e M11a do RST (RST, 1998).



Figura 2.6 – Passagens para peões com regulação luminosa, em Coimbra

A marcação da travessia pedonal regulada por sinais luminosos depende principalmente da largura da faixa de rodagem e, em particular, da existência ou não de um separador central (refúgio). Na Figura 2.7 são esquematicamente apresentadas passagens de nível semaforizadas sem separador central (a), com separador central (b) e com enviesamento à direita (c) e à esquerda (d). Na ótica do peão, deve sempre que possível optar-se por atravessamentos

contínuos, sendo que face a passagens enviesadas deve optar-se pelo enviesamento à direita, de modo a melhorar a visualização dos veículos por parte dos peões (Seco et al., 2008). Estas soluções podem, no entanto, ser utilizadas sem regulação luminosa.

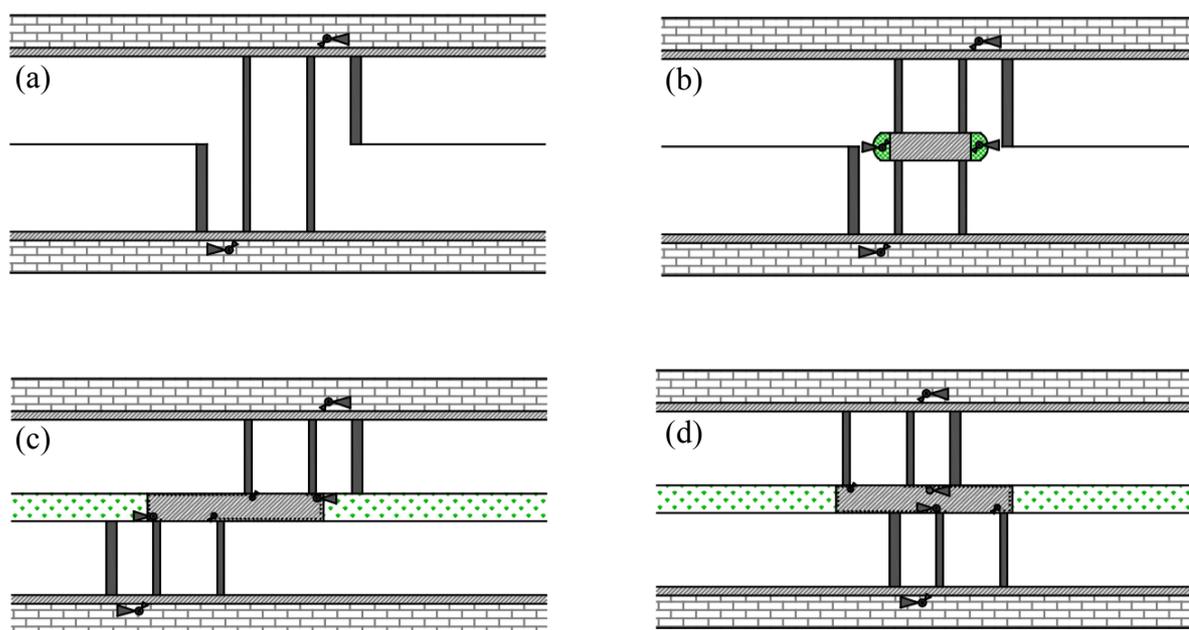


Figura 2.7 – Esquemas de marcação de passagens para peões com regulação luminosa (adaptado de HMSO, 1987)

No caso de passagens para peões com regulação luminosa integradas em cruzamentos é possível contar com diferentes estratégias e planos de fases (Pires da Costa et al., 2005) onde é previsto o avanço das correntes pedonais, salvaguardando os níveis de serviço desejados associados às correntes de veículos. É igualmente possível prever o avanço simultâneo das correntes de tráfego pedonal e de veículos, desde que estes não comprometam a segurança do peão. Em casos em que a prioridade do peão não é perceptível é garantida sinalização adequada, visível e clara para que não suscitem dúvidas sobre o comportamento que devem adotar. É frequente optar-se com o avanço das correntes de veículos com oposição dos peões, tanto nas viragens à direita como nas viragens à esquerda. No entanto, as viragens à direita tendem a oferecer uma maior segurança ao peão do que nas viragens à esquerda (Seco et al., 2008), uma vez que nas viragens à direita as velocidades tendem a ser mais baixas e a distância a percorrer até às passagens de peões mais curta. Acresce ainda o facto de nos movimentos de viragem à esquerda a visibilidade do condutor é prejudicada pela existência do pilar frontal do veículo que pode ocultar a presença do peão (Seco et al., 2008).

De forma a ser possível uma maior eficácia, dependendo do cenário, existem diferentes soluções de semaforização para o atravessamento do peão em cruzamentos semaforizados: (i) ausência de sinalização luminosa específica para os peões, sendo os atravessamentos efetuados nos períodos em que não existe tráfego ou durante o tempo de tudo vermelho. Esta solução é, normalmente, aplicada para baixos níveis de tráfego pedonal, em vias de sentido único ou com placa central de refúgio para peões; (ii) criação de uma fase destinada somente para o atravessamento dos peões, não sendo possível o avanço do tráfego motorizado; (iii) criação de fases em que o atravessamento dos peões e os movimentos de viragem são efetuados em simultâneo devendo o condutor dar prioridade ao peão se este já tiver iniciado o atravessamento; (iv) atravessamento em duas fases exigindo um refúgio onde o peão possa esperar em segurança a fase que lhe permite finalizar o atravessamento; (v) passagem de peões afastada do cruzamento, a uma distância inferior a 50 metros, que permite uma zona de espera para os veículos. Esta solução torna-se penalizante para os peões, embora possa justificar-se se a procura do cruzamento estiver próxima da sua capacidade (Seco et al., 2008).

As passagens para peões com ou sem regulação luminosa mais comuns no nosso país são marcadas através de bandas cromáticas (M20) que servem de alerta para a necessidade de praticar velocidades mais reduzidas (Rodrigues et al., 2008). Quando semaforizadas existem quatro tipos de passagens de nível, além da passagem para peões, sendo estas passagens de nível do tipo *Pelican*, *Puffin*, *Toucan* e *Pegasus*.

2.2.3.1 Solução do tipo *Pelican*

A passagem para peões do tipo *Pelican* foi criada no Reino Unido em 1969, sendo a primeira travessia pedonal, bem sucedida, controlada por sinais luminosos (Department of Transportation, 1999). Desde 1979, as passagens do tipo *Pelican* foram amplamente introduzidas e estima-se que existam mais de 11 000 passagens do tipo *Pelican* no Reino Unido (Hunt & Lyons, 1997).

Nas passagens do tipo *Pelican* os peões devem pressionar o botão para que este lhes seja dada a oportunidade de passagem (sinal verde), passando o amarelo intermitente atribuído aos veículos, nesse momento para vermelho. Quando o tempo de verde está prestes a terminar, é ativado um período de verde intermitente, por vezes, acompanhado de sinais sonoros dirigido aos utilizadores invisuais, não devendo o peão iniciar o atravessamento da faixa de rodagem. Na aproximação a este tipo de travessias os condutores são alertados para a presença de atravessamentos através de uma marcação em ziguezague e da presença de um sinal de amarelo intermitente (ver Figura 2.8) (DTT@2015). A Figura 2.9 apresenta a sequência de luzes para os peões e veículos. Com esta sequência de sinais, no caso de existirem peões a aguardar pela a ativação do sinal verde, o condutor consegue prever que, a qualquer momento, o seu sinal pode passar a vermelho, devendo assim reduzir a sua velocidade.

As passagens pedonais do tipo *Pelican* mais recentes têm sensores que permitem atribuir verde aos peões se o sistema não detetar veículos na aproximação. No entanto, atualmente, o número de travessias a tempo fixo, no Reino Unido, continua a ser significativo (Department of Transportation, 1999).



Figura 2.8 – Passagens do tipo *Pelican*
(Fonte: PDS@2015)

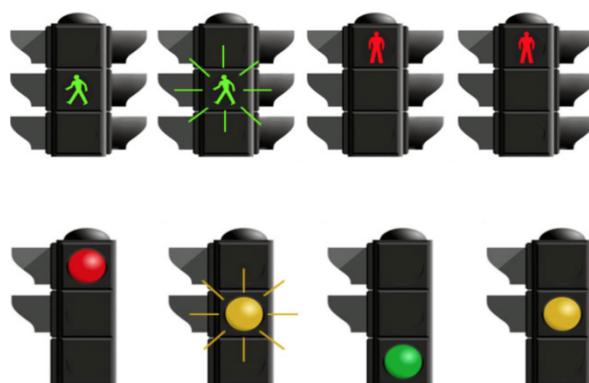


Figura 2.9 – Sequência de luzes para peões e condutores em travessia do tipo *Pelican*
(Fonte: DTT@2015)

Marlow, em 1987, recomendou para passagens para peões semaforizadas do tipo *Pelican* a sua localização a, pelo menos, 20 metros da linha de entrada da rotunda de modo a minimizar o impacto da presença pedonal na capacidade da rotunda (Brown, 1995).

2.2.3.2 Solução do tipo *Puffin*

Por sua vez, em 1980 foram desenvolvidas as passagens do tipo *Puffin*, as quais se apresentaram como sendo um aperfeiçoamento do sistema de passagens do tipo *Pelican* procurando ultrapassar as deficiências do sistema (Billings & Walsh, 1991), designadamente:

- ✓ Tempo insuficiente dado aos peões, com maiores dificuldades de locomoção, de modo a ser possível o atravessamento da faixa de rodagem;
- ✓ Problemas de interpretação, por parte dos peões, associados à fase em que o sinal verde intermitente é acionado;
- ✓ Atrasos desnecessários impostos aos veículos devido a ser uma solução a tempos fixos;
- ✓ Demoras excessivas para os peões devido ao tempo mínimo entre as fases pedonais (Seco et al., 2008).

A passagem do tipo *Puffin* (ver Figura 2.10) procura assim reduzir o atraso associado a ambos os fluxos envolvidos (viário e pedonal) e colmatar as deficiências supracitadas por forma a proporcionar melhores condições aos peões. O sistema *Puffin* consiste na aplicação de dois

detetores, colocados um em cada lado da faixa de rodagem, detetando a presença de um peão que se encontre na zona de deteção. O peão, para os detetores, é definido como tendo uma altura mínima de 1 metro, largura mínima de 0,5 metros, profundidade mínima de 0,2 metros e uma massa mínima de 20 Kg e com forma e propriedades dinâmicas de uma criança com idade média de 5 anos de idade. Um peão que se desloque em cadeira de rodas ou carrinho de bebé também é detetado segundo as especificações supracitadas. A Figura 2.11 mostra a zona de deteção típica segundo as normas estabelecidas pelo VicRoads Standard Drawing TC-1005 (VicRoads, 2004). Os detetores revelam-se capazes de originar uma zona de deteção de, pelo menos, 16 metros de comprimento e 4 metros de largura.

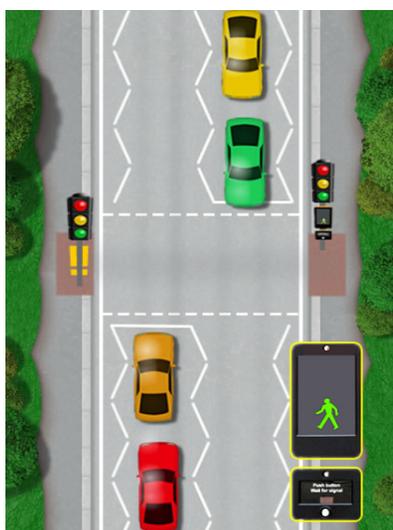


Figura 2.10 – Passagem *Puffin*
(Fonte: DTT@2015)

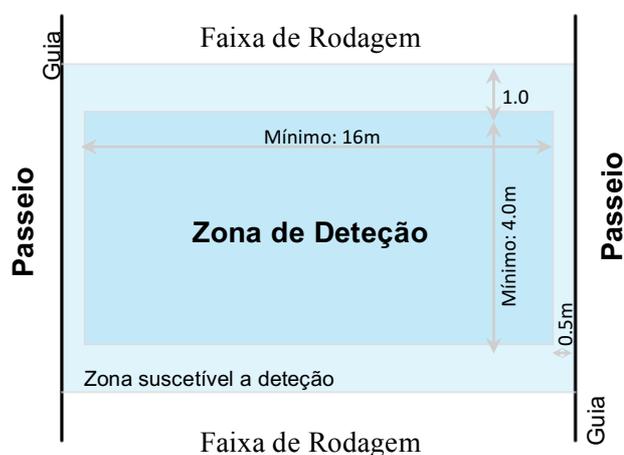


Figura 2.11 – Zona típica de deteção
(adaptado de VicRoads, 2004)

Os detetores permitem que, o tempo atribuído ao peão para efetuar o atravessamento da faixa de rodagem seja estendido ou encurtado (VicRoads, 2004) dentro de um intervalo pré-estabelecido. Se um peão for detetado dentro da zona de deteção após o término do tempo mínimo de verde, então este é prolongado, por pequenos incrementos de tempo, até o mesmo terminar o atravessamento ou ser atingido o tempo de verde máximo pré-definido. Sempre que o tempo de verde é estendido e, deixem de ser detetados peões num tempo pré-determinado (regularmente dois segundos) na zona de atravessamento, o sistema atribui o sinal vermelho aos peões.

Complementarmente, os detetores ainda podem ser usados para aumentar o tempo de limpeza. Quando no final do tempo de limpeza mínimo, o detetor detetar a presença de peões, o prolongamento do tempo de limpeza é acionado. No entanto, se não forem detetados peões num

tempo pré-determinado (habitualmente dois segundos) o tempo de limpeza é interrompido, antes de ser atingido o tempo de limpeza máximo (VicRoads, 2004).

Na Figura 2.12 é esquematicamente representada a sequência de sinais atribuídos aos peões e a correspondente sequência para os condutores. No sistema *Puffin* o sinal verde intermitente para os peões deixa de existir, sendo substituído pelo vermelho.



Figura 2.12 – Sequência de luzes para peões e condutores (Fonte: DTT@2015)

2.2.3.3 Solução do tipo *Toucan*

Identificam-se ainda as passagens do tipo *Toucan*. Estas são semelhantes aos atravessamentos do tipo *Puffin*, diferindo apenas no facto de serem dimensionadas tendo em consideração a presença de ciclistas. A sua materialização carece assim da instalação de detetores para ciclistas. Estas soluções procuram conferir continuidade à circulação nas ciclovias pelo que apenas devem ser aplicadas na presença de fluxos elevados de ciclistas.

2.2.3.4 Solução do tipo *Pegasus*

Por sua vez, as passagens do tipo *Pegasus* são similares aos atravessamentos do tipo *Toucan*, embora prevejam o atravessamento coordenado entre peões e cavalos. A Figura 2.13 apresenta a geometria deste tipo de passagens requerendo uma largura mínima de 3 metros para a zona equestre. No entanto, é determinada uma largura máxima de 5 metros dissuadindo assim os condutores a pararem na zona de passagem aquando a permuta de sinal verde para vermelho (DfT, 2003). A construção de uma separação física entre os dois utilizadores será determinada pelo espaço disponível, sendo aconselhável, sempre que possível, a construção da mesma, tornando o atravessamento dos peões mais seguro.



Figura 2.13 – Passagem do tipo *Pegasus* (Fonte: DfT, 2003)

2.2.4 Passagens desniveladas

As passagens desniveladas são infraestruturas pedonais, podendo ser subdivididas em passagens desniveladas inferiores ou superiores, consoante assumam cotas inferiores ou superiores à faixa de rodagem. Estas passagens têm como objetivo evitar qualquer conflito entre os veículos e os peões, através da sua segregação espacial, conferindo-lhes assim um elevado nível de segurança (Almeida Ribeiro, 2010). O domínio privilegiado destas soluções são atravessamentos associados a correntes de tráfego importantes e sujeitas a velocidades elevadas (Ogden, 1996). Em locais onde o utilizador privilegiado é o peão não se justifica, do ponto de vista económico, a aplicação desta solução (Almeida Ribeiro, 2010). São assim maioritariamente adotadas em vias estruturantes (coletoras ou distribuidoras principais) ou sempre que se pretenda conferir condições de atravessamento adequadas aos peões. A implementação desta solução depende também da avaliação feita pelos peões entre o nível de segurança esperado e o esforço adicional solicitado ao peão para efetuar o atravessamento (Seco et al., 2008).

É importante referir que as passagens desniveladas apenas se tornam mais atrativas para o peão se for agradável e cómoda, o que normalmente acontece quando a orografia natural do terreno é favorável. A solução mais confortável é a que resulta da imposição do desnível ao tráfego automóvel, mantendo-se a travessia de peões plana, uma vez que o peão realiza o atravessamento sem qualquer esforço adicional (Seco et al., 2008). Porém, é uma solução muito dispendiosa quando comparada às soluções tradicionais.

A Figura 2.14 representa esquematicamente exemplos de passagens superiores sobre a faixa de rodagem onde o pé direito mínimo exigido é de 5 metros. Estas soluções são habitualmente associadas a espaços totalmente abertos, pelo que tendem a ser associadas a níveis de sentimento de segurança pessoal elevados. Contudo, exigem extensões de rampas longas para ser possível alcançar os 5 metros de altura, o que as tende a tornar desconfortáveis e pouco atrativas (ODT, 1995). Por sua vez, a Figura 2.15 apresenta exemplos de passagens inferiores desniveladas. Este tipo de soluções associa-se a percursos substancialmente menores, uma vez que o pé direito mínimo exigido é de 2,5 metros. São soluções tipicamente menos dispendiosas, contudo tendem a ser associadas a alguns problemas de segurança pessoal, devido à sua visibilidade reduzida (ODT, 1995).

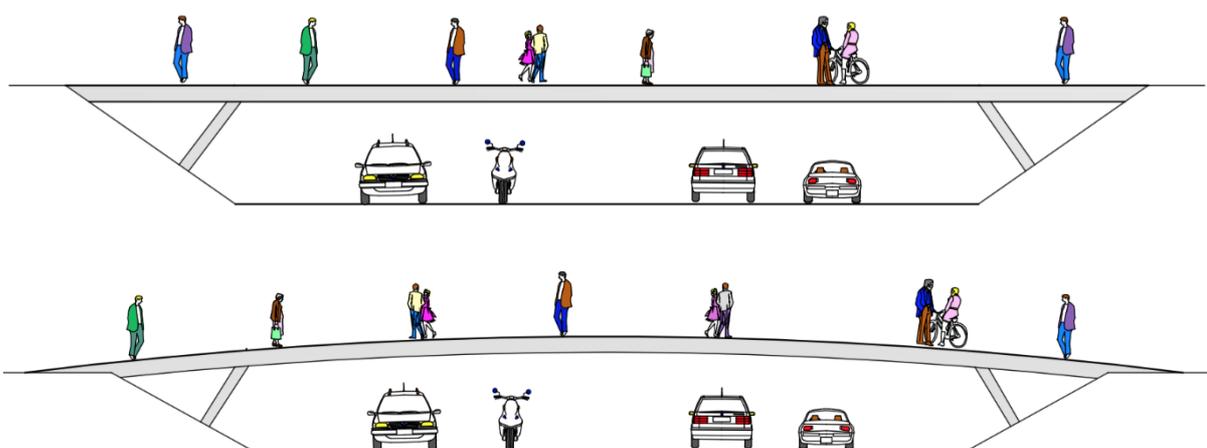


Figura 2.14 – Passagens superiores para peões (adaptado de ODT, 1995)

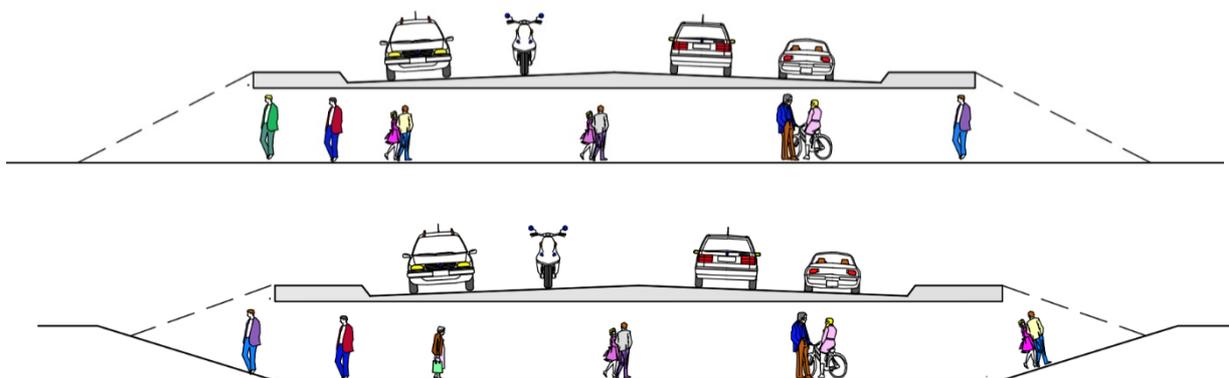


Figura 2.15 – Passagens inferiores para peões (adaptado de ODT, 1995)

2.2.5 Outras medidas de apoio ao peão

As soluções anteriormente apresentadas (passagens pedonais de nível e passagens pedonais desniveladas) oferecem ao peão conforto e segurança durante o atravessamento da faixa de rodagem, mesmo para utilizadores com mobilidade reduzida. Porém, pode ser necessário construir acessos para que o peão com mobilidade reduzida realize o atravessamento sem qualquer obstrução. O Decreto-Lei nº 163/2006 exige que sejam cumpridos requisitos básicos que devem ser contemplados nas passagens de peões para a melhoria da acessibilidade de utilizadores com mobilidade reduzida. Os requisitos básicos determinados pela lei auxiliam o peão nas condições de segurança e no conforto das travessias pedonais, no entanto um dos maiores objetivos é a redução do tempo de exposição do peão ao risco do tráfego automóvel (Matos Coelho, 2011). Deste modo, é usual recorrer a medidas complementares podendo serem aplicadas a passagens pedonais de nível, que visam auxiliar o peão durante o atravessamento da faixa de rodagem.

Conforme o citado na legislação portuguesa e de modo a facilitar o atravessamento da faixa de rodagem pelos peões mais desfavorecidos (deficientes, idosos e crianças), existem medidas que devem ser consideradas:

- ✓ rebaixamento dos passeios na zona da passagem pedonal, de acordo com as normas de acessibilidade, facilitando o trajeto dos peões de mobilidade reduzida;
- ✓ aumento da intensidade da iluminação pública;
- ✓ aplicação de material antiderrapante, de modo a garantir uma boa aderência, mesmo na presença de humidade ou de água;
- ✓ utilização de elementos táteis de modo a alertar e guiar os peões invisuais;
- ✓ salvaguarda de que não existe qualquer elemento na zona da travessia que impeça a visibilidade, quer do peão quer do condutor;
- ✓ garantia de que não existem obstáculos na zona da travessia que possam dificultar a sua utilização por parte dos utilizadores de mobilidade reduzida (motora e/ou visual);
- ✓ previsão da instalação de proteções para a canalização de movimentos dos peões, conduzindo-os ao local da travessia, em vias em que tal se justifique. Essa canalização deverá ir, o mais possível, ao encontro dos trajetos naturais dos peões.

Segundo este diploma, estes requisitos devem ser aplicados a todas as passagens de nível. Por vezes, é necessário recorrer a outras medidas de apoio ao peão, sendo as passagens desfasadas consideradas soluções adequadas, sempre que se pretenda impor o atravessamento em duas fases podendo assim verem e serem vistos pelo tráfego rodoviário. Este tipo de soluções é adequado para travessias onde o fluxo de peões seja maioritariamente crianças e jovens, devido à sua impulsividade têm tendência a realizar o atravessamento apressadamente. Neste caso o

refúgio de peões apresenta uma extensão superior, de modo a ser possível o desfasamento do atravessamento, obrigando, preferencialmente, o peão a percorrer o separador de frente para o tráfego rodoviário. Os fluxos de peões vão cruzar-se, uma vez que se deslocam em sentidos opostos do atravessamento e, conseqüentemente haverá um tempo de espera em cada atravessamento, podendo existir acumulação de peões no refúgio central. Conseqüentemente, o dimensionamento do refúgio deverá ter em consideração o referido e os níveis de procura de peões.

Em cruzamentos, os peões esperam encontrar um percurso o mais direto possível que lhes possibilite atravessar a faixa de rodagem. De acordo com Telford (2007) uma solução que favorece o peão, passa pela diminuição dos raios de curvatura originando uma redução das velocidades praticadas pelos condutores e minimizando a necessidade dos peões se desviarem do trajeto desejado (ver Figura 2.16). O percurso torna-se mais fácil e mais curto, facilitando a mobilidade, principalmente, dos peões invisuais ou com mobilidade reduzida. Em cruzamentos de raios de curvatura pequenos o peão facilmente ganha prioridade, uma vez que os condutores assumem uma condução mais cuidada e a viragem é feita lentamente. Como é possível observar na Figura 2.17, o peão não é forçado a olhar para trás para verificar se existem veículos com a intenção de virar. Esta medida deve ser devidamente ponderada em função do tipo de via, uma vez que pode condicionar o acesso de viaturas pesadas e prejudicar a capacidade viária das vias. Por vezes, é necessário reforçar os bordos do passeio, devido aos veículos pesados necessitarem de o sobrepor para efetuar a manobra de viragem (Telford, 2007).

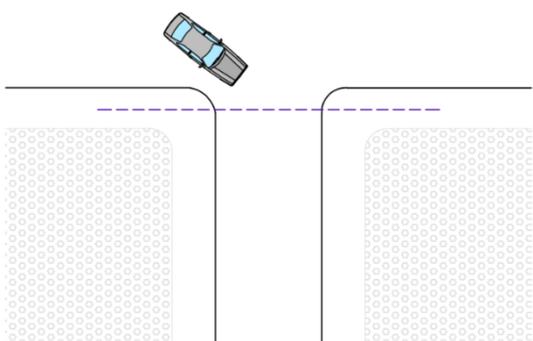


Figura 2.16 – Trajeto desejado do peão
(adaptado de Telford, 2007)

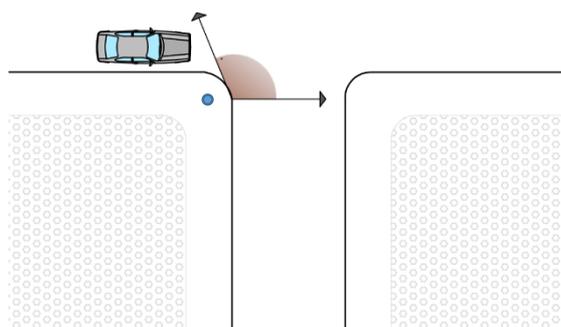


Figura 2.17 – Campo de visão em raios de curvatura pequenos (adaptado de Telford, 2007)

A Figura 2.18 apresenta uma medida de apoio ao peão que, à semelhança da anterior, contribui para uma redução das velocidades praticadas, uma vez que a largura da via na zona da travessia é reduzida significativamente e os passeios nessa zona são alargados. Conseqüentemente, o tempo de exposição do peão ao tráfego diminuiu e a visibilidade entre o peão e o condutor é favorecida.

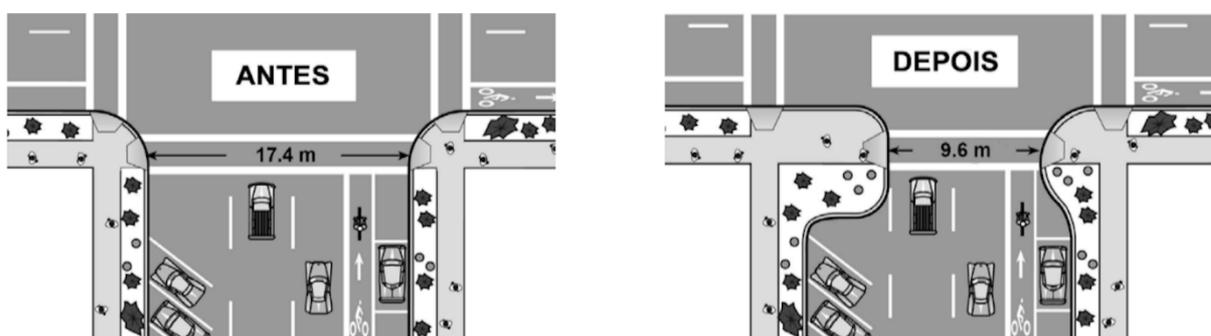


Figura 2.18 – Alargamento dos passeios em cruzamentos (Fonte: FHWA, 2000)

2.3 Considerações Finais

Ao longo dos anos, o emprego de rotundas tem vindo a aumentar e a desempenhar um papel importante tanto em meios urbanos como em meios interurbanos. No entanto, este tipo de soluções são frequentemente implantadas em domínio urbano respondendo, geralmente, à procura pedonal elevada. Conta-se atualmente com diversas medidas de apoio ao peão cujo domínio de aplicação privilegiado depende dos níveis de procura pedonal e automóvel envolvidos. As passagens para peões são as medidas de apoio mais utilizadas em Portugal, contudo, a escolha deste tipo de medida nem sempre é a mais adequada nem se baseia em estudos fundamentados. Por oposição, em vias urbanas estruturantes ou em meios interurbanos sujeitos a níveis elevados de tráfego e de velocidade de circulação, a construção de passagens desniveladas revela-se quase obrigatória por razões de segurança.

São vários os autores que apontam para diferentes distâncias na localização adequada para a implantação das passagens para peões na entrada e/ou na saída da rotunda, sendo o intervalo entre 10 e os 15 metros o mais aconselhado. No entanto, são recomendações empíricas de diferentes autores não existindo estudos científicos que possam comprovar a sua eficiência.

3 IMPACTO DO PEÃO NO FUNCIONAMENTO DA ROTUNDA

3.1 Introdução

O presente ponto apresenta de forma reduzida, mas estruturada, o levantamento do estado da arte sobre o impacto da presença pedonal sobre o funcionamento da rotunda, dando-se particular destaque aos trabalhos de investigação que procuram avaliar a influência que a presença pedonal assume na redução da capacidade das entradas da rotunda e no aumento dos tempos de percurso.

A rotunda para além de ser uma das soluções mais eficazes ao nível da fluidez do tráfego e que assegura elevados níveis de capacidade é cumulativamente uma solução tendencialmente económica quer em termos de investimento inicial quer de manutenção e conservação. Talvez por isso é uma solução cada vez mais utilizada para solucionar problemas, principalmente em meios urbanos. Uma vez que, em meios urbanos o fluxo de tráfego pedonal é significativo, é uma mais valia serem efetuados estudos relativamente ao impacto que os atravessamentos pedonais causam no funcionamento da rotunda.

3.2 Efeito dos atravessamentos pedonais na capacidade

Como referido anteriormente, as rotundas são consideradas, cada vez mais, como uma solução que assegura excelentes níveis de desempenho geral. É possível encontrar na bibliografia da especialidade um vasto número de modelos para estimação da capacidade e dos atrasos em rotundas, destacando-se os modelos desenvolvidos na Alemanha, Austrália, França, Reino Unido, Suíça e Estados Unidos da América (EUA). Contudo são raros os estudos que integram o efeito do peão sobre o seu funcionamento geral. É assim habitual, subestimar ou mesmo negligenciar o impacto que o peão assume sobre a capacidade e na segurança da rotunda (Hellinga & Sindi, 2012), optando-se frequentemente, ao nível do projeto, por aplicar os modelos tradicionais que não incluem esse efeito.

Na realidade, a maioria das rotundas em meios urbanos apresentam passagens pedonais localizadas na proximidade das zonas de entrada e de saída, podendo impor perturbações no funcionamento da rotunda. Tollazzi (1999b) defende que em rotundas com apenas uma via e com forte fluxo pedonal, as passagens para peões devem estar localizadas, aproximadamente, a 10 metros da delimitação do anel, por forma a permitir o armazenamento de dois veículos na zona de espera. A *Figura 3.1* ilustra os problemas que podem ocorrer na rotunda a nível do armazenamento (a), da limpeza (b) ou de ambos (c) devido ao efeito de “blocking-back” provocado pela presença de uma passagem para peões (Tollazzi, 1999b).

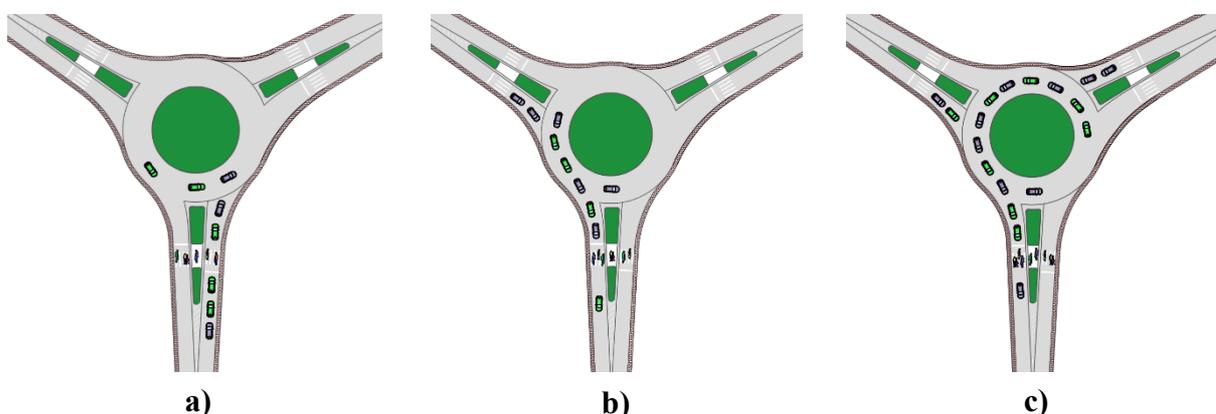


Figura 3.1 – Problemas a nível de armazenamento (a), limpeza (b) e armazenamento e limpeza em simultâneo (c) (adaptado de Tollazzi, 1999b))

A Figura 3.1 mostra que a capacidade da rotunda é condicionada pelo funcionamento do ramo da rotunda onde ocorre armazenamento (a), não tendo qualquer interferência com os restantes ramos da rotunda. No entanto, para problemas a nível da limpeza (b), a fila de espera evolui ao longo do ramo da saída causando atrasos na entrada adjacente imediatamente anterior, uma vez que a distribuição de peões no atravessamento não permite a dissipação da fila (Tollazzi, 1999b). Na presença de um fluxo pedonal elevado, a rotunda pode ter problemas a nível de armazenamento e limpeza em simultâneo (c), uma vez que a evolução da fila ao longo do anel da rotunda poderá levar ao bloqueio total da rotunda (Tollazzi, 1999b). Segundo Tollazzi (1999b) o bloqueio da rotunda depende do volume pedonal e da lei de distribuição das passagens na travessia.

Segundo Hellinga e Sindi (2012), face a volumes elevados de tráfego no anel de circulação, a capacidade da entrada tende a ser reduzida, mesmo na ausência de peões. Segundo o mesmo autor, a presença dos peões nestas condições não causa atrasos adicionais para os veículos, uma vez que se encontram em fila estacionária à espera de oportunidade para circular na rotunda (ver Figura 3.2). No caso em que o fluxo no anel de circulação é baixo, os veículos que se aproximam da entrada na rotunda não necessitam de parar para entrar no anel (ver Figura 3.3). Porém, na presença de peões no atravessamento da faixa de rodagem defende a redução da capacidade na entrada e aumento dos consequentes atrasos (Hellinga & Sindi, 2012).



Figura 3.2 – Elevado fluxo no anel circulatorio



Figura 3.3 – Baixo fluxo no anel circulatorio

O método tradicional americano, HCM 2010 (Highway Capacity Manual) é um dos poucos modelos adaptados para integrar a influência da presença pedonal. Na presença de peões, o seu impacto é introduzido no modelo através de um fator de ajustamento (de redução) na capacidade da entrada (Hellinga & Sindi, 2012; Tollazzi et al., 2006). A Figura 3.4 apresenta esses fatores de ajustamento, para o caso da rotunda com uma só via de circulação, em função dos volumes de veículos conflituantes e de peões envolvidos. A sua dedução é baseada nas seguintes assunções: uma proporção de veículos pesados de 5%; fator de conversão de um veículo pesado como sendo equivalente a dois veículos ligeiros; um fator de hora de ponta de 0,95 e uma durabilidade da análise de 15 minutos (Hellinga & Sindi, 2012). A análise realizou-se para seis níveis diferentes de procura pedonal. Meneguzzer e Rossi (2011) estudaram igualmente o impacto do peão na redução da capacidade da rotunda, considerando o tempo de ocupação do peão durante o atravessamento da passagem pedonal ao invés do fluxo pedonal (por exemplo, HCM 2010). Os valores do fator de redução da capacidade da rotunda foram obtidos em função da taxa de ocupação (razão entre o tempo de ocupação total e o tempo de observação total) e do fluxo rodoviário. O fator de redução da capacidade da rotunda para uma taxa de ocupação de 10% e para fluxos rodoviários de 200 veíc/h e 1 000 veíc/h toma os valores de 0,94 e 0,95, respetivamente, sendo notório que para baixos níveis de procura pedonal o impacto na capacidade tende a ser negligenciável, tendendo mesmo para zero face a elevados volumes de tráfego. Para taxas de ocupação de 60% esse impacto aumenta significativamente obtendo-se fatores de redução da capacidade de 0,55 e 0,65, para fluxos de tráfego de 200 veíc/h e 1 000 veíc/h, respetivamente (Meneguzzer & Rossi, 2011). Segundo o estudo de Meneguzzer e Rossi (2011) é notório que à medida que o fluxo viário aumenta o impacto do peão tende a ser irrelevante, sendo o valor da fator de redução da capacidade da rotunda muito próximo de 1,0.

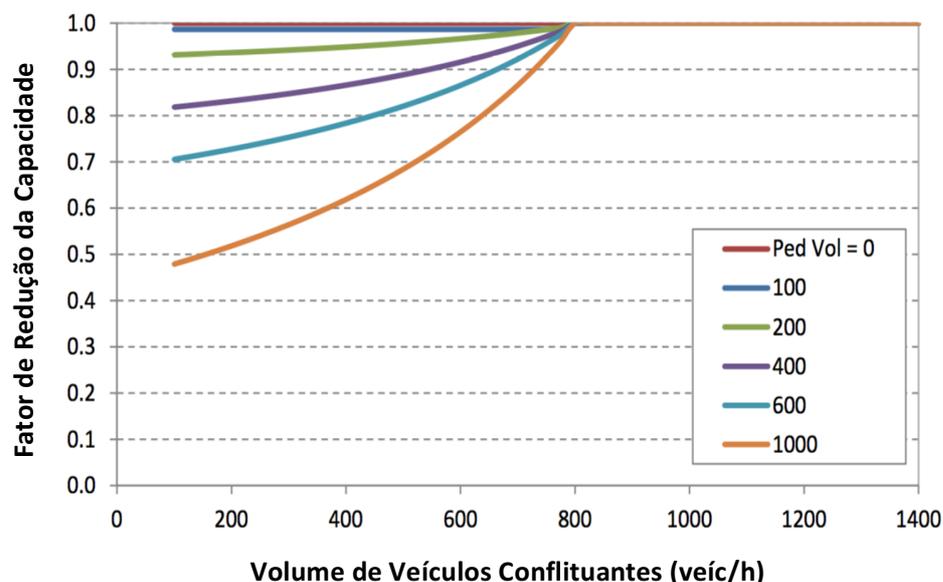


Figura 3.4 – Fator de Redução da capacidade numa entrada com via única
(Fonte: Hellinga & Sindi, 2012)

A análise da Figura 3.4 evidencia que para um fluxo de peões inferior a 200 peões/h não existe uma influência perceptível da presença do peão sobre a capacidade, pelo que o fator de ajustamento assume valores muito próximos de 1,0. Porém, para fluxos pedonais superiores a 200 peões/h a capacidade da rotunda tende a reduzir significativamente, designadamente para volumes de procura de tráfego conflitante, compreendidos entre 200 veíc/h e os 600 veíc/h. Quando o fluxo de veículos se encontra acima de 800 veíc/h o fator de redução toma o valor próximo de 1,0, independentemente do fluxo de peões. Conclui-se assim que, para elevados níveis de tráfego conflitante, os peões assumem uma influência negligenciável na capacidade da rotunda. Contudo, o fator de redução diminui para níveis reduzidos de procura de veículos no anel.

O método HCM 2010 apresenta ainda a influência do fluxo pedonal nos atrasos médios dos veículos. A Figura 3.5 permite estimar os atrasos médios dos veículos em função de volumes de procura de veículos conflitantes e pedonais. A Figura 3.5 foi deduzida para os mesmos valores dos parâmetros utilizados na obtenção da Figura 3.4, com a adição do volume de procura na entrada (constante em 300 veíc/h). A apresentação dos resultados foi reduzida, sendo apenas apresentados os resultados referentes a níveis de tráfego até 1 000 veíc/h, uma vez que para níveis de tráfego superiores se estimam atrasos superiores a 50 seg/veíc para todos os níveis de procura pedonal apresentados (Hellinga & Sindi, 2012).

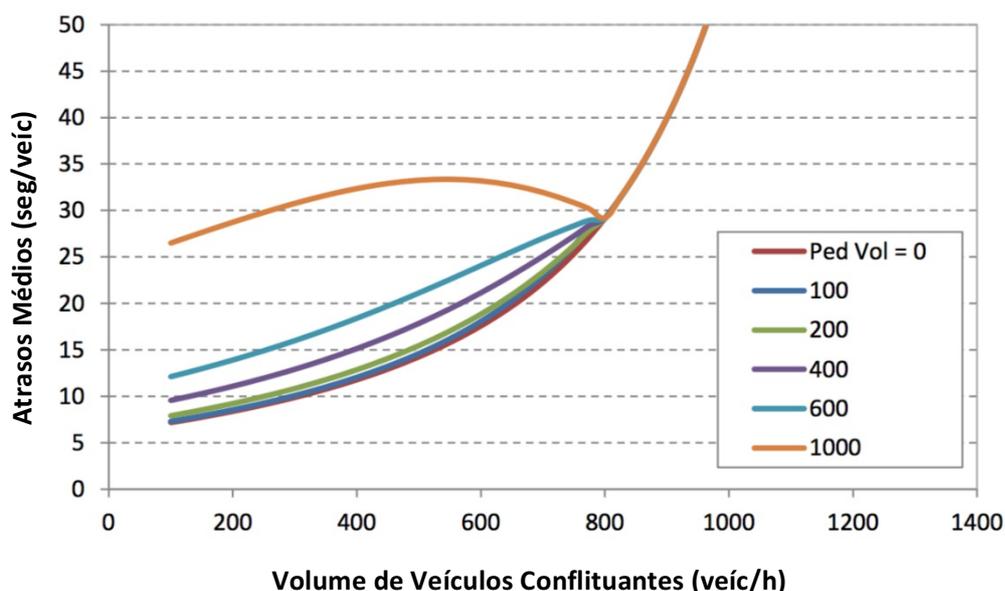


Figura 3.5 – Atrasos em função dos diferentes níveis de procura pedestre e de veículos conflitantes (*Fonte: Hellinga & Sindi, 2012*)

Na Figura 3.5 verifica-se que para níveis de tráfego superiores a 800 veic/h o volume de procura pedonal torna-se indiferente, uma vez que independentemente do valor adotado os atrasos assumem valores superiores a 50 seg/veic. Para fluxos pedonais inferiores a 600 peões/h os atrasos médios aumentam em função do aumento dos fluxos de veículos, como era expectável. No entanto, quando o volume de peões é superior a 1 000 peões/h os resultados foram inesperados (Hellinga & Sindi, 2012), ocorrendo uma diminuição nos atrasos médios quando o tráfego rodoviário se encontra, aproximadamente, entre os 600 veic/h e os 800 veic/h.

Atualmente, os métodos tradicionais de estimação de capacidade tendem a ser substituídos, cada vez mais, por modelos de simulação. Tollazzi et al. (2007), a partir do *software* de simulação AutoMod (AutoMod@2015), avaliaram o impacto do peão na capacidade de uma rotunda, em Moribor, causado pelos atravessamentos bidirecionais realizados pelo peão num dos ramos da rotunda, com apenas uma via de circulação no anel. Assumiram como base o fluxo de tráfego de 2 050 veic/h e o fluxo pedonal bidirecional, aproximadamente, de $P_1 = 375$ peões/h e $P_2 = 85$ peões/h, nas diferentes direções. Os diferentes cenários estudados pelos autores diferiram somente nos níveis de fluxos pedonais. Fixando o fluxo pedonal P_2 e majorando o fluxo pedonal P_1 até 60% o atraso máximo registado foi, aproximadamente, 19 segundos. Contudo, para um aumento de 70% do fluxo pedonal P_1 o atraso médio atingiu um valor máximo de 267 segundos (4 min 27 seg). Relativamente à capacidade da rotunda não ocorreram reduções significativas em ambos os casos (Tollazzi et al., 2007). Fazendo variar o fluxo pedonal P_2 e fixando o fluxo pedonal P_1 , os atrasos médios não se revelaram significativos independentemente dos fluxos pedonais admitidos (5,9 segundos). Segundo os resultados

obtidos por Tollazzi et al. (2007), nos cenários em que os fluxos pedonais P_1 e P_2 são majorados de igual forma, verificou-se um aumento significativo no tempo de atraso médio – 8 segundos e 37 segundos sempre que os fluxos pedonais assumem um aumento de 40% e 60%, respetivamente. O aumento brusco no atraso médio é evidente para fluxos pedonais superiores a 70%, atingindo valores extremamente elevados, 930 segundos (15 min 30 seg), sendo a redução da capacidade da rotunda aproximadamente 17%, considerando-se negligenciável para níveis inferiores a 70% (Tollazzi et al., 2007). Segundo Tollazzi et al. (2007), a presença de atravessamentos pedonais permitiu ainda que o tráfego rodoviário fluísse normalmente, estando associadas reduções mínimas na capacidade da rotunda.

Estes resultados estão genericamente em conformidade com os resultados obtidos por Relvão (2012). Este autor estudou a influência da presença pedonal na redução da capacidade de uma rotunda de duas vias, situada em Coimbra, recorrendo a técnicas de microssimulação. Os resultados obtidos permitem concluir que a presença pedonal não assume um impacto significativo na capacidade da entrada ou saída da rotunda, tornando-se mesmo negligenciável para passagens para peões que se localizem a mais de 15 metros da delimitação do anel (Relvão, 2012). Contudo, Relvão (2012) constatou que sempre que a passagem para peões se localiza a 5 metros do anel ocorre uma redução acentuada no desempenho da rotunda, para volume de peões extremamente elevado (> 600 peões/h) e para taxa de saturação superior a 70%. Ou seja, conclui que a presença pedonal apenas tem impacto na capacidade da rotunda, face a níveis de procura pedonal e de saturação extremamente elevados e, portanto, invulgares. Contudo, e particularmente no ramo da saída, foram registados aumentos significativos dos tempos médios de viagem e uma consequente redução da velocidade média.

Também Lu, Guan e Noyce (2011) avaliaram o impacto de diferentes tipos de passagens para peões (*Pelican* e *Puffin*) numa rotunda com o auxílio do modelo de microssimulação VISSIM (Vissim@2015). Concluíram que a passagem para peões do tipo *Puffin* registou menores atrasos médios para o peão em todos os cenários estudados (ver Quadro 3.1). A análise assumiu um fluxo de tráfego de base de 1 172 uvl/h e de 1 432 uvl/h para uma via e duas vias no anel de circulação, respetivamente e, com fluxos pedonais de 12 peões/h, 60 peões/h e 150 peões/h. Por forma a avaliar o atraso médio dos veículos provocados pela passagem para peões os autores majoraram o fluxo de tráfego de base em 35% (1 582 uvl/h) e 70% (1 992 uvl/h) para uma via e em 85% (2 649 uvl/h) e 170% (3 866 uvl/h) para duas vias no anel de circulação. Segundo Quadro 3.2, a passagem para peões do tipo *Puffin* é a que regista os menores atrasos para fluxos pedonais até 60 peões/h, independentemente do fluxo rodoviário considerado. Porém, para um fluxo de 150 peões/h a solução do tipo *Pelican* revela-se como a mais eficaz (Lu et al., 2011).

Quadro 3.1 – Tempo médio de atraso dos peões para uma e duas vias no anel de circulação (adaptado de Lu, Guan e Noyce, 2011)

Fluxo Pedonal	Passagem para peões	Atraso Médio (seg)	
		(uma via no anel de circulação)	(duas vias no anel de circulação)
12 peões/h	<i>Pelican</i>	19,12	22,93
	<i>Puffin</i>	9,95	11,25
60 peões/h	<i>Pelican</i>	43,84	45,40
	<i>Puffin</i>	21,95	23,29
150 peões/h	<i>Pelican</i>	49,04	51,10
	<i>Puffin</i>	33,60	33,80

Quadro 3.2 – Tempo médio de atraso dos veículos para uma e duas vias no anel de circulação (adaptado de Lu, Guan e Noyce, 2011)

Fluxo Pedonal	Passagem para peões	Atraso Médio (seg/uvl)			Atraso Médio (seg/uvl)		
		(uma via no anel de circulação)			(duas vias no anel de circulação)		
		1 172 uvl/h	1 582 uvl/h	1 992 uvl/h	1 432 uvl/h	2 649 uvl/h	3 866 uvl/h
12 peões/h	<i>Pelican</i>	2,73	3,66	5,08	1,50	2,05	3,21
	<i>Puffin</i>	1,40	1,73	2,24	0,6	0,88	2,27
60 peões/h	<i>Pelican</i>	7,27	9,85	19,06	4,00	5,14	13,39
	<i>Puffin</i>	6,56	9,00	17,45	3,00	3,96	5,16
150 peões/h	<i>Pelican</i>	8,40	11,61	25,74	4,31	5,70	41,93
	<i>Puffin</i>	11,99	22,1	38,64	5,41	7,99	54,45

3.3 Segurança

Em termos de segurança dos peões nas rotundas, verifica-se que os trabalhos científicos efetuados anteriormente ainda são extremamente escassos. A escassez de dados relativos à segurança dos peões pode ser explicada pelo número reduzido de atropelamentos registados em rotundas. Estudos realizados nos Estados Unidos da América, Europa e Austrália (FHWA, 2000) provaram que a aplicação de rotundas se associa habitualmente a um aumento da segurança pedonal. Segundo os estudos supracitados, o peão tende a correr menor risco de sofrer atropelamento, dadas as baixas velocidades dos veículos. Os separadores centrais apresentam-se como medidas de apoio ao peão extremamente eficientes, permitindo os atravessamentos em duas fases.

Na Holanda, realizou-se um estudo que consistiu em converter 181 cruzamentos em rotundas e obtiveram reduções de 73% em acidentes com peões e de 89% em atropelamentos com feridos (Schoon & Minnen, 1993). Neste estudo, todos os tipos de transporte beneficiam de uma maior segurança, como é mostrado no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Redução do número de acidentes em 181 cruzamentos convertidos em rotundas na Holanda (*Fonte: Schoon & Minnen, 1993*)

Modo	Acidentes com peões	Atropelamentos com feridos
Veículos de Passageiros	63%	95%
Ciclomotores	34%	63%
Bicicletas	8%	30%
Pedestres	73%	89%

Segundo (Tollazzi, 1999a), a segurança do peão diminui para rotundas com mais de duas vias de circulação, devido ao aumento do número de pontos de conflito e do aumento das velocidades praticadas. A presença de passagens de peões em rotundas aumenta a segurança e o conforto dos atravessamentos pedonais sendo, contudo, essencial que o seu posicionamento não cause atrasos excessivos ao tráfego rodoviário. A passagem de peões cumpre devidamente a sua função, de forma otimizada, se atrair um número máximo de peões, evitando atravessamentos em locais não adequados à sua prática. De modo a que se torne mais eficiente a utilização da passagem de peões, esta deve estar devidamente sinalizada e gozar de uma boa visibilidade para o tráfego rodoviário, assim também será possível aumentar a segurança do peão.

Jordan (1985) afirma que a preocupação com a segurança dos peões nas rotundas é uma falsa questão. O autor baseou a sua afirmação no estudo que realizou em 800 rotundas em Victoria, na Austrália, num período de 4 anos (1980-1983). Durante este estudo foram identificados 35 atropelamentos, aproximadamente 9 atropelamentos por ano, considerando esse valor extremamente baixo, contudo esta não é a visão da maioria da comunidade científica.

A maioria dos estudos científicos que abordam esta problemática incidem maioritariamente nos utilizadores invisuais. Segundo Guth et al. (2005), os peões invisuais necessitam cerca de 3 segundos a mais do que um peão com visão para detetar quaisquer falhas que ocorram naturalmente no tráfego. Se esse tempo for dado ao peão invisual reduz-se significativamente o número de lacunas a que o peão invisual pode estar sujeito nas rotundas de moderado a elevado volume de tráfego. Ashmead et al. (2005) realizaram um estudo comparativo em Nashville, Tennessee (TN), envolvendo peões com visão normal e invisuais enquanto atravessavam o ramo de uma rotunda com duas vias. O resultado do estudo ditou que os invisuais eram mais suscetíveis a perigos que possam ocorrer durante o atravessamento das vias, contudo o tempo de espera para estes foi superior ao dos peões com visão normal. Durante a travessia dos invisuais houve a necessidade, em 10 casos, do observador intervir como medida de segurança, devido ao facto do peão não se ter apercebido que se encontrava numa situação

potencialmente perigosa. Além disso, dos 144 atravessamentos no total, existiram 15 casos em que o peão com deficiência visual iniciou o atravessamento, mas não o conclui.

As rotundas sujeitas a elevados níveis de tráfego têm associadas um nível de ruído elevado o que dificulta a decisão por parte do peão com deficiência visual, uma vez que não consegue perceber se o automobilista reduz a velocidade para lhe ceder passagem, se está parado ou se avançou (Steiner et al., 2014). Segundo estes autores, os automobilistas são mais propensos a ceder a passagem aos peões: (i) nas entradas das rotundas relativamente às saídas; (ii) quando as velocidades são baixas; (iii) quando o peão é mais agressivo e força o atravessamento; (iv) quando o peão se encontra com uma bengala ou com um cão-guia. Constataram que, na presença de um peão invisual na entrada de uma rotunda, praticamente todos os condutores cederam a passagem ao peão, descendo esse valor para 15% no caso das saídas (Geruschat & Hassan, 2005). Contudo, Inman et al. (2005) concluíram que em rotundas com duas vias, apenas 14% dos automobilistas cedem a passagem a invisuais providos de uma bengala ou na companhia de um cão-guia. É importante ainda referir que a lei americana difere da portuguesa relativamente a prioridades de passagem. Dependendo dos estados, nos EUA, o peão só é considerado prioritário perante sinalização específica (Bastos Silva & Vasconcelos, 2009).

3.4 Considerações Finais

Em síntese, conclui-se que a segurança do peão tende a diminuir com o aumento da capacidade (número de vias) da rotunda, uma vez que o peão fica mais exposto ao risco. A agravar, as velocidades praticadas pelos condutores em rotundas com múltiplas vias são superiores às praticadas em rotundas compactas de uma via. Os estudos realizados relativamente à segurança incidem maioritariamente sobre o peão invisual. A escassez destes estudos deve-se muito provavelmente ao facto da rotunda assegurar níveis elevados de segurança, consubstanciada através de um número extremamente reduzido de atropelamentos em rotundas.

Relativamente à capacidade, verifica-se que as rotundas apresentam elevados níveis de capacidade e fluidez, designadamente quando comparado com outros cruzamentos tradicionais de nível. Como referido anteriormente, a presença pedonal é frequente neste tipo de soluções, uma vez que se inserem predominantemente em meio urbano. A presença pedonal tende a impor perturbações no desempenho da rotunda, porém a avaliação desse impacto ainda não está devidamente quantificado, sendo, no caso do modelo tradicional do FHWA, representado através de um fator de ajustamento na capacidade da rotunda, sem sustentação científica. Trabalhos mais recentes baseados em modelos de simulação permitiram concluir que o impacto da presença pedonal sobre a capacidade tende a ser negligenciável, sendo contudo acentuada nos tempos de percurso. Contudo, na sua maioria, estes estudos assentam na modelação de uma situação específica e na avaliação do impacto associado a passagens de peões simples. Considera-se assim continuar a justificar-se o desenvolvimento de trabalhos que contribuam

para um melhor entendimento deste efeito e, em particular, dos benefícios/limitações associados aos sistemas semaforizados com ou sem separador.

4 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

4.1 Introdução

Na década de 70 as técnicas de simulação vieram abrir novas perspectivas de investigação (Nance, 1993), cobrindo atualmente, diversas áreas de estudo (Chwif, 1999). Na última década, os modelos de simulação revelaram-se como ferramentas de análise de tráfego extremamente promissoras (Vasco, 2013), associadas a baixos custos e tempos de execução (Chwif, 1999). Com o desenvolvimento tecnológico e a constante evolução informática a possibilidade da resolução de problemas de grande escala tornou-se cada vez mais simples, rápida e eficaz (Vasco, 2013).

O presente trabalho foi desenvolvido tendo por base o *software* de microssimulação AIMSUN cedido pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. O *Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks* (AIMSUN) é um *software* de microssimulação desenvolvido nos anos 90, pelo Laboratório de Investigação Operacional e Simulação (LIOS) na Universidade Politécnica da Catalunha (UPC), Espanha (Barceló, 2001), e comercializado pela empresa *Transport Simulation Systems* (TSS). O AIMSUN destaca-se pela rapidez com que realiza as suas simulações e por fundir a modelação de procura viária, a alocação estática e dinâmica do tráfego que atualmente integra três submodelos de simulação: microscópico, mesoscópico e híbrido (AIMSUN@2015).

Segundo Barceló e Casas (2005), a aproximação do modelo simulado ao modelo real passa pela devida calibração dos parâmetros do modelo global de forma a representar fidedignamente o comportamento médio do condutor e seus parâmetros de variação. Cada veículo é tratado como uma entidade individual com características e comportamento próprio, fornecidas ao sistema e que permanecem constantes durante toda a simulação (Hallamann, 2011). As interações entre os veículos (e os outros utilizadores) são obtidas pela aplicação de algoritmos traduzidos em três micromodelos fundamentais: (i) o de *car-following* (modelo de seguimento do veículo) proposto por Gipps (Barceló, 2010) descreve os padrões de aceleração e desaceleração resultantes da decisão do condutor de um veículo, em função do movimento do veículo líder que circula à sua frente; (ii) o de *lane-changing* (mudança de via) que determina a mudança de via (obrigatória ou opcional) por parte do condutor face às condições prevalecentes de circulação; (iii) e o de *gap-acceptance* (intervalo de aceitação) que determina a tomada de decisão de um condutor para aceitar entrar na corrente prioritária numa interseção (UFSC@2015). Para simulações microscópicas, dever-se-á ter em conta o comportamento local do veículo, implicando que alguns parâmetros do modelo devam ser locais dependendo da

geometria e das condições de tráfego local. O tempo de reação do condutor e a aceleração máxima são dois parâmetros que o AIMSUN utiliza na simulação dos tempos de viagem e nos atrasos (Septarina, 2012). De acordo com Barceló e Casas (2005) a qualidade do simulador microscópico passa pela capacidade que possui para reproduzir o comportamento macroscópico. A escolha do *software* AIMSUN deveu-se ao facto de ser uma das mais conceituadas plataformas de simulação disponíveis no mercado, possuindo as condições necessárias para a elaboração do presente trabalho e ao facto do Departamento de Civil (DEC) possuir a licença académica permitindo ainda avaliar a interação peão-veículo.

O presente capítulo descreve todo o processo necessário para a construção do modelo, utilizando modelos de simulação. Iniciou-se com a recolha e posterior tratamento dos dados. De seguida, efetuou-se a calibração e validação do modelo por forma a apresentar resultados próximos da realidade. Importa referir que o foco do trabalho não incide na representação exata da realidade, mas na avaliação comparativa do impacto que o peão causa no desempenho de uma rotunda face a diferentes soluções de atravessamento, pelo que os trabalhos de calibração e validação não foram considerados como determinantes à qualidade dos trabalhos.

4.2 Seleção do caso estudo

A rotunda selecionada para servir de base ao presente estudo situa-se na interseção da Avenida Mendes Silva com a Rua Dom Pedro de Cristo. A mesma sofreu recentemente uma reformulação relacionada com a construção de um novo ramo de ligação à Rua Pedro Nunes (ver Figura 4.1). Nas proximidades da rotunda localizam-se o Centro de Saúde Norton de Matos e uma zona de feira (a) e o Quartel dos Bombeiros Sapadores de Coimbra (b) (ver Figura 4.2), polos de procura que originam, diariamente, elevados níveis de procura pedonal. A Figura 4.2 ilustra ainda o novo troço que permite acesso direto ao Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC) (c). A rotunda encontra-se ainda nas proximidades do centro comercial CoimbraShopping, da Escola Secundária Quinta das Flores e do Instituto Pedro Nunes (IPN). A rotunda selecionada está inserida na rede estruturante da cidade e, conseqüentemente, está sujeita a elevados níveis de procura de tráfego diário e a uma elevada procura pedonal em períodos do dia/semana. A seleção desta rotunda como estudo de caso procura dar continuidade a estudos já desenvolvidos anteriormente (Relvão, 2012) no Departamento de Engenharia Civil.

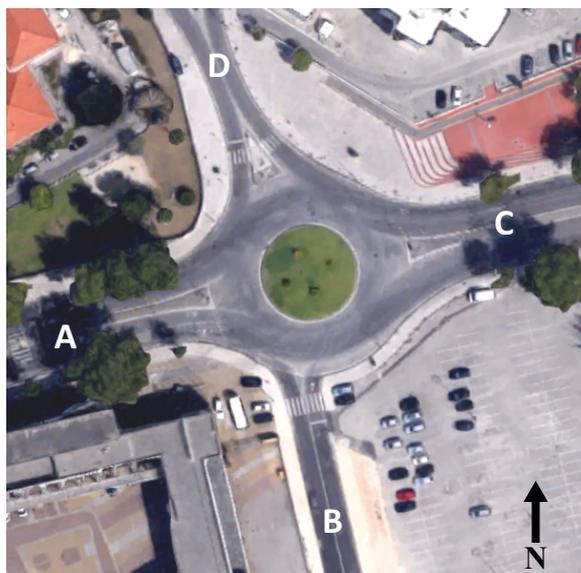


Figura 4.1 – Rotunda de estudo, Coimbra
(Fonte: Google@2015)

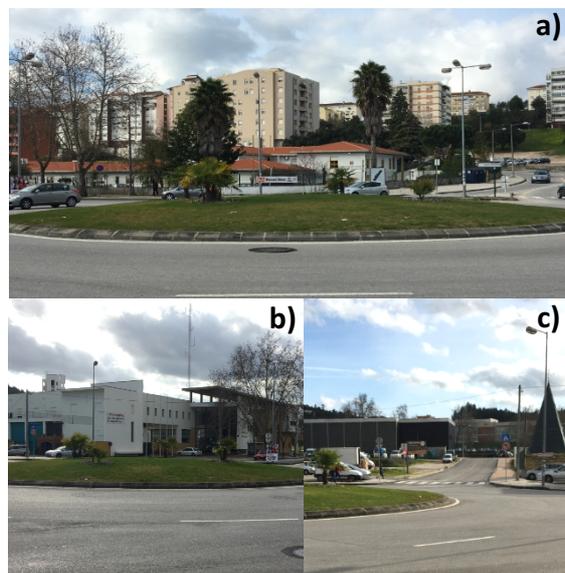


Figura 4.2 – Enquadramento da rotunda de estudo, Coimbra

4.3 Construção do modelo de microssimulação

O modelo de microssimulação foi suportado pelo *software* AIMSUN da empresa TSS. Os trabalhos incidiram em 4 fases fundamentais: (1) definição das matrizes de procura de veículos (matrizes O/D); (2) construção do modelo simulado; (3) trabalhos de calibração e, (4) validação do modelo.

4.3.1 Definição das matrizes de procura de veículos

4.3.1.1 Recolha de dados

Este ponto sintetiza os trabalhos de recolha de dados conducentes à construção da matriz origem/destino (O/D). A recolha de dados envolve, geralmente, um grande esforço em termos de recursos humanos. Nesse sentido, optou-se por realizar duas sessões de recolha de dados no dia 26 de novembro de 2015, limitando a análise ao período de ponta da manhã (8h00m – 9h00m) e ao período da tarde, fora da hora de ponta (15h10m – 16h10m). A recolha de dados envolveu 5 observadores no período da manhã, dos quais 4 registaram o fluxo de entrada na rotunda (segregando as viragens à direita) e a evolução das filas de espera, segregados por períodos de 15 minutos. Um outro observador ficou responsável pela recolha das repartições direcionais em cada uma das entradas, seguindo de forma aleatória a trajetória dos veículos, durante um período de 15 minutos em cada uma das 4 entradas na rotunda. A sessão da tarde envolveu 4 observadores, cada um responsável pela recolha de uma variável: fluxo global de entrada; fluxo global de saída; tráfego conflituante; fluxo de peões nos dois ramos da rotunda

(Avenida Mendes Silva). No caso do ramo A (atravessamento semaforizado), optou-se por contabilizar o número de ativações na botoneira do semáforo, ao invés do número de peões, uma vez que o fluxo pedonal não influencia o tempo de verde do semáforo. Nas Figura 4.3 e Figura 4.4 são esquematizados os postos de contagem, assim como os movimentos controlados por cada observador no período da manhã e da tarde, respetivamente.

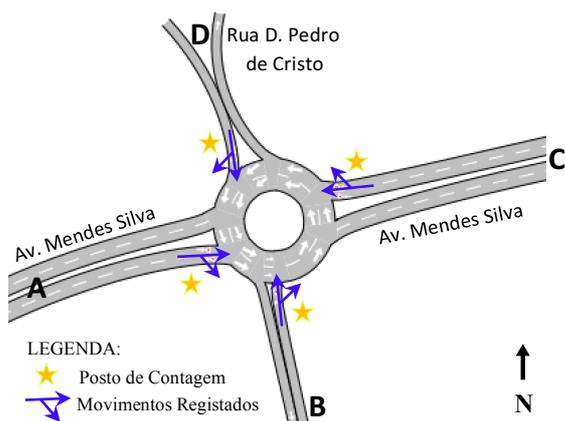


Figura 4.3 – Recolha de dados na hora de ponta (8h00m às 9h00m)

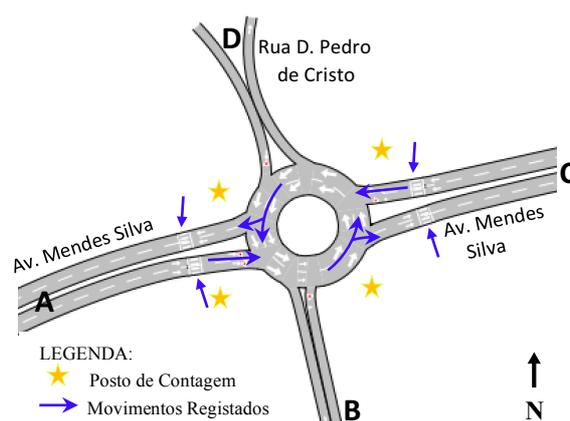


Figura 4.4 – Recolha de dados fora da hora de ponta (15h10m às 16h10m)

Refira-se que, os trabalhos de recolha e tratamento de dados serviram de base a duas dissertações de mestrado em curso no DEC, pelo que esta fase dos trabalhos envolveu a colaboração conjunta dos dois mestrandos.

4.3.1.2 Tratamento dos dados

Após a recolha de dados procedeu-se à compilação dos dados por forma a obter as matrizes origem/destino (O/D).

O Quadro 4.1 apresenta os volumes totais de veículos ligeiros e de pesados segregados por períodos de 15 minutos, identificando-se o período das 8h30m às 8h45m como o pico de ponta. A matriz O/D resultante tem a dimensão 4x4 correspondendo ao número de origens e de destinos, tendo-se introduzido no *software* uma matriz O/D correspondente a cada um dos períodos de 15 minutos (Quadro 4.2 a Quadro 4.5). De modo a simplificar a análise optou-se por considerar veículos equivalentes, utilizando um fator de conversão de um veículo pesado (na maioria autocarros) equivalente a dois veículos ligeiros.

Quadro 4.1 – Volumes de tráfego totais divididos em períodos de 15 minutos

Período	Ligeiros (veíc)	Pesados (veíc)
8:00 - 8:15	655	19
8:15 - 8:30	826	10
8:30 - 8:45	867	15
8:45 - 9:00	773	17

Durante a recolha de dados as viragens à direita foram segregadas e, a partir da repartição direcional calcularam-se as percentagens de viragens para os restantes movimentos direcionais. Os movimentos de inversão de marcha foram registados, todavia, optou-se por desprezá-los face aos seus valores negligenciáveis. Os Quadros 4.2 a 4.5 apresentam as matrizes O/D de veículos equivalentes durante o período da recolha de dados, sendo estas as matrizes O/D posteriormente inseridas no *software* AIMSUN. O período de simulação considerado foi de uma hora (8h00m às 9h00m), contudo e de forma a garantir a estabilidade de funcionamento da rede, optou-se por alargar os trabalhos de simulação a 1h30m, desprezando-se os primeiros 15 minutos (período de carregamento da rede) e os últimos 15 minutos (de modo a retirar da análise o efeito associado aos veículos ainda dentro dos centróides).

Quadro 4.2 – Matriz O/D de veículos equivalentes, no período 8:00 – 8:15

O/D	A	B	C	D	Total
A	0	20	252	119	391
B	15	0	1	2	18
C	170	15	0	8	193
D	78	9	4	0	91
Total	263	43	258	129	693

Quadro 4.3 – Matriz O/D de veículos equivalentes, no período 8:15 – 8:30

O/D	A	B	C	D	Total
A	0	36	240	121	397
B	44	0	4	16	64
C	203	18	0	16	237
D	95	35	18	0	148
Total	342	89	262	153	846

Quadro 4.4 – Matriz O/D de veículos equivalentes, no período 8:30 – 8:45

O/D	A	B	C	D	Total
A	0	13	268	132	413
B	37	0	2	15	54
C	235	21	0	22	278
D	97	36	19	0	152
Total	369	70	289	169	897

Quadro 4.5 – Matriz O/D de veículos equivalentes, no período 8:45 – 9:00

O/D	A	B	C	D	Total
A	0	27	266	131	424
B	14	0	1	7	22
C	165	15	0	29	209
D	113	26	13	0	152
Total	292	67	280	167	807

4.3.2 Construção do modelo simulado

O modelo selecionado para o trabalho de investigação foca-se apenas numa rotunda com 4 ramos afluentes, os ramos A e C são constituídos por duas faixas de rodagem contendo duas vias em cada sentido e os ramos B e D de faixa única com uma via em cada sentido.

Na Figura 4.5 é apresentado o modelo da rotunda, assim como os quatro centróides, correspondendo à geração e atração de viagens de veículos em cada um dos ramos de entrada. A rotunda apresenta as seguintes características geométricas: DCI (diâmetro do círculo inscrito) de 40 metros; largura da faixa de rodagem do anel de circulação de 11 metros; largura de entrada de 3,5 metros e 7,0 metros para uma via e duas vias, respetivamente.

A codificação da rede teve como suporte o *software* AIMSUN e a cartografia da zona de estudo em formato AutoCAD fornecida pela Câmara Municipal de Coimbra. Foram definidas duas classes de utilizadores: “car” e “pedestrian” representando os veículos ligeiros equivalentes e os peões, respetivamente. Todos os ramos da rotunda são providos de uma passagem para peões. De forma a segregar os efeitos, optou-se por estudar individualmente e separadamente os ramos A e C (correspondentes aos ramos com maior procura de veículos e de peões) associados à passagem para peões regulada por sinais luminosos (ramo A) e à passagem para peões (ramo C). No caso do ramo A, foi considerado um semáforo regulado a tempos fixos e no ramo C, a integração do peão foi apoiada pela ativação da sub-rotina *Legion*. A materialização das travessias pedonais obrigou à criação de mais quatro centróides (para geração e atração de peões), localizados em cada um dos extremos das travessias, permitindo assim a simulação de atravessamentos bidirecionais (ver Figura 4.6).

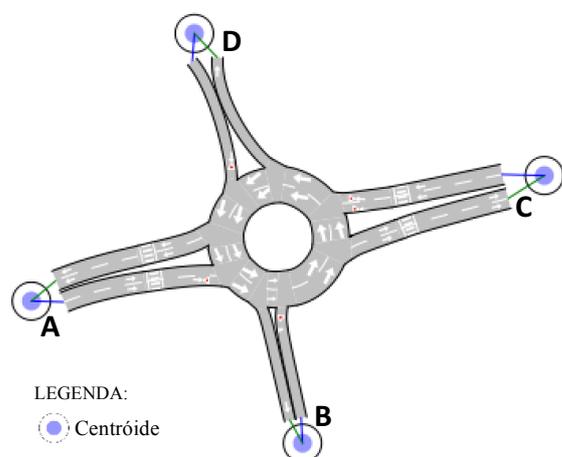


Figura 4.5 – Codificação da rotunda modelo e centróides

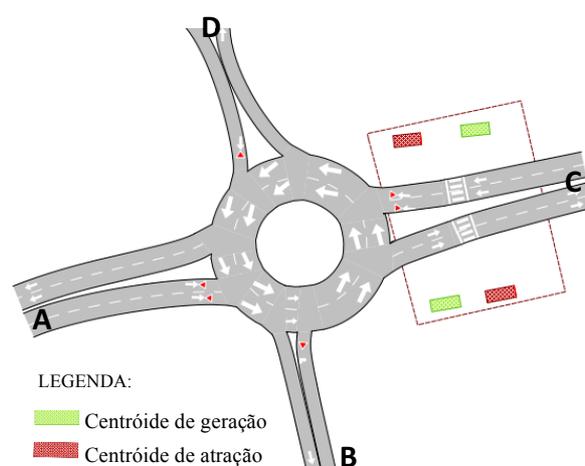


Figura 4.6 – Identificação da zona e dos centróides para o fluxo de peões

4.4 Calibração e validação do modelo

Os trabalhos de calibração e de validação do modelo procuram conferir robustez ao modelo simulado, garantindo que os resultados simulados se aproximam, dentro de uma margem de erro aceitável, dos dados observados. Atendendo a que o objetivo deste trabalho se centra no desenvolvimento de análises comparativas, os trabalhos de calibração e de validação não são considerados fundamentais, desde que se valorizassem os valores relativos em detrimento dos absolutos.

4.4.1 Calibração

O processo de calibração procura aproximar os resultados simulados dos valores observados em campo. Tal aproximação apoia-se num processo de ajuste de um conjunto mais ou menos alargado de parâmetros de calibração de modo a garantir que a diferença entre os valores simulados e observados se situa dentro de intervalos aceitáveis. O *software* assume, por defeito, valores padrão para diferentes parâmetros, resultantes de trabalhos de investigação locais. Contudo, importa referir que esses parâmetros de calibração podem assumir valores diferenciados consoante a cidade ou país, atendendo a que o comportamento do condutor varia de região para região, em função das práticas locais e da legislação vigente.

De modo a simplificar os trabalhos de calibração, optou-se por limitar o ajuste a dois parâmetros: (i) tempo de reação do condutor; (ii) *speed acceptance*, mantendo os restantes parâmetros com os valores por defeito atribuídos pelo *software* AIMSUN. O parâmetro relativo ao tempo de reação do condutor assume, por defeito, o valor de 0,75 segundos, sendo que os trabalhos de calibração levaram a considerar um valor final de 0,8 segundos. Por sua vez o ajuste do *speed acceptance* (representativo da relação entre a velocidade média registada localmente e a velocidade máxima local, aqui considera 40 km/h) foi apoiado pela recolha da distribuição das velocidades em duas secções da Avenida Mendes Silva (uma situada no ramo A e outra no ramo C). Tal distribuição justificou a adoção dos seguintes parâmetros de base: $S_{méd} = 1,14$; $S_{min} = 0,92$; $S_{máx} = 1,32$).

A avaliação da qualidade do ajuste dos parâmetros baseou-se na visualização da evolução das filas de espera, forçando o modelo a reproduzir o comprimento das filas registadas durante a sessão de recolha de dados. Refira-se que por uma questão de simplificação, o processo de calibração não teve em consideração a presença pedonal.

4.4.2 Validação

O processo de validação do modelo permitiu avaliar a proximidade entre os valores simulados e os valores observados em campo. A análise englobou cinco variáveis, recolhidas em simultâneo, segregadas em períodos de 5 minutos: fluxo global de entrada; fluxo global de

saída; fluxo conflituante; fluxo de peões e o número de vezes que a botoneira do semáforo foi acionada. Por forma a ser possível a integração do peão na validação, foi necessário recorrer-se ao simulador de peões *Legion*. A ativação do simulador *Legion* obrigou à utilização de um intervalo de simulação de 0,6 segundos, obrigando assim a alterar o tempo de reação de 0,8 segundos (valor assumido na calibração) para 0,6 segundos, simulando um condutor mais agressivo. Esta alteração tende a afetar os resultados finais de forma não negligenciável. Contudo e por se tratar de análises comparativas, onde este valor se manteve inalterado em todas as análises, este efeito foi ignorado.

O processo de validação passou pelas seguintes fases de trabalho:

- Extrapolação para uma hora dos volumes de tráfego e de peões recolhidos no campo, segregados em períodos de 5 minutos;
- Construção das matrizes (O/D) de tráfego de modo a salvaguardar uma distribuição do tráfego conflituante de 50/50 por via no anel de circulação;
- Inserção da matriz (O/D) de peões e do número de ações na botoneira do semáforo;
- Consideração de um período de simulação de 1h30m, permitindo a exclusão dos primeiros e dos últimos 15 minutos de simulação, por tenderem a corresponder a resultados instáveis;
- Execução de 10 replicações por análise, considerando o valor médio;
- Obtenção do Quadro 4.6 por forma a sintetizar a proximidade dos fluxos observados com a média dos fluxos simulados.

Relativamente aos peões assumiu-se uma repartição bidirecional de 50/50 para cada direção e, por forma a simplificar, admitiu-se uma distribuição uniforme do número de ativações na botoneira do semáforo, solução a tempos fixos.

Quadro 4.6 – Fluxos observados e modelados (uvl/h e peões/h), de períodos de 5 minutos extrapolados para 1 hora

Minuto	Ramo A							Ramo C							
	Entrada		Saída		Movimento Conflituante		Ativações	Entrada		Saída		Movimento Conflituante		Peões	
	Observado	Modelado	Observado	Modelado	Observado	Modelado		Observado	Modelado	Observado	Modelado	Observado	Modelado	Observado	Modelado
5	888	878	780	787	144	145	24	744	742	708	701	228	221	72	70
10	756	752	768	767	228	227	48	732	727	576	568	288	276	168	168
15	972	954	756	742	192	204	36	576	566	684	674	360	349	96	95
20	852	844	816	812	180	183	24	684	679	684	679	360	354	120	119
25	780	768	1092	1092	264	270	36	936	933	720	709	336	334	228	234
30	1008	986	936	935	156	161	36	816	810	756	754	396	387	72	71
35	984	975	840	832	228	231	24	648	642	900	898	384	380	132	134
40	984	968	864	969	168	170	36	636	741	840	842	240	232	132	135
45	876	868	936	945	192	191	24	744	739	792	777	276	269	144	143
50	840	834	864	849	168	172	24	804	799	660	663	300	287	84	81
55	948	928	1164	1169	216	220	36	936	936	804	801	396	393	60	60
60	1116	1098	936	929	240	242	36	828	823	864	865	432	428	48	49

Os resultados obtidos apresentados no Quadro 4.6 para os ramos A e C. O paralelismo entre os valores focou-se nas variáveis relativas ao fluxo de veículos (tráfego global de entrada; tráfego global de saída; fluxo conflituante) e ao fluxo pedonal. A análise dos resultados evidencia uma proximidade entre os valores simulados e observados, atingindo um erro máximo de 16,5% para o fluxo de tráfego e 4% para o fluxo pedonal. Apesar das discrepâncias de valores, considerou-se o modelo de microsimulação como validado.

4.5 Definição dos cenários a estudar

A definição dos cenários teve em consideração cinco fatores fundamentais: (i) tipo de atravessamento pedonal; (ii) grau de saturação da rotunda; (iii) procura pedonal; (iv) localização do atravessamento e (v) existência ou não de separador central.

Foram consideradas duas soluções distintas para o atravessamento pedonal: passagem para peões e passagem para peões semaforizada do tipo *Pelican*. As análises assentaram numa análise comparativa, tendo como situação de referência o grau de saturação da rotunda de 100%, na ausência de peões. Para o efeito e tendo por base as matrizes O/D originais, o nível de procura de tráfego foi incrementado de forma sistemática até ser atingida, em pelo menos uma das entradas da rotunda, a formação de fila de espera estacionária, por um período de pelo menos 5 minutos. Em termos globais atingiu-se uma capacidade de cerca de 4 200 uvl/h para o conjunto das quatro entradas.

De modo a garantir resultados estáveis face ao efeito estocástico do tráfego, optou-se, para cada cenário, por adotar a média de 10 replicações. A análise dos diferentes cenários ocorreu num período de 1h30m de simulação, tendo-se rejeitado os primeiros e os últimos 15 minutos da simulação.

4.5.1 Passagem para peões

Nas análises aplicadas à passagem para peões, apenas se considerou a travessia pedonal localizada no ramo C da rotunda (ver Figura 4.7). Por forma a obter uma variedade de situações, consideraram-se os seguintes cenários:

- Níveis de saturação da rotunda (S): 60%, 80%, 100% e 120%;
- Fluxo de peões (P): 0, 100, 300, 500 e 700 peões/h;
- Localizações para a travessia (N): 5 m (N=1), 10 m (N=2) e 15 m (N=3).

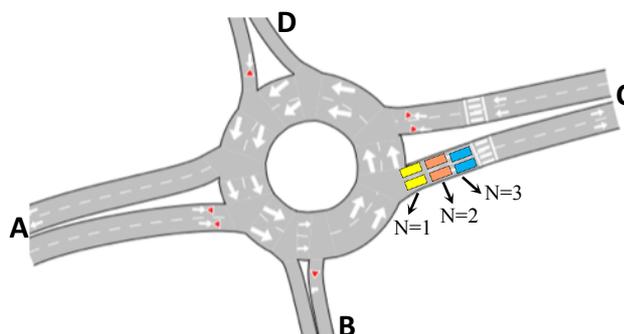


Figura 4.7 – Localizações da passagem para peões, no ramo C

Importa referir que se assumiu uma repartição bidirecional para o fluxo pedonal de 50/50 em cada direção por forma a simplificar a análise. Os tempos de verde intermitente e de verde fixo foram de 5 e 10 segundos, respetivamente.

4.5.2 Passagem para peões com sinalização luminosa

Na presença de uma passagem para peões com sinalização luminosa do tipo *Pelican* o nível de fluxo de peões deixa de ser relevante, sendo condicionante o número de ativações da botoneira do semáforo. Assim, pretende-se avaliar o impacto que uma passagem para peões semaforizada, no ramo A, causa no desempenho da rotunda. Consideraram-se para a análise os seguintes cenários:

- Atravessamento em 1 e 2 fases;
- Níveis de saturação da rotunda (S): 60%, 80%, 100% e 120%;
- Número de ativações da botoneira numa hora: 15, 30, 45, 64 e 84 (apenas para 2 fases);
- Localizações para a travessia (N): 5 m (N=1), 15 m (N=3) e 25 m (N=5).

À semelhança de trabalhos de investigação anteriores (Bastos Silva & Vasconcelos, 2009) assumiu-se um tempo mínimo de verde de 30 segundos para os veículos e uma velocidade para os peões de 1m/s, apesar da velocidade imposta por lei ser de 0,4m/s (Decreto-Lei 163/2006).

Na simulação as ativações ocorrem de forma uniforme e, na análise da passagem com regulação luminosa com duas fases as direções do peão são analisadas independentemente (ver Figura 4.8 e Figura 4.9). O movimento bidirecional dos peões não foi integrado na análise com duas fases de atravessamento por corresponder a uma solução com apenas uma fase. Os tempos de verde intermitente e de verde fixo foram de 3 e 6 segundos, respetivamente.

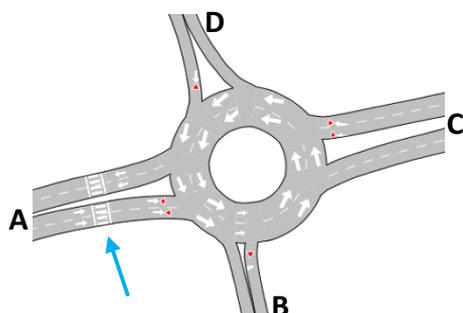


Figura 4.8 – Movimento direcional A do peão

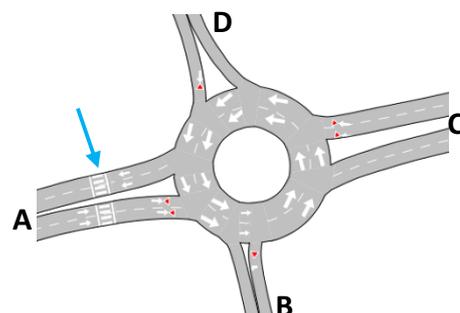


Figura 4.9 – Movimento direcional B do peão

4.6 Considerações Finais

A microssimulação de tráfego tem-se afirmado como promissora na avaliação do desempenho da infraestrutura rodoviária, particularmente face a elementos rodoviários que envolvem a presença de diferentes tipos de utilizadores. Este trabalho recorre à plataforma AIMSUN, para avaliar o efeito do peão na capacidade da rotunda, face a duas soluções diferenciadas: passagem para peões e passagem semaforizada do tipo *Pelican*. Tendo por base esta aplicação foi possível criar um modelo suficientemente robusto capaz de representar uma realidade próxima da existente numa rotunda real em Coimbra.

Este modelo foi construído para apoiar as análises comparativas apresentadas no capítulo seguinte, tendo por base um conjunto alargado de cenários que procura introduzir o efeito de diversos fatores.

5 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE ATRAVESSAMENTOS PEDONAIIS NA CAPACIDADE DA ROTUNDA

5.1 Introdução

O presente capítulo centra-se na apresentação dos resultados das análises realizadas, tendo por base os diferentes cenários definidos no capítulo anterior. Os resultados assentam na avaliação do desempenho da rotunda tendo por base indicadores representativos do funcionamento da rotunda em termos de capacidade.

5.2 Definição dos indicadores de desempenho

O programa de simulação AIMSUN oferece ao utilizador um conjunto alargado de indicadores de desempenho que permitem avaliar o funcionamento quer global da rotunda, quer local, designadamente ao nível de uma determinada secção. No âmbito do presente trabalho foram considerados os seguintes indicadores de desempenho, aplicados às secções de estudo representadas na Figura 5.1:

- Fluxo Médio (veíc/h);
- Tempo médio de viagem (seg/veíc).

Secções de estudo (ver Figura 5.1):

- Secção 1 (entrada do ramo C);
- Secção 2 (saída no ramo C);
- Secção 3 (entrada do ramo A);
- Secção 4 (saída no ramo A).

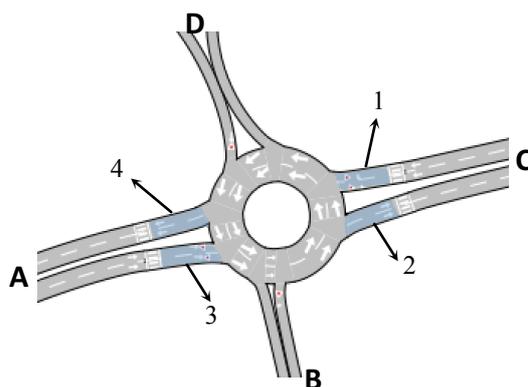


Figura 5.1 – Identificação das secções de estudo

O levantamento do tempo médio de viagem foi aplicado ao movimento de ida em frente por forma a simplificar a análise.

5.3 Análise dos resultados

O presente ponto incide sobre a avaliação do efeito da presença pedonal sobre o funcionamento da rotunda a partir de análises efetuadas para duas soluções: (1) passagem para peões e, (2) passagem para peões com sinalização luminosa.

Por forma a clarificar a análise dos resultados, optou-se por apresentar de forma mais detalhada os gráficos relativos aos indicadores de desempenho do fluxo médio de entrada e do tempo médio de viagem na entrada dos ramos A e C.

5.3.1 Passagem para peões

No ramo C foram consideradas as seguintes combinações de valores:

- distâncias para a localização de uma passagem para peões (5 m, 10 m e 15 m);
- taxa de saturação da rotunda (60%, 80%, 100% e 120%), mantendo a repartição direcional real observada;
- fluxo pedonal (100, 300, 500 e 700 peões/h).

As Figura 5.2 até à Figura 5.7 resumem os resultados obtidos do fluxo médio e do tempo médio de viagem para os diferentes cenários na secção de entrada do ramo C. Os resultados relativos ao fluxo médio e ao tempo médio de viagem, na secção de saída do ramo C, são apresentados nas Figura 5.8 à Figura 5.13.

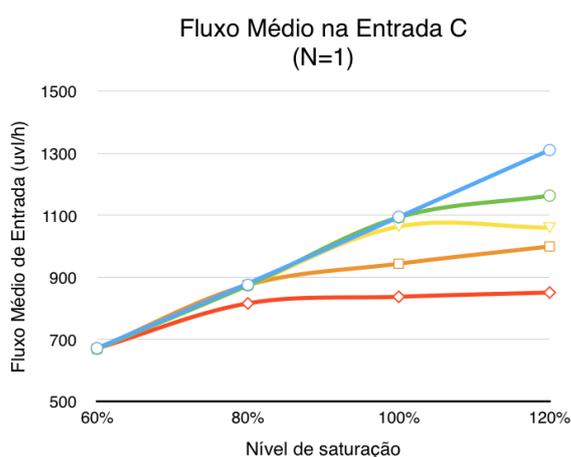


Figura 5.2 – Fluxo médio na entrada C (N=1)

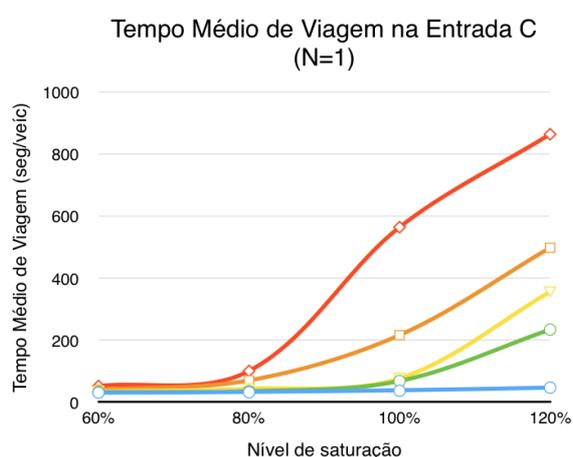


Figura 5.3 – Tempo médio de viagem na entrada C (N=1)

◇ 0 peões/h ◇ 100 peões/h ◇ 300 peões/h ◇ 500 peões/h ◇ 700 peões/h

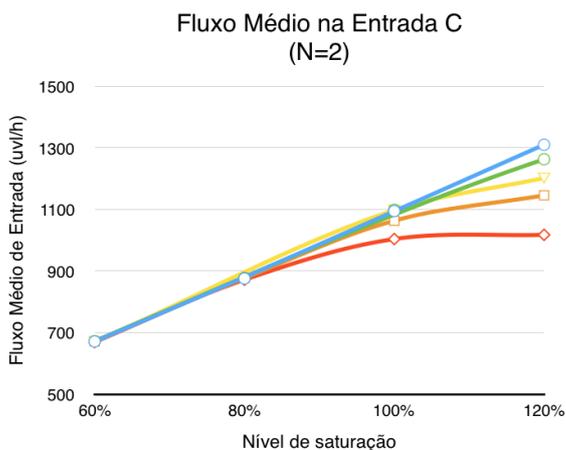


Figura 5.4 – Fluxo médio na entrada C (N=2)

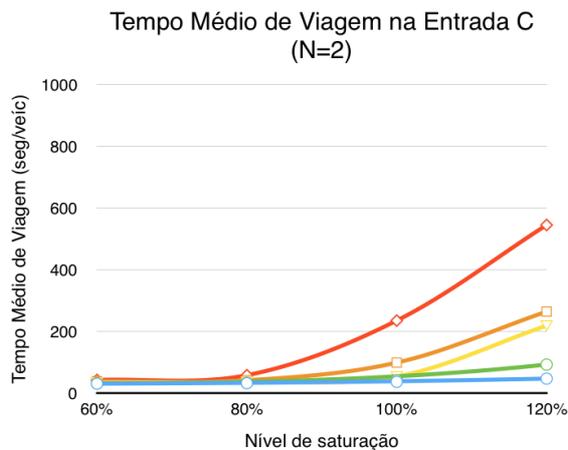


Figura 5.5 – Tempo médio de viagem na entrada C (N=2)

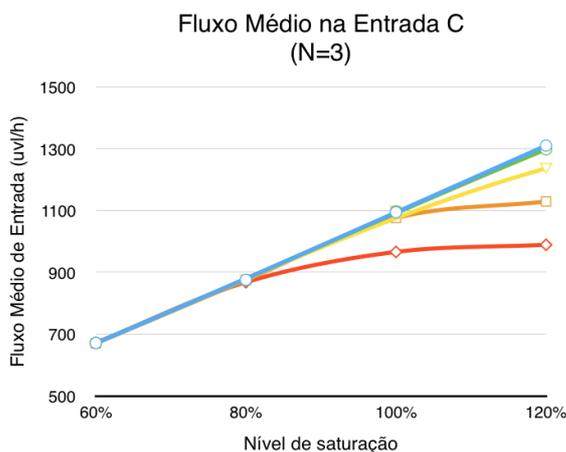


Figura 5.6 – Fluxo médio na entrada C (N=3)

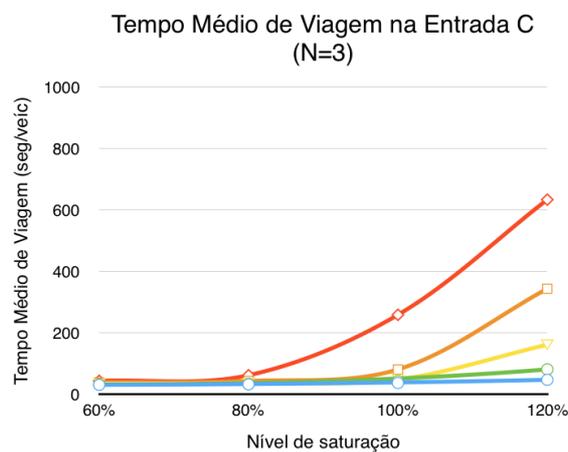


Figura 5.7 – Tempo médio de viagem na entrada C (N=3)

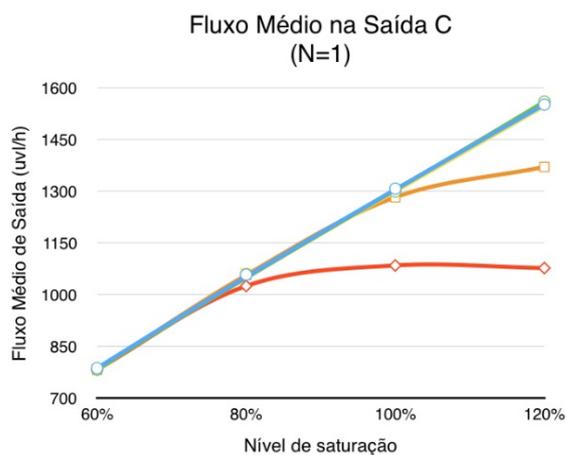


Figura 5.8 – Fluxo médio na saída C (N=1)

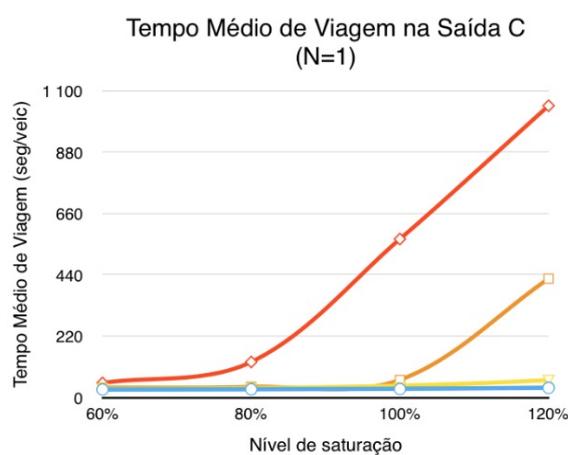


Figura 5.9 – Tempo médio de viagem na saída C (N=1)

○ 0 peões/h ○ 100 peões/h ▼ 300 peões/h □ 500 peões/h ◇ 700 peões/h

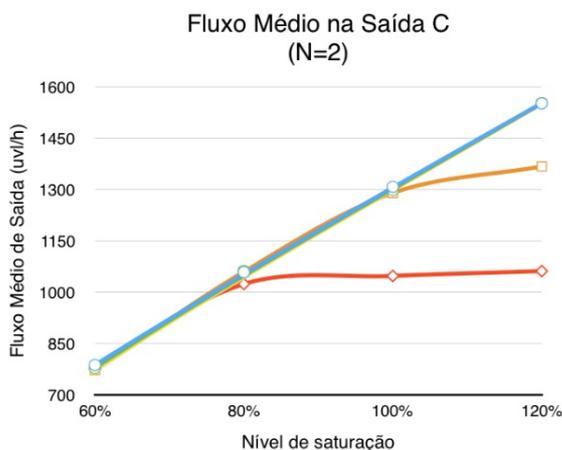


Figura 5.10 – Fluxo médio na saída C (N=2)

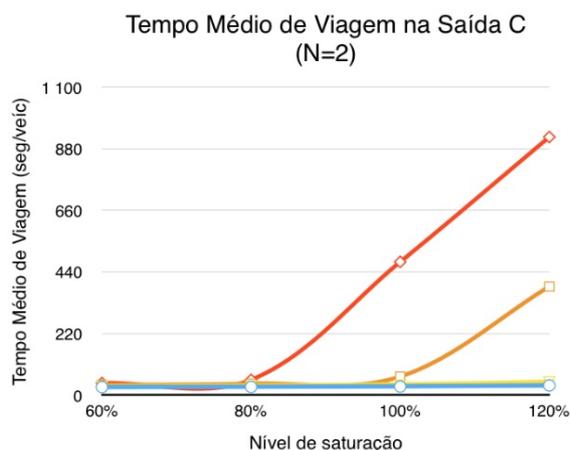


Figura 5.11 – Tempo médio de viagem na saída C (N=2)

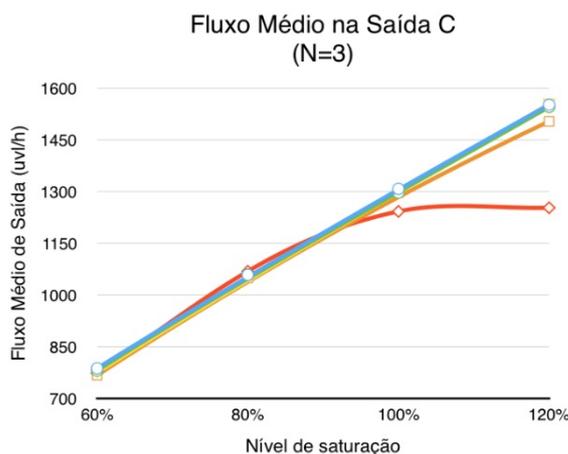


Figura 5.12 – Fluxo médio na saída C (N=3)

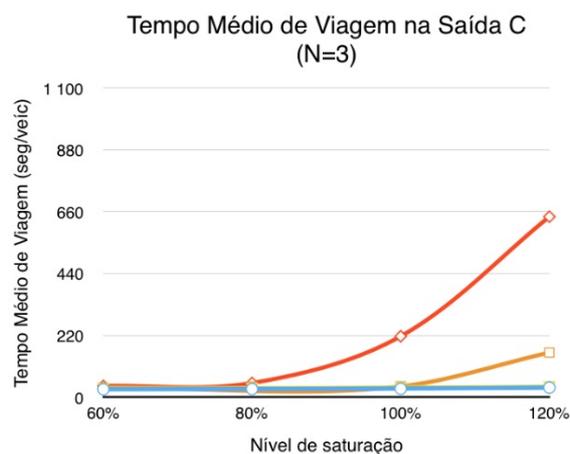


Figura 5.13 – Tempo médio de viagem na saída C (N=3)

◊ 0 peões/h ◊ 100 peões/h ✦ 300 peões/h ◻ 500 peões/h ◊ 700 peões/h

Face aos resultados obtidos, verifica-se que, independentemente do fluxo pedonal, o fluxo médio na entrada aumenta à medida que o nível de saturação aumenta, assumindo um valor máximo, aproximadamente, de 1 300 uvl/h para uma taxa de saturação igual a 120%. Tal deve-se ao facto de, apesar da rotunda estar saturada, esta entrada aos 100% de grau de saturação, manter uma reserva considerável de capacidade. Por sua vez, o impacto do peão na capacidade da entrada C, independentemente do fluxo pedonal, é negligenciável para níveis de saturação inferiores a 80%. Para níveis de saturação superiores a 80%, a presença do peão assume uma expressão significativa, principalmente para N=1. No entanto, para níveis de saturação entre os 80% e os 100%, o impacto do peão só se faz sentir para fluxos pedonais acima dos 500 peões/h.

A presença pedonal nos tempos médios de viagem na entrada releva-se, de igual forma, praticamente negligenciável para fluxos de saturação inferiores a 80%, independentemente do fluxo pedonal. Quando o nível de saturação assume valores entre 80% e 100%, o impacto do peão influencia de forma significativa os tempos médios de viagem para $P > 500$ peões/h, assumindo maior expressividade para $N=1$. Apenas para a situação de condições saturadas (grau de saturação $> 100\%$), o impacto do peão causa aumentos nos tempos médios de viagem, independentemente do fluxo pedonal. Para $N=1$, a influência da presença do peão torna-se ainda mais gravosa, traduzindo-se num aumento máximo do tempo médio de viagem na entrada de 46 segundos para 14 minutos.

Resultados similares são obtidos quando avaliado o impacto causado pelo atravessamento pedonal na redução do fluxo médio e dos tempos médios de viagem na secção de saída (Figura 5.8 à Figura 5.13). No entanto, para níveis superiores a 80%, o impacto da presença pedonal na capacidade de saída não se revela tão acentuado comparativamente à redução da capacidade na entrada, chegando a ser praticamente menosprezável para fluxos pedonais inferiores a 500 peões/h, para $N=3$. Por sua vez, os tempos médios de viagem na saída são afetados apenas para fluxos pedonais superiores a 300 peões/h.

Conclui-se assim que a presença de uma passagem para peões na entrada e na saída da rotunda tende a influenciar de forma pouco significativa a capacidade da entrada e da saída, designadamente para condições não saturadas de circulação. Apesar disso, os tempos médios de viagem tendem a aumentar de forma quase exponencial com o aumento do fluxo pedonal, sendo notório esse aumento para níveis de saturação superiores a 80%. O impacto do atravessamento pedonal aumenta à medida que a travessia se aproxima da delimitação do anel de circulação da rotunda.

5.3.2 Passagem para peões com sinalização luminosa

Para avaliação da influência dos atravessamentos pedonais numa passagem semaforizada recorreu-se à travessia localizada no ramo A (ver Figura 5.14). Foi considerada a tipologia do tipo *Pelican*, associada a um conjunto de combinações resultantes das seguintes variações:

- distâncias ao anel de circulação da rotunda (5 m, 15 m e 25 m);
- taxa de saturação da rotunda (60%, 80%, 100% e 120%), mantendo a repartição direcional real observada;
- número de ativações da botoneira (15, 30, 45; 64 e 84 (apenas para 2 fases)).

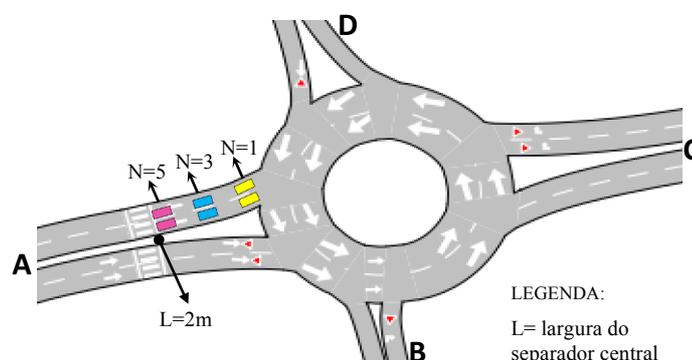


Figura 5.14 – Localizações da passagem semaforzada, no ramo A

Neste ponto são apresentados os resultados obtidos em termos de fluxo médio e do tempo médio de viagem na entrada para soluções em que o atravessamento ocorre numa fase e em duas fases. Os indicadores de desempenho relativos à secção de saída do ramo A podem ser consultados no Anexo A e Anexo B para o atravessamento numa fase e em duas fases, respetivamente. Na análise dos resultados obtidos, deve ter-se em conta que o aumento do número de ativações não corresponde a um aumento proporcional do fluxo de peões. O número de ativações é um valor representativo da periodicidade dos atravessamentos pedonais, sendo que por simplificação se considerou que as ativações ocorrem de forma uniforme ao longo do tempo (o que em termos de capacidade da entrada se traduz numa situação mais penalizante do que a realidade, onde a lei de chegada dos peões segue uma distribuição aleatória).

5.3.2.1 Atravessamento numa fase

Neste ponto optou-se por abordar o impacto causado pela presença do peão no funcionamento da rotunda. Tendo por base os valores de referência internacional (AustRoads, 1995; TRB, 2010), optou-se por considerar a velocidade pedonal igual a 1m/s, enquanto referência de um peão em marcha normal.

As Figura 5.15 à Figura 5.20 apresentam os resultados adquiridos na secção de entrada, para os diferentes N. Os indicadores de desempenho referentes à secção de saída para o atravessamento numa fase podem ser consultados no Anexo A (Figura A.1 à Figura A.6).

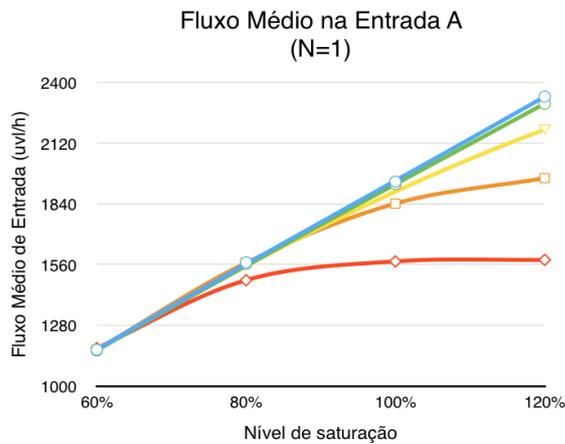


Figura 5.15 – Fluxo médio na entrada A (N=1)

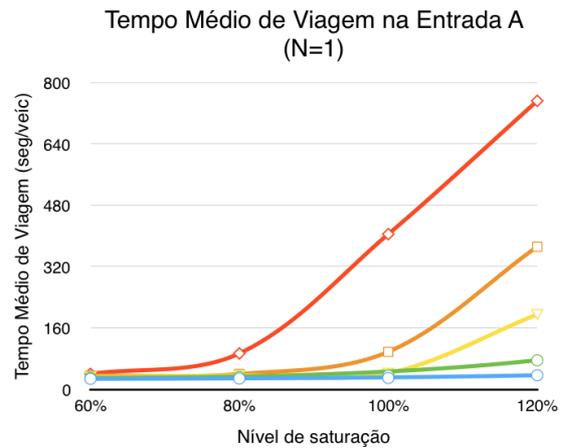


Figura 5.16 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=1)

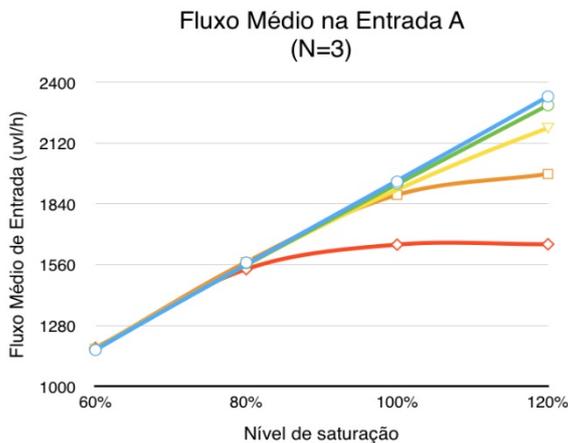


Figura 5.17 – Fluxo médio na entrada A (N=3)

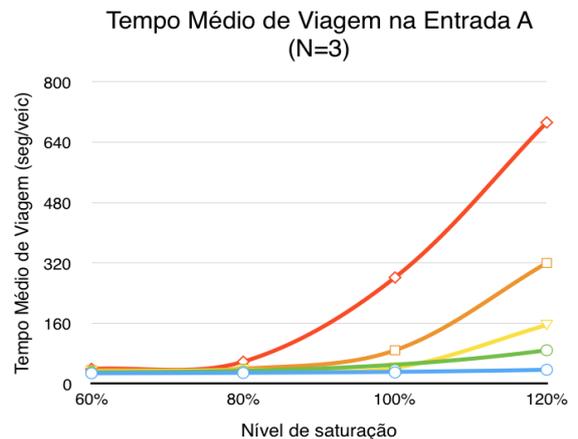


Figura 5.18 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=3)

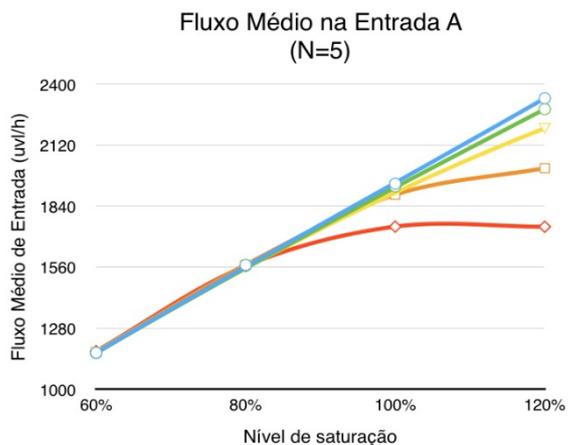


Figura 5.19 – Fluxo médio na entrada A (N=5)

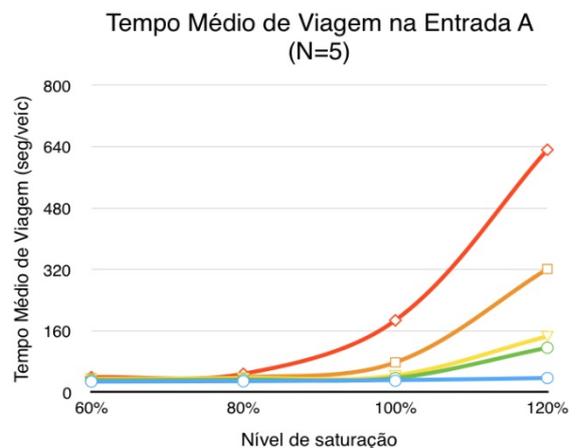


Figura 5.20 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=5)

○ 0 ativações/h ○ 15 ativações/h ✦ 30 ativações/h □ 45 ativações/h ◇ 64 ativações/h

Em termos de fluxo médio na entrada A, o impacto causado pelo peão, em termos percentuais, assemelha-se aos resultados obtidos para a passagem para peões na entrada do ramo C. Também para uma passagem para peões com sinalização luminosa, a presença do peão é praticamente negligenciável para níveis de saturação inferiores a 80%, com maior expressividade para $N=1$. No entanto, e realizando uma análise pormenorizada aos resultados obtidos para o fluxo médio na entrada, quando o nível de saturação da rotunda se encontra entre 80% e 100% o impacto do peão é significativo apenas para um número extremamente elevado de ativações (64 ativações/h). Também para os tempos médios de viagem de entrada, o impacto do peão é praticamente negligenciável para níveis de saturação inferiores a 80%, contudo, para o máximo de ativações por hora o impacto do peão faz-se sentir de forma significativa, particularmente para $N=1$. A presença do peão não é tão gravosa nos tempos médios de viagem, pois, para um número de ativações inferior a 30 ativações/h, o impacto é igualmente negligenciável até atingir um nível de saturação de 100%.

A influência da presença do peão é praticamente desprezável na redução do fluxo médio de saída, independentemente do fluxo pedonal e do nível de saturação (ver Anexo A - Figura A.1 à Figura A.6), ocorre uma ligeira quebra quando o nível de saturação é superior a 80% para $N=1$. No entanto, quando o nível de saturação de aproxima de 120% o fluxo médio na saída tende a aproximar-se do valor de referência (sem a presença de peões). Os resultados obtidos para os tempos médios de viagem contrariam o expectável, uma vez que para níveis de saturação superiores a 100% se regista uma redução dos tempos médios de viagem de C para A. Após a observação da simulação verificou-se que, quando o sinal fica vermelho para o fluxo viário na entrada A, os veículos no ramo C ganham a oportunidade de entrar no anel na rotunda e, uma vez que o fluxo viário no ramo B é muito reduzido facilita o avanço dos veículos no ramo C.

Tal como acontece na análise da solução com uma passagem para peões, para uma passagem para peões com sinalização luminosa, o peão não causa impacto significativo para níveis de saturação inferiores a 80%. A redução da capacidade na entrada traduziu um valor muito semelhante à situação anterior, atingindo um valor máximo de 32%, assim como os tempos médios de viagem na entrada devido a um aumento de 37 segundos para 13 minutos, para $N=1$. Tal facto pode dever-se à permanência do sinal vermelho, impedindo o veículo de avançar, mesmo depois do peão ter efetuado parte do atravessamento. No entanto, para $N=2$ e $N=3$, a passagem para peões apresenta um menor aumento dos tempos médios de viagem.

5.3.2.2 Atravessamento em duas fases

Este ponto apresenta os resultados adquiridos para os diferentes movimentos direcionais do peão, A e B, como referido anteriormente, não se considerou nesta análise o movimento bidirecional por corresponder, aproximadamente, à situação analisada no ponto anterior.

MOVIMENTO DIRECIONAL A

As Figura 5.21 até à Figura 5.26 sintetizam os resultados obtidos do fluxo médio e do tempo médio de viagem para os diferentes cenários na secção de entrada do ramo A. Os indicadores de desempenho relativos à secção de saída podem ser consultados no Anexo B (Figura B.1 à Figura B.6).

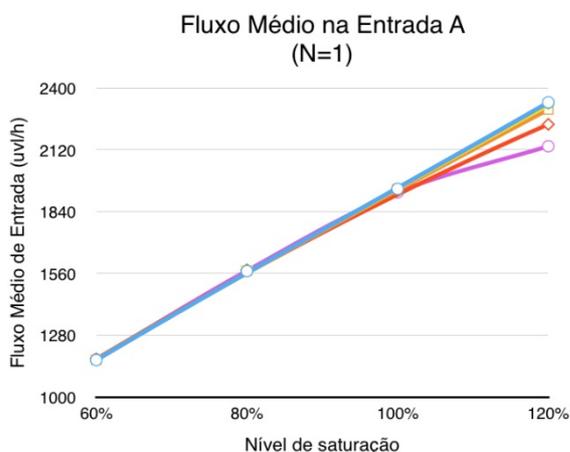


Figura 5.21 – Fluxo médio na entrada A (N=1)

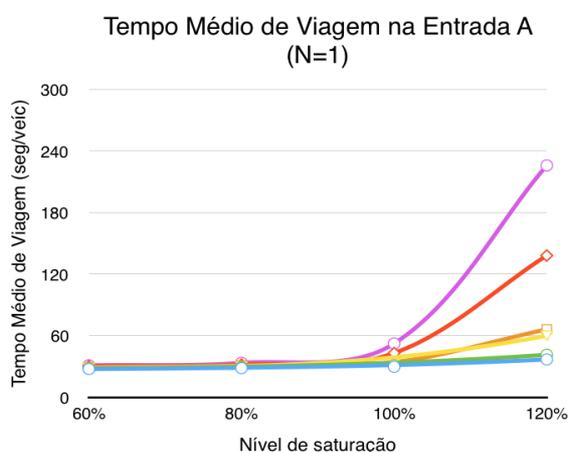


Figura 5.22 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=1)

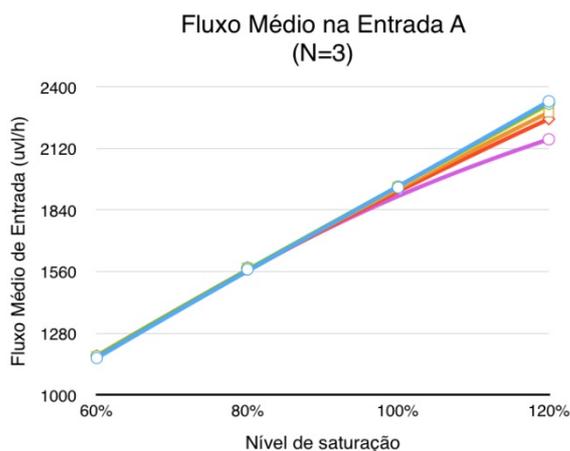


Figura 5.23 – Fluxo médio na entrada A (N=3)

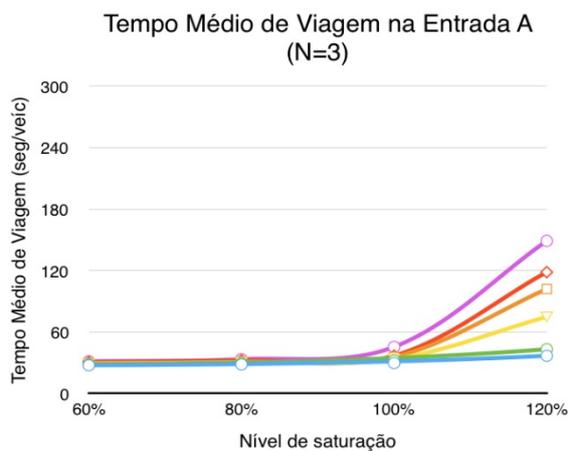


Figura 5.24 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=3)

◇ 0 ativações/h ◇ 15 ativações/h ◇ 30 ativações/h ◇ 45 ativações/h ◇ 64 ativações/h ◇ 84 ativações/h

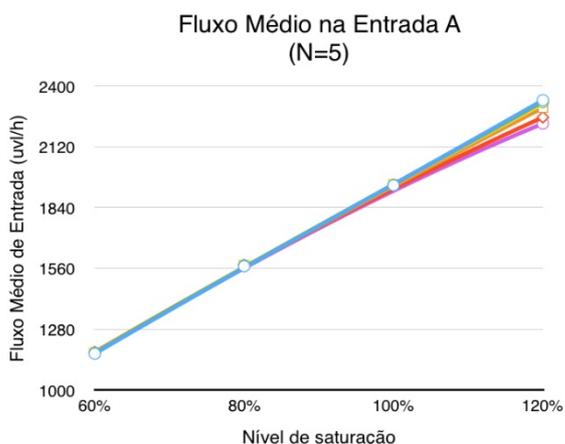


Figura 5.25 – Fluxo médio na entrada A (N=5)

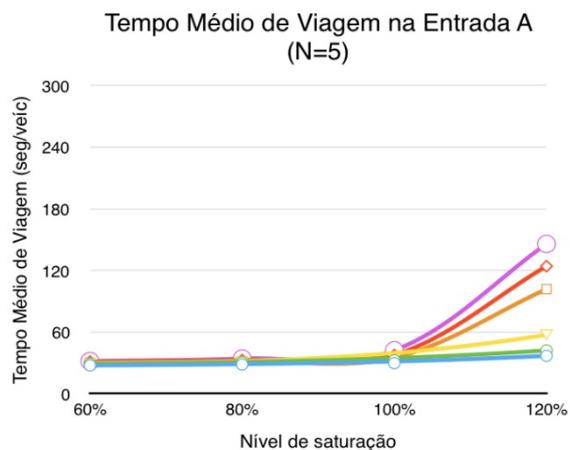


Figura 5.26 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=5)

◇ 0 ativações/h ◇ 15 ativações/h ◇ 30 ativações/h ◇ 45 ativações/h ◇ 64 ativações/h ◇ 84 ativações/h

MOVIMENTO DIRECIONAL B

As Figura 5.27 até à Figura 5.32 sintetizam os resultados obtidos do fluxo médio e do tempo médio de viagem para os diferentes cenários na secção de entrada do ramo A. No Anexo B (Figura B.7 à Figura B.12) encontram-se os resultados dos indicadores de desempenho relativos à secção de saída.

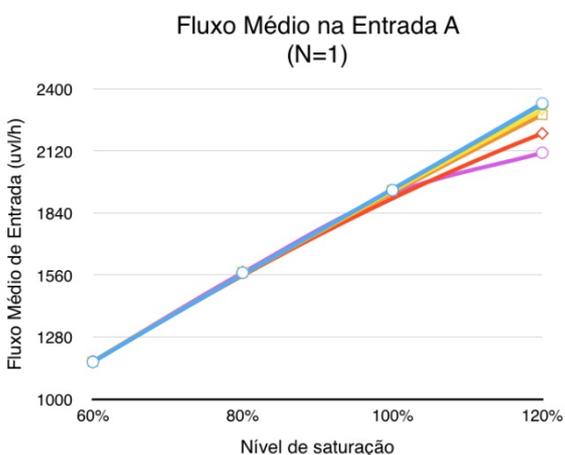


Figura 5.27 – Fluxo médio na entrada A (N=1)

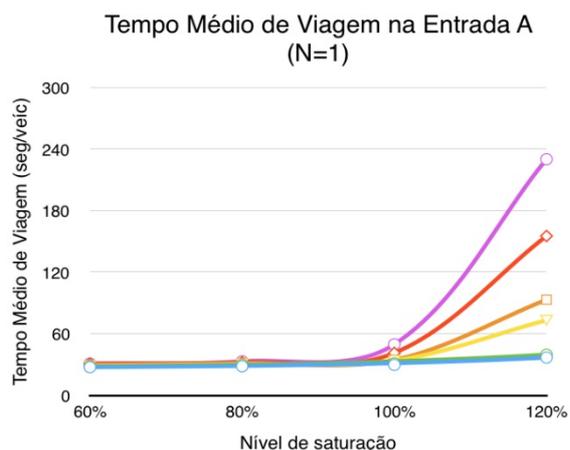


Figura 5.28 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=1)

◇ 0 ativações/h ◇ 15 ativações/h ◇ 30 ativações/h ◇ 45 ativações/h ◇ 64 ativações/h ◇ 84 ativações/h

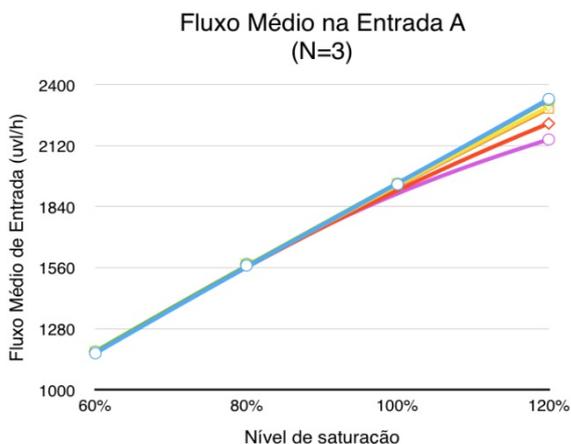


Figura 5.29 – Fluxo médio na entrada A (N=3)

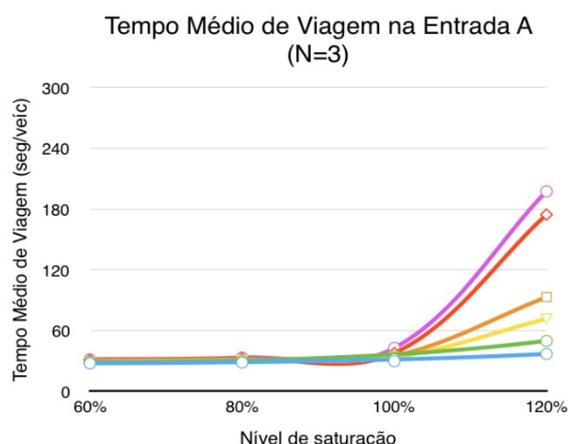


Figura 5.30 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=3)

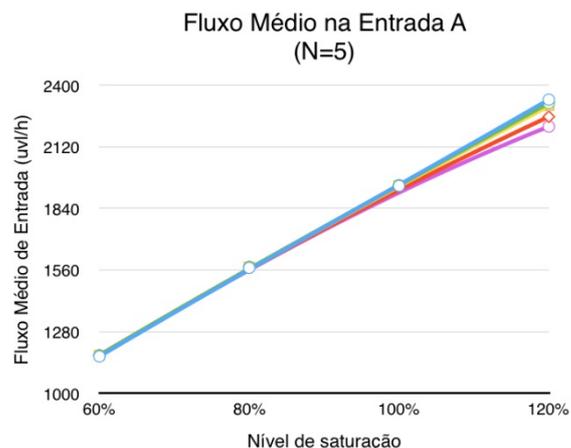


Figura 5.31 – Fluxo médio na entrada A (N=5)

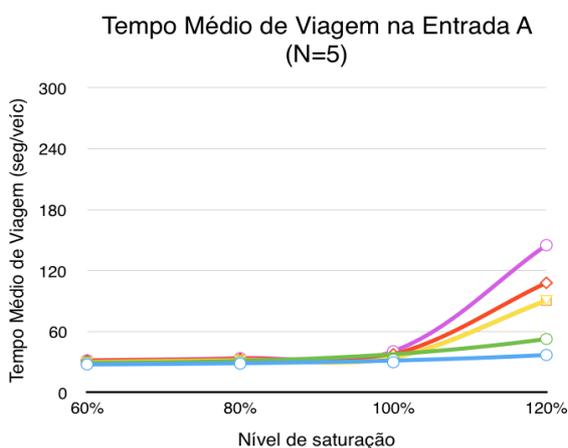


Figura 5.32 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=5)

○ 0 ativações/h ○ 15 ativações/h ✦ 30 ativações/h ◻ 45 ativações/h ◇ 64 ativações/h ◊ 84 ativações/h

Os resultados obtidos para o atravessamento efetuado em duas fases (Figura 5.21 à Figura 5.32) foram, tal como seria expectável, claramente menos penalizantes do que resultante de um atravessamento em fase única. Verificou-se ainda que a direção do atravessamento não é um fator relevante no funcionamento da rotunda. O atravessamento em duas fases possibilita ainda um aumento significativo do número de ativações de 64 ativações/h (atravessamento numa fase) para 84 ativações/h (atravessamento em duas fases).

Fazendo uma análise global dos dois movimentos direcionais, as Figura 5.21 à Figura 5.32 comprovam que a presença do peão permanece praticamente negligenciável para níveis de saturação abaixo dos 100%, independentemente do número de ativações, na redução da

capacidade e no aumento dos tempos médios na entrada. Atendendo às análises já realizadas aos vários tipos de passagens pedonais (passagem para peões e passagem para peões com sinalização luminosa com o atravessamento numa só fase), o atravessamento realizado em duas fases apresenta-se como benéfico, designadamente para fluxos pedonais e/ou níveis de saturação elevados. Mesmo para níveis de saturação superiores a 100% o impacto causado pelo peão não toma valores significativos, atingindo um valor máximo na redução da capacidade na entrada, para $N=1$, aproximadamente, de 10%. Relativamente aos tempos médios de viagem na entrada estes tendem a ser ligeiramente menores para o movimento direcional A, sendo justificável pelo facto da corrente de tráfego na entrada obter sinal verde primeiro. Se para níveis de saturação inferiores a 100% não ocorreram aumentos significativos nos tempos médios de viagem, para níveis de saturação acima dos 100%, os tempos médios de entrada aumentaram de forma brusca, causando um aumento de, aproximadamente, 3 minutos, valor muito inferior aos resultados obtidos referentes às soluções anteriormente apresentadas.

Na secção de saída do ramo A, o peão não se revela prejudicial ao seu funcionamento, independentemente do nível de saturação, assumindo um impacto não negligenciável nos tempos médios de viagem, para níveis de saturação superiores a 100%. No entanto, os resultados obtidos foram inesperáveis, uma vez que há uma redução dos tempos médios de viagem. Após a visualização das replicações da simulação, verificou-se que tal resultado se deve ao facto do semáforo da entrada no ramo A facilitar a entrada dos veículos do ramo C e, uma vez que o tráfego no ramo B é reduzido esse movimento é favorecido, acumulando desta forma os veículos que pretendam efetuar o movimento “ida em frente”. Os tempos médios de viagem na saída tendem a ser ligeiramente inferiores para o movimento direcional B, já que a corrente de tráfego de saída no ramo A recebe o sinal de verde primeiro. Esta diferença é de tal forma insignificante que foi considerada negligenciável.

5.3.2.3 Análise de sensibilidade – impacto da velocidade pedonal legal

A entrada em vigor do Decreto-Lei n.º 163/06 de 8 de agosto veio impor a velocidade máxima pedonal de 0,4m/s, no dimensionamento dos tempos de limpeza associados aos sistemas semaforizados. Estudos nacionais (Cunha, 2011; Ferreira, 2010) demonstram que esse valor corresponde a um valor extremamente baixo e inferior ao adotado pelos peões de mobilidade reduzida (velocidade mínima de 0,74m/s). Sendo um valor imposto por lei, considerou-se relevante avaliar o impacto que tal assunção assume no desempenho da rotunda. Por uma questão de simplificação, optou-se por limitar a análise aos atravessamentos semaforizados numa só fase, por representarem o tipo de atravessamento mais comum em Portugal, sendo, contudo, expectável que o impacto cresça de forma proporcional à extensão da travessia pedonal.

As Figura 5.33 e a Figura 5.34 apresentam os resultados obtidos do fluxo médio e do tempo médio de viagem, respetivamente, para $N=1$, na secção de entrada do ramo A. No anexo C (Figura C.1 à Figura C.10) é possível consultar os restantes resultados. Por forma a realizar-se uma breve análise comparativa sobre o impacto que a velocidade do peão causa na capacidade da entrada, optou-se por retirar os resultados referentes ao número máximo de ativações (84 ativações/h) para uma velocidade igual a 1m/s (ver Figura 5.35 e Figura 5.36), uma vez que, para uma velocidade igual a 0,4m/s não atinge esse número de ativações por hora, tornando assim mais clara a análise.

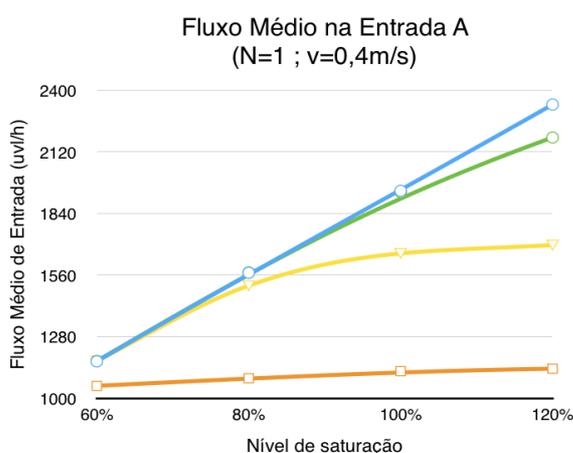


Figura 5.33 – Fluxo médio na entrada A (N=1 ; v=0,4m/s)

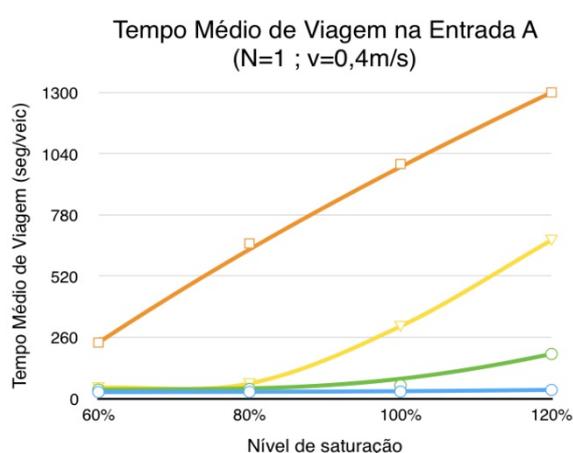


Figura 5.34 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=1 ; v=0,4m/s)

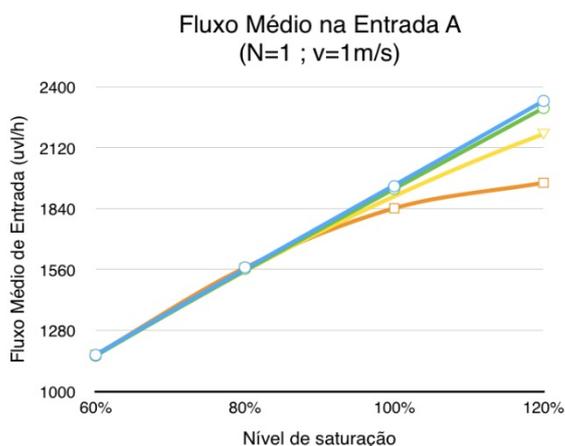


Figura 5.35 – Fluxo médio na entrada A (N=1 ; v=1m/s)

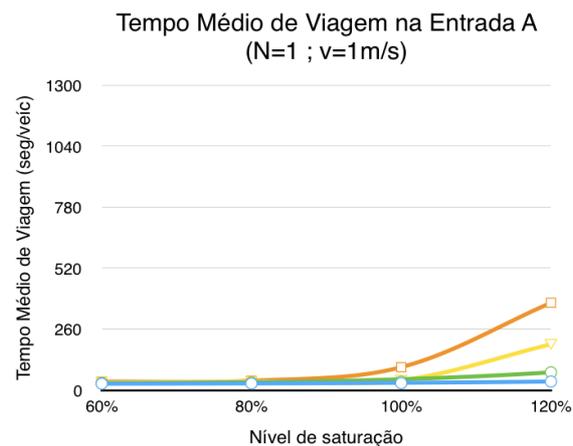


Figura 5.36 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=1 ; v=1m/s)

○ 0 ativações/h ◇ 15 ativações/h ▼ 30 ativações/h □ 45 ativações/h

A partir dos resultados das Figura 5.33 e da Figura 5.34 e do Anexo C (Figura C.1 à Figura C.4) conclui-se que o impacto do peão pode ser considerado praticamente negligenciável para um número de ativações inferior a 30 ativações/h e níveis de saturação inferiores a 80%, na secção de entrada A. Independentemente do nível de saturação, para um número de ativações superior a 30 ativações/h, a perda da capacidade na entrada é extremamente acentuada, atingindo valores de redução da capacidade superiores a 50% e o aumento dos tempos médios de viagem atingem valores muito elevados, aproximadamente 21 minutos. Na secção de saída (ver Anexo C – Figura C.5 à Figura C.10) o impacto causado pelo peão é considerado desprezável apenas para um nível de saturação inferior a 80% e um número de ativações inferior a 15 ativações/h. Apesar do impacto se começar a fazer sentir para um menor de ativações comparativamente à secção de saída, a redução da capacidade na saída e o aumento dos tempos médios na saída revelam-se inferiores comparativamente à secção de entrada.

Por sua vez, os resultados apresentados nas Figura 5.35 e na Figura 5.36 revelam-se menos gravosos, uma vez que o peão é praticamente negligenciável para níveis de saturação inferiores a 100%, independentemente do número de ativações apresentados na Figura 5.35. O valor máximo atingido na redução da capacidade na entrada foi de 16% e o aumento dos tempos médios na entrada de 6 minutos.

Conclui-se, que a utilização da velocidade do peão de 0,4m/s, respeitando a lei vigente, na regulação das fases semaforicas, para níveis de saturação acima dos 120% e para 45 ativações/h, causa uma perda na capacidade acima de 30% e um aumento de, aproximadamente, 15 minutos no tempo médio de viagem na secção de entrada comparativamente a uma solução assumindo uma velocidade do peão de 1m/s.

5.4 Considerações Finais

Os resultados obtidos mostraram-se interessantes. Como esperado, a influência do peão revelou-se significativa quer na secção de entrada, quer da saída da rotunda. Porém, essa influência só se faz sentir para níveis de saturação superiores a 80%, independentemente do fluxo pedonal ou do número de ativações (caso do sistema semaforizado). Na presença de uma solução com sinalização luminosa resulta uma menor penalização provocada pela presença do peão nos indicadores de desempenho considerados. No caso de uma passagem para peões onde o atravessamento ocorre apenas numa fase, os resultados aproximam-se dos resultados obtidos para uma passagem não semaforizada. Excepcionalmente para $N=1$, a redução da capacidade é muito superior na travessia não semaforizada. Mesmo para níveis de saturação superiores a 80%, quando o atravessamento se realiza em duas fases, o impacto tende a ser reduzido. Para esta solução, a influência do peão é praticamente negligenciável na redução da capacidade, independentemente do número de ativações, tanto na entrada como na saída.

Constatou-se que os resultados obtidos para uma passagem para peões e para uma passagem para peões com sinalização luminosa, para níveis de saturação superiores a 80%, se revelam muito semelhantes na redução do fluxo médio de entrada. Porém, o aumento dos tempos médios de viagem revela-se menos gravoso, quando $N=1$, para a passagem para peões com sinalização luminosa, deixando de ser um fator de decisão para localizações da travessia superiores a 10 metros.

Constatou-se que o aumento dos tempos médios para níveis de saturação inferiores a 80% é quase nulo, contudo, para níveis de saturação superiores a 80% aumenta de forma quase exponencial. Para a solução em que o atravessamento ocorre em duas fases o aumento dos tempos médios de viagem só se faz sentir para níveis de saturação superiores a 100%.

Relativamente à localização das travessias, observa-se que para níveis de saturação inferiores a 80% não existem reduções significativas tanto a nível do fluxo médio, como do aumento dos tempos médios de viagem. No entanto, para $N=1$ e para um número extremamente elevado de peões ($P > 700$ peões/h) ocorre uma ligeira quebra no fluxo médio e um aumento nos tempos médios de viagem. Para níveis de saturação superiores a 80%, à medida que a passagem para peões se afasta da delimitação do anel de circulação da rotunda há uma melhoria significativa na capacidade de entrada e nos tempos médios de viagem na entrada para fluxos pedonais inferiores a 300 peões/h. Estima-se que, para distâncias superiores a 10/15 metros, o peão deixa de assumir um peso significativo nos indicadores de desempenho admitidos. Na secção de saída essa melhoria é notória para $N=5$. Para níveis de fluxos pedonais reduzidos ($P < 300$ peões/h) a localização da passagem para peões não causa transtornos significativos para níveis de saturação inferiores a 100%. Para níveis intermédios deve-se localizar a passagem para peões próxima dos 15 metros. Resultados estes que vêm confirmar a ideia generalizada de diferentes autores ao defenderem que a localização ideal da travessia deve estar entre os 10 e os 15 metros. Para casos em que os fluxos pedonais e níveis de saturação são elevados é aconselhável uma análise cuidada da localização da passagem para peões, sendo recomendável optar por localizações superiores a 15 metros. Relativamente à secção de saída, os resultados não apresentam uma melhoria significativa nos indicadores de desempenho à medida que a passagem para peões se afasta do anel de circulação. O efeito do peão causado nos indicadores de desempenho para uma passagem para peões com sinalização luminosa em que o peão realiza o atravessamento em duas fases demonstrou que a localização da travessia não demonstrou ser um fator relevante.

Outro facto interessante foca-se na comparação da influência da presença do peão na secção de entrada e de saída. Aparentemente, e face a situações saturadas na passagem semaforizada, o peão causa um menor impacto na secção de saída, onde se regista uma diminuição dos tempos de viagem para um número elevado de ativações. Contudo, este resultado justifica-se pelo facto

de estar implantada a travessia na entrada do ramo A e pelo baixo fluxo de entrada do ramo B, facilitarem a entrada da corrente de tráfego do ramo C. Contudo, para uma passagem para peões não semaforizada, o aumento dos tempos médios de viagem apresenta-se na secção de saída, traduz-se na formação da fila na secção de saída, cuja evolução tende a bloquear o anel de circulação permitindo a entrada no anel de circulação da corrente de tráfego do ramo C.

A análise comparativa entre as diferentes velocidades adotadas para a velocidade do peão, mostraram resultados extremamente penalizadores para uma velocidade do peão de 0,4m/s, como expectável. A utilização da velocidade do peão admitida por lei, na regulação das fases semaforicas, causa uma perda na capacidade de acima de 30% e um aumento de, aproximadamente, 15 minutos no tempo médio de viagem na secção de entrada comparativamente a uma solução que assuma uma velocidade do peão de 1m/s.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

O presente trabalho teve como principal objetivo avaliar a influência pedonal no funcionamento da rotunda, recorrendo a uma plataforma de microssimulação. Atualmente, a microssimulação apresenta-se como uma ferramenta promissora na análise de situações complexas ou que envolvam a presença de diferentes utilizadores, como é o caso do peão.

Nesta linha de ação, o trabalho teve como foco principal avaliar a influência no desempenho da rotunda resultante da variação de diferentes fatores, designadamente: (i) da taxa de saturação da rotunda; (ii) do volume de peões envolvido; (iii) da localização da travessia pedonal e, (iv) da tipologia do atravessamento. O funcionamento foi avaliado recorrendo a diferentes indicadores de desempenho medidos quer na secção da entrada quer da saída da rotunda.

As análises realizadas permitem concluir que o efeito da presença do peão na capacidade e nos tempos médios de viagem, nas secções de entrada e de saída, independentemente do fluxo pedonal e/ou da localização da travessia, é praticamente negligenciável para níveis de saturação inferiores a 80%. Para esta situação, a presença do peão traduziu-se numa maior penalização na secção de entrada relativamente à saída. Mostrou ainda ser praticamente negligenciável na secção de saída para localizações da travessia superiores a 10/15 metros.

Apesar dos resultados obtidos não revelarem um impacto significativo para níveis de saturação inferiores a 80%, verificou-se que para situações saturadas, o impacto do peão tende a assumir diferentes pesos consoante a tipologia de atravessamento adotada e localização da travessia.

Registou-se um aumento significativo do desempenho quando utilizada a passagem para peões com sinalização luminosa, associada a duas fases de atravessamento. Tal resultado deve-se ao facto do veículo apenas permanecer parado durante o tempo utilizado pelo peão enquanto efetua o atravessamento de uma das faixas de rodagem. Neste tipo de solução, a presença do peão assume um efeito praticamente negligenciável no funcionamento da entrada e da saída, revelando uma ligeira quebra para níveis de saturação superiores a 100% e apenas para a situação da travessia se localizar muito próxima do anel de circulação (N=1). A perda do desempenho é, contudo, considerável para níveis de saturação superiores a 100%, designadamente em termos de tempos médios de viagem na secção da entrada. Curiosamente e contrariamente ao expectável, foi registada uma diminuição dos tempos médios de viagem, na secção de saída, para níveis de saturação superiores a 100%. A visualização pormenorizada das

simulações permitiu concluir que tal aumento se deve à geração de condições favoráveis aos movimentos de saída, por bloqueio de algumas entradas.

A localização da travessia não se revelou particularmente relevante perante soluções com sinalização luminosa. Para uma passagem para peões onde o atravessamento ocorre apenas numa fase, o efeito da localização da travessia na capacidade da entrada, é praticamente negligenciável para um baixo número de atuações (até 45 atuações/h) e para níveis de saturação inferiores a 100%. Esse efeito é ainda mais atenuado face à solução em que o atravessamento ocorre em duas fases, onde o efeito da localização da travessia é insignificante na redução do fluxo médio quer da entrada e da saída.

Os resultados relativos aos tempos médios de viagem para níveis de saturação inferiores a 80% assumem um andamento quase constante e para níveis superiores a 80% aumentam de forma quase exponencial, revelando um efeito significativo da presença pedonal.

A análise de sensibilidade aplicada à velocidade pedonal demonstrou que quando adotada a velocidade pedonal legal de 0,4m/s se traduz numa redução substancial da capacidade, acima de 30% e num aumento de 40 segundos para 21 minutos nos tempos médios de viagem na entrada, quando comparada a uma solução que assuma uma velocidade do peão de 1m/s.

Em termos conclusivos, a capacidade e os tempos médios de viagem, para níveis de saturação inferiores a 80%, independentemente do fluxo pedonal e do tipo de passagem para peões, não são afetados pelo que a sua seleção deve depender maioritariamente dos níveis de segurança e de conforto que se pretendem oferecer ao peão. No entanto, para elevados níveis de saturação e de fluxos pedonais uma passagem para peões com sinalização luminosa, que proporcione o atravessamento em duas fases, traduz-se em resultados extremamente positivos, refletidos em baixos valores de redução da capacidade e de tempos médios de viagem.

6.2 Trabalhos Futuros

O estudo desenvolvido aponta para resultados interessantes relativamente ao impacto causado pela presença do peão no funcionamento da rotunda. Contudo não apresenta um produto acabado, justificando-se o desenvolvimento de trabalhos complementares. Importa integrar análises correspondentes à avaliação do efeito associado à repartição de tráfego de entrada. De igual forma, a análise do efeito associado à variação do número de vias, dimensões da rotunda e do número de ramos pode assumir uma influência do peão não impacto negligenciável.

Neste trabalho foram integrados sistemas para passagens para peões com sinalização luminosa, assumindo uma lei de chegada de peões/atuações no sistema uniforme ao longo do tempo.

Considera-se, contudo, relevante a integração de outras leis de chegada, designadamente distribuições aleatórias, tais como a de *Poisson*.

As análises realizadas, no presente trabalho, tiveram em conta apenas a implantação de uma passagem para peões num dos ramos da rotunda, facto esse que pode resultar em efeitos diferentes quando consideradas travessias em diferentes ramos simultaneamente. Desta forma, considera-se igualmente importante a análise da influência causada pelo peão quando existe uma passagem para peões nos vários ramos da rotunda.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida Ribeiro, J. N. A. (2010). *A Segurança dos Peões em Meios Urbanos*: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Edição IST, outubro, Lisboa.
- Almeida Roque, C. (2002). *Sinalização de Rotundas*: Disposições Normativas, InIR.
- Ashmead, D. H., Guth, D., Wall, R. S., Long, R. G., & Ponchillia, P. E. (2005). *Street crossing by sighted and blind pedestrians at a modern roundabout*. Journal of Transportation Engineering, volume 131, Issue: 11, pages 812-821, November.
- AustRoads. (1995). *Guide to Traffic Engineering Practice; Part 13, Pedestrians*. AustRoads, Sydney.
- Baranowski, B. (2005). *Pedestrian Crosswalk Signals at Roundabouts: Where are they Applicable?* TRB Roundabout Conference May 2005, Salt Lake City, Utah.
- Barceló, J. (2001). *Microscopic Traffic Simulation: A tool for the Analysis and Assessment of ITS Systems*. Highway Capacity Committee, Lake Tahoe, July.
- Barceló, J. (2010). *Fundamentals of Traffic Simulation*. Springer.
- Barceló, J., & Casas, J. (2005). *Dynamic Network Simulation with AIMSUN*. Technical University of Catalonia and TSS -Traffic Simulation Systems, Spain.
- Bastos Silva, A. M. C. (2004). *Definição de uma Metodologia de Conceção de Cruzamentos Giratórios*: Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Edição FCTUC, abril, Coimbra, Portugal.
- Bastos Silva, A. M. C., Relvão, T. J. P., Cunha, R. J., & Silva, J. P. C. (2013). *Evaluation of the effect of the pedestrian crossings on roundabout performance using microsimulation*. 92nd Annual Meeting of Transportation Research Board (TRB), Washington, D.C.
- Bastos Silva, A. M. C., Santos, S., & Gaspar, M. (2013). *Turbo-roundabout use and design*. CITTA 6th Annual Conference on Planning Research, Coimbra, Portugal.
- Bastos Silva, A. M. C., & Seco, Á. J. M. (2004). *Dimensionamento de Rotundas*. Textos Didáticos - 3ª Edição. Universidade de Coimbra, Portugal, abril.
- Bastos Silva, A. M. C., & Seco, Á. J. M. (2008). *Dimensionamento de Rotundas - Manual de Boas Práticas*. Edição InIR (Instituto de Infraestruturas Rodoviárias), Coimbra, Portugal.
- Bastos Silva, A. M. C., & Vasconcelos, L. (2009). *The Microsimulation Applied to Performance Analysis of Roundabouts: The Effect of the Pedestrian Crossings*. European Transport Conference 2009, Leiden, 5-7 October, Netherlands.
- Billings, K., & Walsh, B. (1991). *New Pedestrian Facilities at Signalled Junctions*. Vol P350, pp 1-12, citado por Department of Transportation, (1999).
- Brown, M. (1995). *The design of Roundabouts*. London: HMSO, citado por Tollazzi, 1999.
- Chwif, L. (1999). *Redução de Modelos de Simulação de Eventos Discretos na sua Conceção: Uma Abordagem Causal*. Tese de Doutoramento em Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica/EPUSP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil.
- Código da Estrada - aprovado pelo Decreto-Lei n.º 114/94, de 3 de maio, revisto e republicado pelo Decreto-Lei n.º 72/2013, de 3 de setembro.

- Costa de Matos, Á. (2011). *Ressano Garcia na Coleção da Hemeroteca de Lisboa*. Câmara Municipal de Lisboa, Portugal, outubro - dezembro.
- Cunha, J. R. R. (2011). *Avaliação do Desempenho de Infra-Estruturas Pedonais em Meio Urbano com Técnicas de Análise Multicritério*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- DfT. (1979). *Pelican Crossings: Pelican Crossing Operation*. Departmental Standard TD4/79.
- DfT. (1993). *Geometric of Roundabouts*. Department of Transport - Volume 6, Section 3 of Design Manual of Roads and Bridges - Road Geometry Junctions, September, U.K.
- DfT. (2003). *Equestrian Crossings*. Department for Transport in Traffic Advice Leaflet (TAL), March.
- Diário da República, Decreto-Lei nº 163/2006 de 8/08.
- Ferreira, M. R. C. A. (2010). *Avaliação Multi-Atributo de Atravessamentos em Redes Viárias Urbanas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- FHWA. (2000). *Roundabouts: An Informational Guide*. U.S. Department of Transport, Federal Highway Administration, Virginia, USA.
- Fortuijn, L. G. H. (2009). *Turbo Roundabouts: Design Principles and Safety Performance*. Paper of the Transportation Research Board (TRB) 09-2476.
- Geruschat, D. R., & Hassan, S. E. (2005). *Driver Behavior in Yielding to Sighted and Blind Pedestrians at Roundabouts*. Journal of Visual Impairment & Blindness 99(5):286-312, citado por Inman et al., 2007.
- Guth, D., Ashmead, D., Long, R. G., & Ponchillia, P. (2005). *Blind and Sighted Pedestrians' Judgments of Gaps in Traffic at Roundabouts*. Human Factors 47(2):314-342, citado por Inman et al., 2007.
- Hallamann, H. V. (2011). *Comparação entre Softwares Simuladores de Trânsito*. Trabalho de Graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Hamilton-Baillie, B. (2008). *Shared Space: Reconciling People, Places and Traffic*. Volume 34, No 2.
- Hellinga, B., & Sindi, A. (2012). *Incorporating the Effect of Pedestrians on Roundabout Operations*. Conference Technical Papers 2011-2014.
- HMSO. (1987). *Roads and Traffic in Urban Areas*. Institution of Highways and Transportation, London.
- Hunt, J. G., & Lyons, G. D. (1997). *Enhanced Operating Strategies to Improve Pedestrian Amenity and Safety at Midblock Signalled Pedestrian Crossings*. pp 183-196, United Kingdom.
- Inman, V. W., & Davis, G. W. (2007). *Synthesis of Literature Relevant to Roundabout Signalization to Provide Pedestrian Access*. Final Report, Science Applications International Corporation and Federal Highway Administration, RD&T, 11 January
- Inman, V. W., Davis, G. W., & Sauerburger, D. (2005). *Roundabout Access for Visually Impaired Pedestrians: Evaluation of a Yielding Vehicle Alerting System for Double-Lane Roundabouts*. Proceedings, National Roundabout Conference, Vail, CO, citado por Inman et al., 2007.
- Jordan, P. W. (1985). *Pedestrians and cyclists at roundabouts*. Proceedings of Local Government Engineers Conference. Perth, Australia, citado por Baranowski, 2005.

- Lu, G. X., Guan, F., & Noyce, D. A. (2011). *Simulation Study of Access Management at Modern Roundabouts: Pedestrian Crosswalk Treatments*. Prepared for the 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board (TRB) Washington, D.C., January 23–27.
- Matos Coelho, M. M. (2011). *Os peões e a mobilidade urbana*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Edição ISEL, março, Lisboa, Portugal.
- Meneguzzer, C., & Rossi, R. (2011). *Evaluating the impact of pedestrian crossings on roundabout entry capacity*. Department of Structural and Transportation Engineering, University of Padova, Padova, Italy.
- Nance, R. E. (1993). *A History of Discrete Event Simulation Programming Languages*. In proceedings of the Second ACM SIGPLAN History of Programming Languages Conferences, Cambridge, MA, 28(3), pp 149-175, citado por Chwif, 1999.
- ODT. (1995). *Oregon Bicycle and Pedestrian Plan*. Oregon Department of Transportation, Salem, OR.
- Ogden, K. W. (1996). *Safer Roads: a guide to road safety engineering*. France: Aldershot: Avebury Technical.
- Pires da Costa, A. H., Seco, Á. J. M., & Vasconcelos, A. L. P. (2005). *Sinais Luminosos*. Textos Didáticos - 1ª Edição, dezembro.
- Relvão, T. J. P. (2012). *Avaliação do Efeito das Passagens de Peões na Capacidade das Rotundas*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, janeiro.
- Rodrigues, C. M., Almeida Roque, C., & Macedo, J. M. G. (2008). *Sinalização Rodoviária*. Manual do Planeamento de Acessibilidades e Transportes, CCDRN, dezembro.
- RST. (1998). *Regulamento de Sinalização do Trânsito*. Decreto Regulamentar nº 22-A/98 de 1 de Outubro.
- Schoon, C. C., & Minnen, J. V. (1993). *Accidents on Roundabouts: II*. Second study into the road hazard presented by roundabouts, particularly with regard to cyclists and moped riders. R-93-16. The Netherlands: SWOV Institute for Road Safety Research, citado por FHWA, 2000.
- Seco, Á. J. M., Macedo, J. M. G., & Pires da Costa, A. H. (2008). *Manual do Planeamento de Acessibilidades e Transportes: Peões*. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte (CCDR-N), dezembro, Portugal.
- Septarina. (2012). *Micro-Simulation of the Roundabout at Idrottsparken using AIMSUN*. A Case Study of Idrottsparken Roundabout in Norrköping, Sweden, 23 June.
- Steiner, R. L., Washburn, S., Elefteriadou, L., Gan, A., Alluri, P., Michalaka, D., . . . Cavaretta, A. (2014). *Roundabouts and Access Management*. FDOT Project BDK77 977-22 - Final Report, March.
- Telford, T. (2007). *Manual for Streets*. Department for Transport - Capítulo 6, HMSO, London.
- Tollazzi. (1999a). *Bicyclists` and pedestrian safety in roundabouts - measures for its assurance*. University of Maribor Faculty of Civil Engineering.
- Tollazzi. (1999b). *Reduction of the roundabout capacity due to a pedestrians or cyclists*. Vol. 11, No. 1, 11-14, University of Maribor Faculty of Civil Engineering, 18 February.
- Tollazzi, T., Lerher, T., & Sraml, M. (2007). *The Use of Micro-Simulation in Determining the Capacity of a Roundabout with a Multi-Channel Pedestrian Flow*. Journal of Mechanical Engineering 54(2008)5, pages 334-346, 19 December.

- Tollazzi, T., Lerher, T., & Šraml, M. (2006). *An analysis of the influence of pedestrians' traffic flow to the capacity of a roundabout using discreet simulation method*.
Transportation, D. o. (1999). *Research, Development and Implementation of Pedestrian Safety Facilities*. Publication No. FHWA-RD-99-089. United Kingdom, U. S. Department of Transportation, December.
- TRB. (2010). *Highway Capacity Manual - 2010*. TRB, Washington DC, December, 2011.
- Vasco, M. A. A. (2013). *Análise Energético-ambiental de Rotundas*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Portugal.
- VicRoads. (2004). *Specification for Puffin Crossing "Walk" Detectors - TCS 027-1-2004*. Intelligent Transport Systems Group, December.

SITES CONSULTADOS:

- AIMSUN@2015 – Site oficial de *Transport Simulation Systems* (TSS) <www.aimsun.com> consultado a 08.10.2015
- AutoMod@2015 – Site oficial de *Applied Materials* <www.automod.com> consultado a 05.12.2015
- DTT@2015 – Site oficial de *Driving Test Tips* <www.drivingtesttips.biz> consultado a 10.08.2015
- Google@2015 – Site oficial da *Google* <www.google.pt/maps> consultado a 11.11.2015
- PDS@2015 – Site oficial de *PDS Driver Training* <www.pds-drivertraining.co.uk> consultado a 10.08.2015
- UFSC@2015 – Site oficial da Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Transportes e Logística, Brasil <www.labtrans.ufsc.br> consultado a 03.12.2015
- Vissim@2015 – Site oficial de *PTV Group* <www.vision-traffic.ptvgroup.com/en-uk/home/> consultado a 08.12.2015

ANEXO A – Passagem para peões do tipo *Pelican* - 1 fase

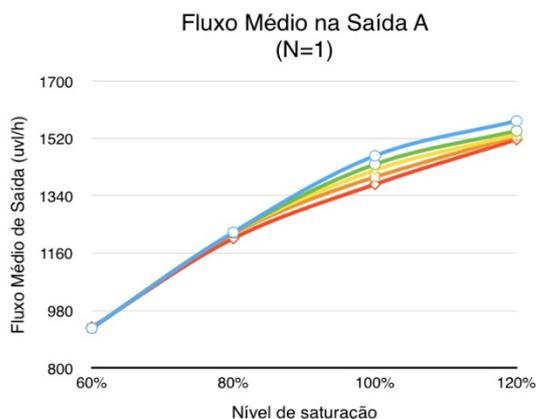


Figura A.1 – Fluxo médio na saída A (N=1)

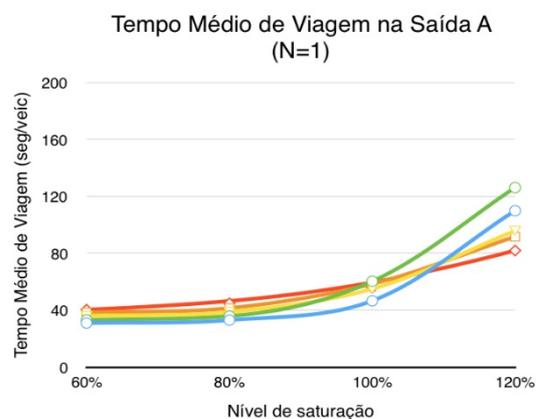


Figura A.2 – Tempo médio de viagem na saída A (N=1)

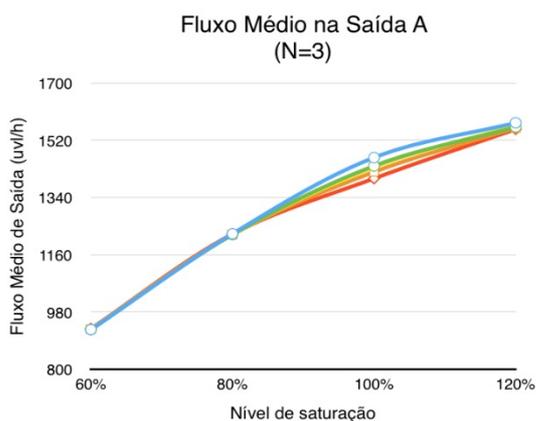


Figura A.3 – Fluxo médio na saída A (N=3)

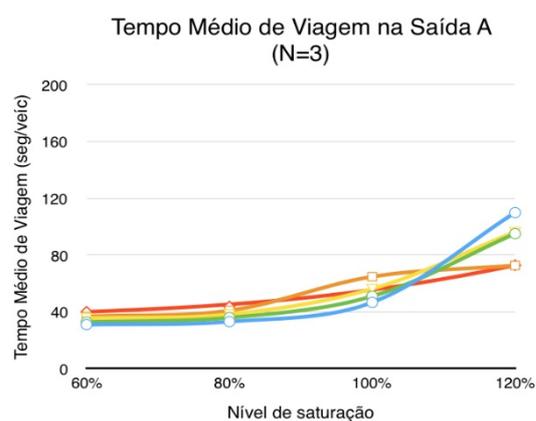


Figura A.4 – Tempo médio de viagem na saída A (N=3)

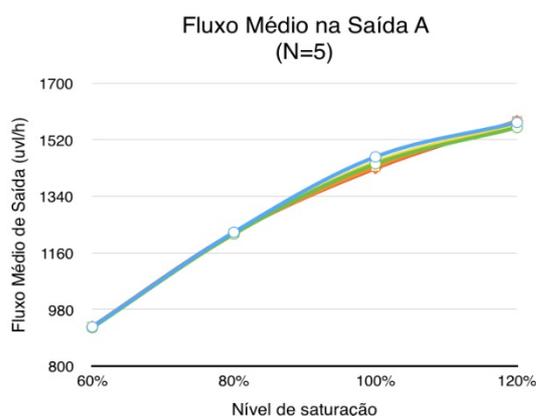


Figura A.5 – Fluxo médio na saída A (N=5)

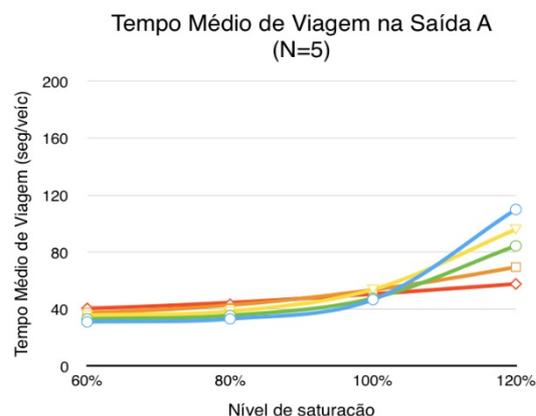


Figura A.6 – Tempo médio de viagem na saída A (N=5)

○ 0 ativações/h ○ 15 ativações/h ✦ 30 ativações/h ✦ 45 ativações/h ✦ 64 ativações/h

ANEXO B – Passagem para peões do tipo *Pelican* - 2 fases

MOVIMENTO DIRECIONAL A

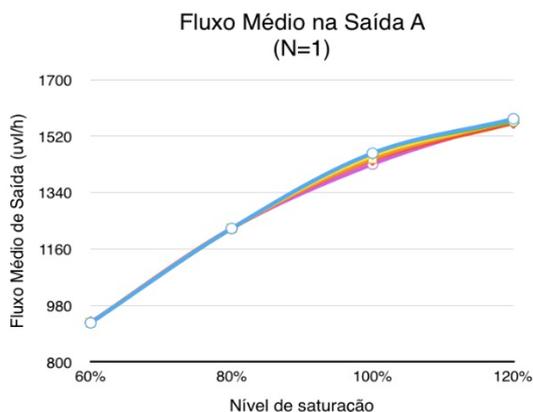


Figura B.1 – Fluxo médio na saída A (N=1)

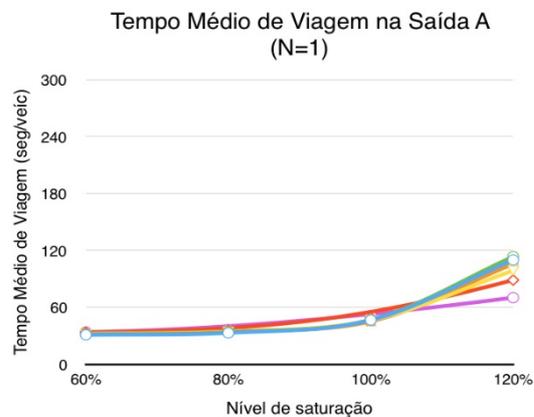


Figura B.2 – Tempo médio de viagem na saída A (N=1)

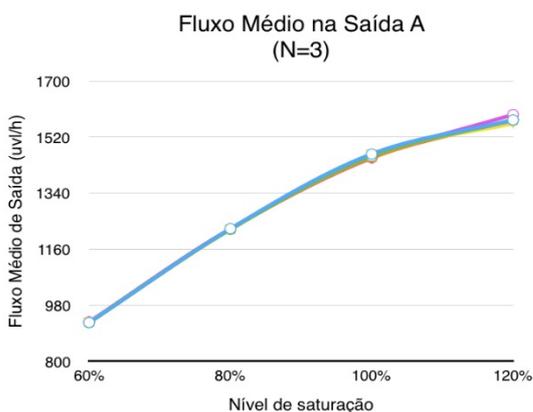


Figura B.3 – Fluxo médio na saída A (N=3)

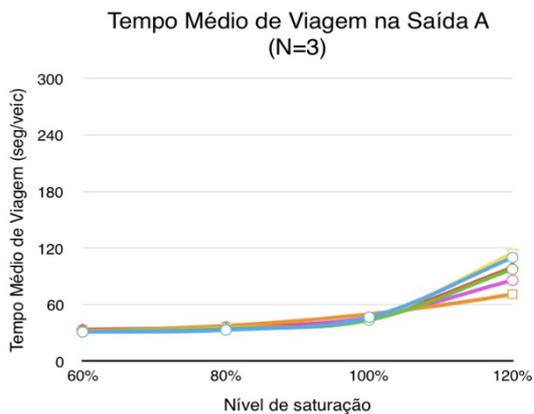


Figura B.4 – Tempo médio de viagem na saída A (N=3)

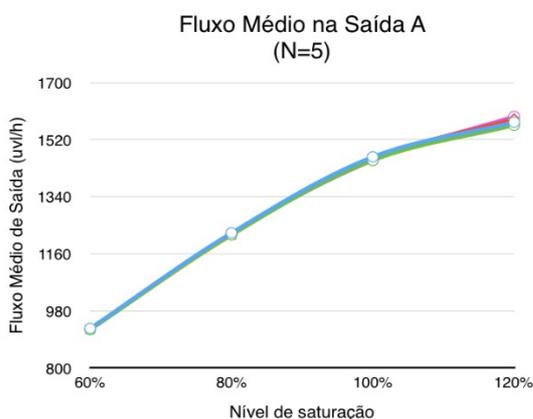


Figura B.5 – Fluxo médio na saída A (N=5)

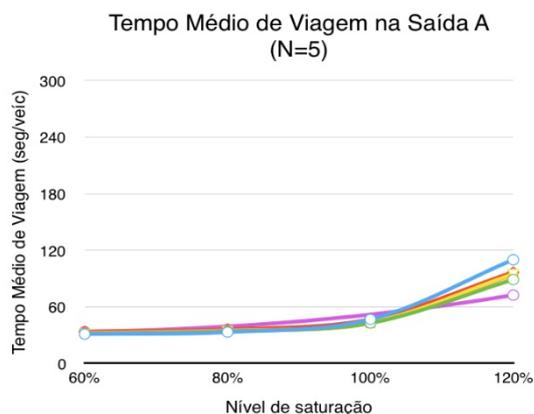


Figura B.6 – Tempo médio de viagem na saída A (N=5)

◇ 0 ativações/h ◇ 15 ativações/h ✚ 30 ativações/h ✚ 45 ativações/h ◇ 64 ativações/h ◇ 84 ativações/h

MOVIMENTO DIRECIONAL B

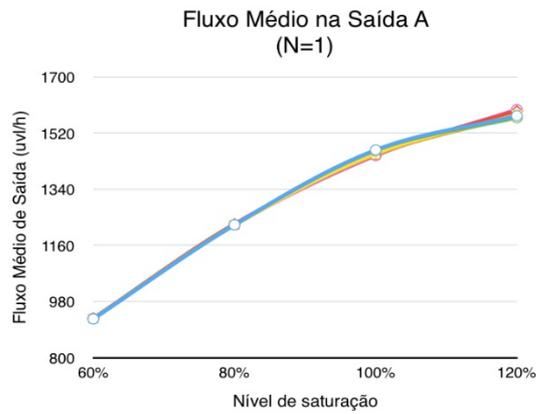


Figura B.7 – Fluxo médio na saída A (N=1)

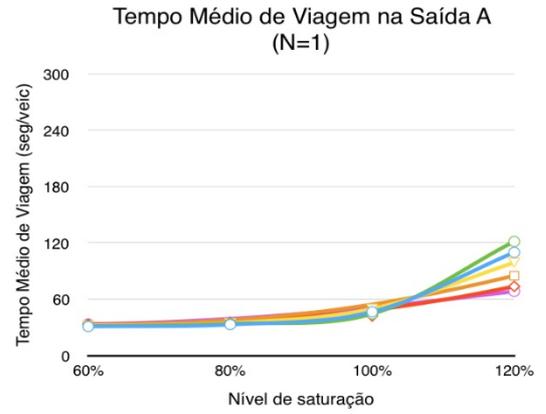


Figura B.8 – Tempo médio de viagem na saída A (N=1)

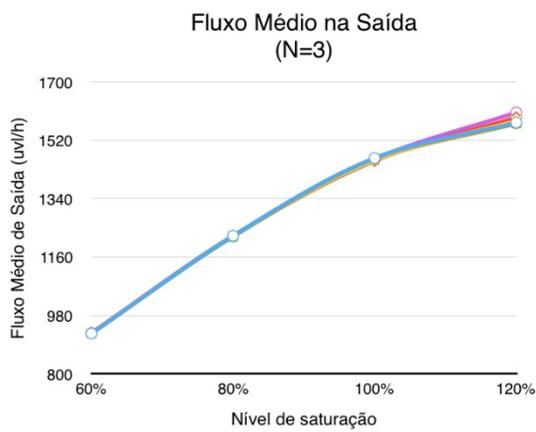


Figura B.9 – Fluxo médio na saída A (N=3)

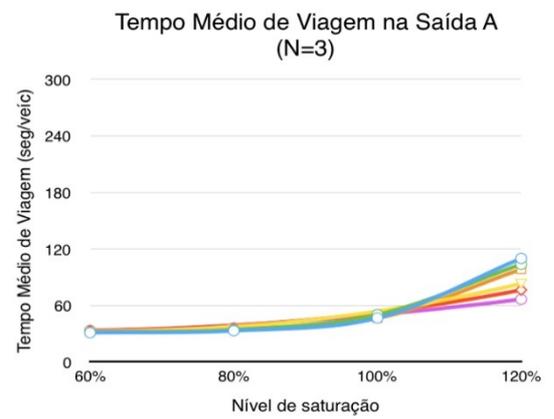


Figura B.10 – Tempo médio de viagem na saída A (N=3)

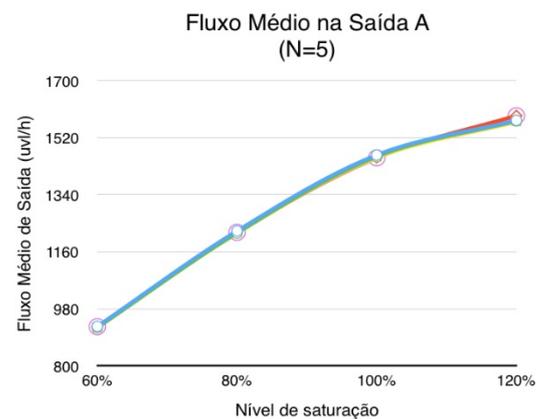


Figura B.11 – Fluxo médio na saída A (N=5)

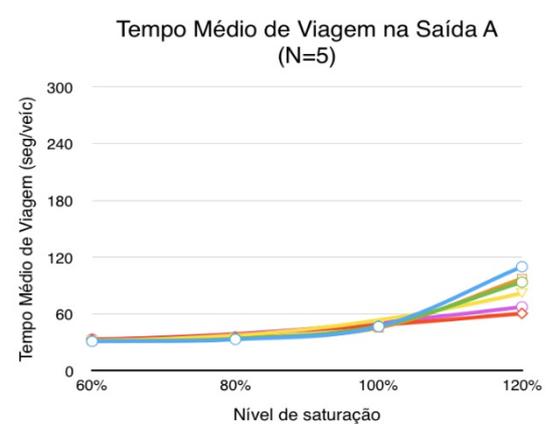


Figura B.12 – Tempo médio de viagem na saída A (N=5)

◇ 0 ativações/h ◇ 15 ativações/h ◇ 30 ativações/h ◇ 45 ativações/h ◇ 64 ativações/h ◇ 84 ativações/h

ANEXO C – Análise de sensibilidade – impacto da velocidade pedonal legal

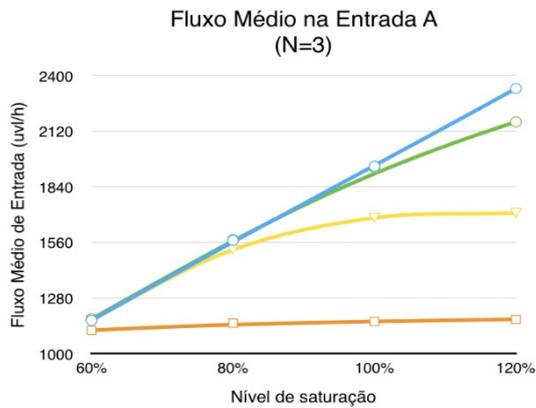


Figura C.1 – Fluxo médio na entrada A (N=3)

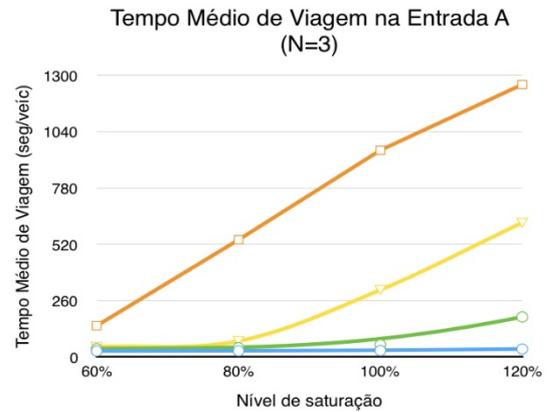


Figura C.2 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=3)

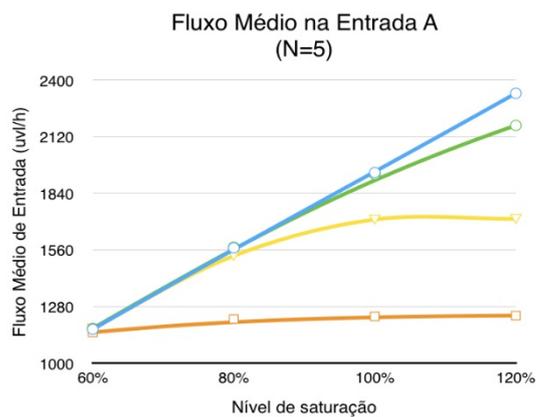


Figura C.3 – Fluxo médio na entrada A (N=5)

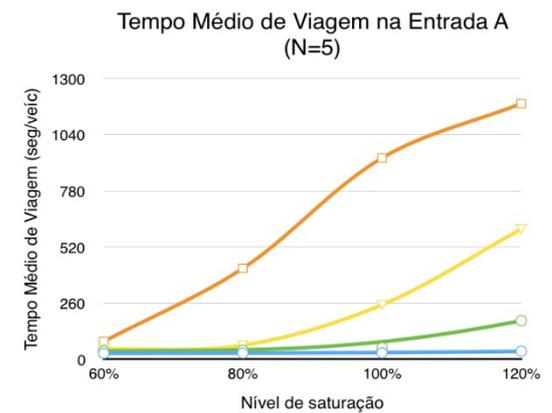


Figura C.4 – Tempo médio de viagem na entrada A (N=5)

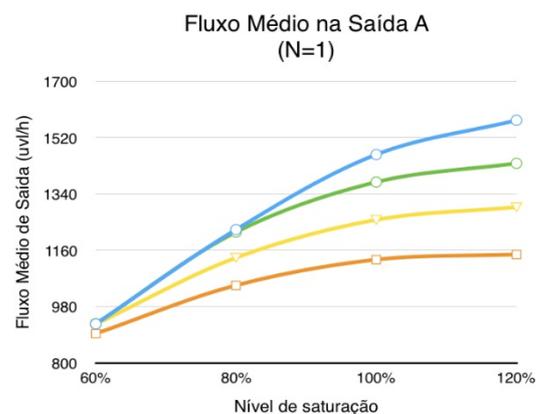


Figura C.5 – Fluxo médio na saída A (N=1)

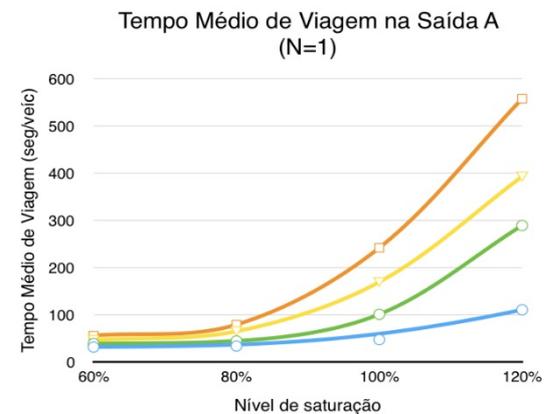


Figura C.6 – Tempo médio de viagem na saída A (N=1)

○ 0 ativações/h ● 15 ativações/h ▲ 30 ativações/h □ 45 ativações/h

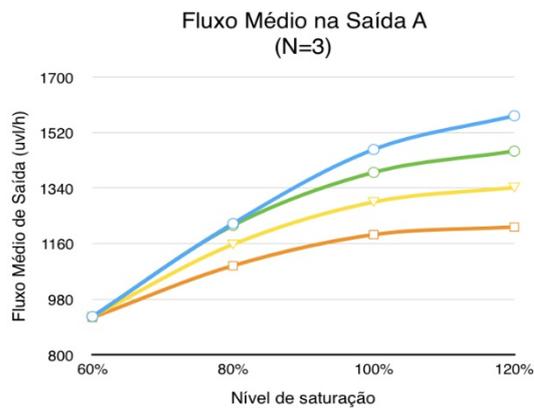


Figura C.7 – Fluxo médio na saída A (N=3)

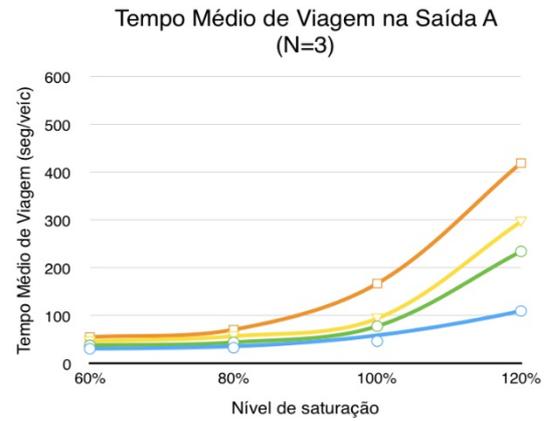


Figura C.8 – Tempo médio de viagem na saída A (N=3)

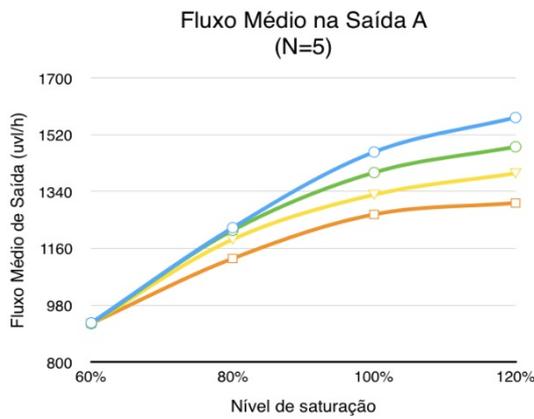


Figura C.9 – Fluxo médio na saída A (N=5)

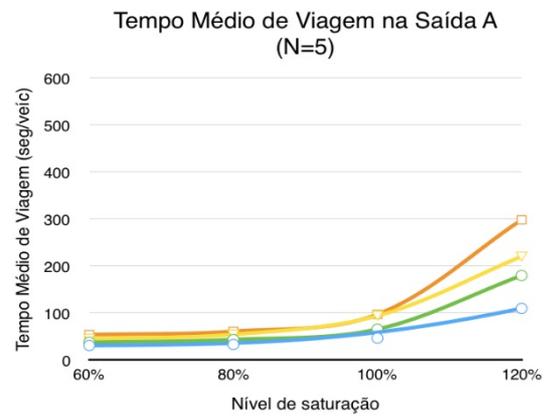


Figura C.10 – Tempo médio de viagem na saída A (N=5)

○ 0 ativações/h ◊ 15 ativações/h ▽ 30 ativações/h □ 45 ativações/h