



Tânia Alexandra Silva Mendes

# AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SOLUÇÕES DE ROTUNDAS INOVADORAS

## PERFORMANCE EVALUATION OF INNOVATIVE ROUNDBABOUTS SOLUTIONS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação,  
orientada pela Professora Doutora Ana Maria César Bastos Silva

Coimbra, julho, 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



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

Tânia Alexandra Silva Mendes

# **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SOLUÇÕES DE ROTUNDAS INOVADORAS**

## **PERFORMANCE EVALUATION OF INNOVATIVE ROUNDBOUTS SOLUTIONS**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação,  
orientada pela Professora Doutora Ana Maria César Bastos Silva

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.  
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer  
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões  
que possa conter.

Coimbra, 26 de julho de 2017

## AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação é o culminar de uma etapa fundamental na minha vida, à qual atribuo grande apreço às excelentes pessoas que fizeram parte desta.

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus pais pelo apoio e disponibilidade incondicional. A eles devo a concretização deste objetivo só sendo possível, porque sempre me acompanharam de forma ativa em todo o meu percurso académico, proporcionando-me as melhores condições para poder estudar e concluir os meus estudos no ensino superior. À minha irmã pela amizade, cumplicidade e apoio prestado em momentos nem sempre fáceis nesta fase académica da minha vida.

Uma palavra de gratidão à Professora Doutora Ana Maria César Bastos Silva que, como orientadora desta dissertação, demonstrou grande preocupação e disponibilidade para me apoiar na realização deste trabalho, dando-me igualmente importantes conselhos e sugestões.

Finalmente, agradeço às pessoas com quem me cruzei em Coimbra e a quem posso chamar de amigas, que tornaram todo o meu percurso académico mais especial, pelo companheirismo nos bons e maus momentos, nas divertidas e longas horas de trabalho e que, sem dúvida, foram um motor de alento e força na conclusão desta epata.

Muito obrigada.

## RESUMO

Desde que surgiu o primeiro conceito de rotunda no final do séc. XIX, que este tem sofrido várias alterações/adaptações, passando pela introdução de várias vias no anel de circulação, até alterações mais profundas que passam pela criação de vários *layouts* alternativos. Atualmente, existem inúmeros estudos que apontam para alguns problemas de segurança das rotundas convencionais, assim como em alguns casos a baixa capacidade. Estes problemas têm vindo a ser mitigados de diferentes formas nos vários países, no entanto, a solução em que o número de pontos de conflito é diminuído provou ser tendencialmente a mais eficiente.

A turborotunda foi dos primeiros conceitos a surgir, na Holanda através do investigador Fortuijn, da Universidade de Delft, tendo como objetivo resolver problemas de segurança associados aos movimentos de entrecruzamento na zona de negociação e atravessamento das rotundas convencionais. Mais tarde surgem os modelos *flower*, *target* e *four-flyover*, criados pelo Prof. Tollazzi, na Universidade de Maribor na República da Eslovénia. O principal objetivo destes quatro modelos é a redução do número de pontos de conflito no anel de circulação, sem condicionar fortemente a sua capacidade. A turborotunda tem como principal característica a introdução de elementos de delimitação física entre vias de modo a definir circuitos em espiral que garantam a devida canalização dos veículos de forma contínua desde a entrada até à saída. A *flower* dispõe em todas as entradas de vias segregadas de viragem à direita. Os modelos *target* e *four-flyover* tem como principal característica o facto de se desenvolverem a diferentes níveis altimétricos.

Neste sentido, esta dissertação centra-se na avaliação do desempenho, em termos de capacidade dos diferentes modelos geométricos de rotunda, alguns deles apresentados muito recentemente justificando, portanto, o desenvolvimento de trabalhos que contribuam quer para a avaliação do seu potencial desempenho quer para a definição dos domínios privilegiados de aplicação. O trabalho foi suportado pela aplicação de técnicas de microsimulação recorrendo ao software AIMSUN. Foi possível concluir que o nível de desempenho da turborotunda é fortemente condicionado pela carga de tráfego e repartição direcional, principalmente para carregamentos de rede em situação de saturação. O modelo *flower* e *four-flyover* é fortemente condicionado pela repartição do tráfego, uma vez que ambos possuem vias segregadas de viragem à direita e à esquerda, respetivamente. Por fim, o modelo *target* apresenta níveis de desempenho muito satisfatórios quer para carregamentos de rede elevados, quer para qualquer uma das repartições direcionais em estudo, sendo de forma geral o modelo de rotunda que atinge o maior nível de desempenho.

## ABSTRACT

Since the first concept of the roundabout at the end of the 19th century, that this has undergone some changes/adaptations, through the introduction of various lanes on the ring movement to the more radical changes that pass through the creation of several alternative layouts. Currently, there are some studies that point to various problems of safety of roundabouts, as well as in some cases the low capacity. These problems have been decreasing in different ways in the various countries, however, the solution in which the number of spots is decreased proved to be the most efficient direction.

The turbo roundabout was one of the first concepts to emerge in the Netherlands through the Fortuijn, researcher at the University of Delft, aiming to solve security problems associated with the motions of interweaving in the negotiation and crossing the roundabouts. Later the flower, target and four-flyover, created by Prof. Tollazzi at the University of Maribor in Slovenia. The main objective of these four models is the reduce the number of conflict points in the circulation ring, without conditioning their capacity. The turbo roundabout has as main feature the introduction of elements of physical delimitation between roads to define spiral circuits that ensure the proper channeling of vehicles continuously from the entry to the exit. The flower has in all entries of segregated lanes of turning to the right. The main characteristics of the target and four-flyover models are that they develop at different altimetric levels.

Therefore, this dissertation focuses on the performance evaluation, in terms of capacity of different geometric models of roundabouts, some of them presented recently justifying, therefore, the development of works that contribute to the evaluation of your performance potential both for the definition of the privileged domains of application. The work was supported by the application of microsimulation techniques using AIMSUN software. It was concluded that the level of performance of the turbo roundabout is strongly conditioned by the traffic load and directional distribution, mainly for saturated network loads. The flower and four-flyover model is strongly conditioned by the traffic distribution, since both have segregated lanes to turn to the right and left, respectively. Finally, the target model presents very satisfactory performance levels for both high network loads and for any of the directional units under study, being generally the routing model that achieves the highest level of performance.

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento do Tema.....	1
1.2	Objetivos da Dissertação.....	3
1.3	Metodologia de abordagem.....	3
1.4	Estrutura da Dissertação.....	4
2	SOLUÇÕES DE ROTUNDAS INOVADORAS.....	5
2.1	Introdução.....	5
2.2	Rotundas do tipo Turbo.....	5
2.2.1	Origem do conceito.....	5
2.2.2	Caracterização geral.....	5
2.2.3	Variações de layouts da turborotunda.....	8
2.2.4	Impactes previsíveis na capacidade e segurança.....	9
2.3	Rotundas do tipo Flower.....	11
2.3.1	Origem do conceito.....	11
2.3.2	Caracterização geral.....	11
2.3.3	Impactes previsíveis na capacidade e segurança.....	12
2.4	Rotundas do tipo Target.....	14
2.4.1	Origem do conceito.....	14
2.4.2	Caracterização geral.....	14
2.4.3	Impactes previsíveis na capacidade e segurança.....	15
2.5	Rotundas do tipo Four-Flyover.....	15
2.5.1	Origem do conceito.....	15
2.5.2	Caracterização geral.....	16
2.5.3	Impactes previsíveis na capacidade e segurança.....	16
2.6	Outros layouts de Rotundas.....	17
2.6.1.	Mini – Rotunda.....	17
2.6.2.	Rotunda com Disposição em anel.....	19
2.6.3.	Rotunda Furada ou do Tipo Hamburger.....	19
2.6.4.	Rotunda Dupla.....	20
2.7	Considerações Finais.....	21
3	CONSTRUÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO.....	25
3.1	Introdução.....	25
3.2	Construção do modelo.....	26
3.3	Seleção do local.....	27
3.4	Recolha de dados de tráfego.....	28

---

3.5	Tratamento de dados.....	29
3.6	Codificação da rede .....	30
3.7	Calibração e validação do modelo.....	33
3.7.1	Calibração.....	33
3.7.2	Validação.....	34
3.8	Considerações finais .....	34
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	36
4.1	Introdução.....	36
4.1.1	Abordagem geral .....	36
4.2	Definição dos cenários.....	37
4.3	Indicadores de desempenho.....	38
4.4	Avaliação do impacto em termos de capacidade global.....	38
4.4.1	Efeito da repartição direcional.....	38
4.4.2	Efeito do grau de saturação .....	44
4.4.3	Demoras médias por veículo .....	51
4.4.4	Capacidade da entrada crítica .....	52
4.4.4.1	Modelo da rotunda Flower .....	52
4.4.4.2	Modelo da Rotunda Turbo.....	54
4.4.4.3	Modelo da rotunda Target .....	55
4.4.4.4	Modelo da rotunda Four-flyover .....	56
4.5	Considerações finais .....	56
5	CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE TRABALHOS FUTUROS .....	58
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	61
	ANEXO I.....	64
	.....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Turborotunda (a), pormenor da delimitação das vias (b) e (c) (Tollazzi, 2010).	6
Figura 2.2 – Turborotunda – Raios de entrada e saída: (a) fase inicial; (b) fase final (Bastos Silva et al, 2013).	7
Figura 2.3 - (a) setas de seleção; (b) painéis de pré-aviso gráfico (Bastos Silva et al, 2013).	7
Figura 2.4 - Fluxos dominantes e Layouts: a) Oval; b) Knee; c) Spiral; d) Rotor. (Bastos Silva, 2013).	8
Figura 2.5 - Pontos de conflito: (a) rotunda convencional de duas vias; (b) turborotunda (Bastos Silva et al, 2013).	10
Figura 2.6 - Rotunda do Tipo Flower (Tollazzi et al, 2014).	12
Figura 2.7 - Pontos de conflito numa rotunda do tipo Flower (Tollazzi et al, 2010).	13
Figura 2.8 – Rotunda do Tipo Flower em Coimbra.	13
Figura 2.9 - Rotunda do Tipo Target (Google@ 2017).	14
Figura 2.10 - Pontos de conflito numa rotunda do tipo Target (Tollazzi et al, 2013).	15
Figura 2.11 - Rotunda do Tipo Four-Flyover (Google@ 2017).	16
Figura 2.12 - Pontos de conflito numa rotunda do tipo Four-Flyover (Tollazzi et al, 2016).	17
Figura 2.13 - Mini-Rotunda em Karlsruhe, Alemanha (Brilon, 2011).	18
Figura 2.14 – Rotunda com disposição em anel (Google@ 2017).	19
Figura 2.15 - Rotunda do Tipo Hamburger (a); Pontos de conflito (b) (Tollazzi et al, 2014).	20
Figura 2.16 - Rotunda do Tipo Dumb-bell (a); Rotunda do tipo Dog-bone (b) (Tollazzi, 2014).	21
Figura 2.17 - 72% do tráfego de entrada virou à direita (Tollazzi et al, 2016).	22
Figura 2.18 - 72% do tráfego de entrada atravessou a interseção (Tollazzi et al, 2016).	22
Figura 2. 19 - 72% do tráfego de entrada virou à esquerda (Tollazzi et al, 2016).	22
Figura 3.1 – Fluxograma da construção do modelo.	27
Figura 3.2 – Rotunda em estudo (Google@ 2017).	28
Figura 3.3 – Nomenclatura dos centróides da rede e localização dos postos de contagem.	29
Figura 3.4 – Localização dos radares móveis.	29
Figura 3. 5 – Os diferentes layouts abordados (sem escala).	31
Figura 4.1 – Fluxograma da construção e análise dos modelos estudados.	36
Figura 4.2 - Comparação da capacidade entre a solução existente e a rotunda do tipo flower.	39
Figura 4.3 - Comparação da capacidade entre a solução existente e a rotunda do tipo target.	40

---

Figura 4.4 – Vista 3D da rotunda do tipo target.	41
Figura 4.5 - Comparação da capacidade entre a solução existente e a rotunda do tipo four-flyover.	41
Figura 4.6 - Vista 3D da rotunda do tipo four-flyover.	42
Figura 4.7 - Comparação da capacidade entre a solução existente e a turborotunda.	43
Figura 4.8 - Efeito do grau de saturação para o Cenário 1.	44
Figura 4.9 - Efeito do grau de saturação para o Cenário 2.	45
Figura 4. 10 - Efeito do grau de saturação para o Cenário 3.	46
Figura 4.11 - Efeito do grau de saturação para o Cenário 4.	47
Figura 4.12 - Efeito do grau de saturação para o Cenário 5.	48
Figura 4. 13 - Efeito do grau de saturação para o Cenário 6.	48
Figura 4.14 - Efeito do grau de saturação para o Cenário 7.	49
Figura 4.15 - Demoras médias por veículo nos diferentes cenários de repartição.	51
Figura 4.16 - Capacidades registadas na entrada 4, para o modelo flower nos diferentes cenários.	52
Figura 4.17 - Capacidades registadas na entrada 4, para o modelo turbo nos diferentes cenários.	54
Figura 4.18 - Capacidades registadas na entrada 1, para o modelo target nos diferentes cenários.	55
Figura 4.19 - Capacidades registadas na entrada 5 mais 6, para o modelo four-flyover nos diferentes cenários.	56
Figura I.1 - Capacidades registadas na entrada 1, para o modelo flower nos diferentes cenários.	64
Figura I.2 - Capacidades registadas na entrada 3, para o modelo flower nos diferentes cenários.	64
Figura I.3 - Capacidades registadas na entrada 5 mais 6, para o modelo flower nos diferentes cenários.	64
Figura I.4 - Capacidades registadas na entrada 1, para o modelo turbo nos diferentes cenários.	65
Figura I.5 - Capacidades registadas na entrada 3, para o modelo turbo nos diferentes cenários.	65
Figura I.6 - Capacidades registadas na entrada 5 mais 6, para o modelo turbo nos diferentes cenários.	65
Figura I.7 - Capacidades registadas na entrada 3, para o modelo target nos diferentes cenários.	66

---

- Figura I.8 - Capacidades registadas na entrada 4, para o modelo target nos diferentes cenários. 66
- Figura I.9 - Capacidades registadas na entrada 5 mais 6, para o modelo target nos diferentes cenários. 66
- Figura I.10 - Capacidades registadas na entrada 1, para o modelo four-flyover nos diferentes cenários. 67
- Figura I.11 - Capacidades registadas na entrada 3, para o modelo four-flyover nos diferentes cenários. 67
- Figura I.12 - Capacidades registadas na entrada 4, para o modelo four-flyover nos diferentes cenários. 67

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Matriz O/D no período 8h15 – 8h30	30
Quadro 3.2- Parâmetros referentes à distribuição de velocidades.	33
Quadro 3. 3 – Comparação dos tempos médios ao longo das entradas E1 e E6 medidos no local com os obtidos no AIMSUN.	34
Quadro 4. 1 – Cenários de repartição direcional.	37

## **ABREVIATURAS**

AIMSUN – Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks

ANSR – Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária

DCI – Diâmetro do Círculo Interno

LIOS – Laboratório de Investigação Operacional e Simulação

RST – Regulamento de Sinalização de Trânsito

uvle – unidade de veículo ligeiro equivalente

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento do Tema

A implantação de rotundas de nível na rede viária, quando devidamente concebidas, resulta normalmente em índices de segurança e capacidade elevados, quando comparados com outras soluções tradicionais de nível, tais como interseções prioritárias ou semaforizadas. Contudo, e face a níveis de procura de tráfego elevados, a capacidade de escoamento de rotundas com uma via, tende a revelar-se insuficiente, o que pode justificar o uso de soluções com múltiplas vias. No entanto, a experiência retirada da sua utilização em diversos países e, também em Portugal, vem realçar a existência de algumas deficiências no seu funcionamento. Entre alguns problemas identifica-se a dificuldade em os condutores selecionarem a via de entrada e de circulação em rotundas de múltiplas vias e a dificuldade de interpretação, por parte dos condutores, das regras de circulação a adotar em função do destino pretendido. Este tipo de dificuldades apesar de não resultar em acidentes graves, está habitualmente na base da geração de conflitos associados a manobras de entrecruzamento e, de um número não negligenciável de acidentes. Estes acidentes são habitualmente pouco graves, envolvendo apenas danos materiais e tendencialmente concentrados nas imediações da entrada e no anel de circulação. Apesar deste tipo de acidentes não apresentarem grande gravidade, afetam o normal funcionamento da rotunda (Vasconcelos, 2014).

Outra condicionante das rotundas de múltiplas vias, tem a ver com o comportamento adotado pelos condutores e conseqüentemente a utilização incorreta das diferentes vias disponibilizadas. Segundo Bastos Silva (2004) tendo por base um estudo comportamental levado a cabo em Portugal, mais de 40% dos condutores em condições livres de circulação entram na rotunda pela via da direita (exterior, adjacente ao passeio) e optam por adotar trajetórias aproximadamente retilíneas, com a conseqüente invasão da via da esquerda (junto ao ilhéu central). Em complemento mais de 20% dos condutores optou por sair da rotunda através da via de circulação exterior, ignorando as marcas rodoviárias. A autora concluiu que este tipo de comportamento tende a estar fortemente relacionado com a geometria da rotunda, e em particular com o nível de deflexão imposto aos condutores e, por inerência da inexistência de elementos físicos que imponham essa mesma deflexão. Concluiu ainda que, por oposição, se a deflexão imposta for elevada, aumenta a probabilidade do condutor desrespeitar as marcações rodoviárias e procurar trajetórias mais retilíneas e, por inerência, mais confortáveis e compatíveis com a prática de velocidades elevadas.

Estes estudos permitem assim concluir que a adoção de rotundas com múltiplas vias, está diretamente relacionada com a geração de um conjunto alargado de conflitos, tendendo a ser agravados pela configuração geométrica adotada. Está ainda comprovado que o nível de segurança diminui significativamente com o número de vias disponibilizadas e com o aumento da procura de tráfego.

Esta constatação tem merecido a preocupação da comunidade técnica e científica internacional, na procura de modos de atuação que permitam melhorar os níveis de segurança global, sem por em causa o nível de fluidez. É assim possível resumir essas formas de atuação em quatro grupos/princípios de base distintos:

- Redução do número de vias de circulação no anel, o que se traduz numa redução significativa dos conflitos por entrecruzamento. Contudo, importa ter noção que esta medida se traduz numa redução substancial da capacidade da rotunda;
- Diminuir a capacidade de entrada e saída, reduzindo o número de vias, este também é uma opção que diminui drasticamente a capacidade da rotunda;
- Aumento do diâmetro da rotunda, o que permite aumentar a distância inter-ramos, e por consequência a distância entre pontos de conflito. Importa referir que esta medida tende a traduzir-se num aumento de velocidade de tráfego (associado ao aumento do raio) o que, se poderá traduzir numa redução do nível de segurança, ao mesmo tempo que resulta em soluções mais exigentes em termos de custos de implantação;
- Procura de *layouts* alternativos que permitam reduzir o número de pontos de conflito, designadamente os mais graves, sem, contudo, comprometer os níveis de capacidade e fluidez.

Esta dissertação centra-se na identificação e avaliação do nível de funcionamento de diferentes soluções geométricas alternativas. É possível encontrar na bibliografia estrangeira diversas referências a *layouts* (Tollazzi et al, 2008), muitos deles ainda sem aplicações práticas. No entanto é possível identificar, atualmente, vários tipos de rotundas em uso um pouco por todo o mundo, embora alguns deles, por serem extremamente recentes permaneçam com utilização limitada em alguns países.

O exemplo mais conhecido da criação de soluções alternativas à rotunda convencional, surgiu na Holanda no final da década de 90 e denomina-se de turborotunda. A turborotunda é uma variante da rotunda de múltiplas vias, na qual os condutores a partir do momento em que escolhem a via de entrada são forçados a seguir um percurso específico, sendo a via de circulação individual em forma de espiral, devidamente delimitada por lancis.

A partir da sua conceção e verificado o seu elevado nível de desempenho, designadamente em termos de segurança, deixaram de ser construídas rotundas convencionais de duas vias na Holanda.

Apesar do seu sucesso, a turborotunda também tem apresentado algumas limitações, nomeadamente na presença de condutores não habituais, sendo o seu elevado desempenho habitualmente associado a espectros de procura muito específico e pouco comuns (Vasconcelos et al, 2014; Bastos Silva, 2015). Nesse sentido, os últimos anos têm sido marcados pela contínua procura de soluções alternativas, tendo-se encontrado referência às seguintes soluções: diferentes variantes do conceito de turborotundas (*turbo-square*, *dogbone*, *compact semi-two-lane roundabout*), a *flower-roundabout* (já com exemplos de aplicação e com resultados satisfatórios), e, embora ainda em fase de desenvolvimento identificam-se as *target* e *four flyover roundabout* (Tollazzi, 2016).

## **1.2 Objetivos da Dissertação**

Com o presente estudo pretendeu-se avaliar o nível de desempenho dos vários *layouts* inovadores de rotundas, apresentados por diferentes autores em publicações da especialidade, comparativamente ao desempenho de uma rotunda convencional, com características geométricas de base similares.

Embora idealmente esta análise, para ser completa, devesse abordar de forma integrada o impacto da adoção de cada uma destas soluções, nas diferentes dimensões do nível de desempenho, com particular ênfase na capacidade, segurança e impactos ambientais. Face às limitações temporais associadas ao desenvolvimento do presente trabalho, levaram a que a análise fosse condicionada à avaliação do desempenho em termos de capacidade, remetendo-se os restantes trabalhos para análises futuras.

Em termos específicos, o objetivo deste estudo centrou-se na avaliação comparativa do desempenho de uma rotunda convencional com múltiplas vias no anel de circulação, relativamente aos vários *layouts* inovadores, tendo-se considerado no âmbito do presente trabalho as soluções, *flower*, *turbo*, *target* e *four-flyover*.

## **1.3 Metodologia de abordagem**

Dada a impossibilidade de testar os modelos referenciados num ambiente rodoviário real, optou-se por recorrer a modelos de simulação de tráfego, os quais se afiguram como ferramentas de apoio adequadas aos objetivos deste trabalho.

O âmbito da presente dissertação passa pela avaliação e comparação do desempenho, resultante da aplicação de diferentes *layouts*. Tendo a consciência que existem inúmeros fatores a ter em conta na globalidade do desempenho de uma rotunda, por motivos de limitação de tempo e

impossibilidade de disponibilização de outros programas de *software* específicos, a presente dissertação foca-se e aprofunda a análise em termos dos níveis de capacidade gerados, quer ao nível da entrada, quer da rotunda em termos gerais. O estudo foi suportado pelo *software* de microsimulação AIMSUN (*Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks*), de referência a nível internacional.

Considerou-se um estudo de caso de uma rotunda convencional real de três vias de circulação no anel e cinco ramos de aproximação como base para a construção dos modelos de microsimulação e de comparação, depois de devidamente calibrado e validado. Efetuaram-se análises de sensibilidade associados a cada modelo, tendo por base um conjunto alargado de cenários de repartição direcional.

#### **1.4 Estrutura da Dissertação**

A presente dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos.

No presente capítulo é apresentado um enquadramento geral do tema, seguido da apresentação dos objetivos do trabalho.

No segundo capítulo apresenta-se uma síntese da revisão da literatura relativamente a conceitos relevantes ao tema, assim como a apresentação dos diferentes *layouts* selecionados para o estudo.

O capítulo 3 começa por descrever a metodologia de abordagem adotada no presente estudo, definindo os indicadores de desempenho assumidos para apoiar as análises comparativas. Faz-se uma apresentação sumária das técnicas de simulação utilizadas. Seguidamente, o capítulo dedica-se à apresentação das várias fases processuais da construção dos modelos, desde a seleção do local, recolha de dados, tratamento de dados, codificação da rede até à calibração e validação.

No capítulo 4 apresenta-se a aplicação das técnicas de microsimulação para apoio à avaliação do desempenho dos diferentes *layouts*, associados a diferentes cenários de procura de tráfego. Por fim, apresentam-se os resultados obtidos referentes às análises comparativas entre os vários modelos.

Finalmente, no quinto capítulo, discutem-se e sintetizam-se as principais conclusões obtidas relativas ao problema estudado. São ainda apontadas algumas perspetivas sobre trabalhos futuros.

## 2 SOLUÇÕES DE ROTUNDAS INOVADORAS

### 2.1 Introdução

O presente capítulo centra-se na caracterização dos diferentes tipos de soluções geométricas de rotundas, criadas recentemente por alguns autores, com o intuito de resolver, ou pelo menos atenuar, os problemas associados ao funcionamento das rotundas convencionais com múltiplas vias. É dado particular destaque ao seu modo de funcionamento e, sempre que disponíveis, ao seu nível de desempenho.

### 2.2 Rotundas do tipo *Turbo*

#### 2.2.1 ORIGEM DO CONCEITO

A turborotunda é um tipo específico de rotunda com circuitos contínuos e fisicamente delimitados por elementos físicos, entre a entrada e a saída, em forma de espiral. Surgiu na Holanda por LGH Fortuijn, um professor da Universidade de Tecnologia de Delft, nos finais dos anos 90. Trata-se de uma variante de uma rotunda convencional com múltiplas vias, onde os condutores são canalizados para as vias mais adequadas às manobras pretendidas. Desde a sua primeira introdução prática em 2000, e face ao seu elevado nível de desempenho comprovado, as rotundas convencionais de duas vias deixaram de ser concebidas neste país (Bastos Silva et al, 2013). Posteriormente este projeto de rotunda inovadora estendeu-se por vários países europeus, como Eslovénia, Alemanha, Dinamarca, Lituânia, República Checa, Hungria, a antiga República Jugoslava da Macedónia (Tollazzi et al, 2016). Desde então, a Holanda conta com mais de 200 turborotundas construídas, tendo já sido desenvolvidas disposições normativas (editadas em abril de 2008) de apoio à sua conceção (Bastos Silva et al, 2013). Vários outros países têm demonstrado interesse em construir esta solução a título piloto, entre outros citem-se os EUA, Itália e Portugal.

#### 2.2.2 CARACTERIZAÇÃO GERAL

A turborotunda é um *layout* diferenciador de uma rotunda com múltiplas vias, revolucionando assim o desenho da rotunda dita convencional. Numa rotunda convencional de duas vias a entrada e saída pode não ser uma operação fácil para os condutores levando, assim a alguns problemas de segurança rodoviária. Este conceito apresenta-se com duas potencialidades relevantes: eliminação dos pontos de conflito relacionados com as manobras de entrecruzamento nas zonas conflituosas, e a redução da velocidade imposta pela presença de elementos de canalização física que impõem um aumento dos níveis de deflexão (Bastos Silva et al, 2013).

Uma das principais características é a introdução de elementos físicos de canalização ao longo das entradas, anel e saída de modo a encaminhar de forma contínua e por trajetórias em espiral o condutor desde a entrada até ao destino pretendido, sem que para isso tenha de recorrer a manobras de entrecruzamento. A separação física das vias é interrompida apenas em locais de entrada no anel, como mostra a figura 2.1. Esta separação física impede assim o entrecruzamento no anel de circulação (Tollazzi et al,2016), sendo que estes elementos de canalização física introduzidos nas entradas do anel e nas saídas da turborotunda, impõem níveis de deflexão mais acentuados, induzindo assim à redução da velocidade de entrada, circulação no anel e saída (Bastos Silva et al, 2013).



Figura 2.1 – Turborotunda (a), pormenor da delimitação das vias (b) e (c) (Tollazzi, 2010).

- Conceção geométrica

O dimensionamento de uma turborotunda assenta em princípios básicos similares ao dimensionamento de rotundas convencionais. Tendo as seguintes regras gerais (Bastos Silva et al, 2013):

- i) perda do direito de passagem nas entradas da turborotunda em relação ao anel de circulação;
- ii) desincentivo a entrecruzamentos nas entradas (ao longo de uma extensão pré-definida), como dentro do anel de circulação;
- iii) o desenvolvimento da espiral deve ser do interior para o exterior e de forma contínua;
- iv) existir, em cada quadrante do anel, um ponto onde o condutor pode optar por sair ou por continuar o movimento circulatório.

Também a dimensão geral da turborotunda é similar a uma rotunda convencional com o mesmo número de vias de circulação no anel, sendo recomendável que o anel não possua mais do que duas vias (três no máximo), já que para valores superiores a turborotunda tenderá a diminuir os níveis de eficiência e sobretudo de segurança (Bastos Silva et al, 2013).

O dimensionamento de uma turborotunda assenta na construção de um anel espiral (denominada concretamente por Espiral de Arquimedes), com o objetivo de limitar a variação da aceleração centrífuga em torno da faixa de rodagem central, o dimensionamento da turborotunda poderá ser visto em pormenor nestes dois documentos, Bastos Silva et al, 2013 e Tollazzi et al, 2016.

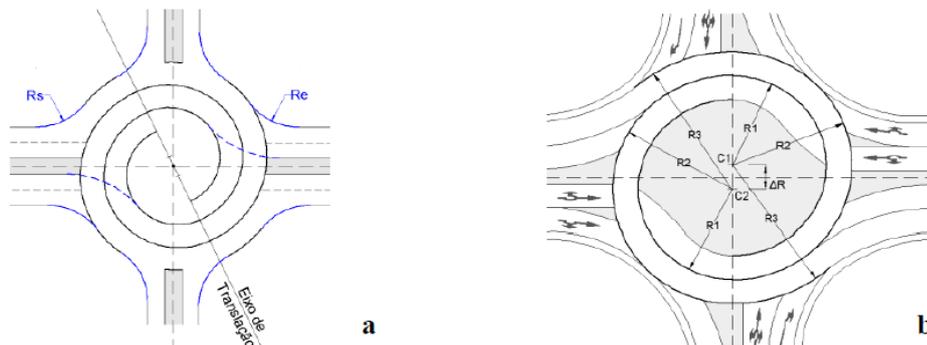


Figura 2.2 – Turborotunda – Raios de entrada e saída: (a) fase inicial; (b) fase final (Bastos Silva et al, 2013).

- Sinalização

Na turborotunda, quer os elementos físicos de canalização quer a marcação rodoviária, assumem um papel determinante na orientação do condutor. A existência de lancis obriga a que, os condutores tenham de escolher a via correta antes de entrar na rotunda, seguindo posteriormente o trajeto pré-definido até à zona de saída. Nesse sentido, a sinalização tem que ser clara e concisa, procurando apoiar o condutor, particularmente na seleção da via na aproximação. Em Portugal, o RST (Regulamento de Sinalização de Trânsito) apenas permite a utilização de setas de seleção convencionais, contudo alguns países, como é o caso da Holanda, regulamentaram o uso de uma seta específica para aplicação em rotundas e turborotundas (Fig. 2.3). Os painéis de pré-aviso também assumem aqui um papel fundamental (Bastos Silva et al, 2013).



Figura 2.3 - (a) setas de seleção; (b) painéis de pré-aviso gráfico (Bastos Silva et al, 2013).

### 2.2.3 VARIAÇÕES DE LAYOUTS DA TURBOROTUNDA

A turborotunda *standard* foi desenvolvida para situações em que existe uma via com maior nível de importância do que a outra. Posteriormente, foram desenvolvidas várias versões de turborotunda para diferentes combinações de dominância do volume de tráfego na via principal e secundária. Existem essencialmente quatro tipologias diferentes de turborotundas (figura 2.4). Os diferentes formatos variam consoante o número de ramos (três ou quatro) e o número de vias de entrada e de saída, denominadas de: *oval*, *knee*, *spiral* e *rotor* (Engelsman e Uken, 2007).

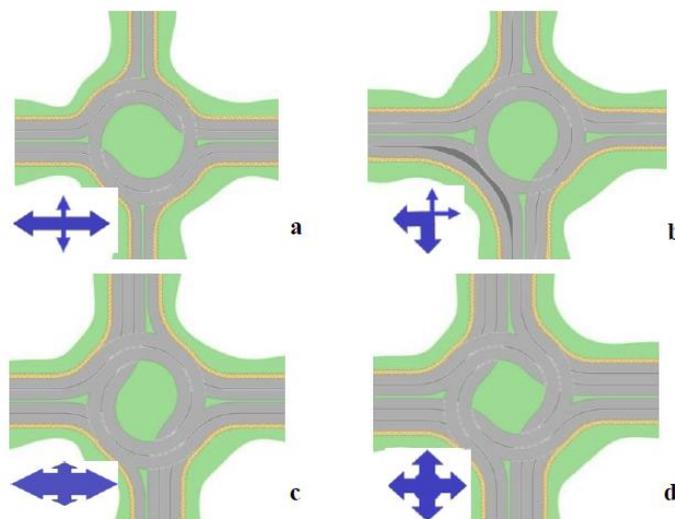


Figura 2.4 - Fluxos dominantes e Layouts: a) Oval; b) *Knee*; c) *Spiral*; d) *Rotor*. (Bastos Silva, 2013).

O layout “*oval*” (figura 2.4 a) foi o primeiro formato de turbo-rotunda a ser concebido e é igualmente o mais comumente aplicado. É a solução mais adequada na presença de vias com hierarquias distintas, onde uma é sujeita a maiores níveis de tráfego. Este layout é definido de modo a minimizar os conflitos entre a via principal e as vias do anel de circulação, e é apropriado a fluxos dominantes associados aos movimentos de ida em frente (Bastos Silva et al, 2013).

Por sua vez, o layout “*knee*” (figura 2.4 b) é aplicado em situações onde se pretendem privilegiar os movimentos de viragem à direita (Engelsman e Uken, 2007), no qual existe inclusivamente uma via segregada de viragem (Bastos Silva et al, 2013).

O layout “*spiral*” (figura 2.4 c) é particularmente adequado a grandes fluxos de tráfego na via principal, onde o movimento dominante é o de ida em frente, combinado com elevados níveis de procura na via secundária, em que os movimentos predominantes são os de viragem à esquerda ou direita (Fortuijn, 2007).

Finalmente, o *layout* “rotor” (figura 2.4 d) à semelhança do anterior é também indicado para responder a significativos níveis de procura, mas onde os movimentos de todas as entradas estão equilibrados (Engelsman e Uken, 2007).

Segundo Bastos Silva et al (2013), de entre as tipologias acima apresentadas (figura 2.4), as que mais se adequam ao desempenho da turborotunda são as três primeiras. Uma característica importante deste conceito é, portanto, a sua versatilidade, pois permite responder eficazmente a interseções entre vias com hierarquias distintas ou similares, e para uma gama elevada de níveis de procura.

Todavia, existe um problema comum a todos estes *layouts* relacionado com as inversões de marcha, atendendo às tipologias apresentadas pode verificar-se que nas vias secundárias nem sempre é possível este movimento de forma natural (Bastos Silva et al, 2013).

#### 2.2.4 IMPACTES PREVISÍVEIS NA CAPACIDADE E SEGURANÇA

Segundo Englesman e Uken (2007) este tipo de solução, tem uma série de vantagens quando comparado com uma rotunda convencional de duas vias, designadamente:

- os conflitos de entrada e saída são eliminados, orientando os condutores para as vias corretas antes de entrar na rotunda, sendo conduzidos até à saída pelas linhas espirais existentes;
- eliminação da necessidade de mudança de via junto das saídas;
- redução do número de pontos de conflito de 24 em rotundas convencionais de duas vias para 14 em turborotundas, eliminando os pontos de entrecruzamento, resultando num aumento de segurança rodoviária;
- em relação aos atrasos dizem-se ser menores, embora as turborotundas existentes atualmente funcionem abaixo da sua capacidade máxima, não existindo conclusões concretas acerca deste tema;
- a capacidade de uma turborotunda é cerca de 25% a 35% maior que a capacidade de uma rotunda convencional de duas vias. Refira-se, contudo, que este resultado tem vindo a ser contestado por diversos autores (Vasconcelos et al, 2014; Bastos Silva e Mariano, 2015);
- induz a adotar velocidades mais baixas ao longo do anel de circulação, promovendo a segurança pedestre;

Estudos levados a cabo por Fortuijn (2007), aplicados à rotunda normal de duas vias e à turborotunda, concluem que é expectável que os veículos que circulam na via exterior da turborotunda atinjam velocidades inferiores aos que circulam na rotunda convencional, uma vez que estão associados a níveis de deflexão superiores. Estes resultados foram comprovados através da aplicação de técnicas de microssimulação tendo-se registado uma redução de cerca

de 10 km/h (redução de 48 para 38 km/h). Estes resultados assemelham-se aos associados a uma rotunda de uma via.

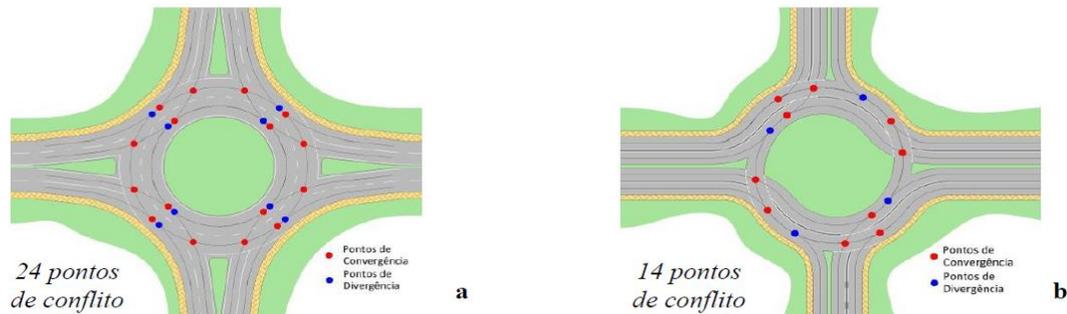


Figura 2.5 - Pontos de conflito: (a) rotunda convencional de duas vias; (b) turborotunda (Bastos Silva et al, 2013).

Ao nível de capacidade os resultados obtidos em vários estudos não são consensuais. Um estudo realizado por Engelsman e Uken (2007) concluí que a turborotunda apresenta ganhos significativos de capacidade, tal como descrito anteriormente. Também Yperman e Immers (2003) recorrendo a técnicas de microsimulação, obtiveram-se aumentos de capacidade entre os 12 e 20% com a transformação de uma rotunda de três vias de circulação numa turborotunda de dimensão similar, tendo concluído que o seu desempenho depende significativamente da repartição do tráfego adotada. Já um estudo realizado recentemente em Portugal por Vasconcelos et al. (2012), recorrendo a microsimulação e tendo por base dois cenários de procura aplicados a um *layout oval* (onde o primeiro tipifica a interseção entre uma via principal e uma secundária com níveis de tráfego semelhantes em ambas as direções, e o segundo contempla uma situação em que a maioria do tráfego das vias secundárias adota o mesmo destino na via principal), conduziu às seguintes conclusões:

- a capacidade das entradas principais das turborotundas é sempre inferior à da rotunda convencional de duas vias, porque o tráfego conflituante está concentrado apenas numa via do anel, enquanto na rotunda convencional de duas vias o tráfego reparte-se pelas duas vias;
- o desempenho relativo das turborotundas piora com o aumento da procura na direção principal, podendo atingir perdas de capacidade na ordem dos 40%;
- nas entradas secundárias, as turborotundas asseguram melhor desempenho, mas apenas para cenários específicos de procura, especialmente quando a proporção de viragens à direita é muito elevada (superior a 60%).

Estes resultados foram igualmente confirmados em estudos posteriores, onde se procurou avaliar o impacto associado quer ao peso da carga da rede, quer à variação em termos de

repartição direcional do tráfego de entrada. Há também a apontar que a capacidade da turborotunda varia consoante o *layout* adotado.

Um trabalho de investigação recente, baseado na aplicação de modelos de estimação de acidentes, demonstra que as turborotundas proporcionam reduções no número de acidentes entre os 40 e os 50%, sendo a reduções de acidentes com feridos entre os 20 e 30% (Tollazzi et al, 2016).

Outra característica importante é a resposta eficaz às exigências de operacionalidade dos veículos pesados, uma vez que os delimitadores físicos no anel são compostos por lancis galgáveis (lancis rampeados com 7 cm de altura máxima e 30 cm de largura) e o ilhéu central inclui uma orla transponível (Bastos Silva et al, 2013). Por sua vez, estes elementos são suficientemente elevados para desincentivar o seu atravessamento por parte dos veículos ligeiros. Pelo lado negativo, os lancis dificultam as operações de remoção de neve e podem ser perigosos para motociclistas (Brilon, 2011).

## 2.3 Rotundas do tipo *Flower*

### 2.3.1 ORIGEM DO CONCEITO

A rotunda do tipo *flower* surgiu no Centro de Construção de Estradas da Faculdade de Engenharia Civil, na Universidade de Maribor na República da Eslovénia, sob a orientação do Prof. Tollazzi. Foi implementada pela primeira vez na cidade de Maribor. Foi executada para fazer face a alguns problemas registados previamente no funcionamento da turborotunda. A turborotunda embora diminua significativamente o número de pontos de conflito mantém algumas debilidades, sendo uma delas o elevado custo de construção, e outra a manutenção de pontos de conflito em cruz, e por inerência com alto nível de gravidade. Assim, face a estes problemas, vários estudos na área científica têm surgido por forma a melhorar a segurança, sendo também uma ótima solução para implementar em áreas urbanas (Tollazzi et al, 2010).

### 2.3.2 CARACTERIZAÇÃO GERAL

Não obstante da boa experiência com as turborotundas na Eslovénia, surgem duas questões associadas às rotundas convencionais:

- *O que é possível fazer nas rotundas convencionais com múltiplas vias para melhorar a sua segurança?*
- *É possível eliminar os pontos de conflito de maior gravidade existentes na atual rotunda convencional, e assim alcançar um maior nível de segurança sem diminuir significativamente a capacidade da rotunda?*

Respondendo à primeira questão, segundo Tollazzi, por razões maioritariamente financeiras, não é expectável que se revele viável a reconversão de todas as rotundas convencionais em

soluções do tipo turborotunda. Em relação à segunda questão, esta coloca-se quando se pondera se é possível combinar as características positivas de diferentes tipos de rotundas, ao mesmo tempo que se elimina as suas características negativas. A solução proposta por Tollazzi é a rotunda do tipo “*flower*”, a qual procura afirmar-se como uma solução alternativa à turborotunda, mas mais económica e onde são banidos os conflitos em cruz.



Figura 2.6 - Rotunda do Tipo *Flower* (Tollazzi et al, 2014).

Em termos gerais, esta solução caracteriza-se pela existência de vias segregadas de viragem à direita em todos os ramos afluentes, permitindo que estes movimentos de viragem se efetivem sem entrar no anel de circulação (Tollazzi et al, 2016). As regras de condução neste tipo de rotunda são semelhantes às impostas numa rotunda convencional de duas vias, sendo a sua utilização recomendável sempre que o volume de veículos que viram à direita é significativo.

### 2.3.3 IMPACTES PREVISÍVEIS NA CAPACIDADE E SEGURANÇA

Uma das vantagens frequentemente apontadas, é o fato desta poder ser implementada dentro das fronteiras de uma rotunda convencional de duas vias, o que do ponto de vista financeiro e de ocupação de espaço é uma mais valia.

Do ponto de vista da segurança rodoviária, este *layout* de rotunda elimina os pontos de conflito de entrecruzamento de veículos, sendo este o ponto de conflito de maior gravidade. Ao mesmo tempo, o fato dos movimentos de viragem à direita não entrarem no anel central e deste passar a oferecer menos uma via de circulação, permite reduzir de forma significativa o número de pontos de conflito, seja do tipo de convergência, divergência ou de cruzamento. Assim, os pontos de conflito existentes na rotunda do tipo *flower* são: 4 de convergência e 4 de divergência, como mostra a seguinte figura.

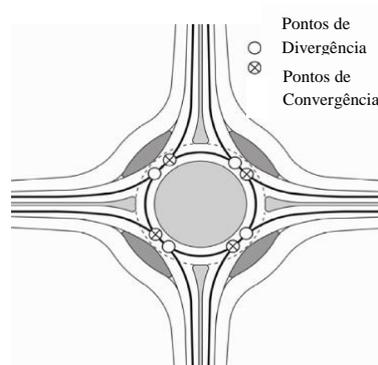


Figura 2.7 - Pontos de conflito numa rotunda do tipo *Flower* (Tollazzi et al, 2010).

Tendo por base estudos de microssimulação realizados por Tollazzi (2010), concluiu-se que não existem diferenças significativas entre a rotunda do tipo *flower*, a rotunda convencional de duas vias (2+2) e a turbotrotunda quando os níveis de procura de tráfego são baixos, sendo os comprimentos de fila e os níveis de saturação similares. O mesmo estudo, mostra que as rotundas do tipo *flower* são sempre melhores, ao nível de capacidade, do que uma rotunda convencional de uma via. Face a uma elevada carga de tráfego, as diferenças concentram-se a favor da rotunda do tipo *flower*, principalmente quando a maioria do tráfego pretende virar à direita, registando-se menores atrasos em comparação com as duas outras soluções. Este tipo de rotunda apresenta-se como sendo uma boa solução, perante uma situação em que o fluxo de tráfego rodoviário que efetua a manobra de viragem à direita é significativo, sendo que quanto maior for a percentagem de veículos a efetuar esta manobra mais eficaz tenderá a ser esta solução ou quando a via principal e secundária tem cargas de tráfego semelhante (Tollazzi et al, 2010).

Uma característica também importante deste tipo de rotunda é o facto de permitir “perdoar erros”, isto é, mesmo que o condutor permaneça na via da esquerda nas imediações da entrada, a solução continua a permitir a viragem à direita na saída mais próxima. Este tipo de rotunda congestiona no momento em que a capacidade da rotunda de uma via é excedida (Tollazzi et al, 2010).

Em Portugal existe pelo menos um exemplo de rotunda do tipo *flower*, recentemente construído em Santa Clara na cidade de Coimbra, sendo constituída por 3 ramos. Em relação ao seu funcionamento, até à data funciona dentro do que era expectável para a zona onde se insere.

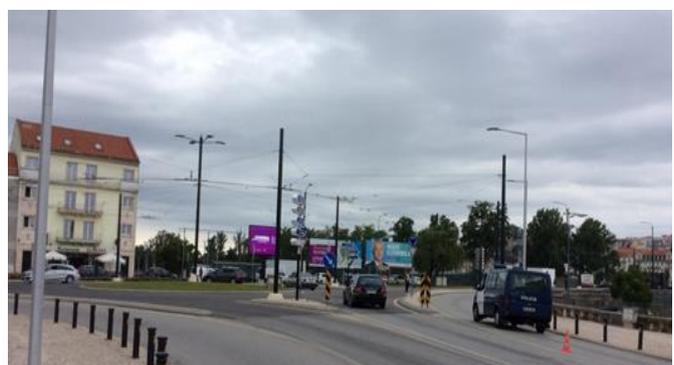


Figura 2.8 – Rotunda do Tipo *Flower* em Coimbra.

## 2.4 Rotundas do tipo *Target*

### 2.4.1 ORIGEM DO CONCEITO

Como já descrito anteriormente, a diminuição do número de pontos de conflito é um objetivo frequentemente seguido sempre que se pretende aumentar os níveis de segurança e, por vezes de capacidade. Este objetivo tem justificado a procura de soluções geométricas alternativas, sendo um exemplo a rotunda do tipo *target* (Tollazzi et al, 2013).

À semelhança da rotunda do tipo *flower*, também a “*target roundabout*” foi criada pelo Prof. Tollazzi do Centro de Construção de Estradas da Faculdade de Engenharia Civil, na Universidade de Maribor, na República da Eslovénia (Tollazzi et al,2013).

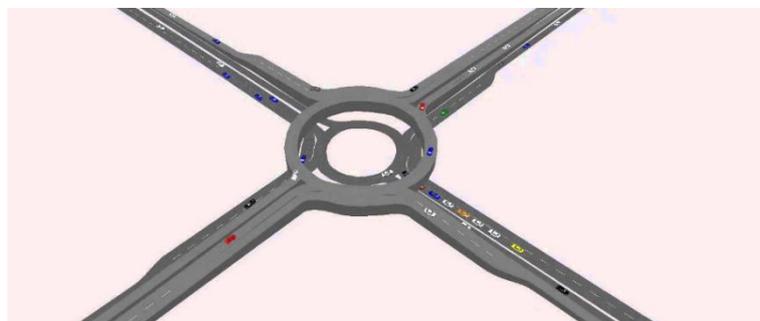


Figura 2.9 - Rotunda do Tipo *Target* (Google@ 2017).

### 2.4.2 CARACTERIZAÇÃO GERAL

A “*target roundabout*” encontra-se atualmente em fase de desenvolvimento teórico desconhecendo-se a existência de algum exemplo construído. Este tipo de rotunda é concebida/projetada como uma rotunda de duas vias, mas com diâmetros externos diferentes, localizados a diferentes níveis altimétricos. À semelhança da *flower*, as viragens à direita são providas de via segregada de viragem à direita, sendo a via da esquerda na aproximação destinada aos restantes movimentos de viragem. (Tollazzi et al, 2013). Em complemento, dois dos ramos de circulação são canalizados para o anel inferior, sendo os restantes ramos canalizados para o anel superior o que potencia uma redução drástica do tráfego conflituante e por inerência um aumento de capacidade.

O modo de funcionamento de uma rotunda do tipo *target* é semelhante ao da turborotunda, embora assente na separação altimétrica das vias de circulação no anel e nas entradas na rotunda (Tollazzi et al, 2016).

O domínio privilegiado de aplicação são as áreas suburbanas, onde há maior disponibilidade de espaço, permitindo materializar as rampas de acesso nas devidas condições geométricas.

Contudo, esta solução também é igualmente aplicável em áreas urbanas já que a solução pode assumir dimensões reduzidas (Tollazzi et al, 2013).

#### 2.4.3 IMPACTES PREVISÍVEIS NA CAPACIDADE E SEGURANÇA

À semelhança da rotunda do tipo *flower*, também este tipo de rotunda permite “perdoar erros”, ou seja, se o condutor se mantiver na via da esquerda tem sempre a possibilidade de sair na primeira saída, liberdade inexistente na turbotrotunda (Tollazzi et al, 2013).

A segregação dos movimentos de viragem à direita, resulta na criação de uma rotunda com uma via de circulação (ao contrário da turbotrotunda), deixando de existir pontos de conflito em cruz, associados ao atravessamento de vias de circulação. A figura seguinte ilustra os pontos de conflito existentes numa rotunda do tipo *target*, sendo 8 de convergência e 8 de divergência (como em duas rotundas de uma via) (Tollazzi et al, 2013).

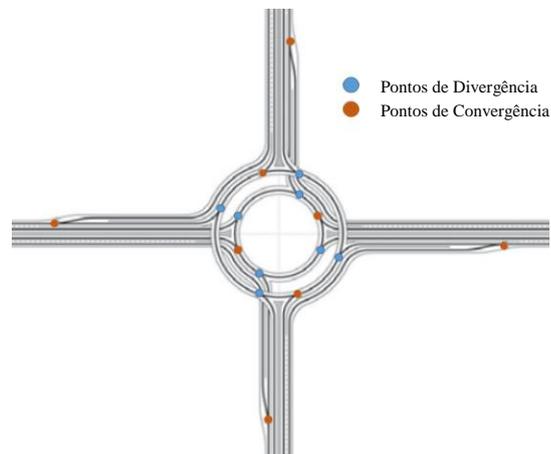


Figura 2.10 - Pontos de conflito numa rotunda do tipo *Target* (Tollazzi et al, 2013).

Tendo por base os trabalhos de microssimulação desenvolvidos por Tollazzi et al., é possível concluir que os fluxos conflituantes em cada entrada são menores do que aqueles registados em rotundas convencionais de duas vias, pelo que os atrasos são igualmente mais reduzidos para as diferentes condições de tráfego, independentemente da distribuição e intensidade de fluxo (Tollazzi et al, 2015). Apesar disso e face ao aumento significativo de custos, resultante da construção da obra de arte, a sua construção só se justifica sempre que os níveis de procura de tráfego sejam significativos.

## 2.5 Rotundas do tipo *Four-Flyover*

### 2.5.1 ORIGEM DO CONCEITO

À semelhança da rotunda *target*, também a rotunda do tipo *four-flyover* se mantém em fase de desenvolvimento, não existindo ainda exemplos reais construídos. Também esta tipologia de solução surgiu no Centro de Construção de Estradas da Faculdade de Engenharia Civil, da Universidade de Maribor na República da Eslovénia, através do Prof. Tollazzi.

Esta solução à semelhança da rotunda do tipo *target*, também assume o desnivelamento a dois níveis, incorporando uma rotunda convencional de nível e o desnivelamento associado aos movimentos de viragem à esquerda.

### 2.5.2 CARACTERIZAÇÃO GERAL

A rotunda *four-flyover*, caracteriza-se pela existência de vias de segregação de viragem à esquerda (vias de deslizamento). Esta rotunda é concebida como uma rotunda de grande dimensão a um determinado nível altimétrico ( $D_{\text{exterior}} = 80 \text{ m}$ ), sendo que as viragens à esquerda são segregadas fisicamente da solução ( $R = 35 \text{ m}$ ) através de vias desniveladas inferior ou superiormente em relação ao prato da rotunda (Tollazzi et al, 2016).

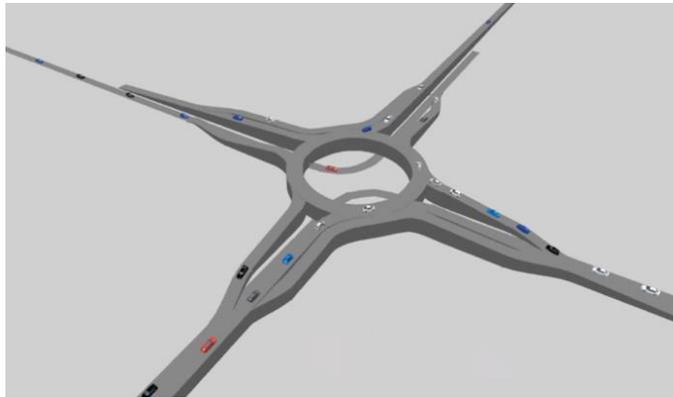


Figura 2.11 - Rotunda do Tipo *Four-Flyover* (Google@ 2017).

Esta rotunda, na sua forma clássica, disponibiliza uma via no anel de circulação, duas vias de entrada nos ramos principais e uma via de entrada nas entradas secundárias.

### 2.5.3 IMPACTES PREVISÍVEIS NA CAPACIDADE E SEGURANÇA

Na rotunda do tipo *four-flyover* devido à sua grande dimensão ( $D_{\text{exterior}} = 80 \text{ metros}$ ) e separação altimétrica dos movimentos de viragem à esquerda, a redução dos pontos de conflito é significativa. Assim, são eliminados os pontos de conflito associados a manobras de entrecruzamento, passando a existir apenas 4 de convergência e 4 de divergência, como mostra a seguinte figura (Tollazzi et al, 2016).

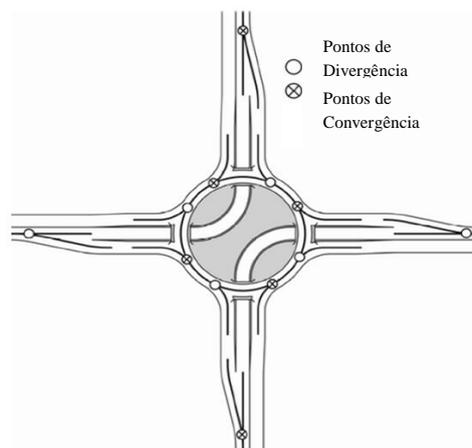


Figura 2.12 - Pontos de conflito numa rotunda do tipo *Four-Flyover* (Tollazzi et al, 2016).

Ao nível da capacidade, não são conhecidos resultados publicados sobre o desempenho da solução comparativamente a outras soluções tradicionais. O único trabalho encontrado corresponde a uma análise comparativa, baseada em técnicas de microssimulação, comparando a capacidade de uma *four-flyover* com uma rotunda convencional de duas vias. Concluiu-se que esta solução alternativa oferece uma maior capacidade e menores tempos de espera comparativamente à rotunda tradicional. Ainda assim, e tal como seria expectável, este tipo de rotunda mostrou ser mais eficaz quando as viragens à esquerda prevalecem (Tollazzi et al, 2016).

## 2.6 Outros layouts de Rotundas

Neste subcapítulo serão apresentados muito sumariamente outros tipos de rotundas, já existentes em vários países. Além dos *layouts* já descritos nos subcapítulos anteriores, existem outros também considerados como alternativas às rotundas convencionais, como é o exemplo da mini-rotunda, rotunda dupla e com disposição em anel, rotunda furada ou do tipo *hamburger* e rotunda dupla (tipo *dumb-bell* ou do tipo *dog-bone*) sendo esta última desnivelada (Tollazzi et al, 2014 e Brilon, 2011). Estes *layouts* têm surgido para solucionar problemas existentes em cruzamentos prioritários e também em rotundas convencionais de múltiplas vias.

De seguida são apresentadas algumas das características gerais destes tipos de rotundas.

### 2.6.1. MINI – ROTUNDA

A mini-rotunda existe em vários países, como é o caso do Reino Unido, onde tiveram a sua introdução no início da década de 1970 (Bodé et al, 2006). Já na Alemanha as experiências começaram em 1995 no estado de Northrhine-Westphalia, com treze cruzamentos sem sinalização a serem convertidos em mini-rotundas. Os resultados obtidos foram extremamente interessantes, particularmente em termos de capacidade, com débitos que atingiram cerca de 17 000 veículos/dia. Também os atrasos reduziram, sendo ainda caracterizadas por

apresentarem baixos custos de investimento, mostrando-se também muito seguras. Estudos realizados posteriormente, por Brilon (2011) mostram uma redução muito significativa na taxa de acidentes.



Figura 2.13 - Mini-Rotunda em Karlsruhe, Alemanha (Brilon, 2011).

Em Portugal, a sua aplicação limita-se ainda a um número muito restrito, sendo igualmente a experiência bastante positiva.

Este tipo de solução tem vindo a ser adotada com a finalidade de melhorar o funcionamento de cruzamentos prioritários, com 3 ou 4 ramos. A experiência tem demonstrado que não devem ser aplicadas em cruzamentos com 5 ou mais ramos (Bodé et al, 2006). Esta solução trouxe algumas vantagens relativamente aos cruzamentos prioritários, como dar prioridade aos veículos que pretendem virar à direita, facilitar o acesso e reduzir o atraso nas estradas secundárias, melhorar a capacidade em cruzamentos saturados, redução do número de acidentes e gravidade destes (Bodé et al, 2006). Esta solução tem a sua maior aplicação em área urbanas, onde a presença de veículos pesados é reduzida, pois estes têm dificuldades em contorná-la. Sendo a velocidade máxima permitida de 50km/h (Brilon, 2011).

As mini-rotundas caracterizam-se pela existência de uma ilha central galgável com diâmetro inferior a 4 metros e por DCIs (Diâmetro do Círculo Interno) compreendidos entre 14 e 28 metros. A ilha central pode ser materializada em relação ao anel de circulação, ou pode por e simplesmente ser demarcada no pavimento, como sinalização horizontal. A solução materializada é aplicável a DCIs superiores a 18 metros, devendo ter uma altura máxima de 12 centímetros no centro, sendo que a faixa do anel de circulação deverá ser suficientemente larga para acomodar as necessidades de manobra dos veículos pesados, já que estes têm total liberdade de galgar a ilha central, nomeadamente nas viragens à esquerda, daí ser inaceitável a implantação de qualquer tipo de dispositivo no seu interior, como sinais, postes de iluminação ou mobiliário urbano (Bastos Silva e Seco, 2008).

### 2.6.2. ROTUNDA COM DISPOSIÇÃO EM ANEL

A rotunda com disposição em anel (figura 2.14) é uma solução pouco vulgar, sendo caracterizada por alguma complexidade e perda de legibilidade face a outras soluções (Bastos Silva e Seco, 2008).

As rotundas dispostas em anel, pela sua invulgaridade e por permitirem a circulação nos dois sentidos do anel, associam-se a dificuldades acrescidas de interpretação por parte dos condutores, particularmente os menos habituais.

A sua aplicação deve ser condicionada particularmente em países não familiarizados com o seu funcionamento, como é o caso de Portugal. Devem ainda limitar-se preferencialmente ao tratamento de zonas que permitam assegurar consideráveis distâncias entre os diferentes ramos afluentes e, por sua vez, a grandes raios da ilha central (Bastos Silva e Seco, 2008), como é o caso de vias circulares em torno de um bairro ou de uma zona urbana.



Figura 2.14 – Rotunda com disposição em anel (Google@ 2017).

### 2.6.3. ROTUNDA FURADA OU DO TIPO HAMBURGER

As rotundas furadas ou do tipo *hamburger* (figura 2.15) são soluções cuja ilha central é atravessada por uma via considerada prioritária, subdividindo-a em dois semicírculos laterais. Esses semicírculos destinam-se a canalizar e direcionar os movimentos com origem nas vias secundárias e os movimentos da via principal que pretendem mudar de direção (Bastos Silva e Seco, 2008). O diâmetro do círculo inscrito é variável, sendo recomendável o uso de dimensões próximas de 60 metros (Tollazzi et al, 2014).

Apesar de terem sido muito utilizadas em alguns países, nomeadamente em Espanha e Reino Unido, constituem soluções difíceis de compreender pelo condutor e às quais estão associados elevados níveis de sinistralidade, e de acidentes com gravidade. Pode ainda, resultar numa considerável redução dos níveis de serviço e de segurança associados aos movimentos secundários que exigem o atravessamento da corrente principal, contudo aos movimentos principais não estão associadas demoras. A existência de conflitos a 90°, conflitos estes com

elevada gravidade, têm justificado a transformação deste tipo de rotundas em rotundas normais ou em cruzamentos semaforizados.

As regras de regulação das prioridades que lhe estão associadas definem um modo de funcionamento que se afasta significativamente do princípio implícito ao funcionamento das rotundas, pelo que este tipo de solução não é habitualmente integrado no conjunto das tipologias de interseções giratórias (Bastos Silva e Seco, 2008).

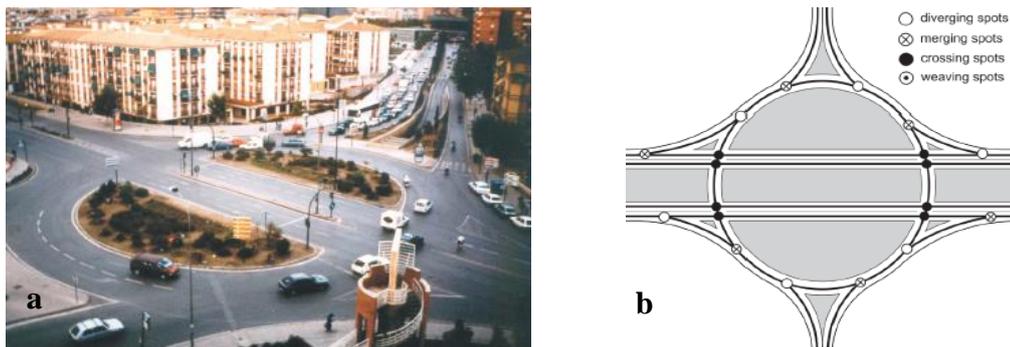


Figura 2.15 - Rotunda do Tipo *Hamburger* (a); Pontos de conflito (b) (Tollazzi et al, 2014).

#### 2.6.4. ROTUNDA DUPLA

Esta solução apoia-se num viaduto central que interliga duas rotundas compactas, localizadas lateralmente em relação à faixa de rodagem da via considerada prioritária, as quais são responsáveis pelo redirecionamento dos movimentos de mudança de direção e do tráfego proveniente das vias secundárias (figura 2.16). Deverão existir alguns cuidados no dimensionamento dos acessos não só no que toca à sua capacidade, mas também garantir que estão visíveis (Bastos Silva e Seco, 2008).

Adaptam-se particularmente bem na resolução de pontos de conflito entre vias, onde, pela sua importância se pretende beneficiar determinado movimento direcional. Surgem assim, essencialmente inseridas nos acessos a autoestradas ou a vias arteriais, onde a sua importância funcional justifique um grande investimento inicial. Podem constituir igualmente soluções economicamente rentáveis no ordenamento de cruzamentos, sempre que uma das vias intersectadas surge em escavação ou aterro (Bastos Silva e Seco, 2008).

Este tipo de solução é muito frequente em vários países europeus, como é o exemplo da Eslovénia, mas o maior número de rotundas duplas está localizado nas Ilhas Canárias, onde praticamente todos os cruzamentos desnivelados são constituídos por rotundas duplas, quer do tipo *dum-bell*, quer do tipo *dog-bone* (Tollazzi, 2014)

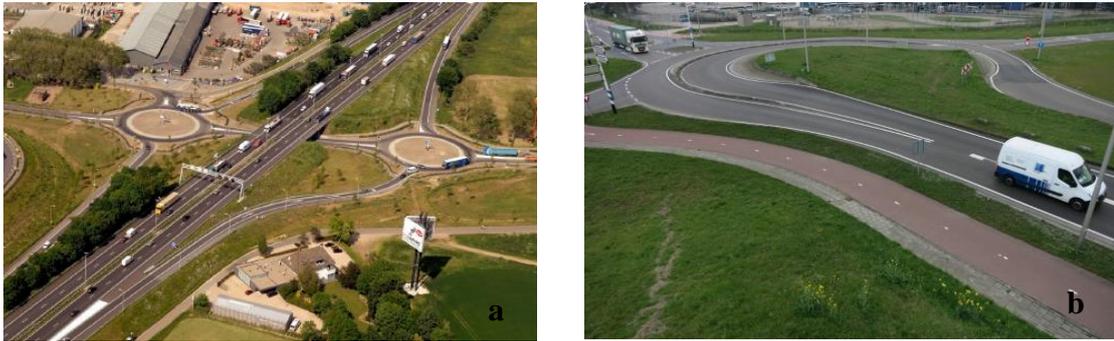


Figura 2.16 - Rotunda do Tipo *Dumb-bell* (a); Rotunda do tipo *Dog-bone* (b)  
(Tollazzi, 2014).

## 2.7 Considerações Finais

Neste capítulo apresentou-se um conjunto limitado de soluções alternativas às rotundas tradicionais. Tollazzi, criador da maioria destas tipologias, designadamente das mais recentes, desenvolveu recentemente um trabalho de avaliação comparativa, cujos resultados são aqui apresentados de forma resumida.

Esta avaliação comparativa foi realizada tendo por base os atrasos, para oito tipos de rotundas distintas:

- Turbo;
- *Target*;
- *Four-flyover*;
- *Flower-Yield* (vias segregadas de viragem à direita com sinal de cedência de prioridade);
- *Flower-Free* (vias de segregadas de viragem à direita com fluxo contínuo);
- Rotunda convencional com uma via de entrada e uma de saída (1+1);
- Rotunda convencional com uma via de entrada e duas de saída (1+2) e
- Rotunda convencional com duas vias de entrada e duas de saída (2+2).

O estudo teve por base 3 cenários de repartição da procura, onde o fluxo de entrada variou entre os 225 e os 4 775 veículos/h:

- 72% do tráfego de entrada virou à direita, 13% atravessou a interseção e 15% virou à esquerda;
- 72% do tráfego de entrada atravessou a interseção, 13% virou à direita e 15% virou à esquerda e
- 72% do tráfego de entrada virou à esquerda, 13% atravessou a interseção e 15% virou à direita.

Posto isto, os resultados obtidos por Tollazzi (2016) estão apresentados nos seguintes gráficos.

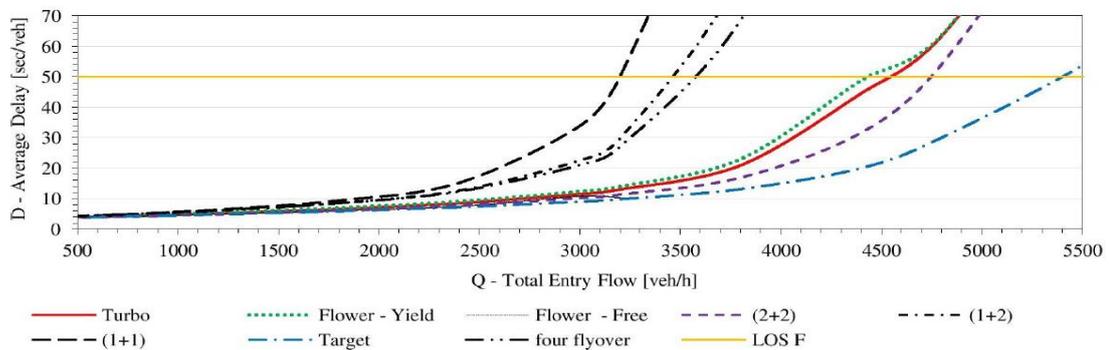


Figura 2.17 - 72% do tráfego de entrada virou à direita (Tollazzi et al, 2016).

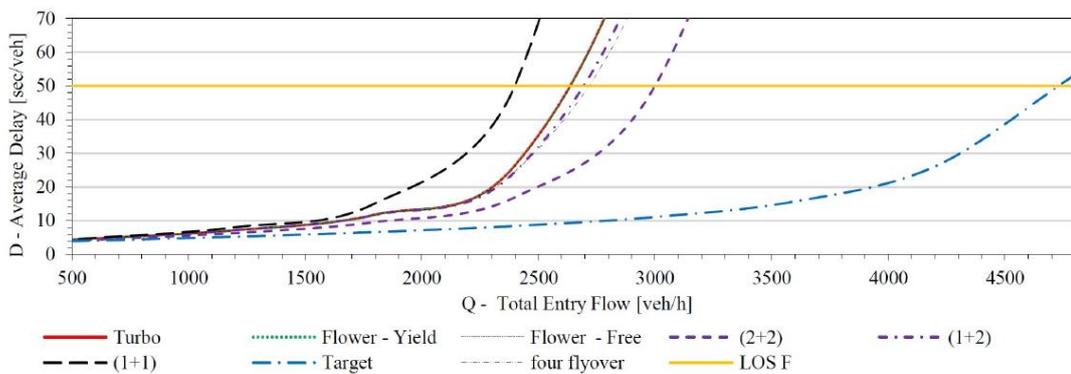


Figura 2.18 - 72% do tráfego de entrada atravessou a interseção (Tollazzi et al, 2016).

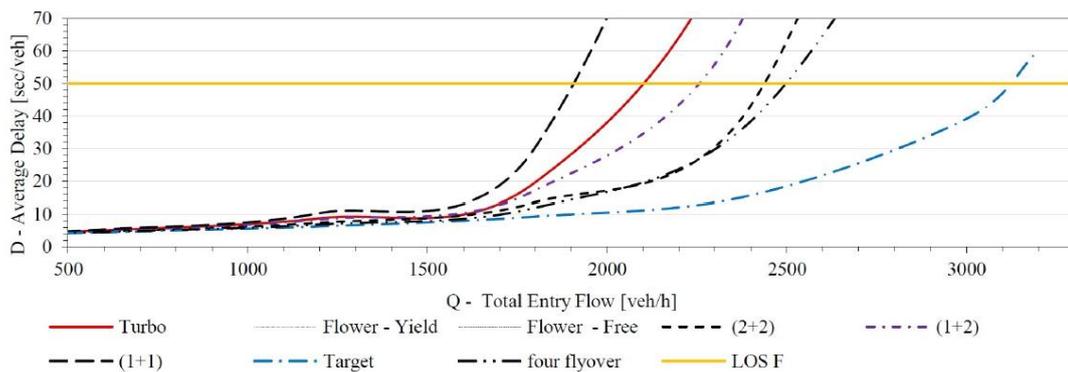


Figura 2.19 - 72% do tráfego de entrada virou à esquerda (Tollazzi et al, 2016).

Analisando os gráficos, uma das primeiras conclusões a tirar é que independentemente do *layout* de rotunda adotado, as soluções tendem a apresentar melhores níveis de desempenho sempre que há prevalência dos volumes de viragem à direita (72%).

Também qualquer que seja a distribuição de tráfego adotada, a rotunda do tipo *target* é a que atinge sempre o melhor nível de desempenho quando comparada com os restantes tipos de rotundas. Por oposição, e tal como seria expectável, a solução que apresenta menores fluxos de entrada, (e por inerência os maiores atrasos) é a rotunda convencional de uma via de entrada e uma via de saída (1+1). Como já referido nos subcapítulos anteriores este tipo de rotunda apresenta baixos níveis de capacidade particularmente quando comparados com os assegurados pelas restantes soluções com 2 vias.

Relativamente à turborotunda é possível verificar que esta atinge o seu melhor desempenho em termos de capacidade de entrada quando 72% do fluxo de entrada vira à direita, embora apresente níveis de desempenho ligeiramente inferiores aos da rotunda convencional com duas vias de entrada e duas de saída (2+2), o que vem de encontro aos estudos levados a cabo por outros autores (ver 2.2.4). Para as outras duas distribuições de tráfego a rotunda (2+2), tem uma clara vantagem relativamente à turborotunda, com uma diferença aproximadamente de 500 veículos/h.

A rotunda do tipo *flower*, adapta-se particularmente bem a situações onde as viragens à direita prevalecem, uma vez que oferece vias segregadas destinadas a servir este movimento.

Já a rotunda *four-flyover*, apresenta maiores níveis de desempenho quando as viragens à esquerda prevalecem, já que dispõem de vias segregadas de viragem à esquerda.

Em suma, a rotunda que apresenta menores atrasos, para os diferentes cenários de procura de tráfego é a rotunda do tipo *target*, uma vez que a disponibilização de dois anéis de circulação a diferentes níveis altimétricos se traduz numa redução significativa do fluxo conflituante em todas as entradas. Contudo, a sua eficácia é contrabalançada pelo aumento dos seus custos de construção, já que exige a construção de uma segunda rotunda completamente desnivelada. Esta suposição é confirmada pelo trabalho de Tollazzi (2015) que apresenta uma análise comparativa, em termos de custos, para as diferentes soluções geométricas:

1. Rotunda do Tipo *target*: 3.980.000€
2. Rotunda do Tipo *four-flyover*: 2.050.000€
3. Rotunda do Tipo *flower*: 1.200.000€
4. Rotunda convencional com uma via de entrada e uma via no anel de circulação (1+1): 1.050.000€
5. Rotunda convencional com uma via de entrada e duas vias no anel de circulação (1+2): 1.120.000€
6. Rotunda convencional com duas vias de entrada e duas vias no anel de circulação (2+2): 1.300.000€

Apesar de não estar mencionado, a turborotunda terá um custo aproximado ao de uma rotunda convencional com duas vias de entrada e duas vias no anel de circulação (2+2).

## 3 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

### 3.1 Introdução

Com o desenvolvimento tecnológico e a evolução da capacidade computacional, a resolução de problemas de grande escala foi sendo mais rápida, eficaz e simplificada. A utilização de modelos de simulação de tráfego tornou-se uma ferramenta eficaz para a determinação dos benefícios e dos impactos de projetos a nível dos transportes. O teste de sistemas através da simulação exige menos recursos e maior segurança, uma vez que não é necessária a sua implementação na rede real. Tem surgido uma grande variedade de *software*, que atualmente se discute e compara, uma vez que nem todos derivam dos mesmos pressupostos. As simulações de tráfego tornam-se cada vez mais simples e eficazes em função da evolução tecnológica, no entanto continuam a ser um processo complexo (Vilarinho, 2014).

Segundo Vilarinho (2014), os modelos de simulação podem ser classificados de acordo com o nível de detalhe que conseguem representar. A classificação tem em conta as entidades consideradas e o seu nível de descrição, podendo dividir-se da seguinte forma:

- **Sub-microscópicos:** modelos com nível de detalhe, descrevendo o funcionamento de partes do veículo, o seu comportamento pormenorizado e do seu condutor;
- **Microssimulação:** avaliam o tráfego detalhadamente representando cada veículo como uma entidade com determinadas características espaciais e temporais, sensíveis ao comportamento do próprio veículo e do condutor. A sua parametrização está integrada nos seguintes principais modelos microscópicos que visam descrever o comportamento dos condutores, designadamente (Vasconcelos, 2004):
  - “*car-following*” ou “seguimento do veículo”, representativo da reação do condutor perante o movimento do veículo que segue à sua frente;
  - “*gap-acceptance*” ou “intervalo de aceitação”, decisão de atravessar ou aguardar numa interseção;
  - “*lane-changing*” ou “mudança de via”, que modela a motivação e a possibilidade de o veículo mudar de via, tendo por base o seu objetivo próximo.

- **Mesossimulação:** nível de detalhe intermédio não distinguindo os veículos como elementos singulares, mas sim como pelotões, com aplicação dos modelos fundamentais na atribuição à rede;
- **Macrossimulação:** calculam o tráfego como um todo (“fluído”), não fazendo distinção entre as partes que o constituem, funcionando como uma representação simplificada da realidade, onde as redes são modeladas através de arcos (vias de comunicação) e nós (interseções entre as vias), equiparando-se a um modelo de grafos.

O presente trabalho foi suportado pelas técnicas de microssimulação. No desenvolvimento do caso de estudo recorreu-se ao *software* AIMSUN (*Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks*), disponibilizado pela área científica de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação do Departamento de Engenharia Civil.

A origem deste *software* remonta aos anos 90, tendo sido concebido e desenvolvido pelo Laboratório de Investigação Operacional e Simulação (LIOS), do grupo de investigação pertencente ao Departamento de Estatística e Investigação Operacional da Universidade Politécnica da Catalunha em Espanha. O AIMSUN é capaz de reproduzir em ambiente virtual as condições reais de tráfego em diferentes redes viárias. Atualmente, o AIMSUN é um produto comercial que consiste num simulador microscópico de tráfego que tem como principal objetivo a simulação de tráfego em redes urbanas e interurbanas. Os modelos existentes no AIMSUN e a sua arquitetura são capazes de modelar detalhadamente uma rede viária, permitindo distinguir diferentes tipos de veículos, modelar a procura de tráfego através de volumes de tráfego e proporções de viragens ou de matrizes origem-destino (O/D) e de modelos de escolha de percursos (Macedo e Benta, 2013). O AIMSUN tem provado ser muito útil no teste de novos sistemas de controlo de tráfego e na gestão de políticas baseadas nas tecnologias tradicionais ou na implementação de Sistemas Inteligentes de Transportes (ITS – *Intelligent Transport Systems*) (Vilarinho et al., 2014). Como tal, a utilização desta aplicação tem provado ser bastante útil, daí a justificação da sua utilização no presente trabalho.

### 3.2 Construção do modelo

A construção de um modelo de microssimulação contempla quatro passos importantes: i) codificação da rede simulada, tendo por base as características da infraestrutura real; ii) caracterização da procura de tráfego automóvel; iii) calibração do modelo, através de ajustes na parametrização do modelo procurando-se obter uma representação o mais realista possível; iv) validação do modelo, recorrendo a recolhas de dados independentes.

A Figura 3.1 apresenta um fluxograma ilustrativo da metodologia adotada no âmbito do presente estudo, por forma a melhorar a compreensão dos mesmos.

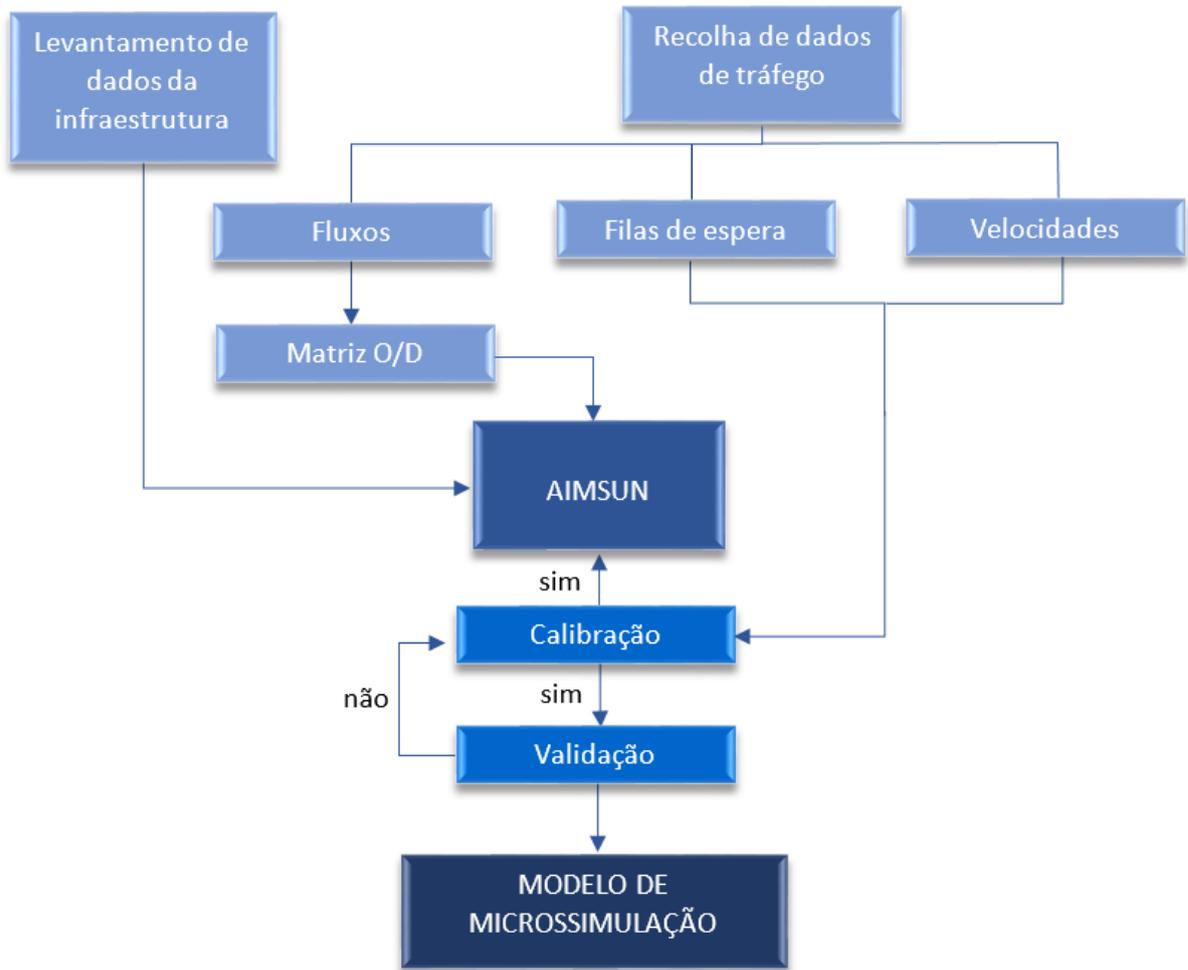


Figura 3.1 – Fluxograma da construção do modelo.

### 3.3 Seleção do local

A presente dissertação pretende avaliar o desempenho das soluções apresentadas no capítulo anterior, sendo elas, rotundas do tipo *turbo*, *flower*, *target* e *four-flyover*. Optou-se por basear o estudo com um exemplo real de modo a proporcionar uma análise mais realista do problema.

O local selecionado incidiu na cidade de Coimbra, num dos pontos de entrada na cidade, mais concretamente na rotunda do Almegue, na interseção da Variante Sul a Coimbra com a Avenida Professor Mário Silva (Via rápida de Taveiro). A solução atual, que impõe um funcionamento em sentido giratório, do tipo rotunda, é uma praça com formato retangular, com três vias de circulação e cinco ramos de aproximação como ilustrada na figura 3.2. A escolha desta rotunda deve-se ao facto de esta se localizar numa zona periurbana, sujeita a níveis de tráfego elevados, principalmente na hora de ponta da manhã.



Figura 3.2 – Rotunda em estudo (Google@ 2017).

### 3.4 Recolha de dados de tráfego

A construção do modelo de microssimulação (AIMSUN) pressupõe a definição das matrizes O/D (origem/destino) correspondente aos diferentes tipos de veículos. A obtenção desta matriz obriga, habitualmente à disponibilização de elevados recursos humanos e económicos ou temporais, uma vez que, o ideal seria integrar a variabilidade diária e semanal através de recolhas de dados em diferentes períodos do dia e em vários dias da semana.

Neste caso específico, devido à dimensão e ao elevado fluxo de tráfego existente na rotunda a recolha de dados exigiria elevados recursos humanos. No âmbito da presente dissertação, optou-se por utilizar os dados de tráfego recolhidos, com base numa extensa campanha de recolha de dados de campo, levada a cabo em 2011. Optou-se por não fazer a atualização da matriz por se considerar que não se registaram alterações muito significativas ao longo dos últimos anos. Por outro lado, importa ter presente que o objetivo do modelo é servir de base às análises comparativas, não sendo por isso imperioso representar, de forma fidedigna, uma determinada realidade. Ao optar-se por modelar uma situação real, pretende-se garantir que os resultados obtidos são realistas e, portanto, obteníveis.

O período de recolha de dados foi limitado à hora de ponta da manhã, com início às 7h30 e término às 9h30, tendo sido dividida em períodos de 15 minutos. A metodologia de recolha de dados adotada baseou-se na realização de contagens direcionais dos fluxos de tráfego, complementada por registos de matrículas, registo das filas de espera e gravação vídeo. A recolha foi efetuada em dois dias, sendo no primeiro dia realizadas as contagens direcionais e no segundo os registos das matrículas nas entradas e saídas. Esta recolha envolveu um total de 14 observadores, em que as categorias de veículos registadas foram: veículos ligeiros, veículos pesados de passageiros, veículos pesados de mercadorias e veículos de duas rodas. Na seguinte figura estão representados os postos de cada observador, sendo que em todos os postos foram contabilizados os fluxos de entrada e de saída.



Figura 3.3 – Nomenclatura dos centróides da rede e localização dos postos de contagem.

Segundo o relatório apresentado pelos estudantes (Pankowska et al, 2011) referente à recolha de dados há a ter em atenção, o registo das filas de espera, pois apenas foi contabilizada a de acesso à estrada E3, uma vez que nenhuma das restantes alcançou nenhum observador, os quais foram posicionados a uma distância bastante considerável da entrada da interseção.

Complementarmente e, com vista a apoiar os trabalhos de calibração, recorrendo a um radar móvel procedeu-se ao registo das velocidades praticadas em vários troços na aproximação como ilustra a figura 3.4.

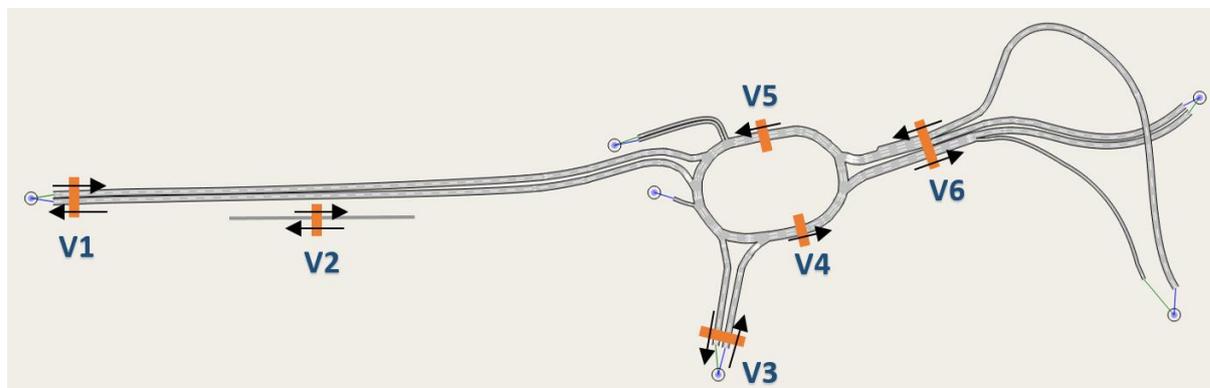


Figura 3.4 – Localização dos radares móveis.

### 3.5 Tratamento de dados

Tendo por base os dados apresentados anteriormente o seu tratamento dividiu-se em duas fases: (i) compilação dos dados em ficheiro Excel, (ii) obtenção das matrizes O/D necessárias para o funcionamento da plataforma de microsimulação.

O primeiro passo passou por calcular os volumes de tráfego associados aos diferentes movimentos direcionais e para cada uma das entradas da rotunda em estudo. Há que referir que as inversões de marcha não foram contabilizadas, por forma a simplificar o procedimento,

sendo que, é expectável que pela sua pouca relevância, as mesmas não tendem a afetar de forma significativa o funcionamento do modelo.

Deste procedimento resultaram um total de 8 matrizes O/D para cada uma das tipologias de veículo, ou seja, veículos ligeiros, pesados, *bus* e veículos de duas rodas, perfazendo no total 32 matrizes O/D, correspondentes aos níveis de procura associados a cada período de 15 minutos. A dimensão das matrizes O/D resulta do número de origens e de destinos associados a centróides, ou seja, 6x6 (quadro 3.1). De referir que para as restantes soluções em estudo a entrada referente ao centróide E8 (exclusiva para *bus*), deixará de existir passando estes veículos para o centróide E3, reduzindo a dimensão da matriz O/D para 5x5.

De forma a facilitar a análise, na fase de criação dos diferentes cenários de análise, optou-se por converter os diferentes tipos de veículos em unidades de veículos ligeiros equivalentes (uvle). Para o efeito considerou-se um fator de conversão dos veículos pesados e *bus* de 2 e para os veículos de duas rodas um fator igual a 0,5.

		Destino						Total
		(8:15 - 8:30)	S1	S3	S4	S5	S6	
Origem	E1	0	0	13	97	322	0	432
	E3	0	0	0	23	73	0	96
	E4	20	6	0	25	285	0	336
	E5	111	9	23	0	0	0	143
	E6	187	28	138	0	0	0	353
	E8	0	0	0	2	4	0	6
Total		318	43	174	147	684	0	<b>1366</b>

Quadro 3.1 – Matriz O/D no período 8h15 – 8h30

O quadro 3.1 apresenta a matriz O/D convertida em uvle, obtida para os 15 minutos de maior procura, correspondente ao período de 8:15 às 8:30.

Esta matriz foi extrapolada para o período global de 75 min. (1h15min.) de forma a garantir a estabilidade do sistema, tendo-se rejeitado os primeiros 15 minutos, por se considerarem corresponder ao período de carregamento da rede (warm-up).

### 3.6 Codificação da rede

A codificação da rede foi suportada pelo *software* AIMSUN tendo por base a cartografia atualizada retirada da plataforma *OpenStreetMap*. Foram criados cinco modelos: i) correspondente à situação viária atual; ii) adaptação da solução existente a uma rotunda do tipo *flower*; iii) transformação em turborotunda; iv) transformação em rotunda do tipo *target* e por fim v) transformação em rotunda do tipo *four-flyover*.

Na sua versão atual, trata-se de uma rotunda com três vias no anel de circulação e com 5 ramos afluentes, sendo que um deles se destina exclusivamente à entrada de *Bus* na rotunda, dos quais, 2 são constituídos por uma dupla faixa de rodagem com duas vias em cada sentido, um apresenta três vias de entrada e três de saída e os restantes ramos oferecem somente uma via de entrada e saída. Para os devidos efeitos foi mantida a dimensão geral das várias soluções de forma a eliminar esse efeito na variabilidade dos resultados. Os vários modelos apresentam-se na seguinte figura.

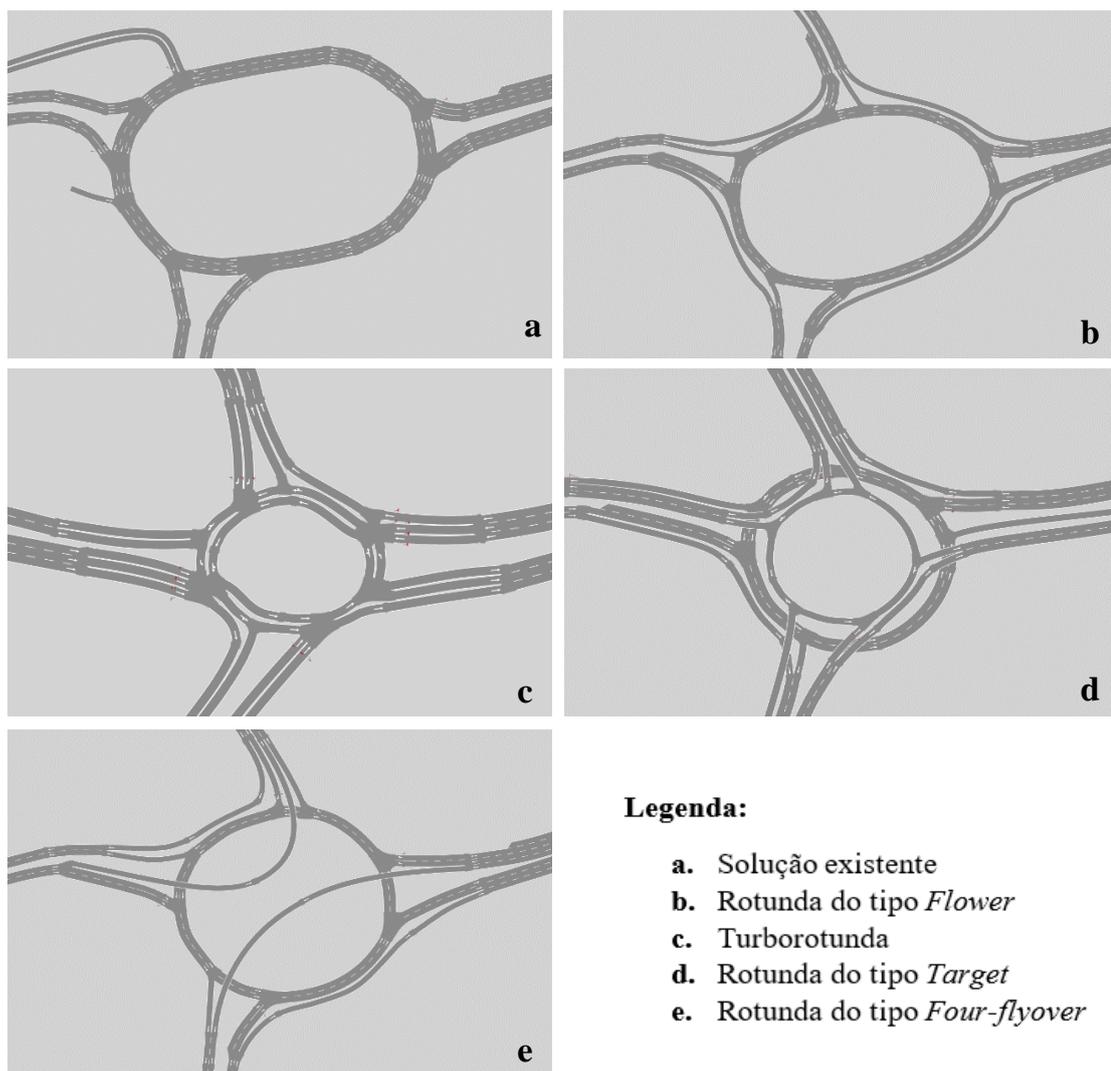


Figura 3.5 – Os diferentes *layouts* abordados (sem escala).

De forma a aumentar o nível de representatividade local, foi definida a classe “*car*” em representação dos veículos ligeiros, a classificação das vias que constituem o anel da rotunda como “*roundabout*”, associado ao limite máximo de velocidade de 40km/h, em conformidade com a velocidade máxima imposta localmente.

Para a adaptação da rotunda aos vários modelos (*flower*, *turbo*, *target*, *four-flyover*) foi necessário proceder a algumas alterações ao *layout* base apresentado anteriormente. Cite-se a eliminação do ramo de acesso exclusivo a autocarros, uma vez que o número de bus no local é reduzido e foi convertido em *uvle* e incluído na matriz O/D geral. Também o ramo confluyente E3- sentido Bencanta que liga com a via de acesso à escola agrária, teve de sofrer alterações, de forma a viabilizar a transformação da rotunda atual nas soluções alternativas. A entrada deste ramo na rotunda foi assim afastado da entrada E1- Via rápida de Taveiro, tendo-se admitido que a construção das soluções alternativas obrigaria a desnivelar este movimento em relação à linha férrea.

Relativamente aos *layouts* adotados há que salientar o modelo da turborotunda. Para este tipo de rotunda importa ter em atenção a importância dos movimentos direcionais envolvidos para seleção do *layout* mais adequado. Optou-se assim pelo *layout* tipo “*spiral*”, já que é particularmente adequado ao registo de grandes fluxos de tráfego na via principal (E1 – E6 ou S5), onde o movimento dominante é de ida em frente. Em relação à rotunda do tipo *target*, como descrito no capítulo anterior este tipo de solução compreende dois anéis de circulação a diferentes níveis altimétricos. Face à integração topográfica da intersecção, optou-se por elevar a rotunda de menor diâmetro, de forma a minimizar os custos associados ao desnivelamento. O mesmo aconteceu em relação à rotunda do tipo *four-flyover*, onde se optou por desnivelar superiormente a viragem à esquerda.

Importa ainda referir que para os diferentes modelos foi considerada estrategicamente a situação de não imposição de regras comportamentais específicas, designadamente as atualmente vigentes em Portugal e enquadradas através da Lei nº 72/2013, de 3 setembro, consubstanciada através do artigo nº. 14-A (ANSR,2013) já que à data da recolha de dados estas, ainda não estarem em vigor e poderem por em causa os resultados da calibração.

- Art.º 14-A do CE “*1-b) Se pretende sair da rotunda na primeira via de saída, deve ocupar a via da direita*”;

- Art.º14-A do CE “*1-c) Se pretende sair da rotunda por qualquer das vias de saída, só deve ocupar a via de trânsito mais à direita após passar a via de saída imediatamente anterior àquela por onde pretende sair, aproximando-se progressivamente desta e mudando de via depois de tomadas precauções*”.

Um estudo realizado por Domingues (2016) revela que esta nova legislação se traduz em reduções substanciais em termos de capacidade, podendo atingir, consoante a repartição do tráfego nas entradas, mais de 60% em relação à situação de isenção de regras.

### 3.7 Calibração e validação do modelo

#### 3.7.1 CALIBRAÇÃO

Depois de construído o modelo, procedeu-se aos trabalhos de calibração de forma a garantir que o modelo simulado representa de forma fidedigna a realidade. A calibração do modelo revela-se indispensável para aproximar os resultados simulados aos reais, mediante um processo de ajuste de um conjunto limitado de parâmetros de calibração relacionados com o comportamento dos condutores ou dos veículos.

Considerou-se que, para este estudo específico, não se justificava desenvolver um trabalho de calibração muito exaustivo, uma vez que o objetivo central do trabalho não é reproduzir com exatidão uma determinada realidade, mas sim comparar o desempenho associado às várias soluções.

Assumindo que os parâmetros presentes no programa AIMSUN são previamente definidos como assumindo os valores “default”, definidos com base em um número alargado de estudos comportamentais que os validam, considerou-se apenas necessário ajustar parâmetros que assumissem uma diferença significativa nas condições de circulação simuladas relativamente às condições facilmente analisáveis *in situ*.

Assim sendo, optou-se por limitar o ajuste a dois parâmetros de calibração: grau de aceitação da velocidade máxima em regime livre de circulação (*speed acceptance*) e o tempo de reação médio do veículo que se propõe a entrar na rotunda (*gap-acceptance*). Para tal, utilizaram-se dados de velocidades registadas em regime livre nos vários pontos já mencionados anteriormente (figura 3.4), no quadro seguinte resume os dados em função da média, máximo, mínimo e desvio padrão e os respetivos coeficientes do parâmetro “*speed acceptance*” dos veículos ligeiros.

Parâmetro	Mínimo	Médio	Máximo	Desvio padrão
Velocidade máxima desejada	36 Km/h	65 Km/h	129 Km/h	22 Km/h
Aceitação de velocidade "speed acceptance"	0,97	1,14	1,3	0,11

Quadro 3.2- Parâmetros referentes à distribuição de velocidades

Os valores de “*speed acceptance*” atribuídos foram estabelecidos a partir da distribuição real das velocidades em regime livre registados pelo radar móvel em várias seções dos trechos de aproximação à interseção em estudo. O valor do parâmetro “*speed acceptance*” representa a relação entre a velocidade real registada com velocidade máxima legal permitida nesses mesmos locais, apresentando assim como um indicador representativo da predisposição para os

condutores locais violarem o limite legal estabelecido. A velocidade máxima legal estabelecida nos diferentes trechos estudados varia entre 40 e 90 Km/h.

Também a calibração do tempo de reação se baseou na procura do valor mais adequado, impondo variações incrementais ao seu valor de base, até se obter comprimentos de filas de espera nas várias entradas similares às observadas localmente. No final deste processo, optou-se pelo valor de 0,69 segundos, sendo que o valor *default* do programa é de 0,75 segundos.

### 3.7.2 VALIDAÇÃO

A validação do modelo permite efetuar uma análise de aproximação entre os resultados obtidos quando o modelo está calibrado e os valores reais recolhidos no trabalho de campo.

Neste estudo em concreto, a validação do modelo resumiu-se à comparação dos tempos médios de viagem obtidos pela microssimulação, entre os centróides E1 e E6 (percurso de ida) que corresponde às entradas com maior fluxo de tráfego. Estes tempos médios foram obtidos através do registo de matrículas, para uma amostra aleatória de veículos, tendo-se neste caso, optado por seleccionar os veículos de cor branca.

Para este efeito foram criadas matrizes O/D de 15 em 15 minutos, com um volume de tráfego reduzido. No quadro seguinte encontram-se os tempos médios de percurso *in situ* e os obtidos através do programa de microssimulação.

Tempo médio de percurso medidos no local (s)	Tempo médio de percurso AIMSUN (s)	Percentagem do erro (%)
321,3	286,1	11%

Quadro 3. 3 – Comparação dos tempos médios ao longo das entradas E1 e E6 medidos no local com os obtidos no AIMSUN

Depois de concluída a calibração, constatou-se que os tempos medidos no local são superiores aos obtidos pelo programa de microssimulação em cerca de 11%. Este erro pode ser devido aos padrões da velocidade dos veículos durante o atravessamento da rotunda, uma vez que o tempo *in situ* é limitado a um reduzido número de veículos (apenas veículos de cor branca), mas muito provavelmente associada à conversão dos diferentes tipos de veículos em uvle.

## 3.8 Considerações finais

No presente capítulo foi apresentada a construção de um modelo de microssimulação preparado para apoiar o desenvolvimento de análises comparativas aplicadas à avaliação do desempenho de rotundas face à adoção de diferentes *layouts* alternativos. O modelo apoiou-se na plataforma

AIMSUN a qual se revelou constituir um instrumento adequado à representação fidedigna de diferentes realidades.

Os trabalhos de calibração e validação permitiram melhorar a aproximação do modelo à realidade, sendo que os erros registados podem ser considerados aceitáveis para o tipo de análise pretendida.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Introdução

O presente capítulo destina-se à análise comparativa do funcionamento de uma rotunda convencional com três vias de circulação no anel, com diferentes *layouts* de rotundas, sendo que alguns deles já contam com exemplos construídos em vários países. De seguida, define-se a metodologia de abordagem, os cenários estudados e os indicadores de desempenho em análise.

#### 4.1.1 ABORDAGEM GERAL

Na figura 4.1, apresenta-se um fluxograma explicativo da metodologia adotada no presente capítulo.

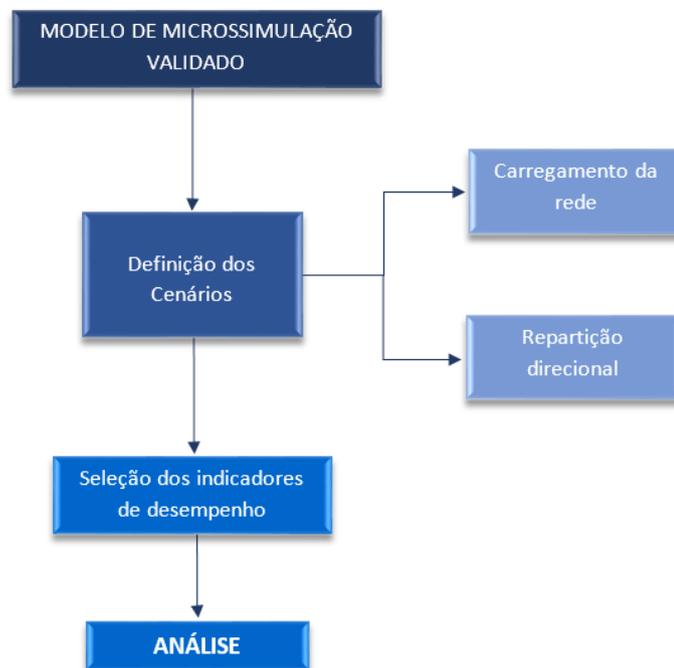


Figura 4.1 – Fluxograma da construção e análise dos modelos estudados.

Após a validação do modelo de simulação (baseado no software AIMSUN), foi necessário definir os cenários a estudar, os quais procuram cobrir duas situações particulares: i) variação

do carregamento da rede (diferentes níveis de saturação) e ii) variação de repartições direcionais de forma sistemática e alternada.

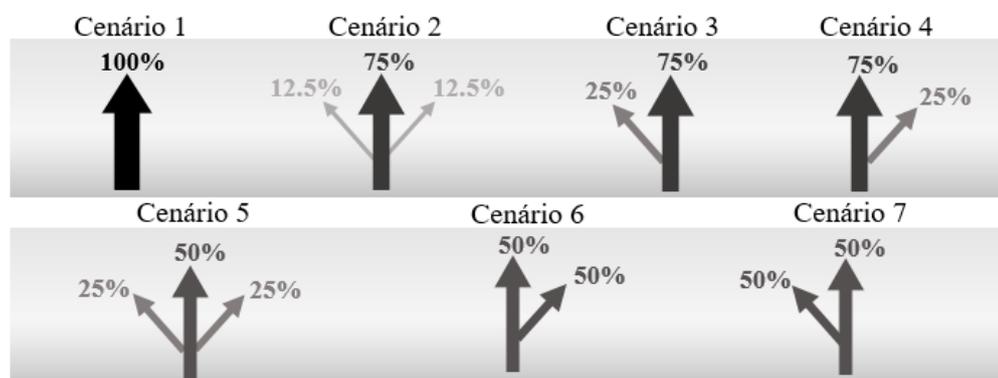
Contudo, e complementarmente foi ainda necessário proceder a um processo de calibração ao modelo da turborotunda, baseado na escolha estocástica de rotas alternativas, indispensável para o bom funcionamento da mesma.

O modelo usado como referência às análises comparativas foi o referente à solução existente, facilitando assim uma avaliação comparativa em termos de funcionamento e capacidade relativamente aos restantes modelos.

## 4.2 Definição dos cenários

Foram definidos diferentes cenários de procura de tráfego, permitindo assim perceber a forma como o desempenho de cada solução alternativa varia, em função da variação quer da carga de tráfego imputada à rede quer da sua repartição direcional ao nível da entrada.

Assim sendo, foram analisadas duas situações fundamentais de procura, perfazendo dois conjuntos de cenários. O primeiro é referente à variação da repartição direcional de forma sistemática e alternada, tendo-se assumido a mesma repartição para as várias entradas. No quadro 4.1 estão esquematizados os vários movimentos (ida em frente, viragem à direita e viragem à esquerda), assim como a correspondente proporção associada a cada movimento.



Quadro 4. 1 – Cenários de repartição direcional.

Para além destes cenários, foi também analisado o cenário onde se assume a carga real de tráfego registada nas seções de campo (Cenário 0), somando um total de 8 cenários de estudo.

A segunda análise procurou cobrir o efeito da variação do carregamento da rede em cada uma das soluções alternativas, tendo-se realizado simulações sistemáticas, associadas a coeficientes de majoração da matriz O/D, de 5 em 5% até se atingir os 150% a partir deste ponto, de 10 em 10%.

### 4.3 Indicadores de desempenho

Através do *software* AIMSUN é possível recolher uma grande variedade de *outputs* capazes de caracterizar o desempenho do sistema modelado aos seus diferentes níveis. O presente trabalho, pretende avaliar o nível de desempenho associado aos diferentes modelos alternativos, pelo que importa optar por comparar indicadores fáceis de entender pelo utilizador comum e que permitam evidenciar as diferenças encontradas. Para tal, foram adotados os seguintes indicadores de desempenho:

- i) Capacidade global, correspondente à soma da capacidade de cada uma das entradas dos vários modelos de rotundas (uvle/h);
- ii) Capacidade da entrada crítica, correspondente à capacidade da primeira entrada a saturar (uvle/h);
- iii) Demoras médias por veículo (s/km).

Para se obter os valores correspondentes à capacidade de cada entrada, o AIMSUN permite a colocação de detetores nas respetivas entradas, deste modo, é possível extrair vários dados sendo que um deles é referente à capacidade da entrada.

### 4.4 Avaliação do impacto em termos de capacidade global

A avaliação de desempenho dos vários modelos estudados passou por fazer entrar na rotunda valores crescentes de tráfego global e, por sua vez, identificar o instante de saturação. Refira-se que se considera a rotunda saturada quando uma das entradas atinge a saturação, garantindo formação de fila de espera contínua na aproximação a essa mesma entrada. Em relação à capacidade máxima, esta refere-se ao número máximo de veículos que se insere no anel (no conjunto de todas as entradas), no instante em que a primeira entrada saturou.

#### 4.4.1 EFEITO DA REPARTIÇÃO DIRECIONAL

Numa primeira análise, começou-se por identificar o ponto de saturação para cada modelo, bem como para cada cenário em estudo. Esta identificação foi realizada por observação da formação das filas de espera nas diferentes entradas tendo-se considerado o modelo saturado face à formação estável de fila. Como tal, foi registada a capacidade global traduzida à unidade de veículo ligeiro equivalente (uvle).

Por forma a facilitar a análise comparativa dos diferentes cenários, estes foram agrupados do seguinte modo:

- i. Análise A) – Cenários 1, 2 e 5: Incremento proporcional uniforme do volume de tráfego das viragens à esquerda e à direita;
- ii. Análise B) – Cenários 5, 3 e 7: Redução simultânea do volume de tráfego de viragem à direita e aumento do volume de tráfego de viragem à esquerda;

- iii. Análise c) – Cenários 7, 3 e 1: Incremento do volume de tráfego de viragem à esquerda, com viragem à direita nula;
- iv. Análise D) – Cenários 1, 4 e 6: Incremento do volume de tráfego de viragem à direita, com viragem à esquerda nula.

A variabilidade dos cenários estudados permite não só individualizar o comportamento das soluções para um determinado efeito de repartição direcional, através de valores concretos de fluxos de capacidade obtidos para o caso de estudo, mas também, para possibilitar uma visão alargada do funcionamento de cada modelo de rotunda sujeita a várias condições de tráfego. Como tal, optou-se, por simultaneamente, apresentar uma comparação percentual da capacidade global relativamente a um dado modelo de referência, aqui considerada como sendo a solução existente. Apresentam-se de seguida os gráficos referentes a esta mesma comparação.

#### • Rotunda do Tipo *Flower*

Esta solução caracteriza-se por disponibilizar uma via segregada de viragem à direita em cada uma das entradas. A figura 4.2, apresenta os resultados obtidos em termos de capacidade global para a *flower*, bem como a sua variação em relação à solução de referência (atual).

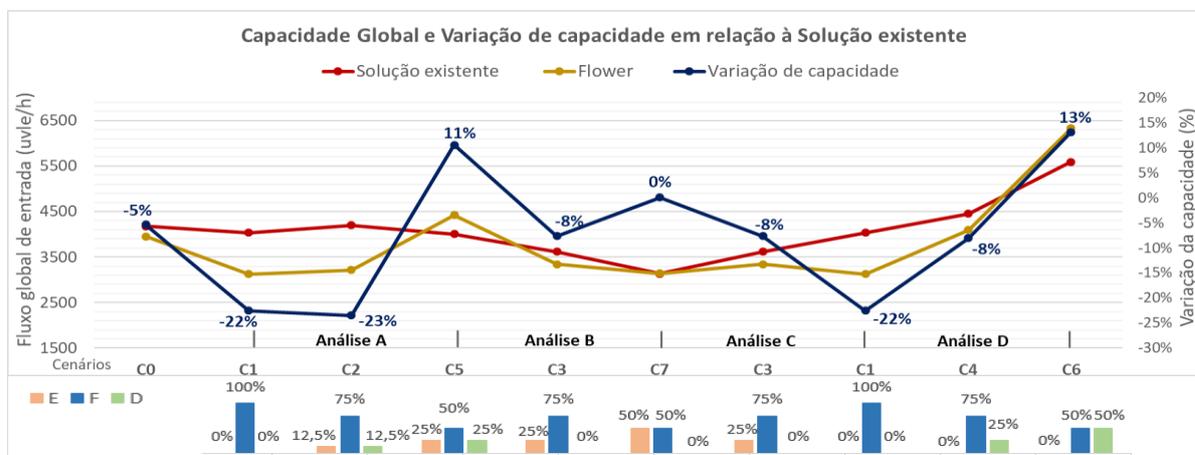


Figura 4.2 - Comparação da capacidade entre a solução existente e a rotunda do tipo *flower*.

De forma geral, verifica-se que, com exceção de alguns cenários específicos, a capacidade da rotunda atual é tendencialmente superior à da *flower*. Tal como seria exetável, esta tendência inverte-se sempre que a percentagem de viragens à direita assume expressão (cenários 5 e 6), associados a ganhos de capacidade na ordem dos 11% e 13%, respetivamente, face à rotunda convencional em estudo.

É ainda de salientar que o cenário 4, apesar de estar associado a 25% de viragens à direita, a *flower* apresenta uma perda de capacidade global de 8% o que se deve à perda de flexibilidade dada ao condutor, na escolha das vias de entrada. Este resultado enfatiza a importância

associada à flexibilidade comportamental oferecida por cada solução, apesar de tendencialmente se reverter cumulativamente em perdas de segurança.

Também a redução do número de vias no anel de circulação, passando de três para duas, se tende a traduzir numa redução da capacidade, registando-se quebras mais significativas nos cenários onde a maioria do tráfego tem obrigatoriamente que entrar no anel, seja para seguir em frente, seja para virar à esquerda. A situação extrema regista-se no cenário 1, onde a redução da capacidade atinge os 22%.

Estes resultados evidenciam claramente o domínio privilegiado de aplicação das *flowers*, sendo certo que, no caso de uma rotunda com 3 vias de circulação, apenas se releva competitiva em relação à rotunda convencional, quando a percentagem do tráfego que vira à direita é superior a 25%. É ainda dedutível que esta percentagem aumente significativamente para soluções de 2 vias, devendo aproximar-se dos 40 a 50% de viragem à direita. Em termos conclusivos, verifica-se que a *flower* assume um domínio extremamente restrito, limitando-se a ser competitiva em situações de procura de tráfego muito específicas e pouco comuns.

#### • Rotunda do Tipo *Target*

A figura 4.3 apresenta os resultados para a solução *target*. Esta solução caracteriza-se pela disponibilização de duas rotundas a níveis altimétricos diferentes, sendo que cada uma permite a ligação de apenas metade dos ramos de entrada, resultando assim numa diminuição significativa do tráfego conflituante em cada um dos anéis. Para este exemplo, optou-se por considerar o nível inferior com duas vias no anel, no sentido de maior tráfego (E1 para E5 e E6), já no anel do nível superior considera-se o sentido perpendicular a este, onde se regista uma menor procura. Os resultados obtidos evidenciam este benefício, já que independentemente do cenário de repartição adotado a *target* atinge sempre maiores níveis de capacidade do que a rotunda de referência.

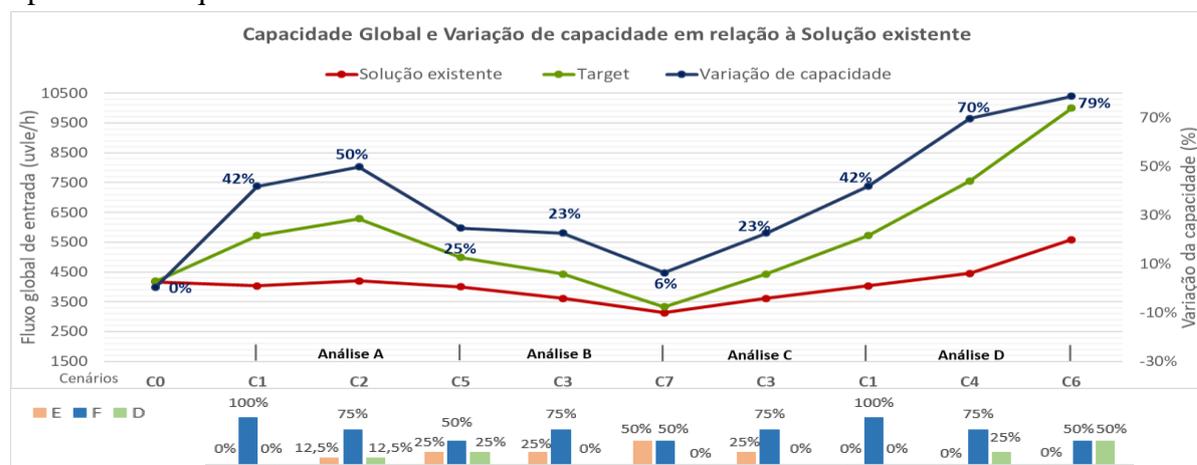


Figura 4.3 - Comparação da capacidade entre a solução existente e a rotunda do tipo *target*.

Uma outra razão para o elevado desempenho deste modelo, deve-se também ao facto de cumulativamente todas as viragens à direita se encontrarem segregadas, o que permite obter ganhos adicionais na análise D. Citem-se os cenários 4 e 6, onde se obtiveram acréscimos de 70 e 80%, respetivamente, quando comparando com a solução existente.

Estes resultados permitem assim concluir, que esta solução é tendencialmente melhor do que a solução tradicional, assumindo ainda um elevado grau de adaptação a diferentes cenários de repartição de procura. Contudo, o facto de exigir a construção de uma rotunda adicional desnivelada, mesmo que mais compacta, traduz-se em soluções economicamente exigentes e com impactos de intrusão na paisagem não negligenciáveis. Apesar disso, os resultados obtidos permitem concluir que se trata de uma solução com potencial para aplicação em cruzamentos sujeitos a elevados níveis de procura de tráfego e onde não existam restrições muito significativas de espaço.

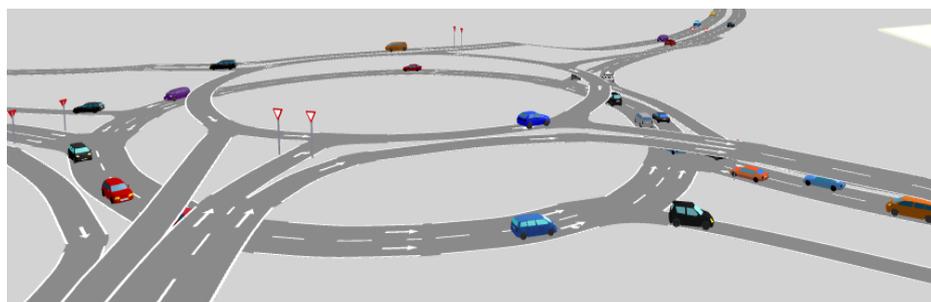


Figura 4.4 – Vista 3D da rotunda do tipo *target*.

• **Rotunda do Tipo *Four-flyover***

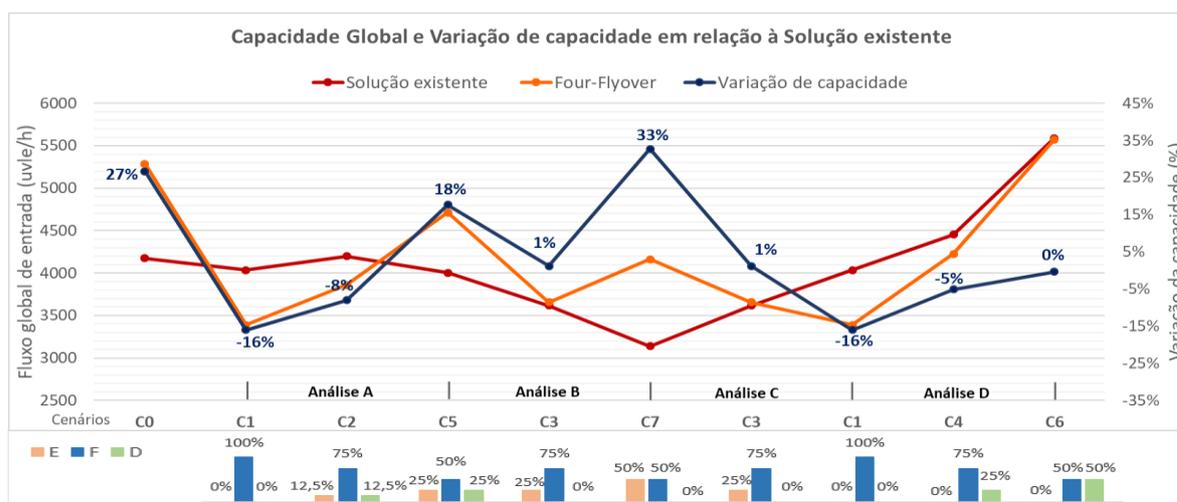


Figura 4.5 - Comparação da capacidade entre a solução existente e a rotunda do tipo *four-flyover*.

À semelhança do modelo *target*, também este tipo de rotunda dispõe de dois níveis altimétricos, sendo, neste caso, as viragens à esquerda desniveladas relativamente ao prato da rotunda, como é possível observar na figura 4.6, vista a 3 dimensões.

Tal como seria expectável, o aumento do desempenho desta solução é evidenciado à medida que a proporção de viragens à esquerda aumenta, chegando a atingir ganhos de cerca de 30% (cenário 7), quando a viragem à direita é nula e a viragem à esquerda é 50% da procura total. Porém quando a proporção de viragem à esquerda é menor ou mesmo nula, consequente aumento da percentagem de viragens à direita ou de ida em frente, registam-se perdas de capacidade significativas, principalmente quando a totalidade do tráfego segue em frente (cenário 1), já que em termos práticos se traduz na perda de uma via de entrada. Apesar disso importa ter presente que se trata de um cenário pouco habitual e, portanto, representativo de uma situação rara em termos reais.

Em termos globais, verifica-se que esta solução apresenta mais uma vez um domínio de aplicação restrito, limitando-se a apresentar benefícios em relação à solução tradicional de nível, sempre que a percentagem de viragem à esquerda é significativa numa determinada direção, sendo idealmente associada a uma grande representatividade das viragens à direita na direção secundária. A análise cuidada dos resultados permite concluir que a solução apenas se revela competitiva para percentagens de viragens à esquerda superiores a 25%. Também nesta solução é expectável que esta percentagem suba consideravelmente para soluções com apenas 2 vias.



Figura 4.6 - Vista 3D da rotunda do tipo *four-flyover*.

- **Turborotunda**

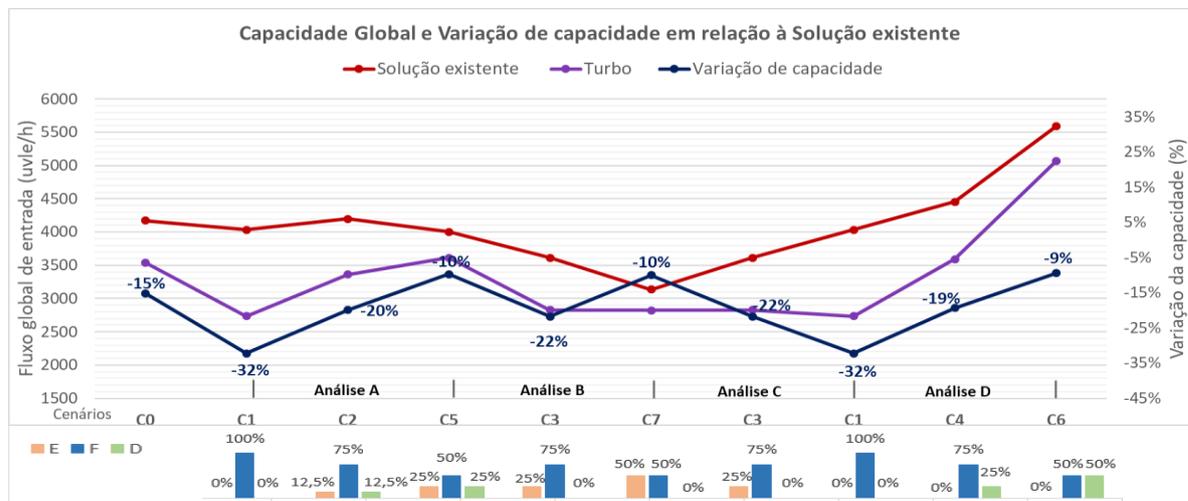


Figura 4.7 - Comparação da capacidade entre a solução existente e a turborotunda.

Neste ponto apresenta-se a análise comparativa referente à turborotunda (figura 4.7). Os resultados evidenciam que, independentemente do cenário de repartição adotado, o melhor desempenho se regista na solução existente, isto é, na rotunda convencional. Refira-se que estes resultados estão em conformidade com resultados de outros trabalhos realizados recentemente e apresentados anteriormente no segundo capítulo. Nesses trabalhos, concluiu-se que a turborotunda apenas se releva competitiva para percentagens de viragem à direita superiores a 60%. Sublinhe-se, contudo, que a redução de capacidade registada, no âmbito do presente estudo, seja maior do que a encontrada nesses estudos, o que poderá estar relacionada com o facto da rotunda de referência disponibilizar três vias.

Da análise dos diferentes cenários de repartição direcional, é possível observar que os menores decréscimos de volume de tráfego de entrada se registam à medida que o incremento de viragens à direita aumenta, sendo que no cenário 6 é onde se observa uma menor variação, cerca de 10%, face à rotunda convencional, comprovando-se que o modelo da turborotunda beneficia as viragens à direita.

O pior desempenho da turborotunda, regista-se à medida que aumenta a percentagem de fluxo de tráfego que segue em frente e vira à esquerda. Portanto, a maior variação de fluxo regista-se no cenário 1 (na ordem dos 30%), onde todo o tráfego de entrada segue em frente, apesar deste ser um cenário pouco provável.

#### 4.4.2 EFEITO DO GRAU DE SATURAÇÃO

Neste subponto, apresenta-se a variação registada em termos de capacidade tendo por base os diferentes cenários de repartição direcional e a variação imposta à carga na rede. São apresentados gráficos com base nos dados simulados que relacionam o fluxo de entrada com o respetivo carregamento da rede.

A influência do volume de tráfego correspondente a cada movimento direcional foi, assim, avaliada por redução ou majoração da matriz dos volumes de tráfego, analisando cada cenário individualmente para os diferentes modelos em estudo.

A figura 4.8 apresenta os resultados obtidos para o cenário 1, quando sujeito a um aumento sistemático da carga de tráfego na rede, para as diferentes tipologias em estudo. Relembre-se que neste cenário, todo o tráfego efetua o movimento de ida em frente.

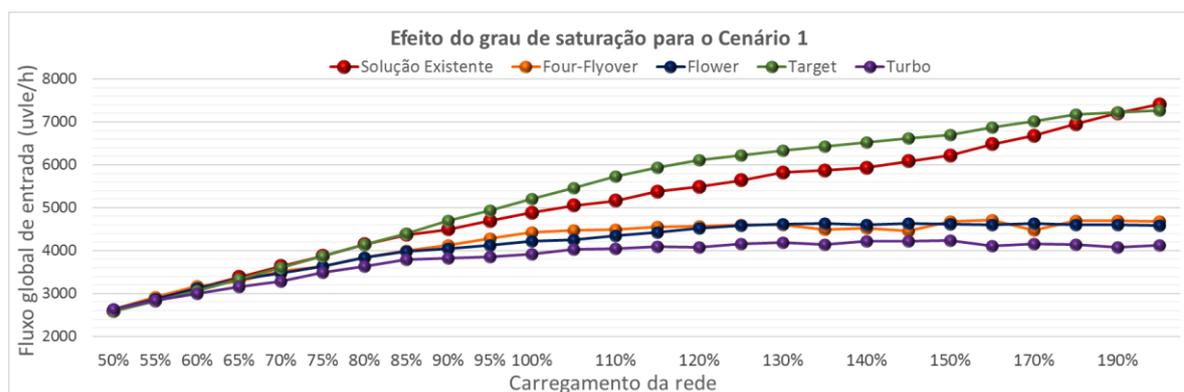


Figura 4.8 - Efeito do grau de saturação para o Cenário 1.

A análise do gráfico evidencia o elevado desempenho da solução *target* a qual atinge níveis de capacidade ligeiramente superiores à da solução existente. Esta tendência apenas é contrariada para níveis de carga extremamente elevados, superiores a 190%, onde a solução existente se apresenta como a mais eficaz. Isto devesse à existência de um grande volume de tráfego vindo da entrada E1 (Taveiro-Coimbra) e da entrada E5 mais E6 (referente ao tráfego vindo do IC2 e da Avenida Guarda Inglesa), sendo que o modelo da solução existente nesta última entrada disponibiliza três vias de entrada, enquanto que o modelo *target* apresenta somente duas destinadas à entrada no anel da rotunda, estando a 3ª via afetada ao movimento de viragem à direita.

Contudo, o elevado desempenho da solução *target* era expectável, pois como analisado anteriormente esta apresenta maiores níveis de capacidade comparativamente aos restantes, uma vez que este *layout*, se associa a uma redução muito significativa do fluxo conflituante nos anéis de circulação.

O modelo da solução existente apresenta igualmente um bom desempenho, devendo-se sobretudo à existência de três vias de entrada no anel da rotunda e numa das entradas de maior fluxo (E5+E6).

Os modelos *flower*, *four-flyover* e *turbo* apresentam fluxos de entrada muito próximos entre si e francamente inferiores aos das outras duas soluções em análise. A estabilização do fluxo global de entrada é atingida próximo dos 95%. Sublinhe-se ainda que o pior desempenho foi obtido pelo modelo da turborotunda. Este fraco desempenho por parte destes modelos devesse ao facto de uns favorecerem as viragens à direita, como é o caso do modelo *flower* e *turbo*, e outros as viragens à esquerda como é o caso do modelo *four-flyover*. Como, este cenário corresponde a 100% de movimentos de ida em frente, este resultado era previsível, uma vez que o fluxo conflituante aumenta à medida que se aumenta a carga da rede.

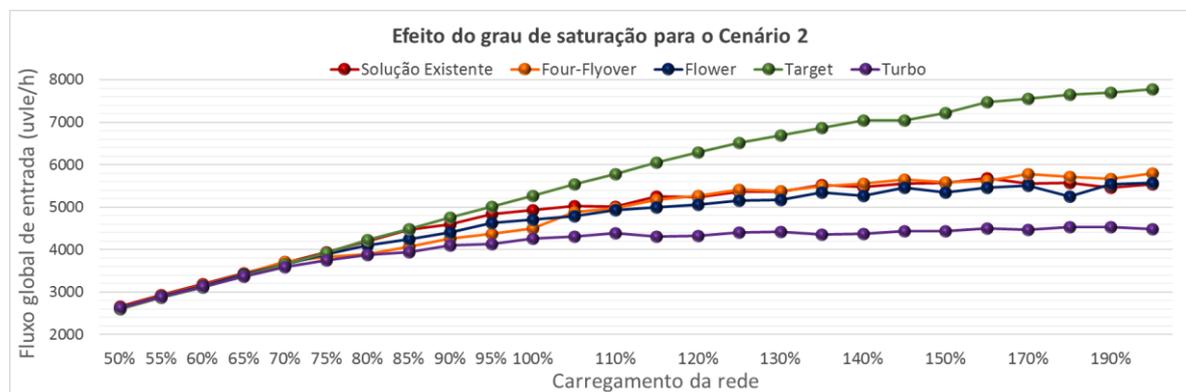


Figura 4.9 - Efeito do grau de saturação para o Cenário 2.

A figura 4.9 apresenta os resultados obtidos para o cenário 2. Este cenário é caracterizado por uma repartição direcional associada a 75% do tráfego de movimentos de ida em frente, sendo que os restantes 25% são igualmente repartidos pela viragem à esquerda e à direita (este cenário é representativo de um cenário comum).

Mais uma vez, os resultados evidenciam o elevado desempenho do modelo *target*, particularmente para situações de procura de tráfego elevada. Refira-se que mesmo para carregamentos de 200%, a solução *target* não chegou a atingir a saturação, enquanto que a *turbo* saturou para um carregamento próximo dos 100%. Na realidade, o modelo *turbo* é o que consistentemente apresenta piores níveis de desempenho, já que este modelo favorece os cenários com elevada proporção de viragens à direita.

A diferença de resultados comparativamente ao cenário 1 deve-se previsivelmente ao comportamento do modelo da solução existente. Enquanto no cenário 1 este apresentou resultados muito próximos do modelo *target*, neste cenário o desempenho do modelo baixou

aproximando-se do associado aos modelos *flower* e *four-flyover*. Estes modelos apresentam um aumento significativo do fluxo de entrada comparativamente ao cenário 1, pois o tráfego que segue em frente baixou para 75%, o que se reflete na redução do tráfego conflituante. A saturação é atingida para um carregamento de rede mais elevado, cerca de 130%, atingindo capacidades compreendidas entre os 5000 e os 5500 uvle/h.

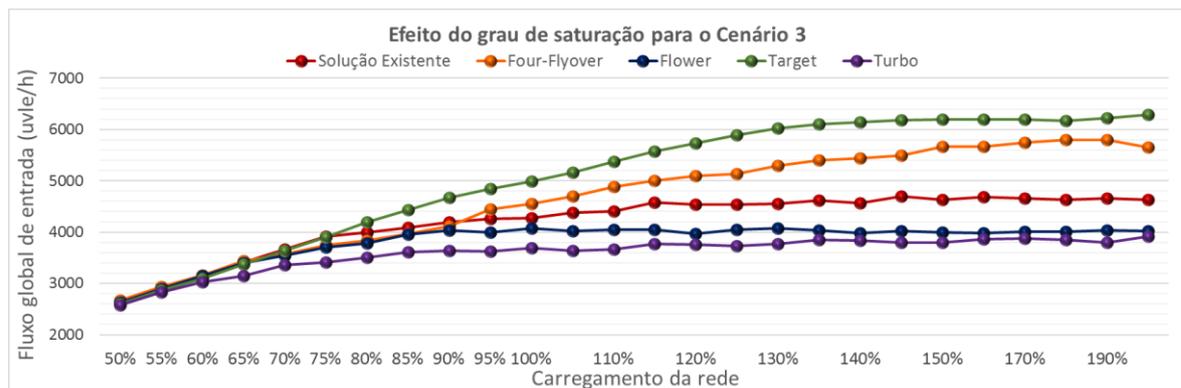


Figura 4. 10 - Efeito do grau de saturação para o Cenário 3.

No caso do cenário 3, foi assumida uma repartição direcional de 75% do tráfego de ida em frente, enquanto os restantes 25% efetuam a viragem à esquerda, não havendo qualquer viragem à direita.

Da análise da figura 4.10, é possível observar algumas diferenças significativas relativamente aos cenários 1 e 2. Desde logo verifica-se que o fluxo global de entrada, reduz significativamente. Tal deve-se, previsivelmente devido à existência de uma percentagem significativa de viragens à esquerda, traduzindo-se assim em maiores níveis de tráfego conflituante no interior do anel da rotunda.

Embora, o modelo *target* se apresente como a solução mais eficaz, verifica-se igualmente um aumento do desempenho do modelo *four-flyover*, a qual atinge a saturação, para níveis de carregamento próximos dos 150%. Tal deve-se ao facto das características do *layout* deste modelo, favorecer o funcionamento das viragens à esquerda. Apesar do fluxo global de entrada do modelo *target* apresentar valores muito semelhantes aos obtidos para os cenários anteriores, próximo dos 6000 uvle/h, verifica-se que o congestionamento é atingido para carregamentos próximos dos 140%, valor abaixo do obtido para o cenário 1. Por oposição os modelos *flower*, *turbo* e *solução existente*, apresentam o pior desempenho atingindo fluxos global máximos de entrada francamente inferiores, compreendidos entre os 4000 e 4800 uvle/h.

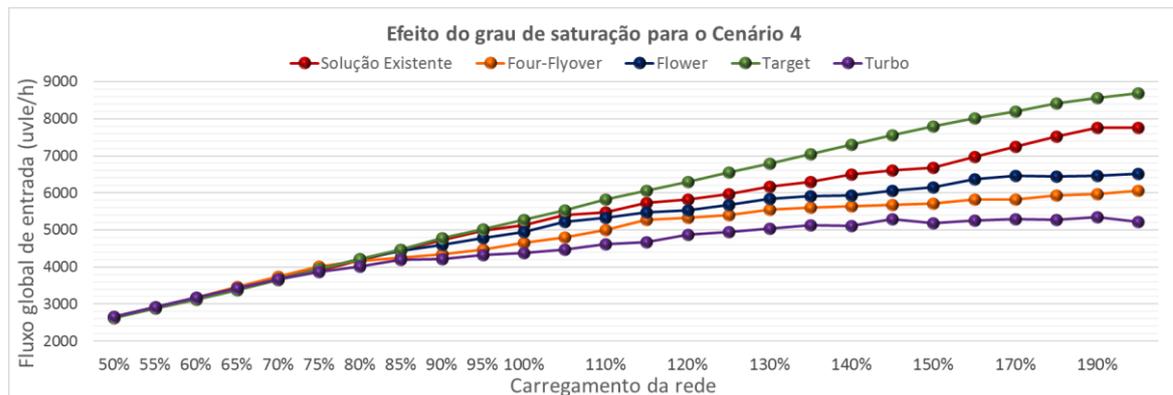


Figura 4.11 - Efeito do grau de saturação para o Cenário 4.

Por sua vez, o cenário 4, caracteriza-se por uma repartição direcional contrária à anterior, associando-se a 25% de volume de tráfego de viragem à direita e, à anulação das viragens à esquerda, mantendo os 75% do tráfego de ida em frente.

A análise da figura 4.11, volta a evidenciar o excelente desempenho do modelo *target* atingindo, mais uma vez o modelo *turbo* como o menos eficaz. O baixo nível da turborotunda, está naturalmente associado ao baixo nível de procura de viragem à direita, sendo apenas 25% do tráfego global de entrada. Refira-se que o modelo *target* atinge para este cenário, níveis de eficácia superiores aos obtidos face a outros cenários de procura, não chegando sequer a atingir o ponto de saturação, mesmo para 200% de carga. O modelo da solução existente atinge valores ligeiramente inferiores aos correspondentes à solução *target*, atingindo a saturação para cargas de cerca de 190%.

Relativamente aos modelos *flower* e *turbo*, apresentam igualmente crescimento ao longo do carregamento da rede, mas com uma capacidade de fluxo de entrada francamente inferior aos anteriores. Estes resultados respondem ao expectável, pois embora estes modelos se adaptem particularmente bem a cenários com viragens à direita, já que dispõem de vias destinadas exclusivamente a esse fim, a percentagem de tráfego de viragem à direita, neste cenário, mantem-se em valores moderados não justificando essa afetação. Refira-se ainda em complemento que, estes modelos possuem um menor número de vias de entrada, nomeadamente na entrada E5 mais E6, assim como menor número de vias no anel da rotunda, quando comparado com o modelo da solução existente, atingindo o congestionamento para cerca de 140% de carga na rede.

Também o modelo *four-flyover*, apresenta resultados previsíveis, uma vez que este *layout* tende a favorecer os cenários onde existem viragens à esquerda, o que não se verifica neste cenário. Apesar disso atinge níveis de desempenho superiores aos obtidos pelo modelo *turbo*, já que disponibiliza um número superior de vias de entrada no anel da rotunda (sentido E1 – E5+E6).

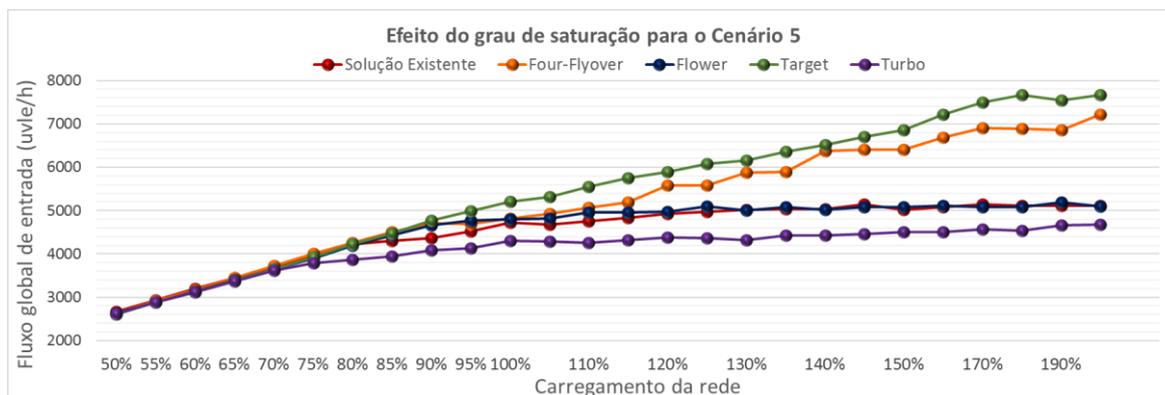


Figura 4.12 - Efeito do grau de saturação para o Cenário 5.

Por sua vez, o cenário 5, à semelhança do cenário 1 e 2 caracteriza-se por afetar 50% do tráfego ao movimento de ida em frente, sendo os restantes 50% repartidos de forma equitativa entre as viragens à direita e à esquerda.

Os resultados evidenciados na figura 4.12, demonstram um andamento significativamente diferente dos associados aos restantes cenários. Ou seja, verifica-se um aumento significativo do fluxo de entrada à medida que se aumenta o carregamento da rede, sendo que a solução do tipo *four-flyover* atinge níveis de desempenho próximos dos associados à solução *target*. Tal responde ao expectável, já que esta solução tende a privilegiar os movimentos de viragem à esquerda. Verifica-se, ainda que, para estas duas soluções, à medida que se majora a carga na rede, o fluxo global de entrada vai sempre aumentado, não chegando a congestionar, sendo que aos 200% o fluxo de entrada ultrapassa os 7000/7500 uvle/h.

A um nível francamente inferior, as soluções *turbo*, *flower* e a existente apresentam um crescimento muito semelhante, sendo que a partir dos 100% o fluxo de entrada destes três modelos se mantém praticamente constante para os diferentes níveis de carregamento da rede, o que leva a concluir que estes três modelos congestionam a partir desta percentagem, atingindo a capacidade global de 4000 a 5000 uvle/h.

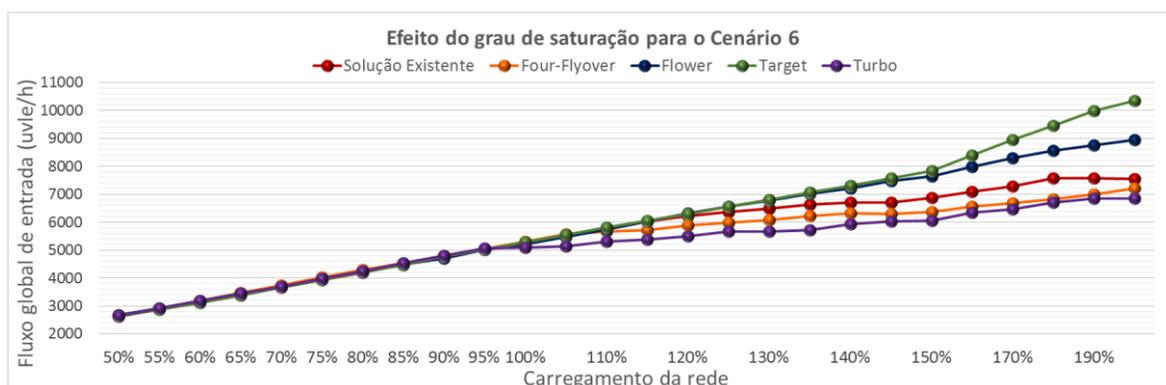


Figura 4. 13 - Efeito do grau de saturação para o Cenário 6.

Por oposição, o cenário 6, procura avaliar o efeito associado ao aumento do volume de tráfego de viragem à direita. Este cenário prevê a atribuição de 50% do tráfego ao movimento de ida em frente e os restantes 50% de viragem à direita.

Como se pode verificar através da figura 4.13, os níveis de desempenho tendem a ser bastante diferenciados dos resultantes da aplicação dos cenários anteriores. Nenhuma das soluções estudadas atingiu a saturação para níveis de carregamento próximos dos 200%, registando-se mesmo ainda alguma reserva de capacidade, em todos os modelos.

No caso do modelo *target*, por exemplo, para um carregamento de rede de 200% atinge-se um fluxo global de entrada que se aproxima dos 10 500 uvle/h, cifrando-se no caso da *flower* nos 9000 uvle/h.

O gráfico evidencia para a generalidade dos modelos um andamento praticamente linear e praticamente proporcional na relação fluxo global de entrada/carregamento da rede, atingindo-se o ponto de quebra perto dos 100%, onde alguns dos modelos (*turbo*, existente e a *four-flyover*) começam a evidenciar uma ligeira perda de desempenho numa das entradas, embora mantenham reserva de capacidade nas restantes. A exceção é para os modelos *target* e *flower*, que mantêm um crescimento linear até aos 145%. O crescimento semelhante destes dois modelos devesse muito possivelmente às características do modelo, já que o modelo *flower* favorece explicitamente as viragens à direita e a percentagem deste tipo de viragem neste cenário é significativa. Apesar disso, o modelo *target* apresenta um crescimento ainda maior, atingindo mais cerca de 1500 uvle/h comparativamente à *flower*, para um carregamento de 200%.

Os restantes modelos, também atingem resultados francamente superiores aos obtidos nos cenários anteriores, nomeadamente a turborotunda, atingindo o seu desempenho máximo, para 7000 uvle/h aos 200% de carregamento. Este resultado confirma os resultados anteriormente publicados por outros autores (Vasconcelos et al., 2014) os quais defendem que este tipo de solução atinge um bom funcionamento para percentagens elevadas de viragem à direita.

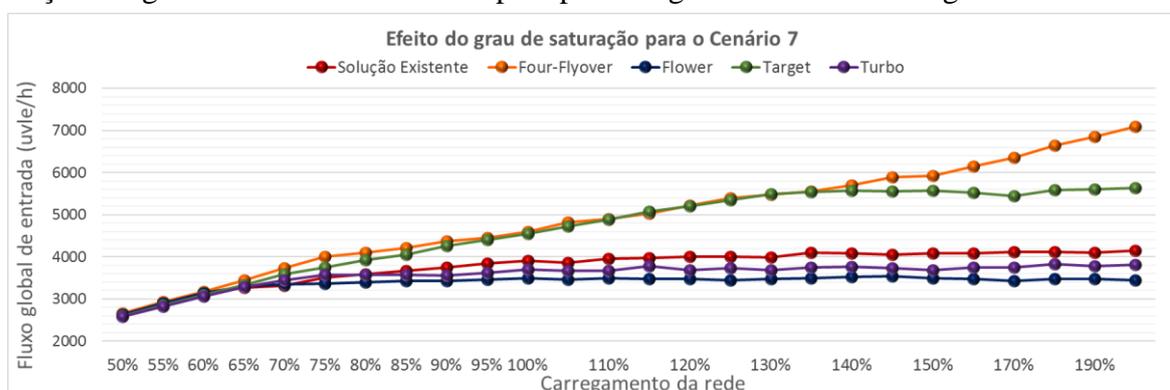


Figura 4.14 - Efeito do grau de saturação para o Cenário 7.

Por fim, o cenário 7, assume a repartição direcional de 50% do volume de tráfego para o movimento de ida em frente, enquanto os restantes 50% viram à esquerda.

Acima de tudo e comparativamente ao cenário 6, verifica-se uma redução muito significativa de desempenho de todos os modelos em análise. Também a estabilização dos valores de capacidade nestes cenários é atingida para carregamentos de rede inferiores comparativamente aos restantes cenários, e por inerência para menores valores de capacidade global. O facto de o cenário 7 implicar um maior volume de viragens à esquerda, traduz-se em maiores níveis de tráfego conflituante no anel da rotunda, e por sua vez, na obtenção de pontos de saturação associados a níveis de carregamento mais baixos comparativamente aos cenários anteriores. Tal fenómeno potencia a estabilização dos valores de capacidade, para níveis de carregamento da rede igualmente mais baixos.

O modelo *four-flyover* é o único que mantém um andamento crescente da curva com o aumento do carregamento da rede, evidenciando sempre um nível de desempenho superior ao associado aos restantes modelos. Tal desempenho era previsível uma vez que o *layout*, desta solução, integra vias desniveladas para apoio às viragens à esquerda em duas entradas, podendo ser direcionadas para as entradas onde se registem maiores volumes de procura associadas a este movimento. A um nível ligeiramente inferior surge o modelo *target*, cuja curva tende a estabilizar para níveis de carregamento próximos dos 140%, atingindo a capacidade máxima global de cerca de 5500 uvle/h.

Os restantes modelos assumem um comportamento similar, atingindo a saturação para níveis próximos dos 70% com capacidades máximas globais de 3200 e 4200 uvle/h. O modelo que atingiu pior nível de desempenho foi o *flower*, o que responde ao expectável, uma vez que possui vias segregadas de viragem à direita, que neste tipo de cenários, não responde a qualquer tipo de procura.

Em síntese, o modelo existente atualmente apresenta para a maioria dos cenários um desempenho muito semelhante aos modelos *flower* e *turbo*. Por sua vez, o modelo que regista o melhor desempenho é maioritariamente o modelo *target*, exceto no cenário 7, onde para um carregamento de rede superior a 135% a *four-flyover*, atingiu maiores níveis de eficácia. Por oposição, o modelo *turbo* é o que apresenta pior desempenho para a maioria dos cenários, exceto para os cenários onde a viragem à direita já apresenta um valor significativo. Estes resultados, respondem genericamente ao expectável e aos resultados já publicados no âmbito de outros estudos, designadamente ao nível da turborotunda.

#### 4.4.3 DEMORAS MÉDIAS POR VEÍCULO

No presente subponto, apresentam-se as demoras médias por veículo (s/km), correspondente ao acréscimo médio de tempo que os veículos demoram a executar a trajetória pretendida, comparativamente à trajetória em regime livre de circulação.

De forma a facilitar a compreensão optou-se por atribuir o mesmo fluxo global de entrada aos vários modelos e para os diferentes cenários de repartição direcional, sendo considerado um fluxo entre 3500 e 3600 uvle/h (cerca de 55% do carregamento total).

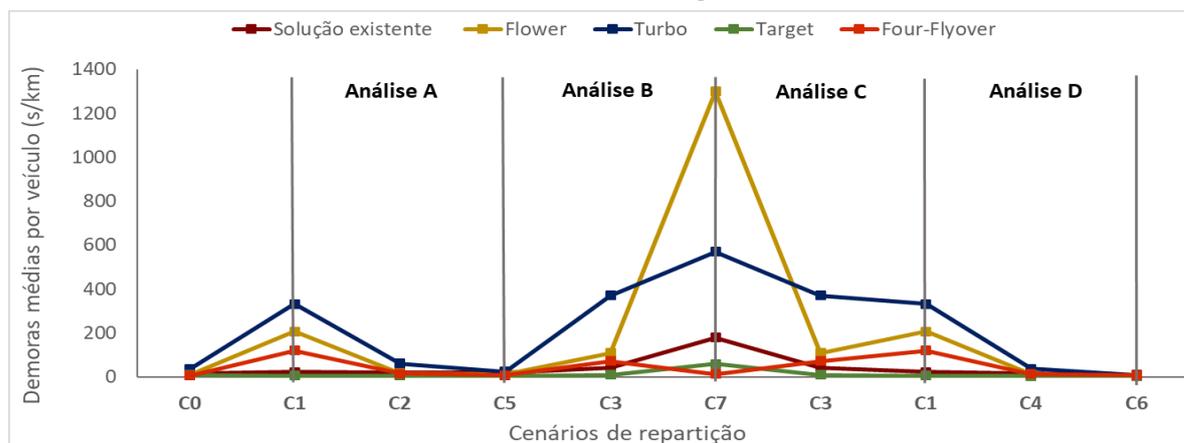


Figura 4.15 - Demoras médias por veículo nos diferentes cenários de repartição.

O gráfico acima apresenta os diferentes cenários agrupados por tipo de análise, de modo a facilitar a avaliação da influência do volume de tráfego correspondente a cada movimento direcional, sendo que na análise A a percentagem de veículos que vira à direita e à esquerda é igual associado à redução da importância do movimento de ida em frente; na análise B é imposto um aumento da viragem à esquerda; na análise C avalia-se o efeito do aumento da viragem à esquerda com viragem à direita nula e finalmente; a análise D representa o aumento da importância da viragem à direita. Todas estas análises encontram-se explicadas no subponto 4.4.1.

Analisando o gráfico é possível observar uma clara tendência do aumento das demoras à medida que aumenta a percentagem de viragem à esquerda, exceto para o modelo *four-flyover* que apresenta uma ligeira descida das demoras ao longo da análise B. Este resultado confirma os resultados associados às análises anteriores, já que a existência de vias segregadas de viragem à esquerda nos ramos com maior tráfego de entrada permite melhorar o desempenho da solução global face a este tipo de cenários de procura. Mais uma vez, é possível provar a eficiência do modelo *target*, sendo este o modelo que regista as menores demoras. Relativamente, ao modelo *flower* e *turbo* é possível observar que estes se comportam melhor quando a percentagem de viragens à direita é significativa (análise D), aumentando as demoras acentuadamente à medida que aumentam as viragens à esquerda (análise C).

O pior desempenho é associado ao modelo *flower*, para o cenário 7, onde 50% do tráfego vira à esquerda. O resultado responde ao expectável, uma vez que este modelo apresenta, em todas as entradas, vias segregadas de viragem à direita, o que neste cenário se revelam inúteis.

A título conclusivo, esta análise comparativa permite inferir que as rotundas convencionais apresentam uma maior flexibilidade para acomodar as alterações à repartição direcional, sendo, portanto, menos sensíveis às variações de repartição direcional. A exceção verifica-se no cenário 7 o qual se associa a demoras significativas.

#### 4.4.4 CAPACIDADE DA ENTRADA CRÍTICA

Neste subponto apresenta-se a variação da capacidade na entrada crítica para cada simulação efetuada. Uma vez, que todos os modelos apresentam *layouts* diferentes, com diferentes níveis de adaptação a diferentes cenários de repartição da procura, não foi possível encontrar uma entrada crítica comum a todos os modelos. Tal exigiu uma análise cuidada dos volumes de tráfego de cada entrada, de forma a identificar qual a primeira entrada a atingir a saturação. A partir destes resultados foi identificada a entrada crítica associada a cada modelo.

Os gráficos apresentados nos subpontos seguintes relacionam o fluxo de entrada com o respetivo carregamento da rede, segregados por modelo. Para controlo da extensão do documento, são apresentados apenas os resultados relativos a uma entrada para cada tipologia de rotunda, sendo os restantes remetidos para o Anexo I.

##### 4.4.4.1 MODELO DA ROTUNDA *FLOWER*

Neste modelo, a entrada 4 foi obtida como sendo a crítica, ou seja, a primeira a congestionar. A figura 4.16 apresenta os resultados obtidos nessa entrada, quando sujeita a um aumento sistemático de carga de tráfego na rede, para os diferentes cenários em estudo.

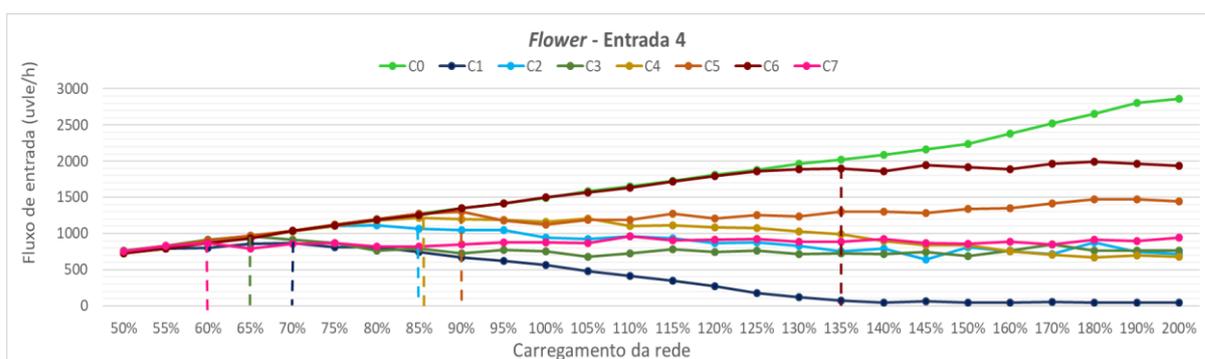


Figura 4.16 - Capacidades registadas na entrada 4, para o modelo *flower* nos diferentes cenários.

O máximo desempenho verifica-se no cenário 0, ou seja, cenário referente à distribuição real. Seguidamente temos o cenário 6, à semelhança do que se verifica em termos de capacidade

global da rotunda, este é o que apresenta um melhor desempenho relativamente aos cenários em estudo, mantendo esse desempenho mesmo em situações de procura de tráfego elevado e/ou congestionamento. Por oposição, o cenário 1 é o que apresenta pior nível de desempenho. Este resultado era expectável uma vez, que este *layout* favorece as viragens à direita, sendo que, o cenário 6 afeta 50% do fluxo de entrada a esse movimento.

A inexistência de movimentos de viragem à esquerda ou à direita no cenário 1, permite com maior facilidade a avaliação visual do comportamento dos veículos dentro da rotunda, facilitando o entendimento sobre o potencial impacto que os movimentos conflituantes exercem sobre as várias entradas. De facto, o fluxo conflituante numa determinada entrada é igual ao fluxo de entrada, no ramo imediatamente anterior. Por essa razão a entrada 4 se afirma como a crítica, já que o fluxo de entrada no ramo 1, é o mais elevado registado nesta rotunda. Registe-se que a saturação é obtida para níveis de carregamento próximos dos 70% (sinalizado na figura 4.16 a traço interrompido com a respetiva cor do cenário correspondente), a partir dos quais o aumento dos níveis de carregamento se traduz num aumento sistemático do fluxo de entrada em 1 e por inerência do tráfego conflituante com a entrada 4. Em consequência a capacidade desta entrada vai diminuindo gradualmente aproximando-se de zero para carregamentos próximos dos 140%.

Relativamente, ao cenário existente, cenário 0, os fluxos de entrada aumentam à medida que a rede é carregada, o que se deve ao facto de existir uma percentagem considerável de tráfego que vira à direita, tanto no ramo de entrada 4 como no ramo de entrada 1.

Os restantes cenários, que introduzem movimentos de viragem à direita e/ou à esquerda, tendem para valores relativamente estáveis de capacidade associadas ao aumento do carregamento da rede, embora, e como seria expectável, os cenários onde a percentagem de movimentos à direita é menor apresentem um fluxo global de entrada ligeiramente inferior (entre 700 e 1000 uvle/h) como é o caso dos cenários 3 e 7. Relativamente ao cenário 4, apesar de apresentar viragem à direita de 25% do fluxo global de entrada, a partir de um carregamento de 85% apresenta decréscimo na capacidade de entrada. Tal acontece devido ao fluxo de entrada no ramo antecedente, entrada 1, à semelhança do que acontece no cenário 1, também para este cenário o crescimento do fluxo de entrada no ramo 1 provoca o bloqueio ou diminuição do fluxo de entrada no ramo 4.

De facto, a capacidade de uma entrada depende diretamente do fluxo conflituante, pelo que a capacidade correspondente ao momento em que congestionada a primeira entrada – capacidade global – pode continuar a aumentar à medida que se aumenta o carregamento da rede. O estudo da capacidade de escoamento das entradas, para condições de sobressaturação, ganha por isso,

relevância na avaliação do nível de desempenho de uma rotunda e das perspetivas de evolução ao longo do tempo desse desempenho.

#### 4.4.4.2 MODELO DA ROTUNDA *TURBO*

Seguidamente, apresenta-se a figura 4.17, com os resultados dos fluxos globais de entrada, referentes à entrada 4, optou-se por apresentar esta entrada por ser a primeira a congestionar na maioria dos cenários.

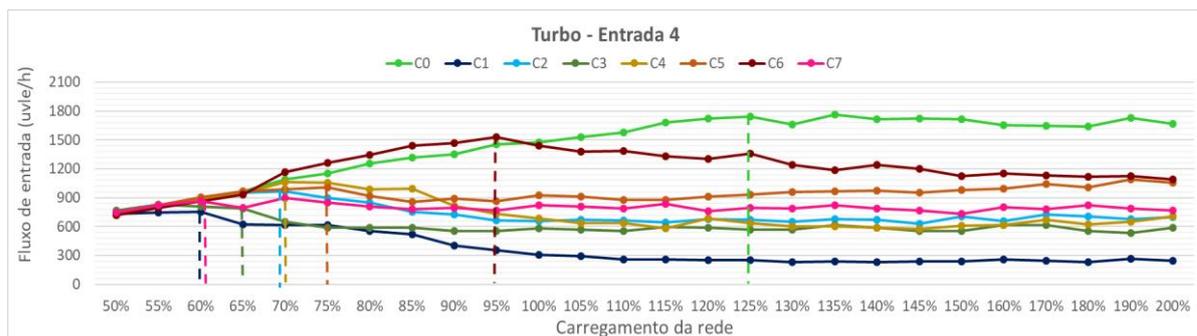


Figura 4.17 - Capacidades registadas na entrada 4, para o modelo *turbo* nos diferentes cenários.

À semelhança da rotunda do tipo *flower*, também esta favorece os cenários onde as viragens à direita são mais significativas, como é o exemplo do cenário 6 onde para carregamentos de rede não muito elevados apresenta um desempenho muito superior aos restantes. Contudo para níveis elevados de carregamento da rede, o desempenho tende a diminuir a aproximar-se dos resultados associados aos restantes cenários de procura, designadamente do 5.

Por oposição, o cenário 1 e o 7 são os que apresentam pior desempenho, atingindo o ponto de saturação para um nível de carregamento de 60% (sinalizado na figura 4.17 a traço interrompido com a respetiva cor do cenário correspondente). Apesar disso, o cenário 7 apresenta um fluxo de entrada relativamente constante para os diferentes níveis de carregamento da rede, enquanto que o cenário 1 decresce até aos 110% de carregamento, em função do aumento do fluxo conflituante provocado pelo fluxo da entrada 1.

Relativamente aos restantes cenários, verifica-se que para aqueles onde existe viragem à esquerda, estes atingem o ponto de saturação para carregamentos da rede inferiores aos cenários que apresentam viragens à direita, como é o exemplo do cenário 3, cifrando-se o ponto de saturação nos 65% de carregamento da rede.

Embora este modelo apresente pontos de saturação para carregamentos baixos, é possível observar que para carregamentos de rede não muito elevados, este modelo apresenta maior fluxo de entrada comparativamente ao modelo *flower*. Outro aspeto importante é a segurança, como já provado por estudos realizados anteriormente a redução de pontos de conflito é

claramente inferior aos da rotunda convencional, traduzida numa diminuição significativa do número de acidentes nomeadamente os de maior gravidade (Vasconcelos et al., 2014).

#### 4.4.4.3 MODELO DA ROTUNDA *TARGET*

De entre as várias entradas estudadas para o modelo *target*, a entrada 1 (correspondente à Via Rápida de Taveiro), é a primeira a atingir a saturação.

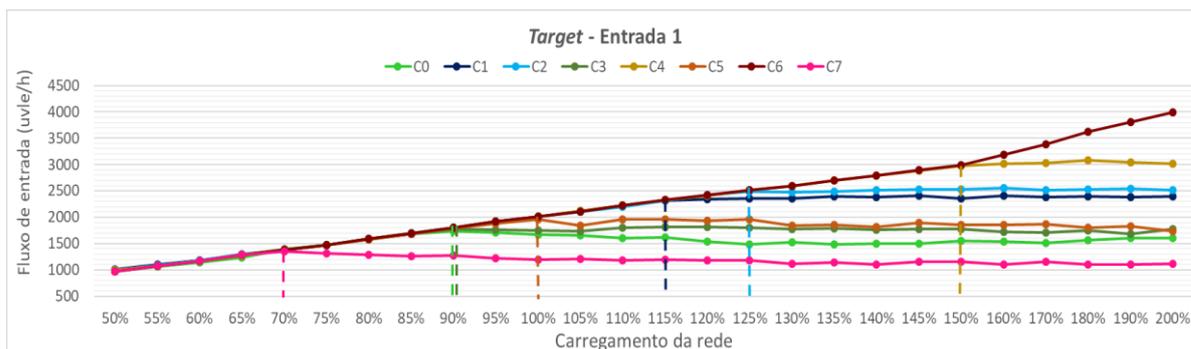


Figura 4.18 - Capacidades registadas na entrada 1, para o modelo *target* nos diferentes cenários.

Da observação da figura 4.18, é possível concluir que nenhum dos cenários se associa a um declínio acentuado à medida que a rede é carregada. Tal resultado era expetável, uma vez que este tipo de *layout* está associado a um reduzido número de pontos de conflito, assim como um fluxo conflituante reduzido, já que é repartido em 2 anéis de circulação (figura 4.4).

Verifica-se ainda que o cenário 6 é o associado aos maiores níveis de desempenho superiores independentemente dos níveis de carregamento da rede. Não apresenta nenhum ponto de quebra, sendo que a partir dos 150% de carregamento da rede, o crescimento ainda se acentua mais. Relembre-se que o cenário 6, para este modelo específico não apresenta nenhum fluxo conflituante, uma vez que apresenta somente movimentos de ida em frente e de viragem à direita, não evidenciando, por isso, o ponto de saturação para carregamentos da rede abaixo dos 200%.

Os piores resultados verificam-se nos cenários que integram movimentos de viragem à esquerda, já que se traduzem em maiores fluxos de tráfego conflituante no anel da rotunda, e por sua vez, na obtenção de pontos de saturação (indicados a traço interrompido) associados a níveis de carregamento mais baixos comparativamente aos restantes cenários. Os pontos de saturação são assim obtidos, para o cenário 7 aos 70% e para o cenário 3 aos 90% de carregamento da rede.

#### 4.4.4.4 MODELO DA ROTUNDA *FOUR-FLYOVER*

Por sua vez, na aplicação do modelo *four-flyover* escolheu-se para analisar a entrada 5 mais entrada 6, relativa à junção da Avenida Guarda Inglesa com o IC2.

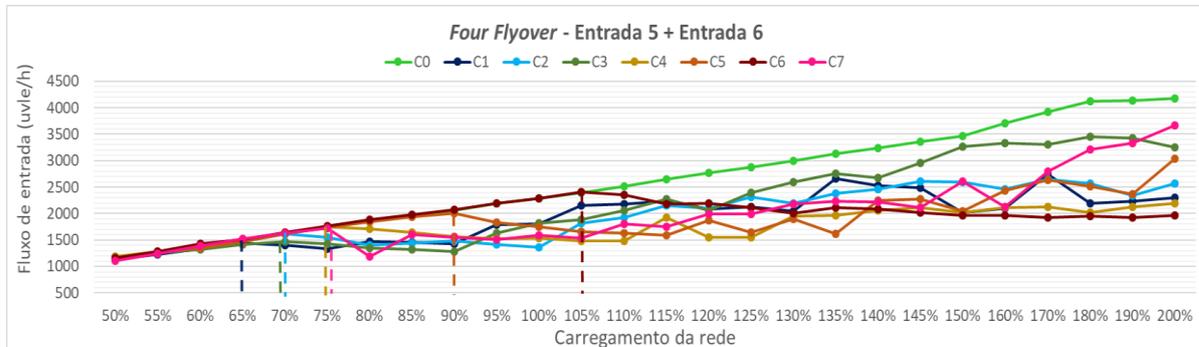


Figura 4.19 - Capacidades registadas na entrada 5 mais 6, para o modelo *four-flyover* nos diferentes cenários.

Para este modelo, verifica-se uma grande oscilação nos vários cenários, contudo é possível observar que nos cenários onde existe viragem à esquerda, estes apresentam um melhor desempenho, principalmente para carregamentos de rede elevados. Esta entrada é problemática e sujeita a níveis elevados de procura já que acomoda a junção do tráfego vindo da Avenida Guarda Inglesa com o vindo do IC2. Por essa razão, esta entrada foi a escolhida para implementação da via segregada de viragem à esquerda, em paralelo com o ramo da entrada 1 (Via rápida de Taveiro).

Por oposição, verifica-se que, para este modelo, os cenários que apresentam um pior desempenho são os que apresentam uma maior percentagem de fluxo de ida em frente ou de viragem à direita, tal como seria expetável.

## 4.5 Considerações finais

As análises consideradas no presente capítulo para os indicadores de desempenho selecionados revelam resultados bastante consistentes ao nível do desempenho dos modelos. De facto, as análises apresentadas no ponto 4.4 identificam o modelo *target* como sendo o que assegura maiores níveis globais de capacidade, para a generalidade dos cenários estudados. Esses resultados são confirmados posteriormente, quando analisadas as demoras médias por veículo e a capacidade das entradas críticas.

Por outro lado, os modelos *turbo* e *flower* são os que apresentam os piores resultados tanto a nível de capacidade de carga, como nas demoras médias por veículo e na análise das entradas críticas. Principalmente para carregamentos de rede elevados, estes modelos apresentam um comportamento mais satisfatório, nos cenários em que a viragem à direita é significativa, onde se identificam algumas entradas onde não chega a ser atingida a saturação, designadamente face

a cenários favoráveis, como é o caso do cenário 6, onde o fluxo de viragem à direita representa 50% do fluxo total de entrada.

Por sua vez, o modelo *four-flyover*, apresenta melhores resultados a nível de capacidade global, para os cenários com uma percentagem significativa de viragem à esquerda. Também ao nível das demoras por veículo os cenários de repartição direcional com estas características se relevam favoráveis. No que diz respeito à entrada crítica os resultados já não permitem tirar conclusões tão evidentes, uma vez que também para estes cenários o carregamento da rede sofre grandes oscilações.

Conclui-se assim que, sempre que uma entrada atinge a saturação, e face ao contínuo aumento do carregamento da rede, são geradas perturbações no normal crescimento do tráfego conflituante, que se refletem em inflexões sistemáticas na curva de variação da capacidade da entrada crítica.

## 5 CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho centrou-se na avaliação do efeito que os diferentes layouts alternativos e inovadores (*flower*, *turbo*, *target* e *four-flyover*) assumem em termos de desempenho e em termos de capacidade. Verificou-se que são ainda escassos os trabalhos de investigação que avaliam, comparativamente o nível de desempenho associado às diferentes soluções geométricas alternativas, designadamente face a diferenciados níveis de procura de tráfego e cenários de repartição direcional. Considerou-se assim pertinente avaliar o funcionamento dos diferentes modelos, comparando-os com uma rotunda convencional existente. Há a salientar que para efeitos comparativos não foi considerado a lei atualmente vigente em Portugal, por se considerar que tal lei ainda não é adotada de forma generalizada pela população portuguesa, e que a sua integração dificultaria os trabalhos de calibração e validação do modelo.

Para tal, foram adotados os seguintes indicadores de desempenho: i) Capacidade global da rotunda, correspondente à soma da capacidade associada a cada uma das entradas da rotunda; ii) Demoras médias por veículo, correspondente ao acréscimo médio de tempo que os veículos demoram a executar a trajetória pretendida, comparativamente à trajetória em regime livre de circulação; iii) Capacidade da entrada crítica, correspondente à capacidade da primeira entrada saturada.

Em termos metodológicos recorreu-se ao modelo de microssimulação AIMSUN aplicado a uma rotunda localizada em Coimbra, caracterizada por dispor cinco ramos de entrada (um deles com três vias de entrada, dois com duas vias de entrada e as restantes somente com uma via de entrada) e 3 vias de circulação no anel. Foi construído um modelo simulado representativo da situação real, o qual foi devidamente calibrado e validado para representar as condições atuais de funcionamento da rotunda. A partir deste foram construídos os restantes modelos, por forma a obter o mais próximo possível uma representação real.

Foram estudados diversos cenários de procura, os quais procuraram introduzir dois efeitos fundamentais, sendo um deles a repartição direcional de tráfego nas entradas e o efeito do nível de carregamento de tráfego.

Em termos gerais, os resultados obtidos foram consensuais e suscetíveis de um conjunto de conclusões interessantes, considerando-os cumpridores dos objetivos inicialmente propostos.

Conclui-se que a alteração de *layouts* assume um impacto significativo no desempenho da rotunda, particularmente, quando existem vias segregadas destinadas exclusivamente às

manobras de viragem à direita ou à esquerda. Esta particularidade está patente especialmente nos modelos *flower*, *target* e *four-flyover*, onde as duas primeiras apresentam vias segregadas de viragem à direita em todos os ramos, a última apresenta apenas vias segregadas de viragem à esquerda em dois dos ramos, sendo preferencialmente associados aos que apresentam um maior fluxo de entrada. É ainda importante sublinhar que independentemente do modelo simulado, o nível de desempenho depende significativamente da repartição direcional do tráfego, registando-se, tal como seria expectável, uma perda de capacidade à medida que aumenta o peso associado às viragens à esquerda. Excetua-se o modelo *four-flyover* por dispor de vias segregadas destinadas a este movimento, podendo atingir em cenários favoráveis (por exemplo no cenário 7, onde o tráfego é repartido igualmente entre a viragem à esquerda e ida em frente) aumentos na ordem dos 30%. Nos restantes modelos a perda de capacidade é bastante sentida principalmente no modelo *turbo*, com perdas de 22% para o cenário 3 e 10% para o cenário 7, atingindo-se a situação mais desfavorável no cenário 1 (onde 100% do tráfego segue em frente), com redução de capacidade da ordem dos 30% comparativamente à solução existente.

Em termos de capacidade nos cenários onde existem movimentos de viragem à direita é notório o ganho de capacidade nos modelos *target* e *flower*. O modelo *target* atinge um acréscimo de capacidade de carga na ordem dos 80%, no cenário 6, onde o tráfego é repartido igualmente entre viragem à direita e ida em frente. Tal deve-se, como verificado através da análise da entrada crítica, à não existência de fluxo conflituante, mesmo para carregamentos de rede elevados. Relativamente ao modelo *flower*, também apresenta um acréscimo significativo do seu desempenho comparativamente à solução atual, na ordem dos 13% (cenário 6). Apesar do modelo *target* apresentar genericamente os melhores resultados em termos de capacidade e de demoras, verifica-se que a adoção deste modelo é, contudo pouco viável, já que exige um grande custo de construção, o que apenas se justifica face a níveis extremamente elevados de procura de tráfego nas várias entradas.

Relativamente ao modelo *turbo*, comparativamente à solução existente apresenta para todos os cenários de repartição uma quebra de capacidade. Há, contudo, que salientar que a análise comparativa é feita em relação a uma rotunda convencional de três vias no anel de circulação, o que potencia um maior fluxo de entrada na rotunda comparativamente à *turbo*, que dispõe de apenas 2. Por essa razão se verifica que para cenários com uma percentagem considerável de viragens à direita o desempenho desta solução aumenta consideravelmente ultrapassando o desempenho do modelo *flower*.

Apesar das análises apontarem para uma vantagem (particularmente acentuada em condições de saturação) da rotunda convencional comparativamente à turborotunda, importa sublinhar que a análise desenvolvida não inclui as análises de segurança rodoviária.

Em síntese, os resultados obtidos no âmbito da presente dissertação demonstram que o nível de desempenho global de uma rotunda, depende de forma extremamente significativa do *layout* adotado e do nível e tipo de procura de tráfego, pelo que a seleção do tipo de solução a adotar deverá merecer uma análise de caracterização cuidada, designadamente ao nível da procura de tráfego.

Considera-se ainda que a seleção da solução a adotar, deverá ser baseada numa análise global que não poderá descurar as restantes dimensões do problema, designadamente a segurança rodoviária, a eficiência ambiental e o consumo de energia. As rotundas, nas suas diferentes formas geométricas, envolvem um conjunto de manobras específicas, onde assumem particular expressão, as manobras de aceleração, travagem e paragem, as quais se tendem a traduzir em variações acentuadas do seu desempenho, ao nível destas diferentes dimensões. Justifica-se assim o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação baseada, designadamente em análises multicritério, que permitam, face a diferentes cenários de procura, determinar qual dos *layouts* alternativos tende a revelar-se o mais eficiente, tendo por base uma análise integrada dos diferentes indicadores de desempenho envolvidos.

Assim, este trabalho não pretende apresentar-se como um produto acabado, mas pelo contrário, como uma primeira análise sectorial do problema, justificando-se a prossecução dos trabalhos conducentes a uma análise global e completa do desempenho real destas diferentes soluções alternativas.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bastos Silva, A., Mariano P.; Silva, J.P.C. (2015) Performance assessment of turbo-roundabouts in corridors, *Transportation Research Procedia* 10 (2015) 124 – 133 (doi: 10.1016/j.trpro.2015.09.062).
- Bastos Silva, A.M.C, Santos, S. e Gaspar, M. (2013) “Turbo-roundabouts use and design”, *CITTA 6<sup>th</sup> Annual Conference on Planning Research*, Coimbra, Portugal.
- Bastos Silva, A.M.C. (2004). “Definição de uma Metodologia de Conceção de Cruzamentos Giratórios”, volume 1 – Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Edição FCTUC, abril, Coimbra, Portugal.
- Bastos Silva, Mariano P., Silva J.P. (2015) “Performance assessment of turbo-roundabout in corridors”, 18<sup>th</sup> Euro Working Group on Transportation, EWGT, Delft, The Netherlands.
- Bastos Silva, Seco Á.J.M (2008) “Manual de Planeamento das Acessibilidades e da Gestão Viária – Rotundas”, Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte, Portugal.
- Bastos Silva, Vasconcelos A.L., Santos S. (2013) “Das Rotundas Convencionais às Turbo-rotundas”, 7<sup>o</sup> Congresso Rodoviário Português, abril, Lisboa, Portugal.
- Bastos Silva, Vasconcelos e Santos S. (2014) “Moving from Conventional Roundabout to Turbo-Roundabouts”, 16<sup>th</sup> Meeting of the EURO Working Group on Transportation 137-146.
- Engelsman J.C. e Uken M. (2007) “Turbo Roundabouts as an alternative to two lane roundabouts”, *Proceedings of the 26th Southern African Transport Conference (SATC 2007)*.
- Ferdiando Corriere e Marco Guerrieri (2012) “Performance Analysis of Basic Turbo-Roundabout in Urban Context”, *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 53(2012) 622-632.
- Gallelli V., Iuele T., Vaiana R. (2016) “Conversion of a semi-two roundabout into a turbo-roundabout: a performance comparison”, the 7<sup>th</sup> International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2016), University Calabria, Department of Civil Engineering, Arcavacata di Rende, Italy.
- Host Richard, Martens Marieke, Kik Jaap (2008) “Evaluation of signalized high-volume multi-lane turbo roundabouts: road scene analysis, road user survey, and video-based analysis of road user behavior”, 21st ICTCT workshop, *Proceedings*.
- L.G.H. Fortuijn (2007) “Turbo-Kreisverkehre Entwicklungen und Erfahrungen.” *Aktuelle Theme der Strassenplanung*, Donnerstag.

- Macedo J.M. e Benta A. (2013) “Seleção da Tipologia de uma Intersecção Utilizando um Simulador Microscópico de Tráfego – Um Caso de Estudo”, Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, Campus Universitário de Santiago, Portugal.
- Mariano P., Bastos Silva (2014) “Avaliação do Desempenho de um Corredor de Turbo-rotundas – Capacidade e Impactes Ambientais” – Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Edição FCTUC, janeiro, Coimbra, Portugal.
- Pankowska A., Bolttruczyk E., Mendes F., Fresco J., Milagre M., Figueiredo M. (2011) “Trabalho Prático – Estudo do Nó do Almegue”, - Trabalho Prático realizado no âmbito da disciplina de Engenharia de Tráfego, Coimbra, Portugal.
- Tollazzi T. (2010) “New Geometric of at-grade Intersections: Turbo and Flower Roundabouts Slovenian Guidelines an Experiences”, Summer School 2010 – Trento, University of Maribor.
- Tollazzi T., Giovanni Tesoriere, Marco Guerrieri, Tiziana Campisi (2015) “Environmental, functional and economic criteria for comparing “target roundabouts” with one- or two-level roundabout intersections”, *Transportation Research Part D* 34, 330-344.
- Tollazzi T., Goran Jovanovic, Marko Rencelj (2013) “New Type of Roundabout: Dual One-Lane Roundabouts on Two Levels with Right-Hand Turning Bypasses – Target Roundabout”, *Traffic & Transportation*, Vol. 25,2013, No.5, 475-481.
- Tollazzi T., Marko Rencelj (2014) “Comparative analyse of the two new alternative types of roundabouts – Turbo and Flower Roundabout”, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, volume 9(3):164-170.
- Tollazzi T., Marko Rencelj, Saso Turnsek (2011) “Slovenian Experience with Alternative Types of Roundabouts – “Turbo” and “Flower” Roundabouts”, 8<sup>th</sup> International Conference, Vilnius Gediminas Technical University (1220-1226).
- Tollazzi T., Marko Rencelj, Saso Turnsek “Roundabout with “depressed” lanes for right turning – Flower Roundabout”, University of Maribor.
- Tollazzi T., Raffaele Mauro, Marco Guerrieri, Marko Rencelj (2016) “Comparative Analysis of Four New Alternative Types of Roundabouts: “Turbo”, “Flower”, “Target” and “Four-Flyover” Roundabout”, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*.
- Vasconcelos A. (2004) “Modelos de Atribuição/Simulação de Tráfego: O Impacto na Qualidade dos Resultados de Erros no Processo de Modelação” – Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Edição FCTUC, maio, Coimbra, Portugal.
- Vasconcelos A.L.P, Seco Á.J.M. e Bastos Silva A. (2014) “Avaliação do Desempenho Operacional de Rotundas: Modelos e Aplicações” – Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Especialidade de Urbanismo, Ordenamento do Território e Transportes – Edição FCTUC, Julho, Coimbra, Portugal.

- Vasconcelos, A.L.P., Bastos Silva A. e Seco Á.J.M. (2012) “Capacity of normal and turbo-roundabouts – comparative analysis”, proceedings of the Institution of Civil Engineers (ICE) – Transport, 2013.
- Vasconcelos, L., Silva, A.B., Seco, A.M., Fernandes, P., Coelho, M.C. (2014). Turboroundabouts: Multicriterion Assessment of Intersection Capacity, Safety, and Emissions, Journal of Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Board of the National Academies, Vol. 2402, pp. 28-37. (DOI: <http://dx.doi.org/10.3141/2402-04>).
- Vilarinho, C. (2008) “Calibração de Modelos Microscópicos de Simulação de Tráfego em Redes Urbanas”, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, Porto, 1 vol.
- Vilarinho, C., Soares, G., Macedo, J. P., Rossetti, R. J. (2014) “Capability-Enhanced AIMSUN with Real-Time Signal Timing Control”, Procedia-Social and Behavioral Sciences, 111, pp.262-271.
- Yperman, I e Immers, L.H. (2003) “Capacity of a Turbo-Roundabout Determined by Microsimulation”, in proceedings 10<sup>th</sup> world congress on ITS. Department of Civil Engineering – Transportation Planning and Highway Engineering, Leuven, Bélgica.

## ANEXO I

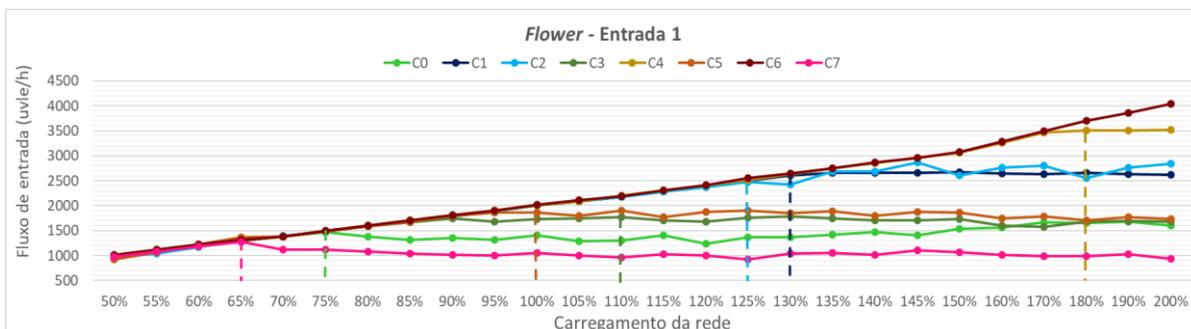


Figura I.1 - Capacidades registadas na entrada 1, para o modelo *flower* nos diferentes cenários.

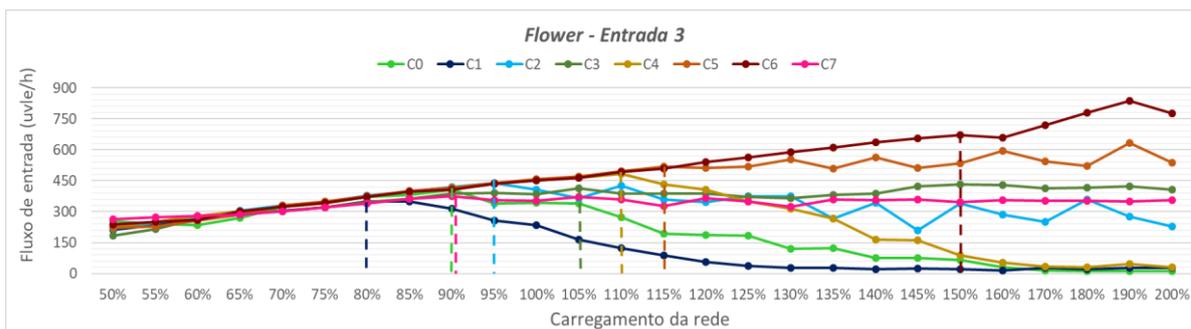


Figura I.2 - Capacidades registadas na entrada 3, para o modelo *flower* nos diferentes cenários.

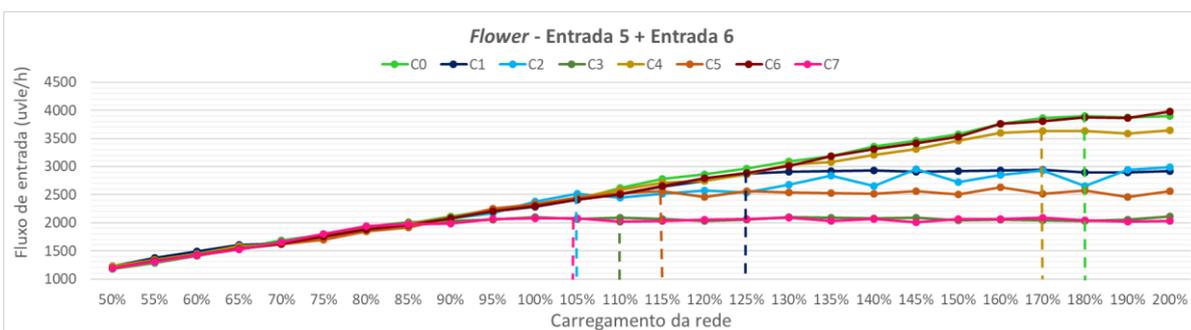


Figura I.3 - Capacidades registadas na entrada 5 mais 6, para o modelo *flower* nos diferentes cenários.

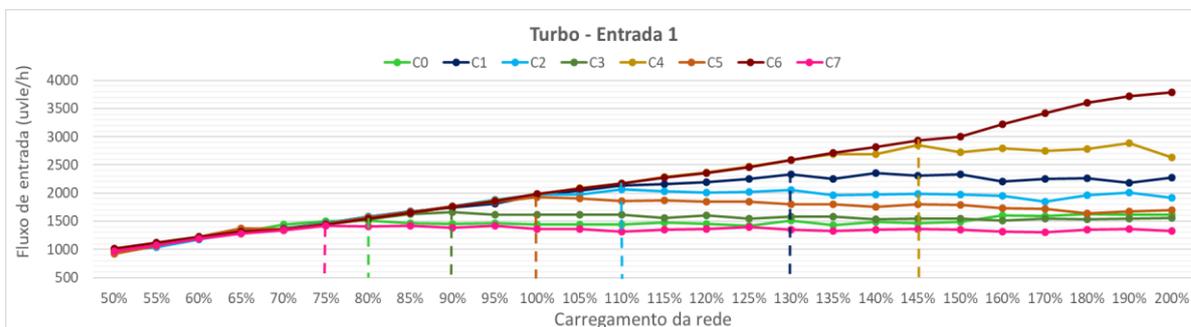


Figura I.4 - Capacidades registadas na entrada 1, para o modelo *turbo* nos diferentes cenários.

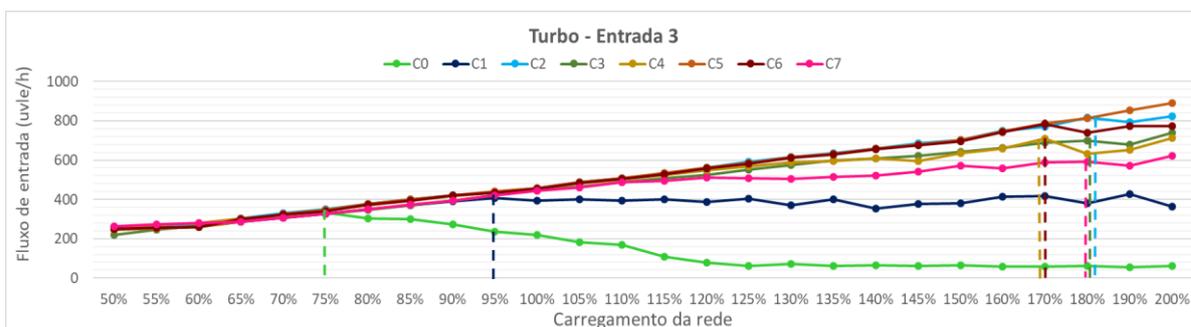


Figura I.5 - Capacidades registadas na entrada 3, para o modelo *turbo* nos diferentes cenários.

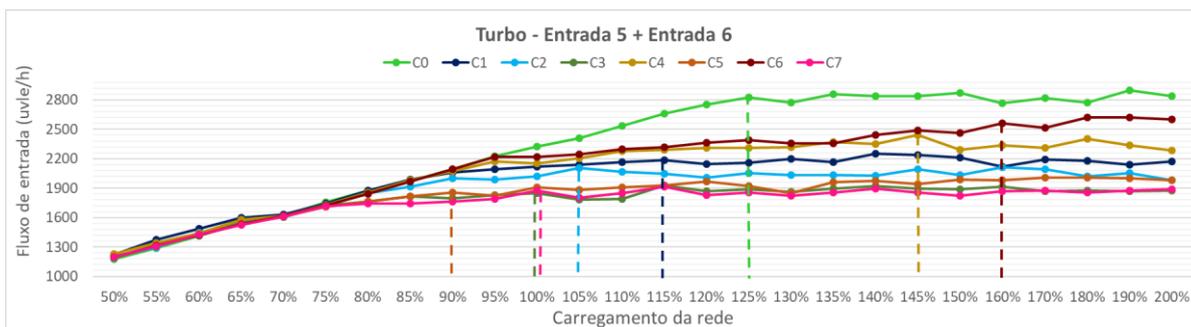


Figura I.6 - Capacidades registadas na entrada 5 mais 6, para o modelo *turbo* nos diferentes cenários.

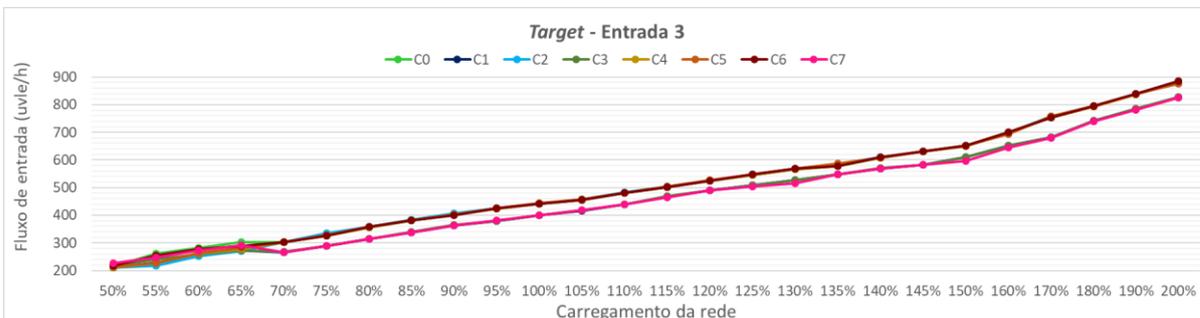


Figura I.7 - Capacidades registadas na entrada 3, para o modelo *target* nos diferentes cenários.

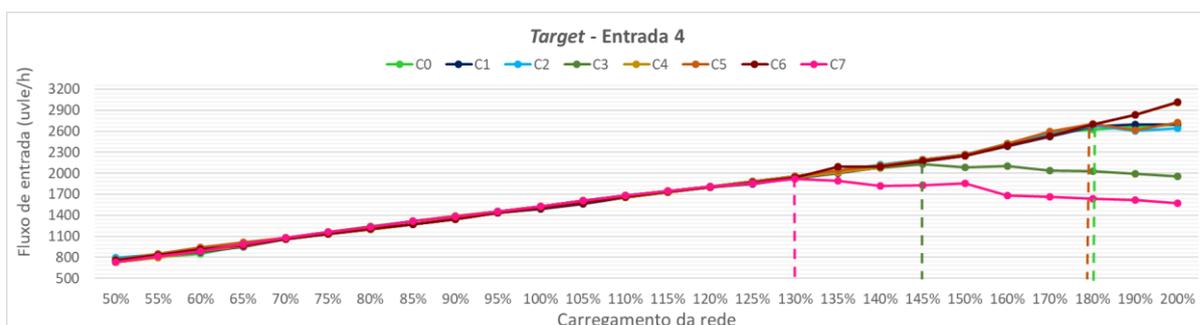


Figura I.8 - Capacidades registadas na entrada 4, para o modelo *target* nos diferentes cenários.

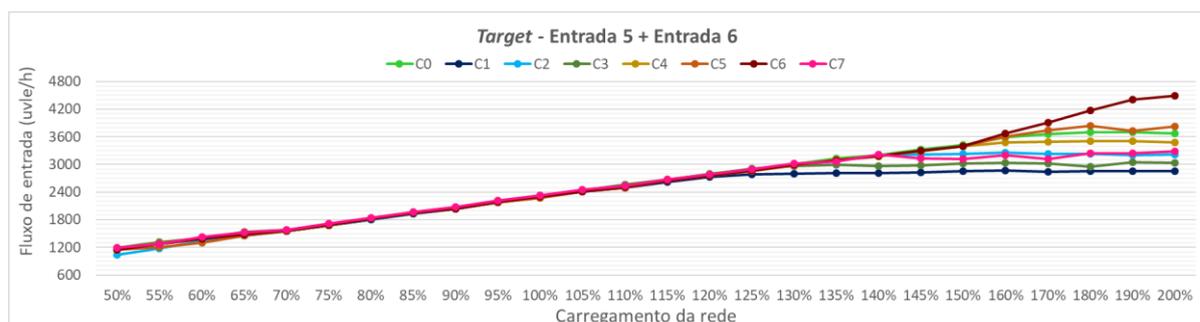


Figura I.9 - Capacidades registadas na entrada 5 mais 6, para o modelo *target* nos diferentes cenários.

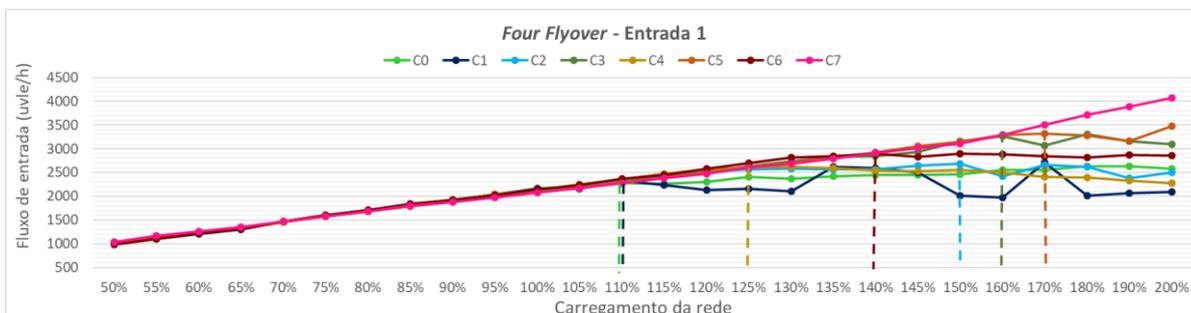


Figura I.10 - Capacidades registadas na entrada 1, para o modelo *four-flyover* nos diferentes cenários.

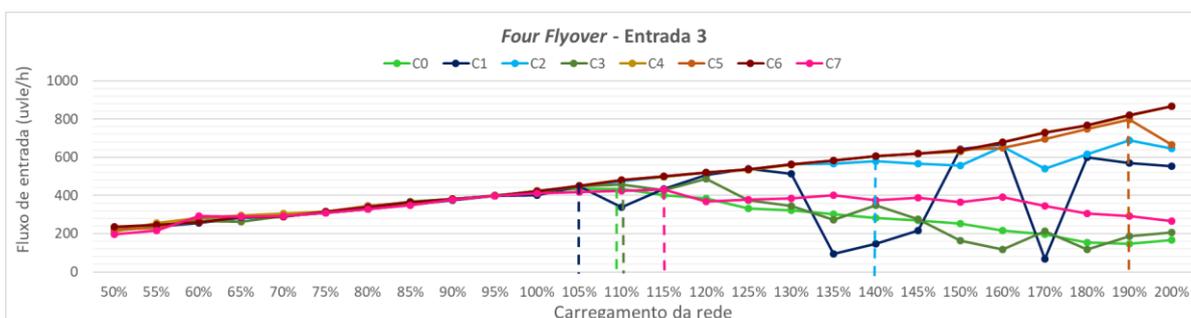


Figura I.11 - Capacidades registadas na entrada 3, para o modelo *four-flyover* nos diferentes cenários.

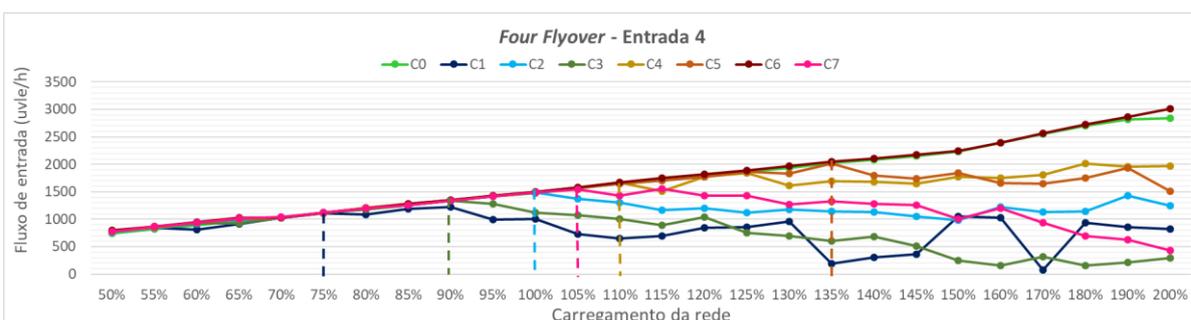


Figura I.12 - Capacidades registadas na entrada 4, para o modelo *four-flyover* nos diferentes cenários.