



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

# **Avaliação do Desempenho de um Corredor de Turbo-rotundas – Segurança**

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

Autor

**Nuno Miguel dos Santos Bernardo**

Orientador

**Professora Doutora Ana Maria César Bastos Silva**

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

**Coimbra, Janeiro, 2015**

## AGRADECIMENTOS

Começo por agradecer aos meus pais pelo seu apoio e disponibilidade incondicional. A eles devo a concretização de um objetivo acalentado desde criança e que só foi 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 sua amizade, cumplicidade e apoio em momentos nem sempre fáceis nesta fase académica da minha vida. À minha avó que sempre me incentivou e me deu força para nunca desistir.

À minha orientadora, professora Doutora Ana Bastos Silva, por todos os conselhos e conhecimentos que me transmitiu de forma a melhorar este trabalho, bem como pela sua disponibilidade e apoio durante o seu período de realização.

Ao meu colega de curso e amigo Pedro Mariano pela ajuda na recolha de dados e no tratamento dos mesmos, inclusive na construção do modelo aplicado nesta dissertação.

Ao meu colega de curso e amigo Carlos Proença e aos investigadores Luís Neto, Sílvia Santos e Rui Garrido, pela sua ajuda nas sessões de recolha de dados e no auxílio aos programas necessários à realização desta dissertação.

Ao projeto de investigação AROUND – Improving Capacity and Emission Models of Roundabouts, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia e pelo programa COMPETE e ao projeto EMSURE – Energy and Mobility for Sustainable Regions, financiado pelo programa QREN pelos meios financeiros disponibilizados de modo a tornar possível toda a recolha de dados necessários.

Aos professores que, ao longo do curso, contribuíram com os seus conhecimentos e metodologias pedagógicas para os “alicerces” da minha futura carreira profissional.

Por fim, a todos os meus amigos que de forma direta ou indireta me acompanharam e apoiaram durante todo o meu percurso académico.

## RESUMO

Em domínio urbano, os acidentes de tráfego tendem a concentrar-se nas intersecções, sendo diversas as abordagens tradicionais que estimam ou preveem o risco de acidentes de tráfego. As referidas metodologias baseiam-se em dados reais recolhidos diretamente dos locais ou em modelos de previsão de acidentes, apresentando, contudo, inúmeras limitações, como sejam a complexidade e diversidade de fatores que afetam a segurança e probabilidade de ocorrência de acidentes, a dificuldade de obtenção do histórico de acidentes, bem como a deficiente qualidade dos dados. Essas limitações justificaram a procura de metodologias alternativas, como as técnicas de microssimulação, que avaliando o nível de desempenho de soluções sem necessidade de recurso à sua construção prévia, permitem estudar o desempenho de soluções rodoviárias complexas ou inovadoras como é o caso das turbo-rotundas.

Neste contexto, a presente tese tem como objetivo avaliar o desempenho da solução turbo-rotunda, quando aplicada em corredor, comparativamente a uma rotunda normal de duas vias, sendo que a análise incidiu ao nível da segurança. O trabalho foi suportado pela aplicação de técnicas de microssimulação do software AIMSUN complementada pela aplicação SSAM e pela construção de um modelo de simulação baseado numa situação real, depois de devidamente calibrado e validado.

Os trabalhos assentaram na definição de um conjunto alargado de cenários de procura de tráfego avaliando-se o efeito associado a diferentes níveis de carregamento de tráfego na rede, e de diferentes cenários de repartição direcional do tráfego nas entradas das rotundas.

Os resultados obtidos mostram de forma consensual e robusta que a transformação de um corredor de rotundas de duas vias num corredor de turbo-rotundas, a funcionar perto do limiar de saturação, se traduz num aumento considerável do número de conflitos. Contudo, não é possível generalizar estas conclusões a todo o tipo de aplicações de turbo-rotundas, designadamente quando aplicadas em corredor, uma vez que apesar dos resultados mostrarem que o nível de desempenho depende consideravelmente da taxa de saturação do sistema, e que o aumento da taxa de saturação se traduz num aumento muito significativo do número de conflitos nos trechos de ligação entre intersecções, esses conflitos são de pequena gravidade podendo, por isso, não resultar em acidentes efetivos.

## **ABSTRACT**

In urban area, traffic accidents tend to occur mainly in intersections. There are several traditional approaches to estimate and predict the risk of traffic accidents at intersections based on data collected directly from the local or based on accident prediction models. However, these traditional approaches are associated with several limitations such as the complexity and diversity of factors affecting the safety and the likelihood of accidents, the difficulty in obtaining a history of accidents and poor data quality. These limitations have justified the search for alternative methods, such as microsimulation techniques, that are able to evaluate the performance of complex and innovative road solutions, as in the case of turbo-roundabouts, without the need of prior construction.

In this context, this thesis aims to evaluate the performance of the turbo-roundabout solution, when applied in corridor, compared to a normal two-lane roundabout. The analysis was focused on safety. The work was supported by the application of microsimulation techniques of AIMSUN software complemented by SSAM application, and by the construction of a simulation model based on a real situation, after proper calibration and validation.

These investigations were based on the definition of a wide range of traffic demand scenarios in order to evaluate the effect of different levels of network traffic loading, and different scenarios of directional distribution of traffic at the entrances of the roundabouts.

The results show, in a consensual and robust way, that the transformation of a normal two-lane roundabout into a turbo-roundabouts corridor, running close to the saturation threshold, results in a considerable increase in the number of conflicts. However, is not possible to generalize these findings to all types of turbo-roundabouts applications, particularly when applied in corridor, since although the results show that the level of performance of the system greatly depends on the saturation rate, and that the increase in saturation rate translates into a considerable increase in the number of conflicts in connection stretches between intersections, these conflicts are not severe and may, therefore, not result in actual accidents.

---

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento do tema e sua importância.....	1
1.2	Objetivos e metodologia de abordagem.....	3
1.3	Estrutura da tese.....	4
2	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE INTERSECÇÕES.....	5
2.1	Introdução/Conceito.....	5
2.2	Modelos de estimação de acidentes.....	6
2.2.1	Modelo de Maycock e Hall.....	7
2.2.2	Austrália.....	8
2.2.3	Modelo de Vieira Gomes.....	9
2.3	Técnicas de análise de conflitos.....	10
2.3.1	Introdução.....	10
2.3.2	Técnica de Conflito de Tráfego Sueca.....	10
2.3.3	Fiabilidade e validade dos métodos de Técnica de Conflito de Tráfego.....	12
2.4	Modelos de simulação de conflitos (+SSAM).....	13
2.4.1	Enquadramento.....	13
2.4.2	Visão geral do modelo de simulação de tráfego.....	14
2.5	Considerações finais.....	17
3	A SEGURANÇA NAS ROTUNDAS E TURBO-ROTUNDAS.....	18
3.1	Das rotundas às turbo-rotundas.....	18
3.2	Níveis de segurança da turbo-rotunda.....	22
3.3	Considerações finais.....	24
4	CONSTRUÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO.....	25
4.1	Introdução.....	25
4.2	Seleção dos locais de estudo.....	27
4.3	Recolha de dados de campo.....	28
4.4	Tratamento de dados.....	31
4.5	Codificação da rede.....	32
4.6	Calibração e Validação do modelo.....	34
4.6.1	Calibração.....	34
4.6.2	Validação.....	35
5	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO CORREDOR DE TURBO-ROTUNDAS.....	37
5.1	Metodologia de abordagem.....	37

---

5.2 Definição dos cenários.....	38
5.3 Definição dos indicadores de desempenho.....	40
5.4 Caracterização do cenário atual.....	42
5.5 Avaliação do desempenho de segurança para as Turbo-rotundas comparativamente às Rotundas Normais .....	43
5.5.1 Avaliação do efeito do carregamento da rede .....	43
5.5.2 Avaliação do efeito associado à variação da repartição direcional .....	49
5.5.2.1 Imposição de repartições diferentes da rotunda intermédia (B) para uma carga de 100% na rede .....	49
5.5.2.2 Imposição da mesma repartição direcional nas três rotundas e em todas as entradas de cada uma das rotundas .....	54
5.6 Validação dos resultados do SSAM .....	56
5.6.1 Carregamento da rede a 100% .....	58
5.6.2 Repartição direcional (Combinação 13).....	58
5.7 Considerações sobre os resultados .....	59
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	61
6.1 Conclusões.....	61
6.2 Trabalhos Futuros .....	63
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	65
ANEXO .....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – a) Instalação de detetores pneumáticos para obter o fluxo de tráfego e medir velocidades; b) Video-gravação para obter as diversas viragens dos veículos. (Vasconcelos et al, 2013)	6
Figura 2.2 – Variáveis do modelo de Maycock and Hall	8
Figura 2.3 - Velocidade de percentil 85 em função do raio da curva e do desejo de velocidade (Arndt, 2004)	8
Figura 2.4 – Cálculo do TTC para trajetórias perpendiculares e paralelas (Zajíc, 2012 retirada de Lareshyn et al, 2010)	12
Figura 2.5 - PET (Zajíc, 2012 retirado de Allen et al,1977)	12
Figura 3.1 – a) e b) Exemplos de rotundas tradicionais de múltiplas vias (Google@2014)	18
Figura 3.2 – a) e b) Comportamentos característicos nos atravessamentos de rotundas de múltiplas vias (Bastos Silva et al, 2013)	20
Figura 3.3 - Pontos de conflito em rotundas de duas vias de circulação: (a) expectável; (b) comportamentos erráticos (Bastos Silva et al, 2013)	21
Figura 3.4 - a) e b) Exemplos de Turbo-rotunda (Google@2014)	21
Figura 3.5 - Pontos de conflito: (a) rotunda normal de duas vias; (b) turbo-rotunda (Bastos Silva et al, 2013)	24
Figura 4.1 – Construção do modelo	26
Figura 4.2 - Corredor de rotundas em estudo (Google@2014)	27
Figura 4.3 – Rotundas em estudo: (a) Rotunda A; (b) Rotunda B; (c) Rotunda C	28
Figura 4.4 – Simbologia associada à codificação da rede (Mariano, 2014)	29
Figura 4.5 - Postos de contagem e respetivos movimentos observados (Mariano, 2014)	30
Figura 4.6 - Postos de recolha direcional de trafego (Mariano, 2014)	30
Figura 4.7 - Representação da codificação da rede atual desenvolvida no AIMSUN (Mariano, 2014)	32
Figura 4.8 - Codificação das rotundas convencionais (em cima) e das turbo-rotundas (em baixo) (Mariano, 2014)	33
Figura 5.1 – Metodologia de abordagem	37
Figura 5.2 - Limites para os ângulos para os 3 tipos de conflitos (retirada do SSAM)	41
Figura 5.3 – Tabela sumário apresentada no SSAM para um dado cenário	41

---

Figura 5.4 – Mapa de conflitos apresentado no SSAM para um dado cenário	42
Figura 5.5 – Número e tipos de conflitos existentes na solução com rotundas tradicionais com o aumento da carga de procura de tráfego na rede	43
Figura 5.6 – Tipos de conflitos na rotunda A para uma procura global de 100%	44
Figura 5.7 – Tipos de conflitos no corredor com rotundas normais: a) para 100% de procura global; b) para 150% de procura global	45
Figura 5.8 – Número de conflitos existentes nas rotundas tradicionais e turbo-rotundas para um aumento da procura global	46
Figura 5.9 – Número e tipos de conflitos existentes na solução turbo-rotundas com aumento da procura global	47
Figura 5.10 – Tipos de conflitos para uma procura de 100%: (a) rotunda convencional A; (b) turbo-rotunda A	47
Figura 5.11 – Número de conflitos total para cada combinação para ambas as soluções	50
Figura 5.12 – Tipo de conflitos para a combinação 4 na rotunda A: (a) rotunda normal; (b) Turbo-rotunda	52
Figura 5.13 – Tipos de conflitos para a combinação 15 na rotunda A: (a) rotunda normal; (b) Turbo-rotunda	55



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Número de conflitos e TMDA consoante a tipologia de rotunda tradicional adotada (SWOV, 2012 retirado de CROW, 1998)	19
Quadro 3.2 – Resultados do número de conflitos e velocidades medias relativas (Vascocnelos et al, 2014)	23
Quadro 4.1 – Matriz O/D veículos ligeiros, correspondente ao período 8h15-8h30	31
Quadro 4.2 - Totais de procura de veículos por cada período de 15 minutos [7h30-9h30]	32
Quadro 4.3 - Parâmetros da distribuição de Velocidades	34
Quadro 4.4 - Comparação dos tempos médios ao longo do corredor medidos no local com os obtidos no AIMSUN	36
Quadro 5.1 – Combinações em estudo para repartições direcionais diferentes em relação à rotunda B	39
Quadro 5.2 – Combinações em estudo para repartições direcionais iguais em todas as rotundas	40
Quadro 5.3 – Taxas de saturação nas entradas principais das rotundas A e B (8:15 – 8:30) – cenário de procura de tráfego atual	42
Quadro 5.4 – Número e tipo de conflitos com o aumento da procura global: (a) Solução rotundas normais; (b) solução Turbo-rotundas	48
Quadro 5.5 – Quadro resumo do número de conflitos, TTC médio e <i>DeltaS</i> médio com o aumento da procura global	48
Quadro 5.6 – Número de conflitos total para cada combinação para ambas as soluções	50
Quadro 5.7 – Tipos de conflitos para as duas soluções para cada combinação	52
Quadro 5.8 - Quadro resumo do número de conflitos, TTC médio e <i>DeltaS</i> médio para cada uma das combinações	53
Quadro 5.9 - – Número de conflitos total para cada combinação para ambas as soluções	54
Quadro 5.10 - Tipos de conflitos para as duas soluções para cada combinação	55
Quadro 5.11 - Quadro resumo do número de conflitos, TTC médio e <i>DeltaS</i> médio para cada uma das combinações	56
Quadro 5.12 – Resultados obtidos pelos dois modelos para cada entrada da rotunda A e por tipologia de acidente	58
Quadro 5.13 - Resultados obtidos pelos dois modelos para cada entrada da rotunda A e por tipologia de acidente	59

## **SIMBOLOGIA**

DeltaS – Velocidade máxima relativa de dois veículos envolvidos no conflito

DR – Initial deceleration rate

MaxS – Velocidade máxima de dois veículos envolvidos no conflito

O/D – Origem destino

PET – Post encroachment time

TA – Time do accident

TCT – Técnicas de análise de conflitos de tráfego

TMDA – Tráfego médio diário anual

TTC – Time to collision

## **ABREVIATURAS**

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

AROUND – Improving Capacity and Emission Models of Roundabouts

CROW – Dutch Information and Technology Platform

EMSURE – Energy and Mobility for Sustainable Regions

FHWA – Federal Highway Administration

ICTCT - Comité Internacional de Técnicas de Conflito de Tráfego

LIOS – Laboratório de Investigação Operacional e Simulação

MEFA – Modelos de Estimativa de Frequência de Acidentes

SSAM – Surrogate Safety Assessment Model

SWOV – Institute for Road and Safety Research

TRL – Transportation Research Laboratory

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento do tema e sua importância

As rotundas são interseções geralmente circulares conhecidas como sendo extremamente eficazes a diferentes níveis, designadamente em termos de acalmia de tráfego e segurança, de regulação do trânsito, fluidez e capacidade. Alguns autores (FHWA, 2000; Elvik e Vaa, 2004; Daniels e Wets, 2005) defendem que a sua principal vantagem, em relação a outros cruzamentos tradicionais de nível, é o seu elevado desempenho ao nível da segurança rodoviária, já que a sua transformação em rotunda se traduz na redução significativa do número de pontos de conflito, designadamente os ortogonais, contribuindo assim para a diminuição de número de acidentes e da sua gravidade.

Contudo, a necessidade de se responder a elevados volumes de procura de tráfego, tem justificado o recurso a rotundas com múltiplas vias nas entradas e no anel de modo a assegurar elevados níveis de capacidade e de fluidez. Apesar destas soluções assegurarem um bom nível de desempenho geral, principalmente em termos de capacidade e custo-benefício, a disponibilização de múltiplas vias tende a gerar problemas de segurança resultantes da prática de comportamentos erráticos dos condutores, e que frequentemente se traduzem em manobras de entrecruzamento, levando a um aumento do número de acidentes. Estes problemas comportamentais são ainda agravados pela inexistência de enquadramento legal que apoie de forma inequívoca, o comportamento do condutor durante as fases de aproximação, atravessamento e saída de uma rotunda, em função do destino pretendido (Bastos Silva et al, 2013).

Como solução alternativa às rotundas convencionais de múltiplas vias, surge assim na Holanda, em 1996, a turbo-rotunda que introduz circuitos em espiral no anel de circulação, delimitados por elementos físicos que visam impedir os entrecruzamentos e reduzir as velocidades de atravessamento. A primeira implementação piloto ocorreu em 2000 na Holanda, onde se observaram evidentes melhorias ao nível da segurança rodoviária, com grande sucesso na redução do número de acidentes comparativamente às soluções convencionais de múltiplas vias, levando alguns países europeus a adotarem esta nova solução, numa primeira fase, igualmente a título piloto (Brilon 2005; Tollazzi et al, 2010).

Devido ao seu sucesso, esta nova solução tem merecido destaque pela comunidade científica, tendo sido já efetuados diversos estudos sobre o seu desempenho (Yperman e Immers, 2003; Mauro e Branco, 2010; Bastos Silva et al, 2011; Fortuijn, 2011; Vasconcelos et al, 2013). No entanto, embora as melhorias ao nível da segurança rodoviária sejam na generalidade consensuais, estes estudos centram-se apenas na aplicação de turbo-rotundas isoladas e na aplicação de metodologias diversificadas, nem sempre consideradas robustas. Deste modo considera-se relevante a realização de trabalhos de investigação científica que contribuam para um melhor conhecimento sobre o real desempenho das turbo-rotundas ao nível da rede e não apenas isoladas.

Existem inúmeras abordagens tradicionais para estimar e prever o risco de acidentes de tráfego em intersecções com base em dados reais recolhidos diretamente dos locais ou com base em modelos de previsão de acidentes. Contudo estas abordagens demonstram inúmeras limitações relacionadas com a complexidade e diversidade dos fatores de segurança e a deficiente qualidade dos dados (Vasconcelos et al, 2013).

É portanto necessário recorrer a técnicas específicas de avaliação do desempenho de soluções em termos de segurança rodoviária, como forma de sustentar tecnicamente eventuais alterações à sua geometria, ou ao seu modo de funcionamento. Além disso, os modelos de regressão tradicionais desenvolvidos em vários países, podem não ser diretamente transferíveis para Portugal pois refletem o comportamento dos utentes da estrada do país de origem.

Em alternativa nos últimos anos, as técnicas de simulação de tráfego microscópicas têm sido extensivamente utilizadas pelos técnicos e gestores de rede para avaliar e comparar o desempenho operacional das diferentes alternativas de projeto. Recentemente tem havido um interesse crescente em expandir as utilizações destas técnicas de simulação para avaliação dos níveis de segurança rodoviária. Estes modelos afirmam-se cada vez mais como instrumentos de análise do desempenho integrado do modo de funcionamento de redes complexas, aos diferentes níveis, designadamente em termos de capacidade, segurança e emissões ambientais.

Os modelos de simulação microscópica são ferramentas de análise prática que, ao longo dos últimos 30 anos, têm sido utilizados para diferentes fins, assumindo um papel cada vez mais relevante em estudos estratégicos, de planeamento e de gestão otimizada de tráfego, podendo envolver diferentes cenários de procura de tráfego e tipologia de utilizadores.

Atualmente, estes modelos são reconhecidos como ferramentas promissoras para avaliar os níveis de segurança rodoviária de infraestruturas já existentes e de testar o potencial de funcionamento associado a novas soluções. O núcleo desta nova abordagem é um software desenvolvido pela FHWA (*Surrogate Safety Assessment Model – SSAM*) que analisa os conflitos potenciais no modelo de microssimulação através do processamento das trajetórias de

---

veículos produzidas com base em modelos de microssimulação (séries temporais da posição do veículo e os perfis de velocidade e aceleração) (Vasconcelos et al, 2013).

O presente trabalho centra-se assim na aplicação de modelos de microssimulação para avaliação do desempenho de turbo-rotundas aplicadas em corredor, em termos de segurança rodoviária, comparativamente a um corredor de rotundas normais. Por facilidade logística, optou-se por seleccionar um corredor de rotundas situadas na cidade de Coimbra, procurando-se perceber os potenciais benefícios associados à sua transformação em turbo-rotundas.

## 1.2 Objetivos e metodologia de abordagem

A presente dissertação de mestrado insere-se no projeto de investigação AROUND – *Improving Capacity and Emission Models of Roundabouts*, no âmbito do qual se pretende avaliar o nível de desempenho de rotundas numa ótica combinada de capacidade, segurança e emissões ambientais e no projeto EMSURE – *Energy and Mobility for Sustainable Regions*, no âmbito do qual se pretende contribuir para o estudo do comportamento do condutor, tendo por base técnicas de simulação.

No âmbito desse projeto, está previsto a avaliação do nível de desempenho de soluções inovadoras, para as quais não existem modelos tradicionais de análise devidamente calibrados, nem é possível recorrer a observações locais, e por consequência a aplicação de técnicas de simulação se revela como a única metodologia de abordagem possível.

A aplicação de técnicas de simulação à avaliação dos níveis de segurança oferecidos por turbo-rotundas tem merecido o desenvolvimento de alguns trabalhos de investigação, com resultados variáveis, embora apontando consensualmente para uma melhoria significativa. Deste modo, achou-se pertinente centrar o presente estudo na avaliação dos níveis de segurança de turbo-rotundas inseridas em corredor, tendo-se escolhido para estudo de caso um corredor de três rotundas consecutivas inseridas na Circular Externa de Coimbra (Av<sup>a</sup> Fernando Namora).

Em termos específicos, o objetivo do estudo centrou-se na avaliação comparativa do desempenho de um corredor composto por três rotundas convencionais de duas vias, de grande dimensão, relativamente a uma solução constituída por três turbo-rotundas de dimensão geral similar. Por limitações de tempo e, por consequência, de disponibilização de *software* específico, optou-se por limitar a análise à avaliação dos níveis de segurança, remetendo a avaliação das componentes de capacidade e emissões ambientais para outro trabalho, entretanto já concluído (Mariano, 2014).

O trabalho foi assim suportado por técnicas de microsimulação, com recurso ao *software* AIMSUN (*Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks*), um simulador de tráfego de origem espanhola, complementada pela aplicação SSAM (*Surrogate Safety Analysis Module*), de origem americana. Os modelos de microsimulação foram construídos tendo por base uma situação real, tendo-se procedido a trabalhos complementares de calibração e validação. O trabalho assentou na definição de um conjunto alargado de cenários de estudo, entre os quais se considerou, por um lado, o aumento da procura global do tráfego na rede e, por outro, a variação na repartição direcional do tráfego nas entradas das rotundas, impondo um crescimento sistemático ou alternado do tráfego em função dos movimentos de viragem.

### **1.3 Estrutura da tese**

A presente dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos.

No presente capítulo, 1, é apresentado um enquadramento geral do tema, seguido da descrição dos objetivos do trabalho.

No capítulo 2 foi feita uma pequena revisão da literatura existente relativamente a conceitos importantes ao tema. É apresentada o conceito de técnicas tradicionais de análise de conflitos assim como a sua evolução até aos modelos de simulação de conflitos apontando estudos já realizados assim como os benefícios e limitações destes conceitos.

No capítulo 3 é feita uma abordagem geral sobre a segurança em rotundas convencionais e turbo-rotundas. É explicada a evolução das rotundas até à turbo-rotunda descrevendo os benefícios e limitações de cada uma destas soluções ao nível da segurança e apresentados alguns estudos já realizados nesse âmbito.

No capítulo 4 está explicada a construção dos dois modelos que foram necessários para este estudo desde a recolha e tratamento dos dados, até ao desenho, calibração e validação destes modelos.

No capítulo 5 são apresentados os resultados comparativos entre os dois modelos estudados com base nos diferentes cenários definidos.

No capítulo 6 são apresentadas algumas conclusões, salientando os aspetos mais relevantes deste estudo e ainda são apresentadas considerações relativas a possíveis trabalhos futuros.

## 2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE INTERSECÇÕES

### 2.1 Introdução/Conceito

Em áreas urbanas, os acidentes de tráfego tendem a concentrar-se em maior número nas intersecções. As abordagens tradicionais para estimar o potencial de risco de acidentes de trânsito em intersecções, com base em dados reais de acidentes, incluem análises antes e após determinado tipo de intervenção e os modelos tradicionais para previsão de acidentes. Estas duas abordagens apresentam limitações importantes resultantes da complexidade e diversidade dos fatores e variáveis que influenciam a ocorrência de um acidente agravada pela deficiente qualidade dos dados arquivados (Vasconcelos et al, 2013).

É ainda frequente a identificação de informação incompleta ou de erros nos dados recolhidos pelas fontes policiais e inseridos nos registos dos acidentes. Os acidentes são eventos raros que acontecem esporadicamente, o que dificulta a aplicação de técnicas estatísticas a amostras desequilibradas (elevada ocorrência de não acidente). Além disso, este tipo de análise, assente na avaliação do historial de acidentes e na identificação dos pontos críticos, é frequentemente criticada, uma vez que não permite prevenir a ocorrência de acidentes, o que justifica, cada vez mais, definir metodologias alternativas de avaliação, numa perspetiva pró-ativa.

A comunidade científica tem por isso procurado identificar outros indicadores de segurança (FHWA – *Federal Highway Administration*, 1989) que, em alternativa ao acidente, melhor permite avaliar o potencial de ocorrência de acidente. O conflito de tráfego é assim uma medida que permite medir o potencial do acidente em intersecções sem ter que esperar que o acidente ocorra (FHWA, 1989). Um conflito de tráfego pode ser definido como um evento que envolve a intersecção de dois ou mais veículos/utilizadores onde um ou ambos fazem uma manobra evasiva para evitar a colisão (Hyden, 1975, Huang et al, 2012). As técnicas tradicionais de análise de conflitos de tráfego envolvem a observação, o registo e a avaliação da frequência e da gravidade dos conflitos de tráfegos num cruzamento, por uma equipa de observadores devidamente treinados para o efeito (Sayed e Zein 1999). Portanto esta técnica é um meio de observação e de avaliação das manobras de condução inseguras geradas num cruzamento e que permite relacionar tais manobras com as características prevaletentes da estrada (Sayed e Zein, 1999).

Segundo Lareshyn (2010), a técnica de conflito de tráfego é o método mais direto de todos os métodos indiretos de medição de segurança rodoviária. De acordo com Archer (2001), também é um método que estima a frequência esperada e a ocorrência de acidentes de uma forma mais rápida e mais informativa (Zajic, 2012). Apesar disso, este procedimento tem sido frequentemente questionado devido às avaliações subjetivas dos observadores e ao custo elevado que está associado à recolha de dados de campo (Huang et al, 2012). A Figura 2.1 mostra duas maneiras distintas da recolha de dados de tráfego.

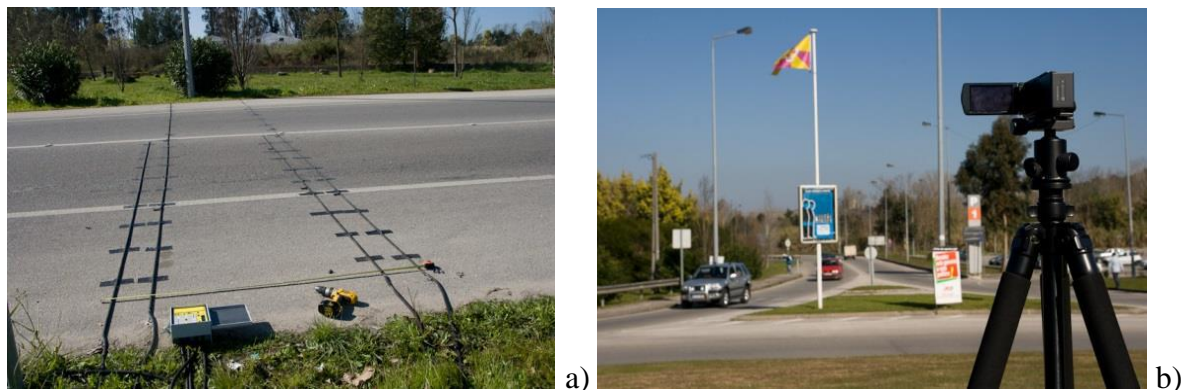


Figura 2.1 – a) Instalação de detetores pneumáticos para obter o fluxo de tráfego e medir velocidades; b) Vídeo-gravação para obter as diversas viragens dos veículos. (Vasconcelos et al, 2013)

Em alternativa nos últimos anos, as técnicas de simulação de tráfego microscópicas têm sido extensivamente utilizadas pelos profissionais de transporte para avaliar e comparar o desempenho operacional das alternativas de projeto. Recentemente tem havido um interesse em expandir as utilizações destas técnicas de simulação para avaliação dos níveis de segurança. A microssimulação afigura-se assim como uma técnica com potencial de aplicação a diferentes elementos infraestruturais, incluindo ao estudo de redes complexas que envolvam diferentes alternativas modais, utilizadores e variabilidade de cenários de procura de tráfego. Estas técnicas, à semelhança das técnicas de análise de conflitos, assentam na contabilização do “número de conflitos” como eventos que poderão resultar na geração de acidentes.

## 2.2 Modelos de estimação de acidentes

O desenvolvimento de modelos tradicionais baseia-se habitualmente na aplicação de técnicas estatísticas sofisticadas a uma base de dados construída tendo por base o historial de acidentes registado ao longo de um período alargado. No entanto, e atendendo ao facto dos acidentes (particularmente em rotundas) constituírem fenómenos muito raros, é normalmente difícil obter



dados suficientes num único local, sob variáveis externas controladas, tais como condições meteorológicas ou de trânsito, para definir um cenário de referência.

Apesar disso, é possível identificar vários modelos de estimação de acidentes em rotunda entre os quais: Reino Unido (Maycock e Hall, 1984), Austrália (Amdt, 2004) e Portugal (Vieira Gomes, 2013). Os pontos seguintes, apresentam de forma breve, uma descrição destes três modelos.

### 2.2.1 Modelo de Maycock e Hall

Maycock e Hall (1984) usaram registos de acidentes de 84 rotundas com quatro ramos para desenvolverem os modelos de estimação de acidentes em rotundas no Reino Unido. Em cada local, foi registado o fluxo de tráfego e o de peões e levantadas as características geométricas da rotunda. Paralelamente foram obtidas as ocorrências registadas ao longo de um período de 6 anos (1974 – 1979). Os acidentes foram segregados nas seguintes categorias: 1) acidentes de entrada no anel de circulação (entre um veículo que esteja a entrar na rotunda e outro que circula no anel), 2) acidentes na aproximação (principalmente embates frente-traseiras, mas também acidentes de mudança de via), 3) acidentes por despiste de veículo isolado (um único veículo colidindo com alguma parte ou objeto da intersecção), 4) outros acidentes (variedade de acidentes sem envolvimento de peões) e 5) acidentes pedonais (qualquer acidente que envolva vítimas pedonais).

Os modelos veículo-veículo apenas se referem a tipologia de acidentes 1, 2 e 4:

$$A_1 = 0,052Q_e^{0,7} Q_c^{0,4} \exp\{-40C_e + 0,14e - 0,007ev - \frac{1}{[1+\exp(4R-7)]} + 0,2P_m - 0,01\theta\} \quad (1)$$

$$A_2 = 0,0057Q_e^{1,7} \exp(20C_e - 0,1e) \quad (2)$$

$$A_4 = 0,026Q_e^{0,8} Q_c^{0,8} \exp(0,2P_m) \quad (3)$$

Onde  $A$  são os acidentes de danos pessoais (incluindo fatalidades) por ano e por aproximação/entrada de rotunda,  $Q_e$  e  $Q_c$  é o fluxo de entrada e o fluxo conflituante, respetivamente (milhares de veículos/dia),  $C_e$  é a curvatura de entrada ( $C_e = 1/R_e$  e  $R_e$  é o raio de entrada associado á trajetória mais retilínea (m)),  $e$  é a largura de entrada na rotunda (m),  $v$  é a largura da via na aproximação,  $R$  é o raio do círculo inscrito,  $P_m$  é a proporção de motociclos (%) e  $\theta$  é o ângulo que dois braços da rotunda fazem medido da linha central de um dos braços para a linha central do outro (graus, °) (ver Figura 2.2).

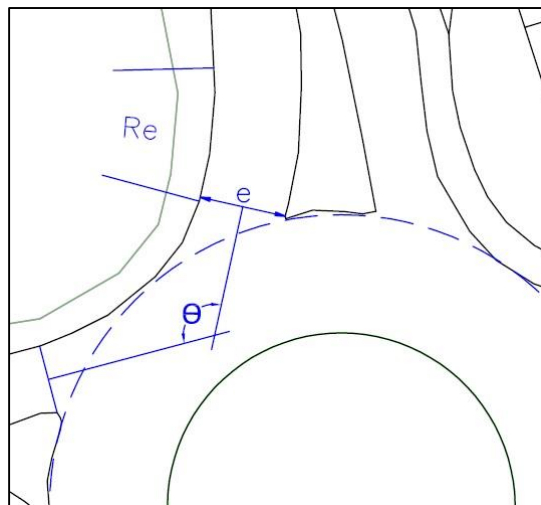


Figura 2.2 – Variáveis do modelo de Maycock and Hall

### 2.2.2 Austrália

Arndt (2004) analisou 100 rotundas localizadas em Queensland (Austrália), onde foram registados 492 acidentes num período de análise de 5 anos. O principal objetivo deste estudo foi determinar o efeito da geometria da rotunda na taxa de acidentes. Foram desenvolvidos modelos para acidentes por despiste isolado, acidentes na aproximação (frente-traseira) e acidentes de entrada/anel de circulação.

Os modelos de acidentes desenvolvidos integram, entre outras variáveis, a velocidade em cada elemento estimado. A Figura 2.3 indica o percentil 85º da velocidade numa curva horizontal, em função do raio e da velocidade desejada. Neste estudo foi assumido que as velocidades desejadas correspondem ao percentil 85 das velocidades de veículos em regime livre de circulação, o qual para condições urbanas e suburbanas é aproximadamente 20km/h acima do limite legal de velocidade.

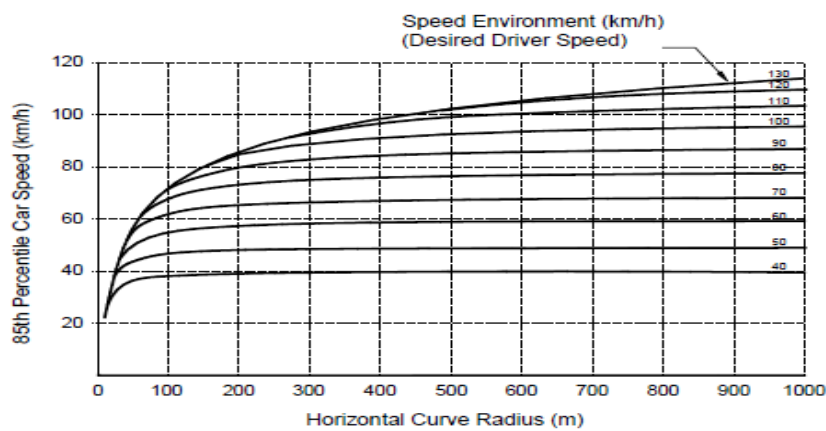


Figura 2.3 - Velocidade de percentil 85 em função do raio da curva e do desejo de velocidade (Arndt, 2004)

Os acidentes na aproximação do tipo frente-traseira ocorrem na zona de entrada na rotunda e são dadas pela seguinte equação:

$$A_r = 9,62 \times 10^{-11} Q_a Q_c^{0,5} S^2 \quad (4)$$

Onde  $A_r$  são os acidentes do tipo frente-traseira por ano (mais de \$1000 danos materiais e/ou danos pessoais),  $Q_a$  é o tráfego médio diário anual de entrada na rotunda, (veículo/dia),  $Q_c$  é o tráfego médio diário anual no anel de circulação adjacente à entrada da rotunda (veículo/dia) e  $S$  é o percentil 85 da distribuição da velocidade na zona de embate (km/h).

Os acidentes de entrada/anel de circulação de veículos são estimados através da seguinte equação:

$$A_c = 3,45 \times 10^{-12} Q_a \sum (Q_{ci}^{0,5} S_i^2) \quad (5)$$

Onde  $A_c$  é o número de acidentes de entrada/anel circulação por ano (mais de \$1000 em danos materiais e/ou danos pessoais),  $Q_a$  é o tráfego médio diário anual na entrada da rotunda (veículo/dia),  $Q_{ci}$  são os vários fluxos de tráfego médio diário anual da via de circulação no anel adjacente à entrada da rotunda (veículo/dia) e  $S_i$  é o percentil 85 da distribuição das velocidades relativas entre os veículos na curva de aproximação e dos veículos no anel de circulação (hm/h).

A velocidade relativa entre a velocidade de entrada e no anel de circulação depende das velocidades de entrada ( $S_a$ ) e de circulação no anel ( $S_c$ ) e do ângulo entre as trajetórias ( $\alpha$ ) e pode ser calculada utilizando a lei dos cossenos:

$$S = \sqrt{S_a^2 + S_c^2 - 2S_a S_c \cos \alpha} \quad (6)$$

### 2.2.3 Modelo de Vieira Gomes

Vieira Gomes (2013) utilizando dados de 94 interseções e 15 rotundas situadas em Lisboa, Portugal, desenvolveu modelos para estimar a frequência de acidentes com vítimas nas redes urbanas. Estes modelos descrevem o número de acidentes esperado como uma função de um conjunto limitado de variáveis explicativas relacionadas com o fluxo de veículos, fluxo de peões e características geométricas da estrada/rotunda.

São apresentados dois modelos para rotundas: um que depende apenas do fluxo de tráfego (Equação 7) e outro que depende também do número de ramos de entradas na rotunda (Equação 8). Os modelos globais para rotundas, excluindo acidentes com peões, são:

$$Y_R = 1,9488 \times 10^{-7} FT^{1,4985} \quad (7)$$

$$Y_R = 2,3845 \times 10^{-8} FT^{1,5084} e^{0,5248LEG} \quad (8)$$

Onde  $Y_R$  é o número estimado de acidentes com vítimas por ano na rotunda, enquanto  $FT$  é o fluxo total de tráfego das entradas, em veículos por dia e  $LEG$  é o número de ramos de entrada da rotunda.

## 2.3 Técnicas de análise de conflitos

### 2.3.1 Introdução

As Técnicas de análise de Conflito de Tráfego (TCT) é, de todos os métodos indiretos, o mais direto no que respeita a medidas de segurança rodoviária (Laureshyn, 2010). Baseia-se na observação e registo de eventos de conflito (quase acidentes) em condições normais e *in situ*. O método foi desenvolvido no final da década de 60 nos laboratórios da *General Motors* para a pesquisa de problemas de segurança dos seus veículos (Perkins e Harris., 1968). Consistia em observar e registar as interações perigosas entre os utilizadores da estrada que necessitavam de uma manobra evasiva para evitar a colisão. Na Checoslováquia foi implementado por iniciativa de Folprecht em 1973 na *Road and Urban Transport Institute (ÚSMD) of Prague*. Em 1988, Folprecht e Křivda incorporaram este método baseado numa avaliação video-registo por observadores treinados em aulas e pesquisas na *VSB-Technical University of Ostrava*. Este método é ainda utilizado com sucesso para resolver inúmeras tarefas de investigação no domínio da avaliação de segurança rodoviária (Zajic, 2012 baseado em Folprecht, 2000; Krivda, 2011). Um método semelhante de observação de conflitos de tráfego com base na sua avaliação por observadores diretos no local é usada na Universidade Técnica de Praga, República Checa (Zajic, 2012 baseado em Slaby e Kocourek., 2006). De acordo com Archer (2001) os métodos TCT oferecem uma maneira mais rápida e informativa para estimar a frequência e a ocorrência de acidentes.

### 2.3.2 Técnica de Conflito de Tráfego Sueca

As técnicas de análise de conflitos de tráfego (TCT) tiveram um desenvolvimento significativo nos anos 70 e 80 na Universidade Técnica de Lund, na Suécia. O seu método de observação de conflito de tráfego é efetuado por observadores treinados focados na procura de situações em que dois condutores podem colidir se nenhum deles optar por uma manobra evasiva. Quando esta manobra evasiva é efetuada, ela é registada pelo observador como “*Time-to-Accident*” (TA). O valor TA juntamente com a velocidade no instante do conflito é utilizada para determinar se o conflito é grave ou não (Hyden, 1987). De acordo com o país onde teve a sua

origem, este método foi designado de “ Técnica de Conflito de Tráfego Sueca”. Alguns outros métodos suecos alternativos com base em princípios semelhantes foram introduzidos na Europa e no mundo. O “Comité Internacional de Técnicas de conflito de tráfego” (ICTCT) define um conflito de tráfego como “Uma situação observável, em que dois ou mais utilizadores se aproximam um do outro no espaço e no tempo, de tal forma que existe um risco de colisão caso os seus movimentos permaneçam inalterados”. (Amundsen e Hydén, 1987).

Um estudo comparativo realizado em 1983, em Malmö, focado na gravidade das situações de conflito identificadas que contou com a participação de 8 equipas estrangeiras que utilizaram técnicas alternativas de conflito de tráfego respeitantes aos seus países, provou que as diferenças entre estas técnicas não eram significativas. Os observadores concordaram em 75% dos conflitos graves identificados (Zajíc, 2012).

As diferenças entre cada observador para avaliar a gravidade de uma manobra evasiva são, portanto, um assunto sujeito a crítica frequente do método TCT. Por isso, foram propostos indicadores alternativos de medida mais objetivos, que permitem obter uma medição na escala de gravidade comprovada no tempo. O indicador mais valioso deste tipo é “Tempo para a colisão” (TTC), definido como o tempo necessário para dois veículos colidirem se mantiverem a sua velocidade atual e trajetória (Laureshyn et al, 2010) (Ver equações 9, 10 e 11 e Figura 2.4). O valor crítico para avaliar o conflito é, por conseguinte, o valor mínimo do TTC durante a sua duração.

$$TTC = \frac{d_2}{v_2}, \text{ se } \frac{d_1}{v_1} \leq \frac{d_2}{v_2} \leq \frac{(d_1+l_1+w_2)}{v_1} \quad (9)$$

$$TTC = \frac{d_1}{v_1}, \text{ se } \frac{d_2}{v_2} \leq \frac{d_1}{v_1} \leq \frac{(d_2+l_2+w_1)}{v_2}$$

$$TTC = \frac{X_1-X_2-l_1}{v_1-v_2}, \text{ se } v_2 \geq v_1 \quad (10)$$

$$TTC = \frac{X_1-X_2}{v_1+v_2} \quad (11)$$

Onde:

$d_1$  e  $d_2$  são as distâncias à parte da frente dos veículos 1 e 2 respetivamente;

$l_1$  e  $l_2$  são os comprimentos dos veículos 1 e 2 respetivamente;

$w_1$  e  $w_2$  são as larguras dos veículos 1 e 2 respetivamente;

$X_1$  e  $X_2$  são as posições dos veículos 1 e 2 respetivamente;

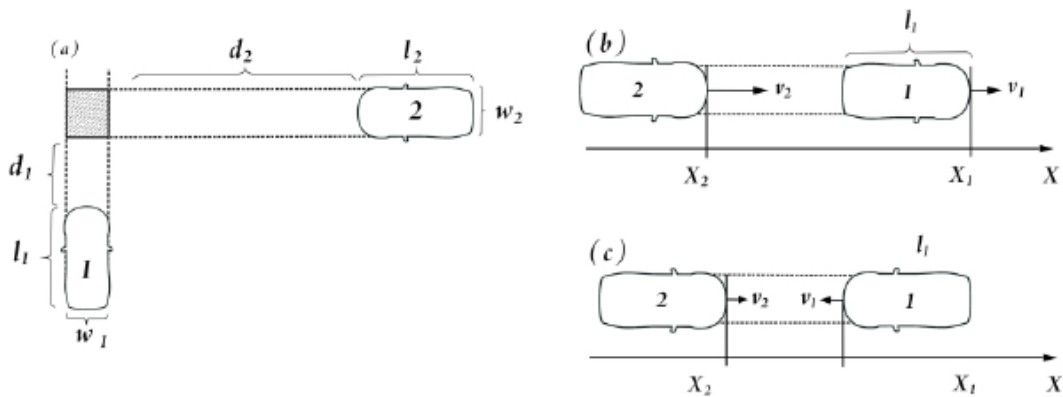


Figura 2.4 – Cálculo do TTC para trajetórias perpendiculares e paralelas (Zajíc, 2012 retirada de Lareshyn et al, 2010)

O TTC é portanto um parâmetro contínuo e pode ser calculado em qualquer instante desde que os dois veículos estejam num trajeto de colisão um com o outro.

Outra alternativa de indicador TTC é o designado Post encroachment time (PET) (Allen et al, 1977) (Ver Figura 2.5). O PET é usado em situações em que não ocorre a colisão, mas a diferença de tempo de intersecção das trajetórias é encontrado abaixo de determinado valor limite (Lareshyn, 2010).

$$PET = t_2 - t_1 \tag{12}$$

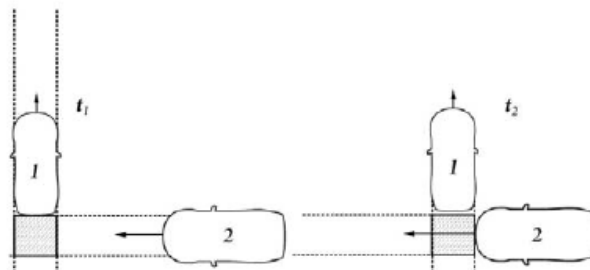


Figura 2.5 - PET (Zajíc, 2012 retirado de Allen et al,1977)

### 2.3.3 Fiabilidade e validade dos métodos de Técnica de Conflito de Tráfego

A utilização prática da técnica de conflitos de tráfego continua a ser extremamente limitada. Como principal razão estão as dúvidas e o grande número de questões relativas à validade e fiabilidade destes métodos.

A validação do método TCT é avaliada principalmente de acordo com a correlação adequada entre o número observado de conflitos e os registos de acidente (Chin e Quek, 1977). Um estudo americano (Migletz et al, 1985) mostrou que o estudo normal de situações de conflito pode fornecer estimativas de frequência média de ocorrência de acidentes, os quais são, pelo menos, tão precisos como os que se baseiam em dados históricos. Na opinião de outros autores (Laureshyn et al, 2010), alguns problemas associados à validação dos resultados resultam da falta de precisão das bases de dados.

Uma questão igualmente levantada é a “validade do processo”, ou seja, se os conflitos que desencadeiam os processos são iguais àqueles que causam os acidentes. Com base nos dados relativos ao TA (*Time-to-accident*) e da velocidade (Hydén, 1987), os autores confirmaram que os conflitos e acidentes partilham efetivamente a mesma atribuição de gravidade, e que os acidentes geralmente atingem o valor de TA abaixo de 0,5 segundos e a velocidade de 10 a 20 km por hora, maior que no caso dos conflitos.

A fiabilidade da medição de conflitos depende significativamente das diferenças associadas à avaliação subjetiva dos conflitos de tráfego por parte de cada observador. Deste ponto de vista os métodos que usam gravações vídeo são considerados mais objetivos. De acordo com alguns investigadores, embora a recolha de imagens possa permitir múltiplas reavaliações, as mesmas não garantem a mesma qualidade da observação em ambiente real. Os observadores no local têm a possibilidade de avaliar melhor os fenómenos causados, já que permite ter uma visão global de todos os eventos que decorrem em simultâneo (Chin e Quek, 1977).

## **2.4 Modelos de simulação de conflitos (+SSAM)**

### **2.4.1. Enquadramento**

A segurança está a emergir como uma área de maior atenção e consciência dentro da engenharia de tráfego. Com recurso a dados históricos é difícil avaliar os níveis de segurança associados a novas soluções ou a soluções inovadoras, devido à falta de modelos validados de previsão de acidente e à falta de consenso sobre o que constitui um mecanismo seguro ou inseguro. Têm no entanto surgido, particularmente nos últimos anos e associado ao avanço tecnológico, modelos de simulação de tráfego com potencial para avaliar o desempenho geral de soluções infraestruturais, aos seus diferentes níveis, incluindo segurança. Estas medidas alternativas podem então ser usadas para apoiar a avaliação comparativa de alternativas de gestão do tráfego no que respeita à segurança, sem trabalho dispendioso de estudos acidentais ou de construção. Além disso, as medidas disponíveis a partir de modelos de simulação são muito mais detalhadas que as medidas subjetivas baseadas em observadores humanos (por exemplo, técnica de conflitos de tráfego) e pode cobrir diferentes cenários de operação (ou seja, momentos do dia,

dias da semana, meses do ano, eventos especiais e incidentes), do que o período de tempo limitado que os observadores *in situ* dispõem para avaliar a situação.

Para avaliar os níveis de segurança associados a vários reordenamentos de tráfego, incluindo projetos de novos ordenamentos, a investigação em segurança tem-se concentrado no estabelecimento de funções de desempenho de segurança que relacionam o número de acidentes ou de taxa de acidentes a fatores de risco (ex TMDA, velocidade média) e a variáveis independentes não operacionais (como são as características geométricas), mediante formulações matemáticas (geralmente complexas), incluindo TMDA, nível de saturação, etc (Bauer e Harwood, 2000). O processo de calibração revela-se essencial na garantia da qualidade dos resultados finais simulados e passa pela seleção adequada dos parâmetros da equação que melhor permitem o ajuste estatístico dos dados observados aos simulados (Gettman e Head 2003 baseado em Hauer et al, 1988 e Malahel, 1986). A pesquisa também tem incidido sobre métodos bayesianos e técnicas estatísticas avançadas (por exemplo CART - *Classification and Regression Trees*) de revisão de estimativas de acidente baseadas em observações (Gettman e Head, 2003 baseado em Hauer et al, 1996 e Malahel, 1986) e vários métodos para a combinação de taxas de sinistralidade e outras medidas de nível de serviço, de segurança ou índices comuns com base num tipo de acidente (por exemplo, apenas danos de propriedade) (Kaub, 2000).

Apesar do número de trabalhos de investigação sobre segurança ter vindo a aumentar nos últimos anos, o número de acidentes em termos absolutos e o índice de acidente ainda são difíceis de prever com precisão. Isto levou a um aumento de interesse na obtenção de indicadores que refletem a segurança de um cruzamento ou pelo menos a maior probabilidade de taxas de acidentes mais elevados do que a média para um cruzamento (Gettman e Head, 2003).

#### **2.4.2 Visão geral do modelo de simulação de tráfego**

Os modelos de simulação microscópica apresentam-se como instrumentos promissores para a estimação de indicadores de segurança em cruzamentos. Os modelos microscópicos geralmente simulam o sistema de tráfego numa base veículo-a-veículo, atualizando segundo a segundo a posição, velocidade, aceleração, posição na via entre outras variáveis de estado, como a interação do veículo com os modos de regulação em cruzamentos, com outros veículos e com a geometria da estrada. Algumas simulações permitem o uso de tempos de simulação extremamente pequenos para uma análise de comportamento mais precisa e/ou usa um estrutura orientada a eventos de grande eficiência computacional. As simulações microscópicas geralmente incluem também a modelação detalhada das temporizações semafóricas. No entanto, todos os modelos de simulação foram desenvolvidos assumindo que os condutores adotam um comportamento seguro de acordo com parâmetros comportamentais previstos tais



como, a agressividade para a aceitação da distância em relação ao outro veículo existente na mesma fila de trânsito e mudança de via.

Os modelos microscópicos estão assim preparados para descrever com elevado nível de detalhe, o comportamento dos veículos, enquanto entidades individuais, com características e atitudes próprias. Essa representação é garantida por um conjunto de modelos microscópicos, os quais são embebidos na aplicação global.

Nos modelos microscópicos, o comportamento dos condutores é descrito por distribuições probabilísticas que asseguram uma heterogeneidade próxima da realidade (UFSC@2014), sendo que, de uma forma geral, estes modelos de simulação integram um conjunto de sub-modelos microscópicos que visam descrever o comportamento dos condutores, designadamente (Vasconcelos 2004; UFSC@2014):

- “*car-following*”, ou “seguimento do veículo”, que descreve os padrões de aceleração e desaceleração resultantes da decisão do condutor de um veículo, em função do movimento do veículo que se encontra à sua frente;
- “*gap-acceptance*”, ou “intervalo de aceitação”, que determina a tomada de decisão de um condutor de um veículo para entrar numa intersecção;
- “*lane-changing*”, ou “mudança de via”, que modela a mudança de via obrigatória ou opcional por parte de um condutor.

A microssimulação de tráfego é a técnica que modela cada veículo e a sua interação numa rede viária, permitindo avaliar o impacto no funcionamento da rede viária, em função de alterações de comportamento dos condutores, alterações da procura de tráfego, ou alterações físicas na rede. É especialmente útil para avaliar condições limite de congestionamento tendo incorporados modelos de filas de espera e de comportamento do condutor. É uma espécie de modelação de agentes em que cada agente é um veículo com um determinado comportamento regido por regras probabilísticas, nomeadamente em termos de velocidades, distância ao veículo da frente, decisões de mudança de pista, etc. É necessário dispor de uma matriz Origem/Destino (O/D) a qual é construída com base em inquéritos à população interessada (sejam O/D, ou ao domicílio), ou em alternativa recorrendo a sessões de contagens em diversos locais da rede a simular.

O SSAM (Surrogate Safety Analysis Module) de origem americana é uma aplicação de *software* que lê ficheiros de trajetórias e perfis de velocidade gerados por programas de simulação microscópica (ex: AIMSUN, VISSIM, PARAMICS, CORSIM, SIMTRAFFIC, TEXAS etc). Esta aplicação calcula estimativas *proxi* de segurança correspondentes a cada interação entre veículos e determina se cada interação satisfaz os critérios para ser considerado um conflito. Esta abordagem elimina a subjetividade associada à técnica de análise de conflito convencional e permite avaliar a segurança de um elemento infraestrutural sob um ambiente controlado antes da ocorrência de acidentes. (Vasconcelos et al, 2014).

---

Existem vários indicadores de desempenho para medir os níveis de segurança aquando a existência dos vários conflitos na microssimulação sendo eles:

1. *Time to collision* (TTC) – tempo necessário para que dois veículos colidam caso mantenham a direção e a velocidade (o valor que interessa é o tempo de colisão mínimo durante o encontro);
2. *Post encroachment time* (PET) – mínima separação temporal entre dois veículos que passam por um espaço comum;
3. *Initial deceleration rate* (DR) – desaceleração inicial do segundo veículo (último a chegar à zona de conflito);
4. Velocidade máxima de dois veículos envolvidos no conflito (*MaxS*)
5. Velocidade máxima relativa de dois veículos envolvidos no conflito (*DeltaS*)

Tem sido comumente aceite por vários autores (Vasconcelos et al 2014; Vasconcelos 2014) que o valor assumido pelos indicadores TTC, PET e DR indicam a frequência do conflito, ou seja, o quão provável uma colisão poderia resultar dum conflito:

- TTC baixo indica uma maior probabilidade de colisão
- PET baixo indica uma maior probabilidade de colisão
- DR alto indica uma maior probabilidade de colisão

Por sua vez, o *MaxS* e o *DeltaS* são frequentemente utilizados para indicar a gravidade provável da (potencial) colisão resultante, isto é, se o conflito resultou numa colisão em vez de um near-miss (quase embate de veículos) (Gettman e Head, 2003). Utilizando o peso dos veículos envolvidos no conflito, os valores de *MaxS* e de *DeltaS* poderiam também ser usados para calcular valores de momento e obter uma melhor estimativa da gravidade da colisão (por exemplo, veículos mais pesados podem causar mais danos nos veículos mais leves). Esta combinação de diferentes veículos que circulam na rede tende a ser um dado importante a incluir na análise de segurança.

É importante distinguir a gravidade do conflito da gravidade da resultante da colisão. Um local com muitos conflitos de gravidade que excedam os limites para TTC, PET e DR mas que são de baixa gravidade na escala de *MaxS* e *DeltaS* não pode ser considerado de grande interesse em termos de segurança. Ou seja, é provável que do acidente não resulte qualquer dano, ou a existir que se limitem a danos materiais. Locais onde possam existir um total de conflitos mais pequeno mas cujos indicadores de gravidade indiciem a ocorrência de acidentes graves (isto é, que possam resultar feridos ou mortes) tendem a ser mais interessantes na procura de medidas mitigadoras.

Este tipo de aplicação assume assim um conjunto alargado de vantagens genéricas entre as quais, assume particular relevância a avaliação do desempenho em termos de segurança de novas soluções infraestruturais ou de regulação em ambiente controlado, antes da ocorrência de qualquer acidente. Contudo assume igualmente algumas limitações: os modelos de simulação microscópica comuns são desenvolvidos para analisar o fluxo de tráfego em seção corrente, mas não integram sub-modelos capazes de modelar as manobras de ultrapassagem em faixas de rodagem com uma via em cada sentido, as inversões de marcha nos cruzamentos etc.. Alguns autores têm proposto procedimentos específicos para apoio à calibração de modelos de simulação para avaliar a segurança (Cunto e Saccomanno, 2008) contudo este ainda é um campo de investigação que justifica o desenvolvimento de investigação complementar. (Vasconcelos et al, 2013).

## **2.5 Considerações finais**

A avaliação da segurança com base em modelos convencionais de previsão de acidentes assume sérias restrições relacionadas com a frequente indisponibilidade e/ou falta qualidade dos dados sobre o histórico de acidentes em Portugal. Por outro lado a sua aplicação não se revela viável para estudar novos *layouts* ou modos de regulação sempre que operam fora do domínio da calibração dos modelos. Por sua vez, as técnicas de análise de conflitos afiguram-se extremamente caras de aplicar, e revestem-se de alguma subjetividade associada à interpretação pessoal dos conflitos por parte dos diferentes observadores. Com a recente expansão do uso de modelos de simulação microscópica à avaliação da segurança das análises, o modelo SSAM representa uma abordagem muito promissora permitindo de forma objetiva avaliar a segurança associada a diferentes tipologias de intersecções ou mesmo a novas instalações ou *layouts* inovadores.

## 3 A SEGURANÇA NAS ROTUNDAS E TURBO-ROTUNDAS

### 3.1. Das rotundas às turbo-rotundas

Nas últimas décadas, as rotundas têm-se apresentado como excelentes soluções em termos de custo-benefício, respondendo com elevado nível de eficiência a múltiplas funções, principalmente à regulação do trânsito, acalmia de tráfego, requalificação urbana e paisagística, etc (Bastos Silva et al, 2013). A sua implementação em diversos países tem vindo a comprovar estes benefícios designadamente quando comparados com outras intersecções rodoviárias de nível (Bastos Silva et al, 2013) e existem muitos estudos que mostram que as rotundas funcionam de forma eficaz e segura, nomeadamente quando se comparam rotundas de uma via de circulação com cruzamentos prioritários (Brown 1995; FHWA, 2000; Bastos Silva, 2004).



a)



b)

Figura 3.1 – a) e b) Exemplos de rotundas tradicionais de múltiplas vias (Google@2014)

No que toca à segurança, os benefícios das rotundas têm sido fortemente debatidos a nível internacional, como reflexo da sua capacidade em reduzir e homogeneizar a distribuição das velocidades na zona de entrada, atravessamento e saída (Bastos Silva et al, 2013). Ao nível da sinistralidade existem reduções compreendidas entre os 40% e os 70%, assim como uma redução significativa da gravidade dos acidentes, por eliminação dos conflitos ortogonais (Hall e Surl. 1981; Maycock e Hall, 1984). Mas a redução em mais de 95% do número de mortos (Brown, 1995; FHWA, 2000) foi porventura o indicador que mais contribuiu para a sua

implementação em praticamente todo o mundo, durante as décadas de 60 e 70. Em Portugal, desde a década de 80 que as rotundas se têm expandido a todo o país, sendo hoje utilizadas tanto em áreas urbanas como interurbanas (Bastos Silva, 2004).

No entanto, mesmo apresentando um nível geral de desempenho bastante satisfatório ao longo dos últimos 30 anos, esta solução tem vindo a evidenciar alguns problemas de funcionamento (Bastos Silva et al, 2013).

De facto, com o aumento de tráfego nas últimas décadas, há uma necessidade de implementar soluções com múltiplas vias de entrada e circulação como resposta a este aumento de capacidade (Bastos Silva et al, 2013). A seleção de vias de entrada de circulação em rotundas multivias por parte dos condutores nem sempre é, no entanto, trivial (Vasconcelos, 2014). Existem dificuldades por parte dos condutores ao interpretarem as regras de circulação que podem originar conflitos de entrecruzamento e acidentes nas imediações da entrada e saída e no anel de circulação (Vasconcelos, 2014) que são mais frequentes e graves à medida que aumenta o número de vias disponibilizadas (Bastos Silva et al, 2013) (ver Quadro 3.1). Apesar destes acidentes serem na maior parte dos casos de pouca gravidade, são frequentes e destabilizam o fluxo de tráfego (Vasconcelos, 2014).

Quadro 3.1 – Número de conflitos e TMDA consoante a tipologia de rotunda tradicional adotada (SWOV, 2012 retirado de CROW, 1998)

Roundabout type	Annual average daily traffic, AADT (veh/day)	Conflicts (pcu/h)
Single-lane	20,000 – 25,000	1,500
Two-lane with single access and exit ramps	22,000 – 30,000	1,500
Two-lane with double access and exit ramps	35,000 – 40,000	2,100 – 2,400

Alguns trabalhos de investigação nacional (Bastos Silva, 2004; Bastos Silva 1997), aplicados a rotundas de duas vias de entrada e de circulação, identificam que a prática corrente de comportamentos de risco está muitas vezes associada ao traçado das trajetórias retilíneas e de mínimo esforço por parte dos utilizadores, os quais originam conflitos e potenciais acidentes. Segundo Bastos Silva (2004) em Portugal, aproximadamente 40% dos condutores que entram na rotunda pela via da direita, tendem a atravessar o anel a direito, invadindo assim a via da esquerda e cerca de 20% dos condutores que entram pela via da esquerda saem do anel através da via da direita, minimizando assim o seu incómodo na condução (ver Figura 3.2 a).

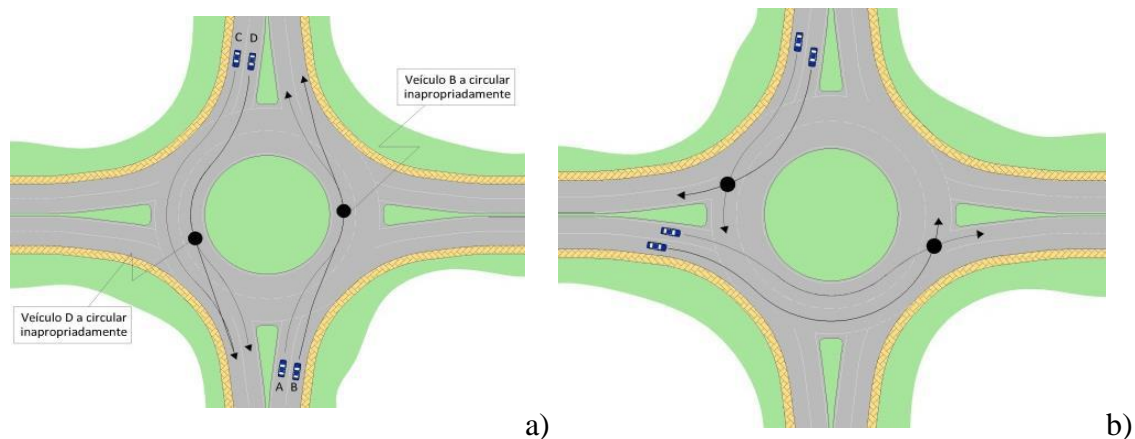


Figura 3.2 – a) e b) Comportamentos característicos nos atravessamentos de rotundas de múltiplas vias (Bastos Silva et al, 2013)

Outra característica que contribui para o aumento da dificuldade do condutor em escolher atempadamente a via que é mais adequada ao seu destino é a deficiente sinalização ou pré-sinalização (Bastos Silva et al, 2013).

Também, no caso de Portugal, a falta de enquadramento legal que defina procedimentos específicos a serem adotados nas rotundas contribui para um agravamento destes conflitos. Em consequência, é registado um número muito significativo de condutores que optam pela via mais à direita da rotunda para a execução de manobras de viragem à esquerda e de inversão de marcha (ver Figura 3.2 b) (Bastos Silva et al, 2013).

Estes comportamentos diminuem significativamente os níveis de segurança nas rotundas, uma vez que para além da hesitação e imprevisibilidade das manobras, resultam ainda num grande aumento do número de potenciais pontos de conflito (Bastos Silva et al, 2013). A transformação de uma rotunda normal com apenas uma via de entrada e de circulação para uma solução com duas vias traduz-se num aumento de 8 para 24 pontos de conflito e a eventual prática dos comportamentos errados dentro do anel de circulação poderá justificar o seu aumento para 32 (ver Figura 3.3). Complementarmente a adoção de várias vias de circulação traduz-se na necessidade de salvaguardar larguras adicionais no anel, que tem como consequência um aumento das dificuldades para assegurar os níveis de deflexão adequados e na prática de velocidades elevadas (Bastos Silva et al, 2013). A inexistência de elementos físicos que imponham níveis elevados de deflexão contribui para que os condutores se mantenham dentro da via correta, mas tem o inconveniente de resultar em velocidades mais elevadas de entrada e em comportamentos heterogéneos que tendem a manter-se durante a zona de circulação e de saída (Vasconcelos, 2014). Por outro lado, o recurso a elevados níveis de deflexão aumenta o

desconforto que os condutores procuram minimizar invadindo as vias adjacentes à procura de trajetórias mais diretas (Vasconcelos, 2014).

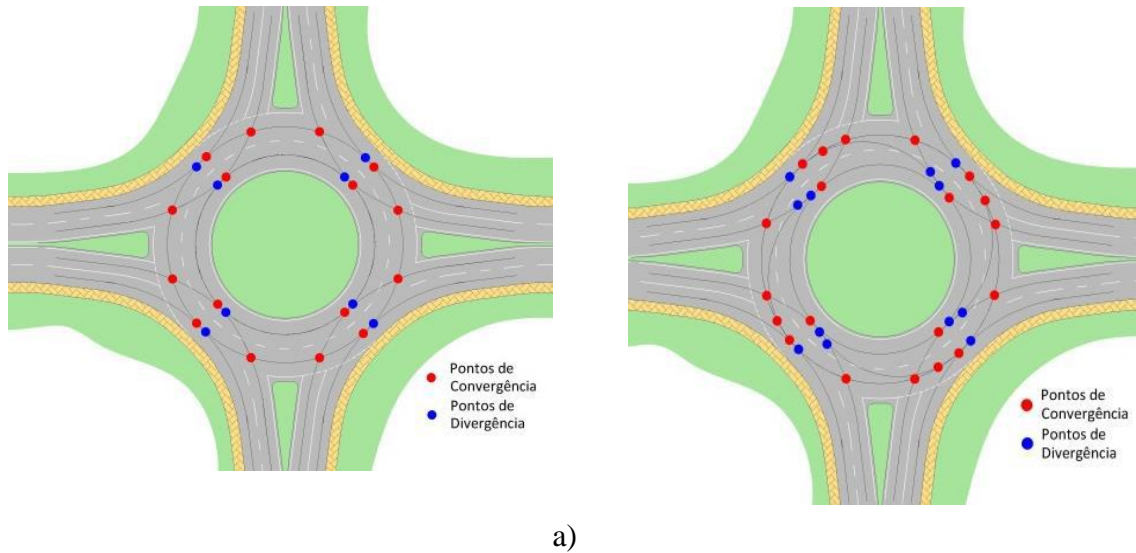


Figura 3.3 - Pontos de conflito em rotundas de duas vias de circulação: (a) expectável; (b) comportamentos erráticos (Bastos Silva et al, 2013)

De forma a atenuar estes problemas, nasceu na Holanda em 1996 através do investigador Lambertus Fortuijn, da Universidade de Delft, um novo conceito de rotunda, a turbo-rotunda, afirmando-se como uma solução alternativa às rotundas com múltiplas vias (Bastos Silva et al., 2013).

Nesta solução os condutores são canalizados para as vias que mais se adequam à manobra que pretendem, através da criação de circuitos contínuos em espiral, delimitados fisicamente por lancis galgáveis no anel de circulação e zonas de entrada e saída (Mauro e Branco, 2010) (ver Figura 3.4).

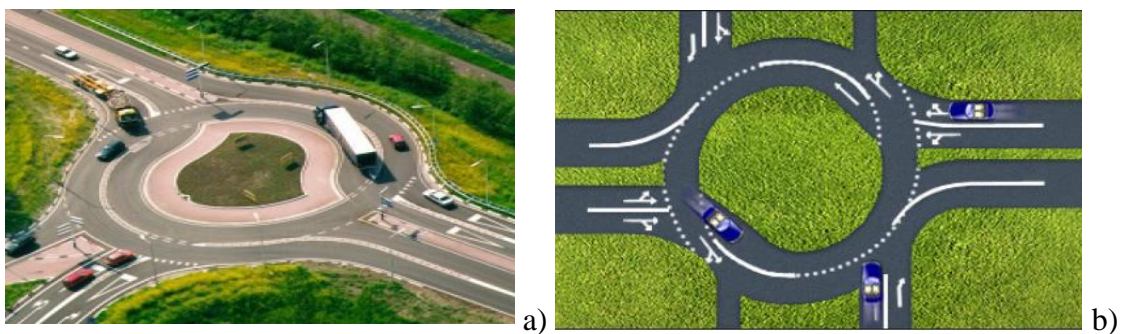


Figura 3.4 - a) e b) Exemplos de Turbo-rotunda (Google@2014)

Como existe uma necessidade de condicionar fisicamente o comportamento do condutor, este conceito possui duas potencialidades relevantes: eliminação dos pontos de conflito relacionados com as manobras de entrecruzamentos nas zonas conflituosas; e a redução da velocidade imposta pela presença de elementos de canalização física que obrigam a um aumento dos níveis de deflexão (Fortuijn, 2007).

### 3.2. Níveis de segurança da turbo-rotunda

Existem estudos de segurança que apontam para uma redução do risco de acidentes em aproximadamente 80% quando se transforma uma rotunda de duas vias numa turbo-rotunda (Fortuijn, 2009). Outros estudos baseados em técnicas de análise de conflitos aplicadas a nove *layouts* sujeitos a diferentes cenários de procura sugerem, de forma consistente, que existe uma redução da frequência de acidentes entre 40 a 50% e de 25 a 30% nos acidentes com feridos (Mauro e Cattani, 2010).

Neste mesmo estudo é ainda feita uma análise de sensibilidade aos volumes de tráfego, onde se conclui que o número de acidentes potenciais tem, no geral, um crescimento linear com o aumento do volume de tráfego, contrariamente ao que sucede nas rotundas tradicionais onde a tendência de crescimento é superior. Assim, em função dos *layouts* considerados, a redução da frequência de potenciais acidentes tende a ser tanto maior quanto maior for o tráfego (Mauro e Cattani, 2010)

Os autores alertam para algumas limitações do processo adotado, principalmente o facto deste modelo de análise de conflitos ter sido calibrado para um número limitado de rotundas tradicionais, não podendo ser extensível a todas as intersecções deste tipo, e do facto da validade dos resultados ser dependente da adaptação do modelo às características específicas das turbo-rotundas, não existindo, até à atualidade, nenhum caso prático de turbo-rotunda construída na Itália que potenciase o processo de calibração. Porém, é referido que o modelo constitui uma avaliação preliminar da possível redução de conflitos e da taxa de acidentes permitindo comparar resultados em função *do layout* adotado.

Estudos efetuados por Fortuijn (2007), aplicados à rotunda normal de duas vias e à turbo-rotunda, concluem que é de esperar que os veículos que circulam na via exterior da turbo-rotunda atinjam velocidades inferiores às praticadas na rotunda normal traduzindo-se por isso num aumento significativo dos níveis de segurança. Resultados comprovados através de técnicas de microsimulação mostram uma redução expectável de 48 para 38 km/h. Estes resultados são semelhantes aos associados a uma rotunda de uma só via com dimensão global similar.



Engelsman e Uken (2007) apresentaram um artigo no qual explicam o possível impacto de uma turbo-rotunda implementada na África do Sul. O estudo afirma que as turbo-rotundas são uma solução eficiente, melhor que as soluções tradicionais de um ou duas vias e que algumas intersecções sinalizadas desde que o volume não seja superior a 3500 veículos por hora.

Brilon (2008) apresentou as suas conclusões baseado em observações da primeira turbo-rotunda construída em Baden-Baden na Alemanha. Ele conclui que as turbo-rotundas são boas soluções em comparação com as rotundas tradicionais, no entanto, este estudo foi feito para um único caso e para volumes de tráfego baixos.

Também na Espanha na cidade de Grado (Asturias) duas turbo-rotundas foram construídas em 2009. Através duma análise de microssimulação onde a turbo-rotunda foi comparada com uma rotunda convencional, a turbo-rotunda oferecia melhores resultados (Bulla e Castro, 2011).

No nosso país a segurança nas turbo-rotundas tem sido também objeto de investigação. Num estudo desenvolvido por Vasconcelos et al (2014), onde se fez a comparação de uma rotunda de uma via, existente em Coimbra, com uma solução convencional de duas vias e uma turbo-rotunda, efetuou-se uma análise de conflitos recorrendo ao SSAM (*Surrogate Safety Assessment Model*), com o auxílio de técnicas de microssimulação.

Quadro 3.2 – Resultados do número de conflitos e velocidades médias relativas (Vasconcelos et al, 2014)

Demand Factor (%)	Number of conflicts			Avg. relative speed (m/s)		
	Single-lane	Two-lane	Turbo	Single-lane	Two-lane	Turbo
100	143	329	92	6.89	7.75	7.55
130	532	828	288	5.35	7.42	6.49
150	936	1303	500	4.88	7.42	6.12
Directional Split (%) Right-Through-Left	Number of conflicts			Avg. relative speed (m/s)		
	Single-lane	Two-lane	Turbo	Single-lane	Two-lane	Turbo
60-20-20	145	202	162	5.85	7.24	6.61
20-60-20	752	638	524	5.06	6.78	4.68
20-20-60	1251	587	650	4.16	5.99	4.39

Os resultados do Quadro 3.2 demonstram que, ao nível da segurança, a turbo-rotunda é a melhor das 3 soluções avaliadas, tendo ainda menos conflitos que a rotunda de uma via. Também se observou uma redução das velocidades de circulação nas turbo-rotundas relativamente às rotundas tradicionais de duas vias, mas um aumento relativamente às soluções de uma via.

Existem assim dois aspetos fundamentais que justificam o aumento de segurança nas turbo-rotundas: O condicionalismo imposto às trajetórias associadas às diferentes manobras, eliminando assim o número de pontos de conflito de 24 na rotunda normal de duas vias, para 14 na turbo-rotunda (ver Figura 3.5); e os elementos de canalização física introduzidos nas entradas do anel e nas saídas da turbo-rotunda, impondo níveis de deflexão mais acentuados, induzindo assim à redução da velocidade de entrada, circulação e saída do anel (Bastos Silva et al, 2013).

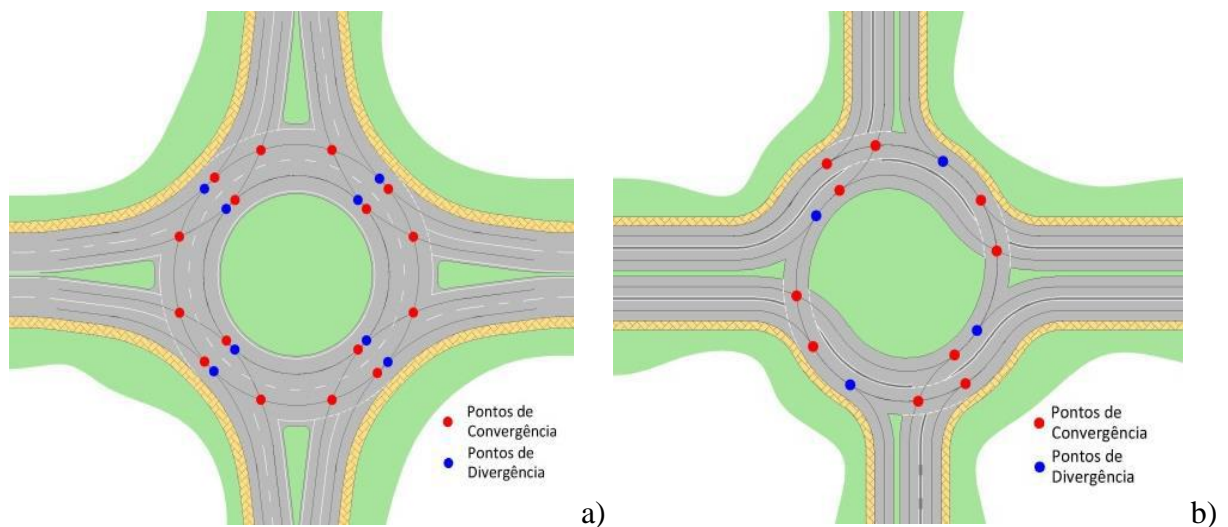


Figura 3.5 - Pontos de conflito: (a) rotunda normal de duas vias; (b) turbo-rotunda (Bastos Silva et al, 2013)

Com a solução turbo-rotunda é assim possível controlar os comportamentos de risco dos condutores que normalmente existem nas rotundas normais forçando estes a adotar comportamentos corretos no atravessamento do anel e, por conseguinte, obrigando-os a reduzir a velocidade de circulação antes, durante e após a interseção.

### 3.3 Considerações finais

As turbo-rotundas são um tipo de rotunda que diminui significativamente o número de pontos de conflito em comparação com as rotundas tradicionais, contudo, esta solução tem as suas limitações e embora haja consenso relativamente ao aumento da segurança, os métodos que têm vindo a ser utilizados apresentam fragilidades, o que justifica investigação complementar.

Por outro lado, os poucos trabalhos existentes limitam-se ao estudo da solução rotunda isolada não existindo ainda resultados que demonstrem a sua contribuição a nível da rede, ou aplicações em forma de corredor.

## 4 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

### 4.1 Introdução

Este capítulo centra-se na avaliação do desempenho em termos de segurança rodoviária de 3 rotundas de 2 vias inseridas num corredor situado na cidade de Coimbra, mais precisamente na Avenida Fernando Namora. Este corredor, por fazer parte integrante da circular externa da cidade é sujeita diariamente a níveis de procura de tráfego urbano extremamente elevados, designadamente nos picos de ponta. A metodologia adotada assentou na comparação direta de indicadores de desempenho para duas situações alternativas: (i) situação atual constituída por um corredor de 3 rotundas de 2 vias; (ii) transformação num corredor de 3 turbo-rotundas.

Os trabalhos assentaram no uso de uma plataforma de microssimulação (AIMSUN), no qual se construiu um modelo de simulação, devidamente calibrado para representar de forma fidedigna a realidade local. Este simulador de tráfego foi concebido e desenvolvido pelo Laboratório de Investigação Operacional e Simulação (LIOS), de um grupo de investigação pertencente ao Departamento de Estatística e Investigação Operacional da Universidade Politécnica da Catalunha, Espanha, cuja primeira versão remonta a 1987 (Macedo e Benta, 2013). A quantificação dos conflitos assentou na utilização de uma aplicação de origem norte-americana (SSAM) a qual assume como *inputs* os ficheiros (trajetórias e perfis de velocidades) resultantes da aplicação da simulação microscópica.

É igualmente relevante referir porque é que se considerou a utilização de um modelo de microssimulação mais adequado em detrimento do modelo de macrossimulação. Os modelos macro apesar da sua evolução no sentido de captarem cada vez melhor a realidade dos sistemas de transporte, falham na análise concreta de muitos problemas. A título de exemplo, não permitem analisar em pormenor o funcionamento de um cruzamento, como é objetivo deste trabalho, ou até modelar um sistema de transportes coletivos passageiro a passageiro. Contudo, este aumento de escala torna-se por vezes necessário para o estudo ao nível tático e operacional de planeamento de transportes e por isso são modelos que têm sofrido maior evolução nos últimos anos.

Uma das grandes limitações associadas à utilização destes modelos prende-se com o volume acentuado de informação que exige a construção do modelo de simulação, seja em termos de caracterização da infraestrutura seja da procura de tráfego. No âmbito do presente trabalho,

optou-se por juntar esforços, pelo que a construção deste modelo de simulação serviu igualmente de base a outra dissertação (Mariano, 2014), dedicada à avaliação do desempenho do corredor de turbo-rotundas ao nível da capacidade e emissões poluentes.

Na Figura 4.1 apresenta-se o fluxograma que explica as etapas realizadas nesta dissertação para a construção do modelo até à sua validação.

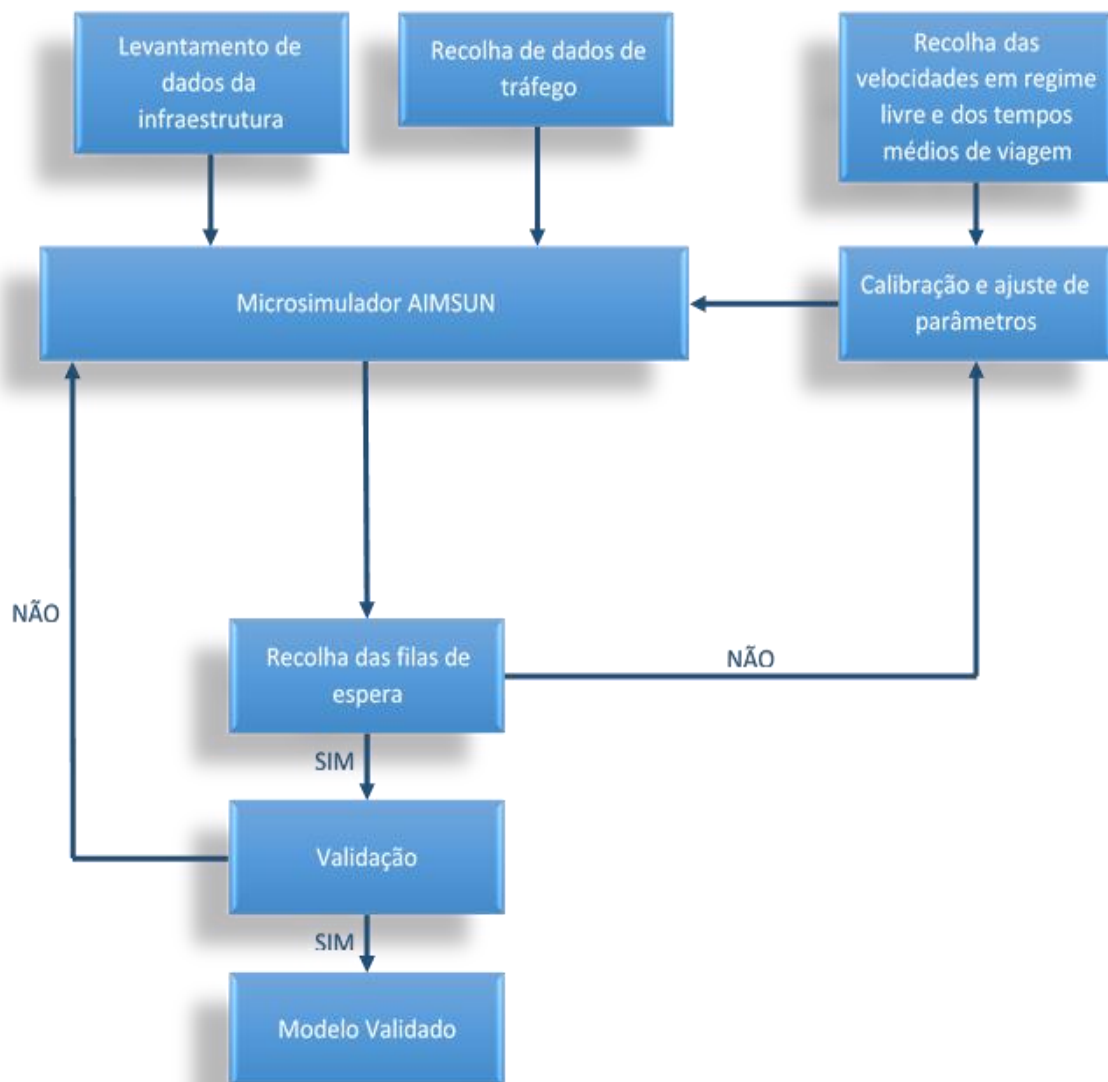


Figura 4.1 – Construção do modelo

## 4.2 Seleção dos locais de estudo

A presente dissertação tem como objetivo avaliar o desempenho da solução turbo-rotunda, quando aplicada em corredor portanto, considerou-se adequado selecionar uma sucessão mínima de três intersecções reais com potencial de transformação em turbo-rotunda. A seleção do local recaiu sobre a cidade de Coimbra, por razões de facilidade logística, conhecimento e funcionamento da rede viária local.

Dado o domínio privilegiado de aplicação das turbo-rotundas, a seleção recaiu sobre o domínio urbano/periurbano, sujeito a níveis de tráfego moderados/elevados. Tendo em conta estes critérios de seleção, optou-se assim por escolher um corredor de três rotundas consecutivas inseridas na Avenida Fernando Namora, integrada na Circular Externa de Coimbra (ver Figura 4.2 e Figura 4.3).



Figura 4.2 - Corredor de rotundas em estudo (Google@2014)

As rotundas selecionadas apresentam características geométricas e dimensão similar entre si, dispondo todas de 4 entradas, e de 2 vias de circulação no seu interior e na maioria das suas entradas.



Figura 4.3 – Rotundas em estudo: (a) Rotunda A; (b) Rotunda B; (c) Rotunda C

### 4.3 Recolha de dados de campo

A construção do modelo de microssimulação (AIMSUN) pressupõe a definição das matrizes OD (origem/destino) correspondente aos diferentes tipos de veículos aplicada à zona em estudo. Para obter esta matriz foi necessário recolher um conjunto de informação capaz de caracterizar a origem e o destino das viagens que acedem ao trecho em estudo. É possível recorrer a diferentes metodologias de recolha de dados que podem passar pela realização de inquéritos O/D, pelo registo de imagens vídeo, pela recolha de matrículas nos diferentes movimentos de entrada e de saída da rede, ou pela contagem direcional em pontos estratégicos da rede. No âmbito do presente estudo, e dada a extensão da rede em estudo, o recurso a gravações vídeo revelou-se impraticável, já que exigiria a sincronização de diversas câmaras, pelo que se optou por fazer a recolha de fluxos de tráfego direcionais através de observadores locais.

Também de referir que, idealmente, este tipo de estudo requer a introdução da variabilidade temporal, exigindo recolhas de dados em diferentes períodos do dia e em vários dias da semana. Por limitações temporais e de recursos humanos e financeiros, optou-se por limitar a

caracterização da procura de tráfego ao período de ponta da manhã, de um dia normal de funcionamento da rede.

Face à extensão da rede as contagens distribuíram-se por dois dias consecutivos envolvendo o esforço de 13 observadores por sessão. O número de observadores necessários para a recolha de dados foi definido consoante o número de entradas e saídas da zona de estudo. Na Figura 4.4 encontra-se representado o corredor de rotundas em estudo, assim como a nomenclatura adotada e os centróides associados às entradas e saídas da rede.

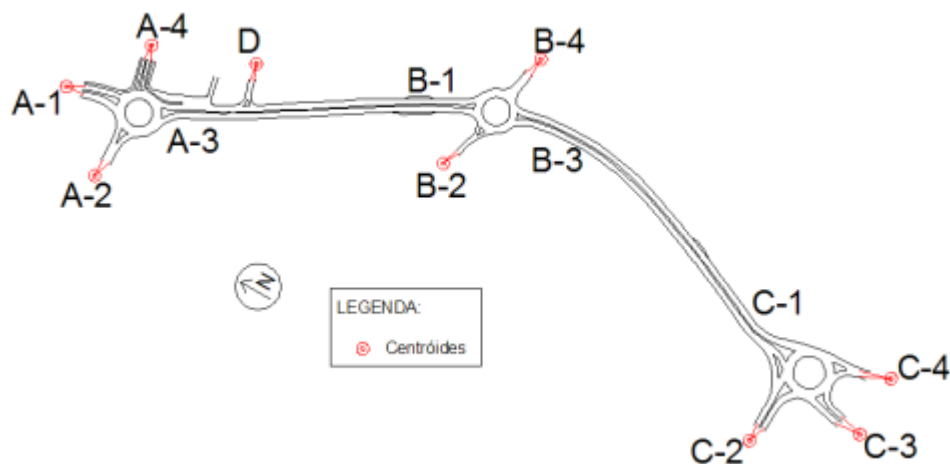


Figura 4.4 – Simbologia associada à codificação da rede (Mariano, 2014)

As sessões de recolha de dados foram precedidas de uma sessão de teste prévio que permitiu testar antecipadamente a metodologia definida, assim como verificar a praticabilidade das contagens em função dos volumes reais de tráfego. Foi ainda tida em consideração a baixa/alta experiência de cada observador em trabalhos de recolha de dados de tráfego, tendo-se afetado os postos mais exigentes aos observadores mais experientes.

A recolha de dados ocorreu nos dias 11 e 12 de Novembro (2013) tendo sido efetuada por 13 observadores no total e no período de ponta da manhã (das 7.30 até as 9.30) pois é aquele onde existe um maior número de veículos em circulação e logo, aquele onde existirão mais pontos de conflito nas rotundas e no corredor em estudo. Entre os observadores encontravam-se investigadores do projeto AROUND e alunos do Ensino Superior.

Em ambos os dias dividiu-se as contagens em períodos de 15 minutos e por categorias de veículos em ligeiro e pesado.

No primeiro dia os observadores anotaram dois tipos de movimentos: total de veículos que entram para o anel da rotunda e total de veículos que viram a direita. Neste dia o valor a recolher foi absoluto já que se pretendia uma contagem global de tráfego. Quanto à contagem dos

veículos, esta foi feita apenas para as entradas e saídas que ligam diretamente o nosso corredor aos centróides.

Na Figura 4.5 estão representados os postos de cada observador e os respetivos movimentos observados.

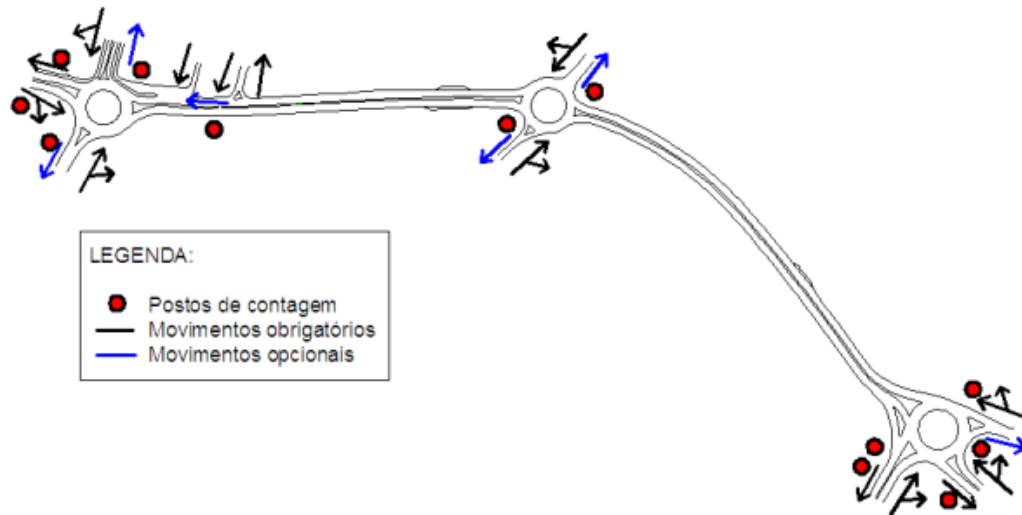


Figura 4.5 - Postos de contagem e respetivos movimentos observados (Mariano, 2014)

No segundo dia anotou-se a repartição direcional de cada movimento de entrada (idas em frente, viragens à esquerda e inversões de marcha) os quais associados aos movimentos globais contabilizados no primeiro dia, permitiram inferir os vários movimentos direcionais por entrada. Complementarmente, nas entradas internas à rede (entradas que não estão diretamente ligadas a centróides) foram também contabilizados os movimentos de viragem à direita já que estes não foram recolhidos no primeiro dia.

Na Figura 4.6 estão representados os postos de contagem distinguidos em função do número de movimentos a contabilizar.

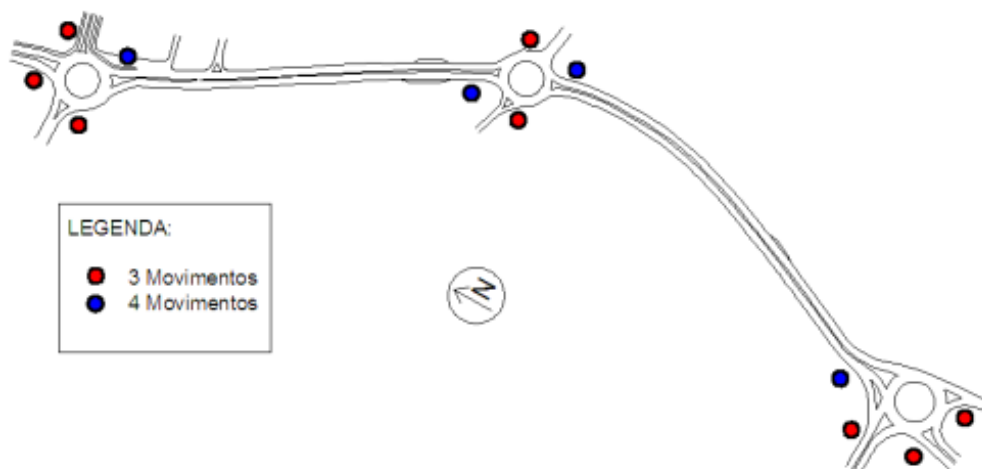


Figura 4.6 - Postos de recolha direcional de tráfego (Mariano, 2014)



#### 4.4 Tratamento de dados

Após a recolha dos dados de tráfego, procedeu-se ao seu tratamento que se dividiu em duas fases. A primeira fase centrou-se na compilação dos dados em ficheiro Excel e uma segunda fase na obtenção das matrizes O/D necessárias para ao funcionamento da plataforma de simulação.

O primeiro passo passou por calcular os volumes de tráfego associados aos diferentes movimentos direcionais e por cada uma das quatro entradas de cada rotunda.

De referir que apesar de terem sido registadas as inversões de marcha, optou-se por não as incluir no processo de cálculo de modo a simplificar todo o procedimento. Refira-se contudo que as mesmas assumem uma expressão quase negligenciável, pelo que não tendem a afetar de forma significativa as conclusões da análise.

Deste procedimento resultaram 16 matrizes O/D correspondentes aos níveis de procura associados a cada período de 15 minutos e aos dois tipos de veículos considerados (ligeiro e pesado). A dimensão das matrizes O/D resulta do número de origens e de destinos associados a centróides, ou seja 9x9 (ver Figura 4.4). Apesar da existência de dois entroncamentos entre as rotundas A e B, decidiu-se atribuir apenas um centróide a um desses entroncamentos, já que não se detetou qualquer afluência de tráfego no outro.

O Quadro 4.1 representa a matriz O/D dos 15 minutos de maior procura, sendo as restantes matrizes apresentadas no Anexo, e o Quadro 4.2 resume os totais de veículos por cada período de 15 minutos.

Quadro 4.1 – Matriz O/D veículos ligeiros, correspondente ao período 8h15-8h30

O/D	A1	A2	A4	B2	B4	C2	C3	C4	D
A1	0	41	10	63	6	98	68	9	0
A2	52	0	7	9	1	14	10	1	0
A4	3	7	0	4	0	6	4	1	0
B2	37	12	0	0	3	10	7	1	0
B4	27	9	0	22	0	2	2	0	0
C2	108	34	1	15	1	0	7	26	0
C3	141	45	1	19	1	28	0	4	0
C4	17	5	0	2	0	59	6	0	0
D	8	3	0	0	0	0	0	0	0

Quadro 4.2 - Totais de procura de veículos por cada período de 15 minutos [7h30-9h30]

Volumes totais de tráfego na rede		
Período	Ligeiros (veíc.)	Pesados (veíc.)
7:30 - 7:45	415	17
7:45 - 8:00	555	19
8:00 - 8:15	700	17
8:15 - 8:30	1078	19
8:30 - 8:45	957	16
8:45 - 9:00	877	19
9:00 - 9:15	884	15
9:15 - 9:30	697	15

#### 4.5 Codificação da rede

A codificação da rede foi feita diretamente na plataforma de microssimulação AIMSUN tendo por base a cartografia exportada diretamente do AutoCAD à escala apropriada. Foram criados dois modelos: i) correspondente à situação viária atual constituída por três rotundas normais (ver Figura 4.7); ii) correspondente à solução alternativa com três turbo-rotundas de dimensões similares às rotundas convencionais (ver Figura 4.8).

A rede atual é composta por três rotundas de grandes dimensões, com duas vias no anel de circulação. O afastamento entre estas é de aproximadamente 400m entre a rotunda A e a rotunda B, e de 470m entre as rotundas B e C. O corredor (via principal que interliga as 3 rotundas) é composto por duas faixas de rodagem com duas vias em cada sentido, com 3,5m de largura cada.

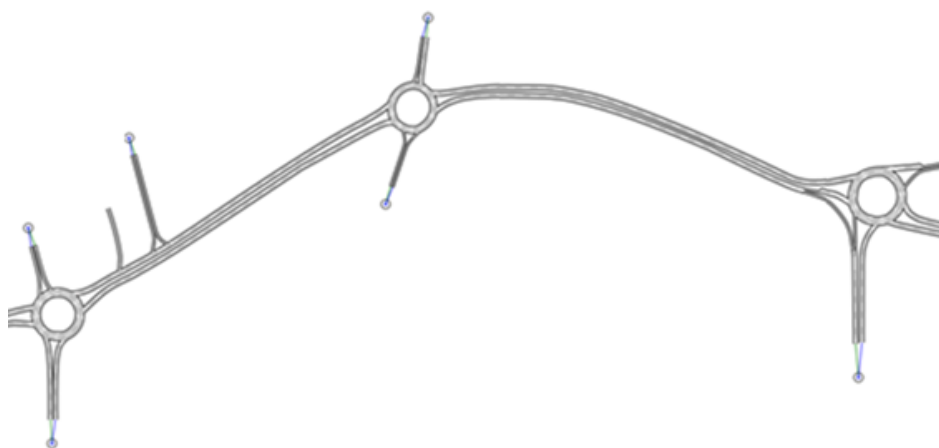


Figura 4.7 - Representação da codificação da rede atual desenvolvida no AIMSUN (Mariano, 2014)

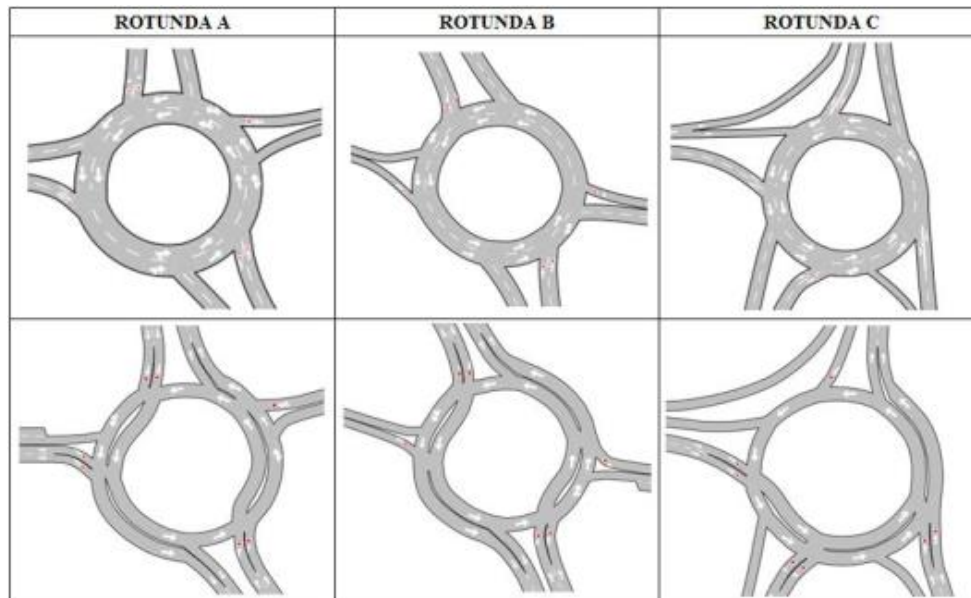


Figura 4.8 - Codificação das rotundas convencionais (em cima) e das turbo-rotundas (em baixo) (Mariano, 2014)

Em conformidade com as duas classes de veículos consideradas nas contagens, definiu-se no programa a classe “car” em representação dos ligeiros e a classe “bus” em representação dos pesados, já que na sua maioria os pesados naquele local eram autocarros.

Na construção do modelo com as turbo-rotundas, foram definidos diferentes *layouts* em função da importância dos movimentos direcionais envolvidos. Atribuiu-se então o *layout* tipo “standart” para as intersecções A e B e o *layout* tipo “knee” para a intersecção C, com segregação do movimento de viragem à direita de C-1 para C-2. As rotundas A e B representam cruzamentos entre duas vias de hierarquia funcional diferente, onde a solução “standart” permitiu beneficiar os ramos principais associados à Circular Externa (via coletora). Por sua vez, o *layout* “knee” escolhido para a rotunda C teve o objetivo de manter a via segregada de viragem à direita já existente na via coletora.

Para a adaptação das rotundas ao formato turbo-rotunda foram necessárias algumas alterações a nível do desenho. Eliminou-se uma das vias de saída nos ramos secundários em todas as rotundas com vista a assegurar a eliminação dos entrecruzamentos. Ainda na Rotunda C, foi também eliminada, pelas mesmas razões, uma via da entrada C-1 que serve os movimentos no anel de circulação. A codificação dos elementos físicos de delimitação foi conseguida recorrendo a vias fisicamente separadas tanto no anel de circulação, como nos ramos de entrada e saída.

De referir ainda que ao nível do desenho da rede não foram considerados os atravessamentos pedonais e as respetivas semaforizações existentes no corredor que liga a rotunda A e B. Apesar de ser uma simplificação que introduz alterações não negligenciáveis ao cenário real, considerou-se que não constitui um problema na medida em que esta dissertação se centra na comparação dos dois modelos, desenvolvidos sob as mesmas condições de base, e não a replicação exata da rede existente.

No que toca às velocidades de circulação da rede, considerou-se que o limite legal para o corredor principal (Circular Externa) e para a entrada C-2 é de 70km/h enquanto nas restantes vias este limite é de 50Km/h.

## 4.6 Calibração e Validação do modelo

### 4.6.1 Calibração

Depois de construído o modelo importa avaliar a sua capacidade para representação fidedigna da realidade. Esse procedimento é tecnicamente designado de calibração. 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 relacionados com o comportamento dos condutores ou dos veículos.

Considerou-se que para este trabalho específico, a calibração não necessita de ser muito exaustiva pois como já foi referido anteriormente, o objetivo deste estudo não é retratar exatamente a realidade mas sim comparar o desempenho associado a duas soluções distintas, pelo que se optou por limitar o ajuste a dois parâmetros de calibração: velocidades em regime livre de circulação e o tempo de reação. Para tal, utilizaram-se dados de velocidades registadas em regime livre para a zona de estudo com base em veículo instrumentado, no âmbito do projeto AROUND, onde também consta uma amostra dos tempos médios de percurso nos dois sentidos do corredor em estudo. O Quadro 4.3 resume os dados função da média, máximo, mínimo e desvio padrão e os respetivos coeficientes do parâmetro "*speed acceptance*" dos veículos ligeiros.

Quadro 4.3 - Parâmetros da distribuição de Velocidades

Parâmetro estatístico	Velocidade (km/h)	Coefficiente "speed acceptance"
Média	68,3	0,98
Valor Máximo	88,3	1,26
Valor Mínimo	54,4	0,78
Desvio Padrão	6,4	0,09

A partir dos valores de velocidade do Quadro 4.3, calcularam-se os coeficientes de “*speed acceptance*” a atribuir às características dos veículos. Estes valores foram obtidos dividindo os valores das velocidades em regime livre pelo limite legal de velocidade de 70km/h.

Também na calibração do modelo efetuou-se uma modificação progressiva do valor de tempo de reação médio dos condutores nas vias em que estes tinham de ceder a passagem, até se obter comprimentos de filas de espera nas várias entradas similares às observadas localmente tendo-se no final deste processo adotado o valor de 0,8 segundos (sendo que o valor *default* do programa é 0,75 segundos)

Ao correr o programa detetaram-se, logo à partida, problemas de congestionamento de tráfego nas entradas A-4 e B-4 onde se geraram filas de espera significativas, e francamente superiores às detetadas no decorrer das contagens. Em relação à entrada A-4, este congestionamento pode-se explicar pelo facto de não se ter considerado o atravessamento pedonal nem a semaforização que existe entre as rotundas A e B, cujo funcionamento altera a distribuição da chegada de veículos à rotunda A e que possibilita que os veículos da entrada A-4 tenham o tempo necessário para poder entrar no anel circulação sem serem condicionados pelos veículos provenientes da entrada A-3. Em relação à entrada B-4 a razão para a existência de uma fila excessiva poderá dever-se a algum erro de contagem.

Como a calibração só por si não foi suficiente para reduzir suficientemente o comprimento das fila de espera, resolveu-se diminuir, por simplificação, os volumes de tráfego nestas duas entradas, nos períodos mais condicionantes, até se obter um resultado próximo daquele que foi visualizado no local. Esta simplificação não alterou em nada o estudo comparativo a desenvolver, na medida em que foram salvaguardadas as mesmas condições de procura para as duas soluções em análise.

#### **4.6.2 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 A-1 e C-3 (percursos de ida em frente ao longo da circular externa e em ambos os sentidos) que correspondem às entradas da rede mais à esquerda e mais à direita respetivamente, com os valores médios reais obtidos na zona de estudo em condições livres de circulação.

Para este efeito foi criada uma matriz O/D auxiliar com volumes de tráfego reduzidos e apenas para os dois pares O/D (A-1 e C-3), de modo a assegurar condições de circulação não condicionadas. O Quadro 4.4 contempla os tempos médios de percurso, medidos no local para o conjunto de condutores envolvidos, e os tempos médios de percurso obtidos no programa com a matriz O/D auxiliar num conjunto de 10 replicações.

Quadro 4.4 - Comparação dos tempos médios ao longo do corredor medidos no local com os obtidos no AIMSUN

Tempos médios de percurso medidos no local (s)		Tempos médios de percurso AIMSUN (s)		Percentagem de erro (%)	
Sentido A1 - C3	Sentido C3 - A1	Sentido A1 - C3	Sentido C3 - A1	Sentido A1 - C3	Sentido C3 - A1
114	117,6	133	137	16,7	16,5

Depois de concluída a calibração, constatou-se que os tempos médios de percurso entre os pares O/D A-1 e C-3, obtidos no AIMSUN, foram consistentemente superiores em cerca de 17% (cerca de 20s) aos medidos no local (ver Quadro 4.4). Este erro pode ser devido aos padrões da velocidade dos veículos, durante o atravessamento das rotundas, os quais podem diferir entre o modelo de microssimulação e a realidade e, por outro lado, a uma eventual deformação da cartografia AutoCad utilizada para codificar a rede.

## 5 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO CORREDOR DE TURBO-ROTUNDAS

Este ponto apresenta as análises comparativas para avaliação do desempenho do corredor de turbo-rotundas relativamente à solução tradicional de rotunda com 2 vias de circulação, aqui considerada como sendo o cenário de referência. É definida a metodologia de abordagem, os indicadores de desempenho seleccionados, os cenários analisados e apresentados os principais resultados.

### 5.1 Metodologia de abordagem

Na Figura 5.1 apresenta-se o fluxograma que explica a metodologia de abordagem adotada.

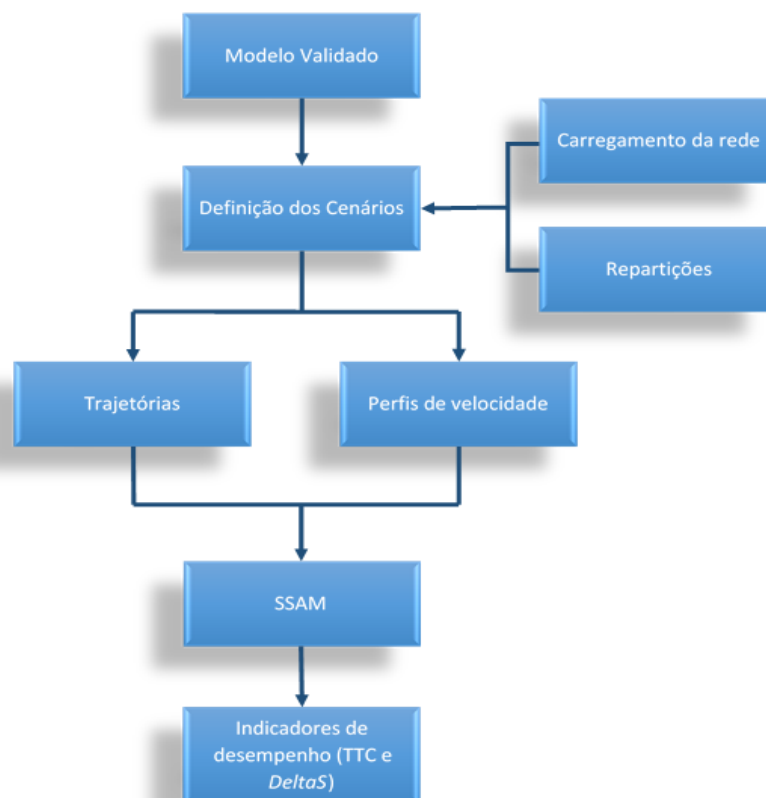


Figura 5.1 – Metodologia de abordagem

Após a validação do modelo de simulação (baseado no software AIMSUN), foi necessário definir os cenários a estudar e que procuraram cobrir duas situações particulares: (i) variação do carregamento da rede (e por inerência diferentes níveis de saturação) e, (ii) variação de repartições direcionais de forma sistemática e alternada. Dados os fenómenos estocásticos do tráfego, para cada cenário de estudo, os resultados da simulação tendem a diferir entre replicações sucessivas. Para atenuar esse efeito e garantir resultados suficientemente robustos e estabilizados, optou-se por considerar como resultado final associada a cada cenário, a média relativa a 10 replicações.

Os *outputs* das corridas do AIMSUN disponibilizam dois tipos de dados fundamentais e que servem de *inputs* à aplicação de segurança (SSAM): ficheiros de trajetórias e ficheiros com as séries temporais de velocidade, com elevada frequência (por defeito, leituras de segundo a segundo). Os resultados do *software* são traduzidos por diversos indicadores de desempenho os quais poderão ser considerados como representativos quer da frequência, quer da gravidade dos potenciais conflitos. Nesta dissertação, optou-se por considerar os indicadores TTC representativo da frequência e o *DeltaS* como representativo da gravidade dos conflitos.

## 5.2 Definição dos cenários

Os cenários estudados no âmbito desta dissertação estão em consonância com os estabelecidos no âmbito de trabalhos anteriores (Vasconcelos et al, 2014). Um primeiro conjunto de cenários procura avaliar o efeito associado ao aumento global da procura de tráfego nas várias entradas mantendo a repartição direcional e um segundo conjunto de cenários onde se varia a repartição direcional sem alterar a procura global nas entradas.

No primeiro grupo de análise, foram estudados os seguintes cenários para a procura de tráfego: situação de referência (procura real de tráfego observada- 100%); 3 cenários adicionais relativos a procuras reduzidas (70%, 80% e 90% da carga real); 5 cenários representativos de procuras de tráfego elevadas (110%, 120%, 130%, 140% e 150%).

No segundo tipo de análises foram avaliados os cenários de repartição direcional nas diferentes entradas para o período de simulação. Esta análise procura potenciar a avaliação do funcionamento dos corredores de ligação entre intersecções, através da quantificação dos movimentos de entrecruzamentos nos trechos de aproximação às entradas tendo-se considerado duas situações diferenciadas: (a) imposição de repartições diferentes da rotunda intermédia para as restantes; (b) imposição da mesma repartição direcional nas três rotundas e em todas as entradas de cada uma das rotundas;



Nesta análise utilizaram-se as repartições direcionais assumidas em Vasconcelos et al (2014): 60-20-20, 20-60-20, 20-20-60 (percentagens de viragens à direita, idas em frente e viragens à esquerda respetivamente). A aplicação destas repartições às 3 rotundas resulta em inúmeras combinações pelo que se optou por limitar a análise às 12 combinações apresentadas no Quadro 5.1 para a situação (a) (imposição de repartições diferentes da rotunda intermédia para as restantes) e mais 3 combinações apresentadas no Quadro 5.2 para a situação (b) (imposição da mesma repartição direcional nas três rotundas e em todas as entradas de cada uma das rotundas).

Quadro 5.1 – Combinações em estudo para repartições direcionais diferentes em relação à rotunda B

Combinações	Rotunda A	Rotunda B	Rotunda C
1	60/20/20	20/60/20	60/20/20
2	60/20/20	20/20/60	60/20/20
3	20/60/20	60/20/20	20/60/20
4	20/60/20	20/20/60	20/60/20
5	20/20/60	60/20/20	20/20/60
6	20/20/60	20/60/20	20/20/60
7	60/20/20	20/60/20	20/20/60
8	60/20/20	20/20/60	20/60/20
9	20/60/20	60/20/20	20/20/60
10	20/60/20	20/20/60	60/20/20
11	20/20/60	60/20/20	20/60/20
12	20/20/60	20/60/20	60/20/20

Como se pode verificar no Quadro 5.1, as combinações selecionadas assumem que a rotunda central, tivesse repartições direcionais antagónicas em relação às duas periféricas podendo estas terem a mesma repartição direcional ou não. O objetivo em se considerarem repartições direcionais diferentes da rotunda central para as periféricas é o de avaliar o efeito, em termos de segurança, da existência de um maior ou menor nível de manobras de entrecruzamentos no trecho de ligação entre intersecções.

Os números apresentados em cada combinação e em cada rotunda são representativos da percentagem de veículos que se deslocam para cada direção em cada entrada da rotunda. Por exemplo, para a combinação 1, na rotunda A, 60% dos veículos vira à direita, 20% seguem em frente e, 20% viram à esquerda em todas as entradas desta rotunda.

Quadro 5.2 – Combinações em estudo para repartições direcionais iguais em todas as rotundas

Combinações	Rotunda A	Rotunda B	Rotunda C
13	20/20/60	20/20/60	20/20/60
14	20/60/20	20/60/20	20/60/20
15	60/20/20	60/20/20	60/20/20

Estes cenários serão efetuados quer para o modelo com rotundas convencionais quer para o modelo com as turbo-rotundas de modo a estabelecer uma comparação entre estes dois modelos.

Cada cenário foi associado a um período de simulação de 2 horas, tendo-se rejeitado os resultados relativos aos primeiros e últimos 15 minutos por se considerar poder não existir um carregamento total da rede e por consequência, os resultados não serem representativos da realidade.

### 5.3 Definição dos indicadores de desempenho

Tendo por base o modelo devidamente calibrado e validado e definidos os cenários a estudar importa definir os indicadores de desempenho de segurança a considerar nas análises comparativas.

O *software* SSAM analisa as trajetórias simuladas dos veículos e consequentemente deteta os vários potenciais conflitos resultantes das interseções entre as trajetórias de veículos conflituantes. O *software* disponibiliza diversos indicadores de desempenho que poderão ser considerados representativos quer da frequência, quer da gravidade dos potenciais conflitos (ver ponto 2.4.2). Tal como em Vasconcelos et al (2014) e Vasconcelos (2014), no âmbito do presente trabalho, optou-se pela utilização de apenas dois destes indicadores, o TTC (*time to collision*) e o *DeltaS* (variação diferencial das velocidades dos veículos envolvidos no conflito).

Utilizou-se o TTC para decidir se o encontro entre veículos deve ser classificado como conflito e o *DeltaS* para avaliar a gravidade da eventual colisão. O TTC indica quão próximos (em tempo) estão de colidir mas não dá qualquer indicação sobre a gravidade do acidente. Por outro lado o *DeltaS* é claramente um indicador de gravidade do acidente.

O TTC é o valor do tempo mínimo para a colisão observado durante um conflito, isto é, representa o tempo que resta até que ocorra uma colisão caso ambos os veículos envolvidos não alterem o seu comportamento, ou seja mantenham a sua trajetória e velocidade. Já o *DeltaS* indica a gravidade provável da (potencial) colisão resultante, isto é, se o conflito resultou numa colisão em vez de um near-miss (quase embate de veículos).

Adotou-se o valor predefinido de 1,5 segundos para o limiar do indicador TTC porque para além deste valor ser referido em diversos estudos (Vasconcelos, 2014 baseado em Horst, 1989; Svensson, 1998; Vogel, 2003), a utilização de valores predefinidos facilita a comparação com os trabalhos já realizados e trabalhos futuros

O *software* admite um valor *standard* de 1,5 para o indicador TTC e também admite os limites para os ângulos entre conflitos do tipo *Rear-end* (embate frente-traseira) e *Crossing* (atravessamento) e *Line Change* (mudança de via) (ver Figura 5.2).

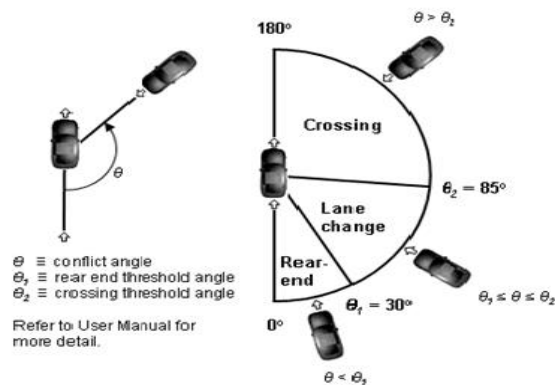


Figura 5.2 - Limites para os ângulos para os 3 tipos de conflitos (retirada do SSAM)

Como *outputs* o *software* identifica todos os potenciais conflitos gerados, associando a cada um deles os valores de cada indicador de desempenho e a sua classificação em termos de tipologia. Complementarmente apresenta-se uma tabela sumário onde são apresentados os tipos e números de conflitos e o respetivo valor máximo, mínimo, da média e da variância para cada um dos indicadores (Figura 5.3) e por fim um mapa com a representação gráfica dos conflitos (Figura 5.4).

NO FILTER APPLIED					
Summary Group	SSAM_Measure	Min	Max	Mean	Variance
Summary Group	SSAM Measure	Min	Max	Mean	Variance
Unfiltered-All Files	TTC	0,00	1,50	0,97	0,25
Unfiltered-All Files	PET	0,00	4,90	1,82	0,96
Unfiltered-All Files	MaxS	1,12	19,47	6,60	6,42
Unfiltered-All Files	DeltaS	0,09	18,71	5,16	4,85
Unfiltered-All Files	DR	-14,83	3,06	-2,32	2,62
Unfiltered-All Files	MaxD	-15,17	3,06	-2,69	2,65
Unfiltered-All Files	MaxDeltaV	0,07	9,62	2,78	1,53
Summary Group	SSAM Measure	Min	Max	Mean	Variance
Unfiltered C:\Use...	TTC	0,00	1,50	0,97	0,25
Unfiltered C:\Use...	PET	0,00	4,90	1,82	0,96
Unfiltered C:\Use...	MaxS	1,12	19,47	6,60	6,42
Unfiltered C:\Use...	DeltaS	0,09	18,71	5,16	4,85
Unfiltered C:\Use...	DR	-14,83	3,06	-2,32	2,62
Summary ...	Total	Unclassified	Crossing	RearEnd	LaneChange
Unfiltered-All...	1692	0	22	1461	209
Unfiltered C...	1692	0	22	1461	209

Figura 5.3 – Tabela sumário apresentada no SSAM para um dado cenário

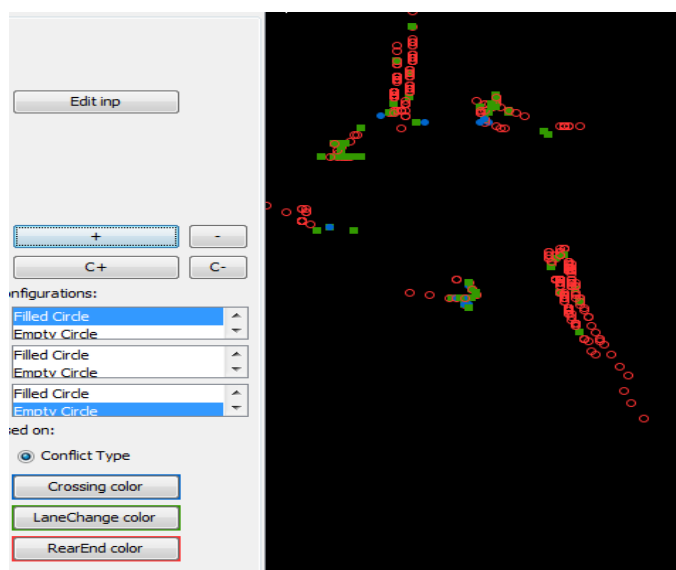


Figura 5.4 – Mapa de conflitos apresentado no SSAM para um dado cenário

## 5.4 Caracterização do cenário atual

Apesar do corredor de rotundas em estudo não se apresentar visivelmente congestionado no período analisado, pelo fato deste trecho fazer parte da Circular Externa de Coimbra, o mesmo está sujeito a elevados volumes de tráfego, nomeadamente no período de ponta da manhã. De modo a avaliar a taxa de saturação atualmente registada nas rotundas convencionais no pico de ponta [8:15 – 8:30], foi aplicado o método do TRL, de base estatística, desenvolvido por Kimber (1980), às entradas sujeitas aos maiores níveis de procura. Realizaram-se os cálculos para as entradas A-1, A-3, B-1 e B-3 (ver Figura 4.4), encontrando-se os resultados resumidos no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Taxas de saturação nas entradas principais das rotundas A e B (8:15 – 8:30) – cenário de procura de tráfego atual

Entrada	Taxa de Saturação (%)
A - 1	58
A - 3	90
B - 1	61
B - 3	89

Verifica-se a partir dos valores obtidos que, apesar de algumas entradas manterem uma reserva considerável de capacidade, observa-se que para o período de maior procura, algumas entradas se encontram a funcionar bastante próximas das condições de saturação. É expectável que possa ocorrer alguma instabilidade no funcionamento das entradas A-3 e B-3 (sentido Sul-Norte),

dados que apresentam uma taxa de saturação de 90%. Atendendo a que a taxa de saturação de um sistema é determinado pelo elemento crítico, pode-se estimar que a rede em estudo se encontra a funcionar a um nível de saturação próximo dos 90%.

## 5.5 Avaliação do desempenho de segurança para as Turbo-rotundas comparativamente às Rotundas Normais

Nesta fase foram avaliados os diversos cenários pré-definidos para a procura de tráfego correspondentes às duas horas de simulação observadas: (1) efeito do carregamento do tráfego na rede; (2) efeito associado à variação da repartição direcional.

### 5.5.1 Avaliação do efeito do carregamento da rede

Para estudar o efeito associado ao carregamento da rede, foram considerados cenários relativos a níveis baixos de procura de tráfego (uso de fatores redutores de 70%, 80% e 90%) e de procura elevada (uso de fatores de majoração de 110%, 120%, 130%, 140% e 150%), mantendo fixa a repartição direcional real.

A Figura 5.5 apresenta a evolução dos 3 tipos de conflitos estudados associados ao carregamento da rede para a solução com rotundas normais.

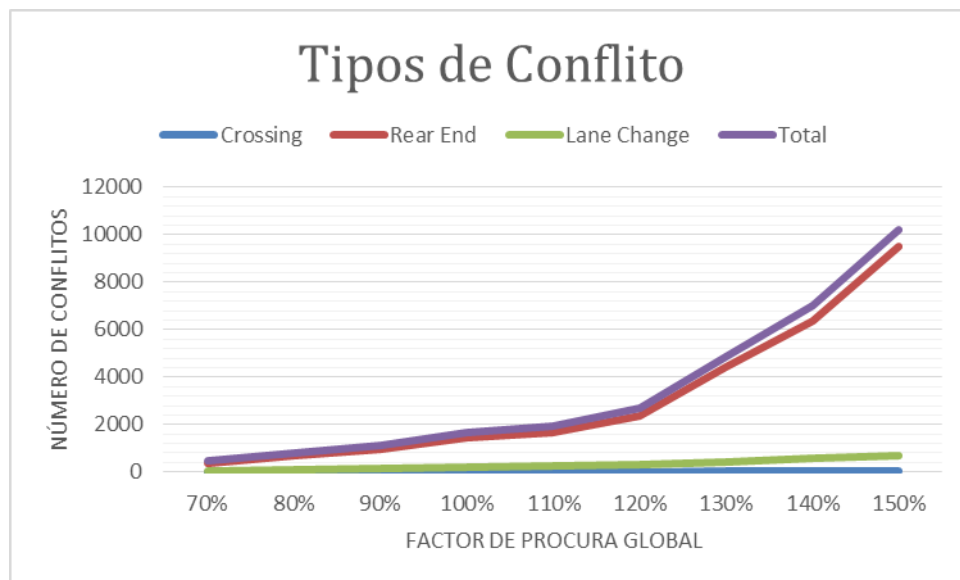


Figura 5.5 – Número e tipos de conflitos existentes na solução com rotundas tradicionais com o aumento da carga de procura de tráfego na rede

Como se pode verificar na Figura 5.5 e tal como seria expectável, o volume de tráfego apresenta-se como um fator de risco, sendo claro o aumento do número de conflitos com o

aumento do carregamento da rede. É ainda de salientar que o tipo de conflito mais predominante é o conflito do tipo frente-traseira (*Rear End*) o que poderá indiciar a importância associada aos entrecruzamentos no trecho de aproximação e às manobras de negociação da rotunda. Tal pode ser confirmado através da Figura 5.6 que apresenta a distribuição espacial dos conflitos na rede, verificando-se uma tendencial concentração de conflitos junto às entradas das rotundas onde se concentram as manobras de pára-arranca. É igualmente expectável que esse tipo de conflito, aumente com o aumento da taxa de carregamento de rede (e, por inerência de saturação) já que tendem a aumentar os comprimentos das filas de espera (ver Figura 5.7 (a) e (b)).

Também os tipos de conflito atravessamento (*Crossing*) e mudança de via (*Lane Change*) evidenciam um ligeiro aumento com o carregamento da rede, embora se trate de um aumento pouco significativo, designadamente quando comparado com o conflito frente-traseira. De facto estes dois tipos de conflito apenas ocorrem no interior das rotundas onde há entrecruzamentos de veículos e também onde estes optam pela via mas desejável ao seu destino (conflitos representados a azul e verde na Figura 5.6).

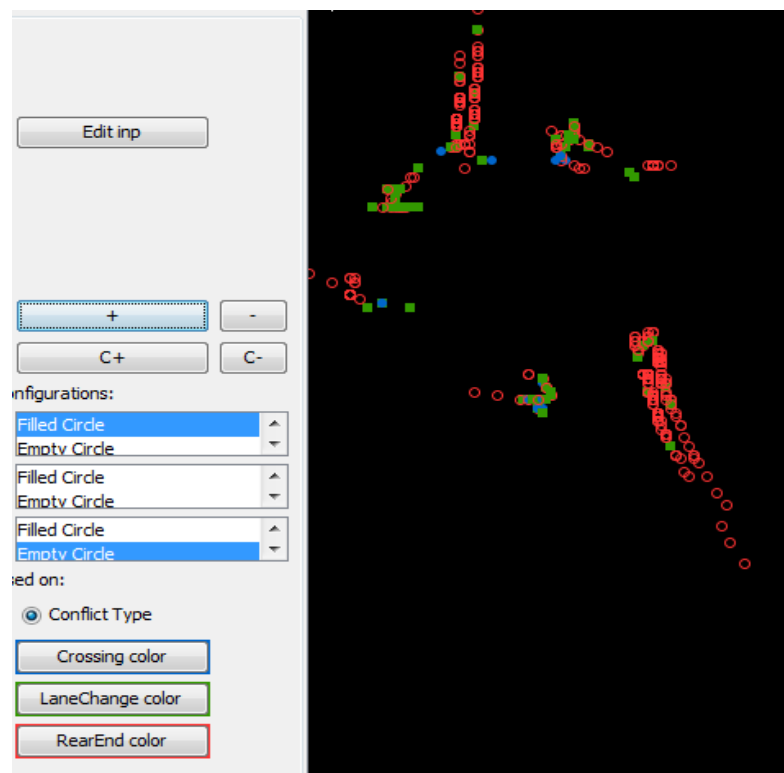


Figura 5.6 – Tipos de conflitos na rotunda A para uma procura global de 100%

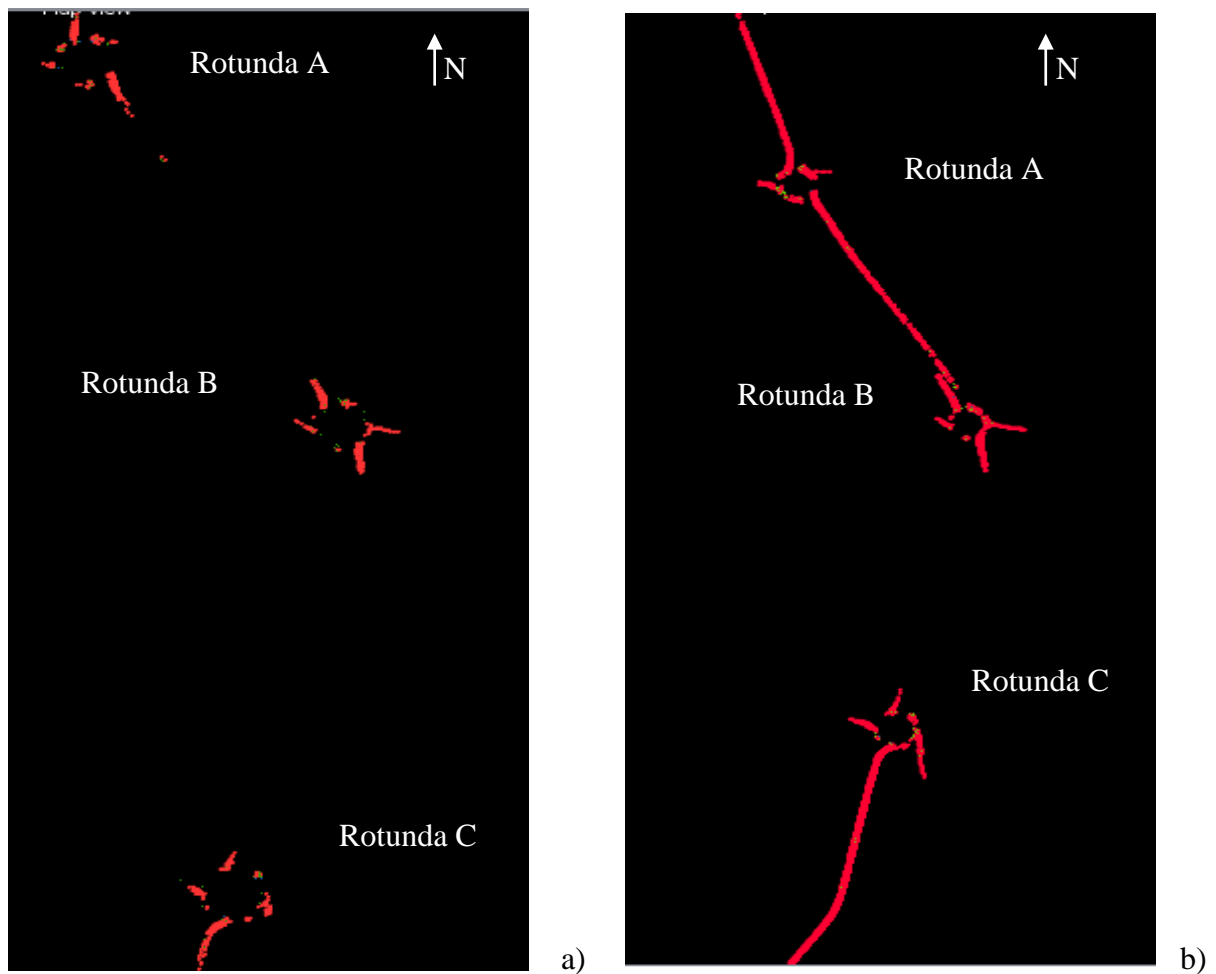


Figura 5.7 – Tipos de conflitos no corredor com rotundas normais: a) para 100% de procura global; b) para 150% de procura global

A avaliação do desempenho do corredor em análise foi posteriormente estudado, assumindo que as 3 rotundas normais (A, B e C) são transformadas em turbo-rotundas (A e B do tipo *standart* e C do tipo *Knee*). A Figura 5.8 apresenta os resultados retirados do modelo, quando a rede é sujeita a uma variação da carga na rede.

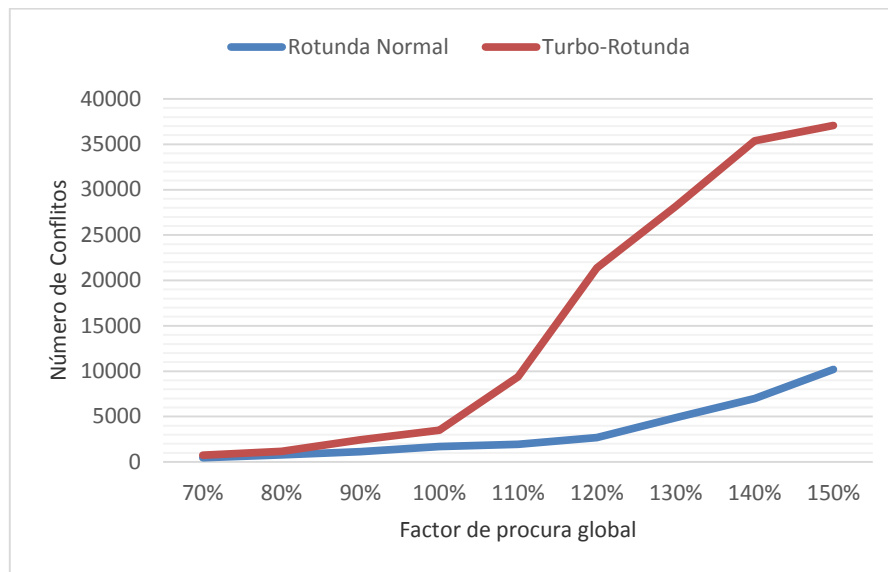


Figura 5.8 – Número de conflitos existentes nas rotundas tradicionais e turbo-rotundas para um aumento da procura global

A Figura 5.8 evidencia a ocorrência de um aumento de conflitos significativamente superior para a solução corredor com turbo-rotundas comparativamente à solução atual, sendo esse acréscimo cada vez mais evidente à medida que aumenta a carga na rede. Para a procura de tráfego atual, ou seja 100%, o corredor com turbo-rotundas já apresenta um grande número de conflitos o que poderá estar associada ao fato da rede estar a funcionar próxima do limiar de capacidade podendo assim registarem-se breves períodos de congestionamento. A partir dos 100% de procura existe um aumento quase que exponencial do número de conflitos que tem tendência a amenizar, apesar de continuar a aumentar, a partir dos 120% já que a rede já estará a funcionar acima da saturação. Estes resultados estão em consonância com as conclusões apresentadas por Mariano (2014), uma vez que conclui que, para taxas de saturação próximas dos 100%, as turbo-rotundas apresentam níveis de congestionamento superiores às rotundas convencionais de duas vias, o que tendencialmente se traduz num aumento do número de conflitos entre veículos, particularmente ao longo dos trechos de aproximação.

Essa suposição é confirmada através da análise do tipo de conflitos e a sua distribuição espacial. Tal como acontece para a rotunda normal, na turbo-rotunda o conflito mais predominante é o frente-traseira (*Rear End*) (ver Figura 5.9). Este tipo de conflito ocorre sobretudo nas zonas de aproximação da rotunda enquanto os tipos de conflitos mudança de via (*Lane Change*) e atravessamento (*Crossing*) ocorrem sobretudo já no interior da rotunda (ver Figura 5.10 a). Tais resultados respondem ao expectável, já que no caso da turbo-rotunda, o processo de decisão associado à seleção de via, é transferido para os ramos de aproximação, onde se gera um número adicional de manobras de entrecruzamento. Esse número tende a ser superior ao registado na rotunda normal, visto que, ao apresentar maior flexibilidade de escolha de vias de circulação, o



processo de decisão passa frequentemente para a zona de entrada e anel de circulação (aqui traduzidos em conflitos de mudança de via).

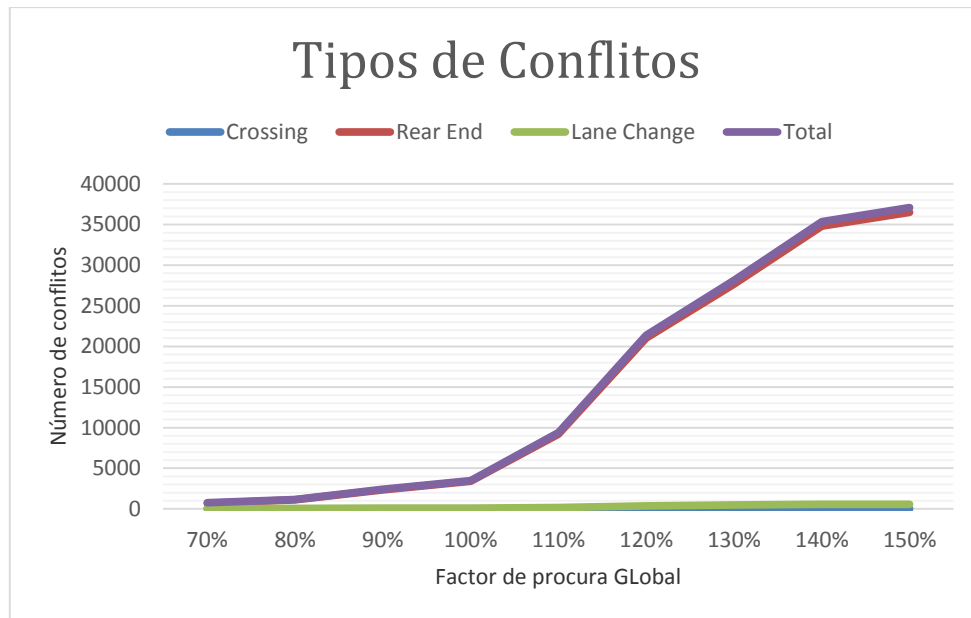


Figura 5.9 – Número e tipos de conflitos existentes na solução turbo-rotundas com aumento da procura global

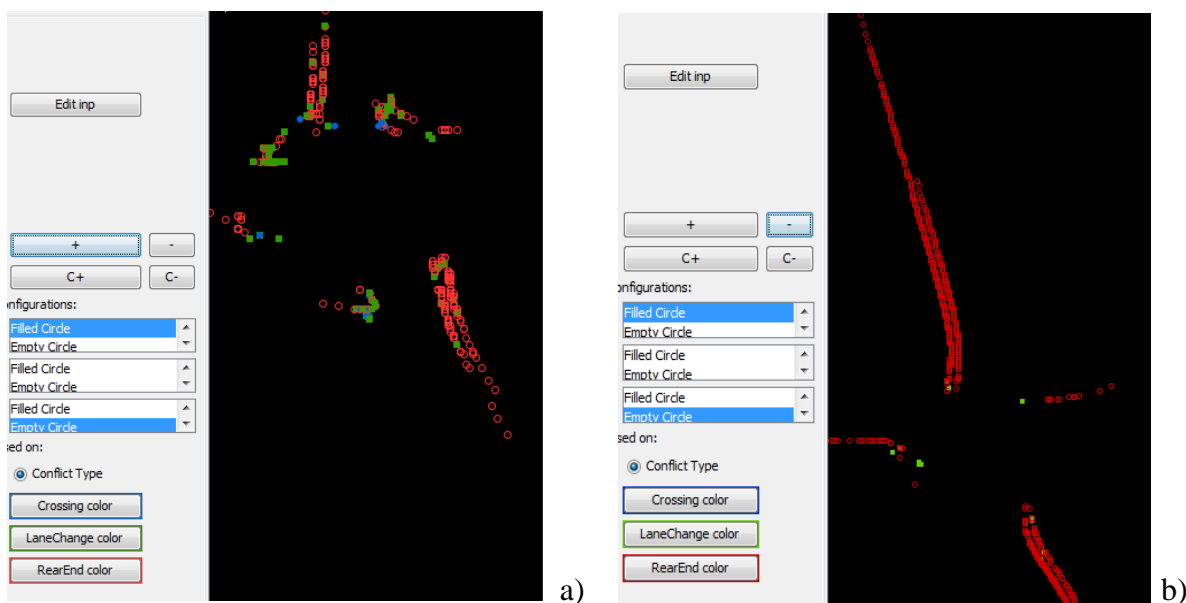


Figura 5.10 – Tipos de conflitos para uma procura de 100%: (a) rotunda convencional A; (b) turbo-rotunda A

Da análise conjunta da Figura 5.10 e Quadro 5.4 pode-se ainda constatar que os conflitos *Lane Change* e *Crossing*, ocorrem em pequeno número e tal como seria expectável, o desempenho da turbo-rotunda é superior à rotunda normal, sendo esse benefício crescente com o aumento da carga na rede. A maioria destes conflitos ocorre no interior da rotunda o que está em consonância com a bibliografia da especialidade, evidenciando as vantagens das turbo-rotundas na gestão dos conflitos de entrecruzamento nas zonas de entrada, atravessamento e saída da rotunda. De notar que são estes os acidentes que resultam tendencialmente em conflitos graves e portanto com maior probabilidade de originar acidentes reais.

Quadro 5.4 – Número e tipo de conflitos com o aumento da procura global: (a) Solução rotundas normais; (b) solução Turbo-rotundas

Demanda	Tipos de conflito			total
	%	crossing	rear end	
70%	2	389	59	450
80%	3	669	102	774
90%	6	960	159	1125
100%	22	1461	209	1692
110%	12	1689	240	1941
120%	7	2365	318	2690
130%	22	4416	417	4855
140%	31	6367	599	6997
150%	46	9487	680	10213

a)

Demanda	Tipos de conflito			total
	%	crossing	rear end	
70%	0	691	58	749
80%	1	1098	52	1151
90%	1	2350	78	2429
100%	5	3386	106	3497
110%	2	9198	178	9378
120%	7	20999	381	21387
130%	8	27660	472	28140
140%	6	34800	566	35372
150%	7	36514	558	37079

b)

Por sua vez, o Quadro 5.5 apresenta os resultados traduzidos em termos de indicadores TTC e *DeltaS*.

Quadro 5.5 – Quadro resumo do número de conflitos, TTC médio e *DeltaS* médio com o aumento da procura global

%	Nº de Conflitos		TTC médio		Delta S médio	
	Rotunda normal	Turbo-Rotunda	Rotunda Normal	Turbo-Rotunda	Rotunda Normal	Turbo-Rotunda
70	450	749	0,86	1,26	5,33	4
80	774	1151	0,91	1,29	5,14	3,64
90	1125	2429	0,92	1,28	5,17	3,09
100	1692	3497	0,97	1,29	5,16	2,87
110	1941	9378	0,97	1,29	5,22	2,15
120	2690	21387	1	1,27	4,92	1,65
130	4855	28140	1,11	1,28	3,95	1,61
140	6997	35372	1,14	1,28	3,5	1,56
150	10213	37079	1,2	1,27	3,07	1,52

São evidentes grandes diferenças nos resultados associados às duas soluções. O TTC médio registado na solução de turbo-rotundas é superior à solução de rotundas normais, o que por um lado justifica o elevado número de conflitos nas turbo-rotundas e por outro indicia uma menor gravidade. O facto do TTC ser elevado significa que existe um maior intervalo de tempo para

dois condutores colidirem um com o outro e portanto dispõem igualmente de mais tempo para poder reagir e assim evitar o acidente, ou minimizar as suas consequências.

Tal interpretação é confirmada pela análise do indicador de gravidade *DeltaS* o qual é francamente superior na rotunda normal comparativamente à turbo-rotunda. Tal indica que apesar de se registar um menor número de conflitos na solução rotunda normal, os conflitos tendem a ser de maior gravidade e portanto mais propícios a resultarem em acidentes graves.

É ainda de realçar que com o aumento de procura de tráfego, o TTC aumenta e o *DeltaS* diminui pois com o congestionamento da rede, os condutores praticam velocidades mais reduzidas pelo que demorarão mais tempo para colidirem se permanecerem na mesma trajetória e a gravidade dos conflitos tende a ser menor. Apenas na solução com turbo-rotundas é que não se verificam grandes variâncias do TTC médio possivelmente porque para essa situação os condutores têm que forçosamente diminuir a velocidade para entrar nas turbo-rotundas, de modo a escolherem atempadamente a via que mais lhes convém.

## **5.5.2 Avaliação do efeito associado à variação da repartição direcional**

### **5.5.2.1 Imposição de repartições diferentes da rotunda intermédia (B) para uma carga de 100% na rede**

Neste cenário, que compreende as combinações 1 à 12, optou-se por diferenciar a repartição direcional da rotunda B em relação às rotundas A e C podendo estas duas apresentarem a mesma repartição direcional entre elas. Decidiu-se optar por esta análise pois é aquela que é a mais crítica já que mudando a repartição direcional da rotunda intermédia (rotunda B) em relação às rotundas adjacentes, tenderá a ser gerado um aumento de entrecruzamentos nos ramos de ligação e, por consequência, um aumento de pontos de conflito (designadamente frente-traseira). Todas as análises foram desenvolvidas para a situação de carga na rede de 100% (ou seja próxima de 90% de taxa de saturação). Os resultados obtidos estão sintetizados no Quadro 5.6 e na Figura 5.11.

Quadro 5.6 – Número de conflitos total para cada combinação para ambas as soluções

Combinação	Todos os conflitos	
	Rotunda Normal	Turbo Rotunda
1	601	3299
2	541	2993
3	870	3716
4	1286	10101
5	1068	3286
6	1198	5715
7	905	2847
8	795	4190
9	1079	5928
10	812	9864
11	850	5779
12	712	3964

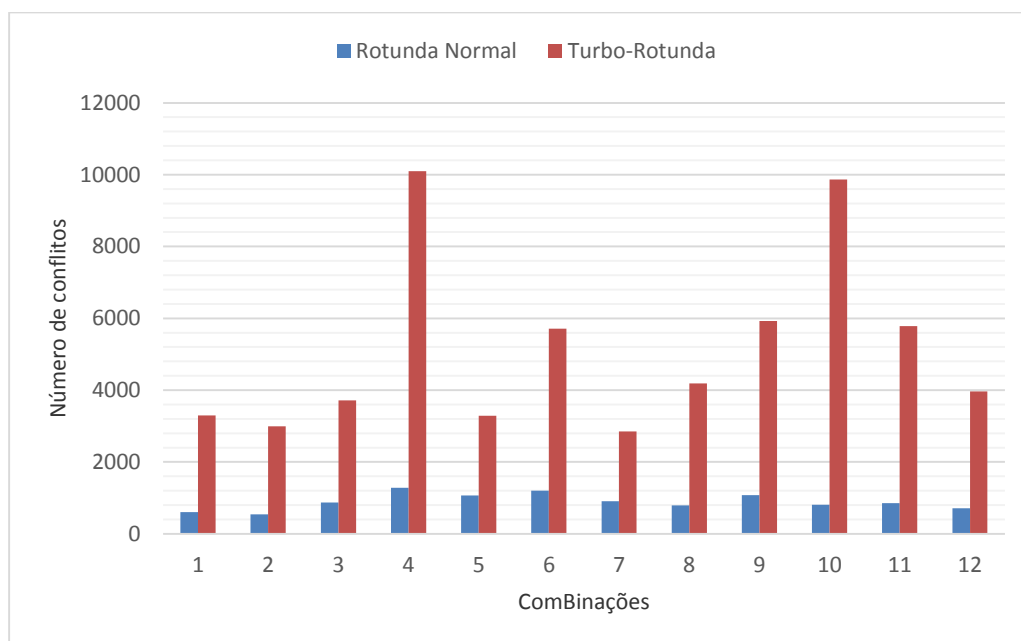


Figura 5.11 – Número de conflitos total para cada combinação para ambas as soluções

Quando avaliado o número de conflitos gerados na rede, verifica-se que, em termos globais, o desempenho do corredor de rotundas convencionais apresenta um nível de desempenho aparentemente superior ao de turbo-rotundas. Contudo, e como visto anteriormente, importa perceber a distribuição destes conflitos por tipologia de conflito.

Da análise do Quadro 5.6 verifica-se ainda, que para a situação atual (rotundas convencionais) a combinação número 4, é a que se traduz num maior número de conflitos. Essa combinação representa a situação em que existe uma maior percentagem de veículos das rotundas A e C a seguirem em frente (60%) e onde na rotunda intermédia (B) a maioria do tráfego vira à esquerda. Estes resultados respondem ao expectável, já que para além de existir um nível elevado de procura de tráfego nos arcos de ligação entre rotundas, é ainda imposta a mudança de via na aproximação à rotunda central.

Relativamente à combinação número 2 verifica-se que é aquela que origina o menor número de conflitos, o que também era expectável. Na realidade nas duas rotundas extremas (A e C), o movimento de viragem à direita representa o movimento direcional mais importante, o que se traduz por um lado, na geração de manobras de baixo nível de gravidade e, por outro lado, na redução significativa dos volumes de tráfego afetados à rede, porque a maior parte da procura, ao virar à direita, sai do sistema logo na 1ª interseção.

Refira-se que esta tendência é consensual quando analisado o corredor de turbo-rotundas. A combinação 4 continua a ser aquela que apresenta um maior número de conflitos. Por sua vez o menor número de conflitos regista-se nas combinações em que a maior parte dos veículos vira à direita nas rotundas A ou C ou em ambas (designadamente nas combinações 2 e 7) (ver Quadro 5.1). De referir que a variação será maior nas combinações em que a percentagem de viragens à direita é maior nas rotundas A e já que correspondem às combinações em que a maior parte do tráfego, sai dos sistema, logo na 1ª interseção, deixando por isso de continuar a gerar conflitos, ao longo do período de simulação.

Contudo não pode deixar de ser realçado o acréscimo significativo do número de conflitos globais registados nas turbo-rotundas comparativamente às rotundas normais (ver Figura 5.11). Esse acréscimo pode estar associado ao facto do corredor estar a funcionar próximo do limiar de saturação, pelo que a transformação das rotundas em turbo-rotundas se traduz numa redução da capacidade (mesmo que ligeira) que por sua vez se traduz num maior número de conflitos na gestão das filas de espera. Tal constatação justificou a análise pormenorizada da repartição dos conflitos globais por tipologia de conflito (Quadro 5.7), assim como a avaliação dos indicadores de desempenho TTC e *DeltaS*.

Quadro 5.7 – Tipos de conflitos para as duas soluções para cada combinação

Combinações	Tipos de conflitos para rotunda normal			Tipos de conflitos para rotunda normal		
	Crossing	RearEnd	LaneChange	Crossing	RearEnd	LaneChange
1	5	500	96	6	3240	53
2	1	450	90	2	2942	49
3	8	720	142	1	3645	70
4	14	1104	168	8	9979	114
5	9	901	158	7	3204	75
6	13	1019	166	4	5639	72
7	5	769	131	5	2769	73
8	7	666	122	2	4125	63
9	3	922	154	3	5836	89
10	14	678	120	3	9734	127
11	13	713	124	2	5691	86
12	12	566	134	4	3891	69

A análise do Quadro 5.7 evidencia, em consonância com as análises anteriores, que o tipo de conflito mais comum é o frente-traseira (*Rear End*) assumindo os restantes conflitos, valores francamente inferiores.

Fazendo uma análise de comparação entre as duas soluções alternativas, verifica-se, em geral, uma diminuição do número de conflitos do tipo *crossing* e *lane change* quando o corredor de rotundas é transformado em turbo-rotundas. Estes conflitos ocorrem em maior número particularmente no interior das rotundas, como já foi anteriormente referido. Contudo, o acréscimo acentuado do número de conflitos do tipo *Rear End* tende a “camuflar” este potencial benefício das turbo-rotundas (ver Figura 5.12).

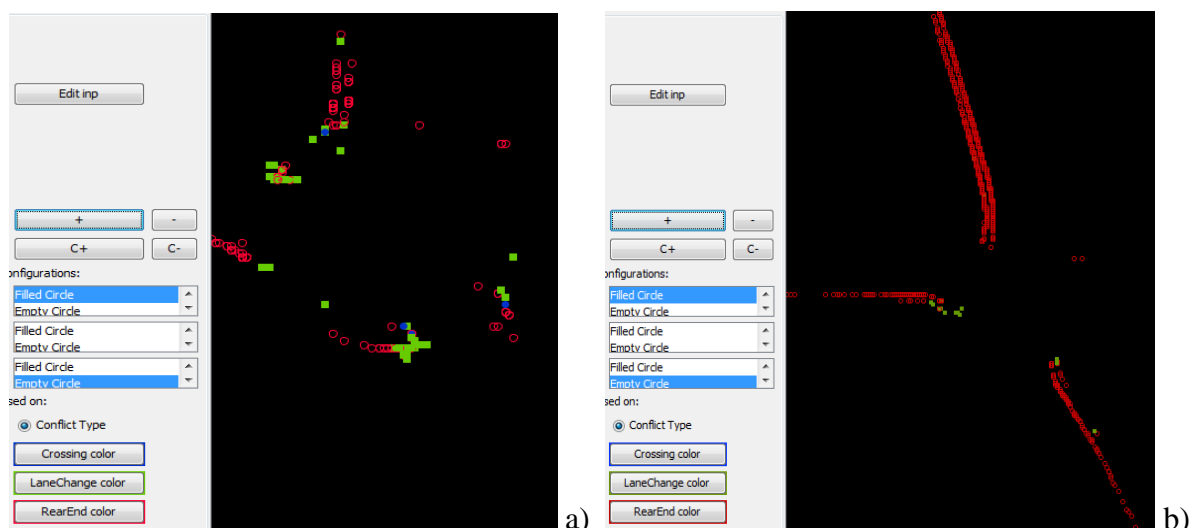


Figura 5.12 – Tipo de conflitos para a combinação 4 na rotunda A: (a) rotunda normal; (b) Turbo-rotunda

Fazendo uma análise mais pormenorizada, verifica-se que conflitos *Lane Change* ocorrem em número superior comparativamente aos conflitos *Crossing*. Os conflitos *Crossing* são conflitos de atravessamento junto das entradas na rotunda ou nas saídas. Por sua vez os conflitos *Lane Change* ocorrem em grande número no interior das rotundas tradicionais sempre que o condutor opta pela via mais adequada ao seu destino para abandonar a rotunda. Tais comportamentos não são praticáveis nas turbo-rotundas porque o condutor depois de entrar na turbo-rotunda se vê impedido de mudar de via. De acordo com a Figura 5.12, os poucos conflitos do tipo *lane change* registam-se na aproximação à intersecção e na secção da entrada na turbo-rotunda, quando um veículo força a mudança de via na entrada do anel.

Quadro 5.8 - Quadro resumo do número de conflitos, TTC médio e *DeltaS* médio para cada uma das combinações

Combinações	Nº de Conflitos		TTC médio		Delta S médio	
	Rotunda normal	Turbo-Rotunda	Rotunda Normal	Turbo-Rotunda	Rotunda Normal	Turbo-Rotunda
1	601	3299	0,92	1,29	5,12	2,18
2	541	2993	0,85	1,30	5,17	2,38
3	870	3716	0,91	1,27	5,21	2,17
4	1286	10101	0,86	1,28	5,33	1,85
5	1068	3286	0,92	1,29	5,23	2,61
6	1198	5715	0,91	1,29	5,43	2,30
7	905	2847	0,85	1,29	5,39	2,81
8	795	4190	0,85	1,29	5,22	2,36
9	1079	5928	0,89	1,29	5,07	2,07
10	812	9864	0,87	1,28	5,20	1,66
11	850	5779	0,94	1,28	5,31	2,09
12	712	3964	0,93	1,29	5,42	2,48

Por sua vez, o Quadro 5.8, apresenta a variação do TTC e do *DeltaS* em função das várias combinações de repartição da procura. Mais uma vez se verificam grandes diferenças de desempenho entre as duas soluções em avaliação. Em consonância com os resultados anteriores, o TTC tende a ser maior na solução turbo-rotundas comparativamente à rotunda normal, independentemente da combinação em análise. Contudo, sublinhe-se a combinação 2 (a maioria do tráfego vira à direita nas rotundas extremas) onde a diferença desse indicador é mais acentuada nas duas soluções alternativas. Tal poderá ficar a dever-se ao facto de as viragens à direita serem, por princípio as soluções com menor nível de gravidade, sendo essa gravidade ainda mais reduzida nas turbo-rotundas, visto que esses movimentos só conflituam com a corrente de tráfego de uma via no anel. Também o indicador de gravidade *DeltaS* indicia um maior nível de segurança nas turbo-rotundas, apresentando, independentemente do tipo de repartição direcional, um valor francamente mais pequeno nas turbo-rotundas comparativamente às rotundas normais. Sublinhe-se o facto do menor *DeltaS* ter sido obtido na combinação número 10, a qual representa uma situação onde o tráfego predominante não se traduz em tráfego conflituante nas diferentes entradas das rotundas ou turbo-rotundas.

Refira-se ainda que estes dois indicadores (TTC e Delta S) se revelam mais sensíveis à repartição de tráfego nas turbo-rotundas do que nas rotundas normais, solução onde os indicadores assumem valores praticamente constantes para as diferentes combinações de repartição.

#### 5.5.2.2 Imposição da mesma repartição direcional nas três rotundas e em todas as entradas de cada uma das rotundas

Neste cenário, que compreende as combinações 13, 14 e 15, optou-se por desenvolver uma análise onde todas as rotundas mantivessem a mesma repartição direcional de modo a verificar, ao nível do corredor, o que aconteceria, em termos de segurança, se a maior parte dos veículos virasse à direita, seguisse em frente ou virasse à esquerda respetivamente em todas as entradas das rotundas em estudo.

Quadro 5.9 - – Número de conflitos total para cada combinação para ambas as soluções

Combinação	Todos os conflitos	
	Rotunda Normal	Turbo Rotunda
13	1066	5142
14	1099	8543
15	466	2602

Como se pode verificar pelo Quadro 5.9 como seria de esperar a combinação 15 (maior percentagem de viragens à direita) é aquela que apresenta menor número de conflitos quer para a solução atual quer para a solução com turbo-rotundas pois as viragens à direita são mais seguras e no caso das turbo-rotundas são protegidas pela existência de canalização física. Continua, contudo, a ser evidente que o número de conflitos totais é francamente superior nas turbo-rotundas do que nas rotundas normais. Tal como visto anteriormente esse acréscimo deve-se ao aumento dos conflitos nos trechos de aproximação (Figura 5.13), em grande parte associada à ligeira perda de capacidade que está associada a esta solução (Mariano, 2014).



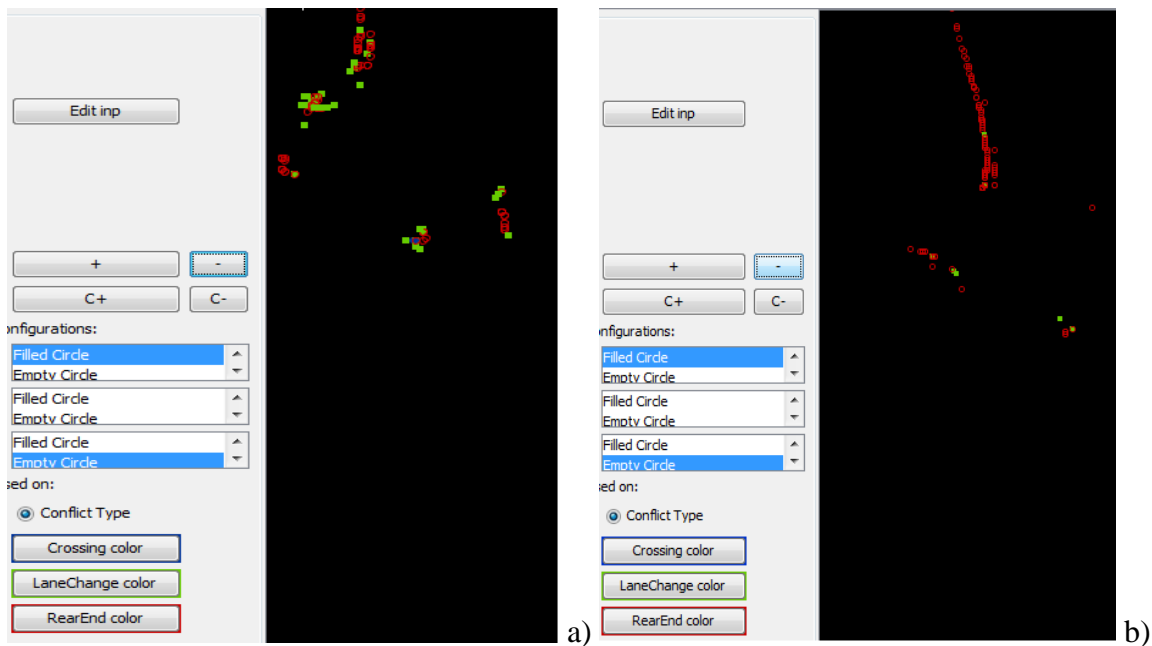


Figura 5.13 – Tipos de conflitos para a combinação 15 na rotunda A: (a) rotunda normal; (b) Turbo-rotunda

Quadro 5.10 - Tipos de conflitos para as duas soluções para cada combinação

Combinações	Tipos de conflitos para rotunda normal			Tipos de conflitos para rotunda normal		
	Crossing	RearEnd	LaneChange	Crossing	RearEnd	LaneChange
13	6	900	160	5	5059	78
14	13	913	173	7	8426	110
15	5	383	78	6	2602	47

As tendências gerais apresentadas anteriormente são igualmente registadas nestas três novas combinações de repartição direcional. Fazendo uma análise geral do Quadro 5.10 verifica-se que o tipo de conflito *Rear End* é o mais predominante sendo os outros dois tipos de conflitos muito inferiores. Os conflitos do tipo *Crossing* e *RearEnd* diminuem em geral da solução rotunda normal para a solução turbo-rotunda, como se pode também verificar na Figura 5.13, pois estes conflitos ocorrem na sua maioria no interior das rotundas. Em relação ao número de conflitos do tipo *Rear End* estes sofrem um grande aumento da rotunda normal para a turbo-rotunda sendo particularmente concentrados nos ramos de aproximação e negociação das turbo-rotundas.

Também os conflitos *Lane Change* diminuem quando se transforma a rotunda normal numa turbo-rotunda assumindo valores mais reduzidos do que os conflitos do tipo *Crossing*. Os conflitos *Crossing* são conflitos de entrecruzamento que apesar de diminuírem pouco ainda existem dentro duma turbo-rotunda, particularmente concentrados junto às entradas. Já os conflitos *Lane Change* acontecem maioritariamente no interior das rotundas tradicionais

quando o condutor decide mudar de via para sair na saída pretendida. Tal comportamento é eliminado nas turbo-rotundas uma vez que a decisão é tomada antes de entrar na turbo-rotunda. Realce-se a combinação 14 (tráfego predominante no movimento de ida em frente), a qual é a que melhor evidencia os benefícios das turbo-rotundas relativamente às rotundas normais. O decréscimo dos conflitos é de praticamente 50%, o que se justifica pelo facto de na rotunda normal o veículo na negociação da entrada ter de conflitar com 2 vias de tráfego e na turbo rotunda, apenas ter de atravessar uma única via. Tal simplificação geométrica traduz-se ainda na diminuição do *DeltaS* e aumento do TTC registados no Quadro 5.11.

Quadro 5.11 - Quadro resumo do número de conflitos, TTC médio e *DeltaS* médio para cada uma das combinações

Combinações	Nº de Conflitos		TTC médio		Delta S médio	
	Rotunda normal	Turbo-Rotunda	Rotunda Normal	Turbo-Rotunda	Rotunda Normal	Turbo-Rotunda
13	1066	5142	0,90	1,29	5,39	2,42
14	1099	8543	0,89	1,27	5,29	1,75
15	466	2602	0,94	1,29	5,12	2,22

Observando o Quadro 5.11, em relação aos indicadores estudados (TTC e *DeltaS*) mais uma vez se mantêm as tendências apresentadas anteriormente. O TTC é maior na solução turbo-rotundas comparativamente à solução rotunda normal e o *DeltaS* é muito superior na rotunda Normal do que na Turbo-rotunda o que indica que apesar de existirem menor número de conflitos na solução atual estes serão de maior gravidade quando comparados com a solução turbo-rotunda.

A combinação 14 (maior percentagem de veículos que segue em frente), apesar de ser aquela que no caso das turbo-rotundas apresenta maior número de conflitos, é também aquela em que estes conflitos são de menor gravidade (*DeltaS* menor) pois a aproximação numa turbo-rotunda requer práticas de menor velocidade por parte dos condutores e, ainda mais, quando a maior parte do fluxo de tráfego se desloca dentro dos corredores devido às idas em frente, pelo que as velocidades praticadas também têm de ser necessariamente menores.

## 5.6 Validação dos resultados do SSAM

Os processos de validação passam desejavelmente pela comparação de resultados simulados com os dados observados no sistema real. Dada a ausência de dados relativos ao historial de acidentes no corredor de rotundas selecionado, optou-se por recorrer à comparação dos resultados simulados pelo SSAM com o número de acidentes estimados pelo modelo de estimação de acidentes em rotundas Maycock e Hall, descrito no subcapítulo 2.2. Preferiu-se recorrer a este modelo, visto que representa um dos modelos mais antigos e conceituados

aplicados às entradas de rotundas. Contudo, importa desde já ter presente que os resultados dos dois métodos não são diretamente comparáveis, pois o modelo de Maycock estima o número de acidentes num determinado período de tempo e o SSAM aponta para o número de potenciais conflitos, sendo certo que nem todos os conflitos resultam em acidentes. Apesar disso é provável que possa existir uma tendência similar de variação dos valores.

Atendendo a que este modelo matemático permite a estimativa de acidentes por entrada na rotunda enquanto solução isolada, foi necessário selecionar apenas uma das 3 rotundas em estudo. Optou-se pela rotunda A, já que, à semelhança da rotunda C, é a que está sujeita aos maiores volumes de tráfego, valor determinante no cálculo do modelo de Maycock e Hall. Por sua vez, a rotunda C, mesmo estando sujeita a um fluxo de tráfego elevado, foi retirada da análise atendendo a que não apresenta uma configuração *standard* das rotundas estudadas por Maycock por possuir um *bypass* numa das suas entradas para facilitar as viragens à direita.

Quanto aos cenários a utilizar para esta comparação serão analisados dois, um para uma capacidade de carga a 100% (cenário atual) e outro, de repartição direcional tendo sido escolhida para este caso a combinação 13 que é uma das combinações em que a maior percentagem de veículo vira à esquerda e portanto aquela em que haverá probabilidade de haver um maior número de conflitos.

Como também foi descrito no subcapítulo 2.2, mais precisamente no ponto 2.2.1, este modelo possui 5 categorias de acidentes: 1) acidentes de entrada no anel de circulação (entre um veículo que esteja a entrar na rotunda e outro que circula no anel), 2) acidentes na aproximação (principalmente embates frente-traseiras, mas também acidentes de mudança de via), 3) acidentes por despiste de veículo isolado (um único veículo colidindo com alguma parte ou objeto da intersecção), 4) outros acidentes (variedade de acidentes sem envolvimento de peões) e 5) acidentes pedonais (qualquer acidente que envolva vítimas pedonais).

Como o método SSAM só define eventos de conflito para pares de veículos, os tipos de acidente 3 e 5 (veículo único e pedonais respetivamente) não são possíveis de analisar. Também no que toca ao tipo de acidente 4, este não foi possível de determinar pois a versão de SSAM utilizada nesta dissertação apenas analisa conflitos do tipo *crossing*, *rear end* e *lane change* não analisando outro tipo de conflitos para além destes três.

Assim foram estudados os conflitos do tipo *crossing* para a tipologia de acidente 1 e os conflitos do tipo *rear end* e *lane changing* para a tipologia de acidente 2.

Também será necessário referir que esta comparação entre o modelo de Maycock e o SSAM apenas foi realizada para o modelo de rotunda normal pois o modelo matemático foi construído

para obter os acidentes em entradas de rotundas deste tipo onde entram apenas variáveis geométricas referentes à tipologia de rotundas convencionais (ver equações 1 e 2).

### 5.6.1 Carregamento da rede a 100%

No Quadro 5.12 estão representados os resultados obtidos para cada uma das entradas da rotunda A, quer pelo modelo de Maycock (número de acidentes), quer pelo SSAM (número de conflitos ) para a situação atual e para os tipos de acidente 1 e 2.

Quadro 5.12 – Resultados obtidos pelos dois modelos para cada entrada da rotunda A e por tipologia de acidente

Entradas	Tipo de Acidente 1		Tipo de Acidente 2	
	Maycock	SSAM	Maycock	SSAM
A1	0	20	1	350
A2	0	0	0	60
A3	0	0	3	690
A4	0	0	0	40

A partir do Quadro 5.12 pode verificar-se que o tipo de conflito *crossing*, estudado no tipo de acidente 1 (atravessamentos dos veículos nas entradas na rotunda e no interior do anel), é muito pouco frequente pelo modelo do SSAM sendo mesmo nulo o número de acidentes quando se analisam os resultados obtidos por Maycock, havendo assim uma concordância tendencial entre os valores obtidos por estes modelos. Já para os tipos de conflitos *rear end* e *lane change*, estes acontecem em maior número no tipo de acidente 2 (acidentes/conflitos na aproximação à rotunda). Também aqui existe uma tendência similar na variação dos valores entre modelos observando-se que, as entradas A3 e A1 são aquelas que têm o maior e o segundo maior número de conflitos respetivamente o que, por sua vez, também leva a um maior número de acidentes, neste caso 3 acidentes para a entrada A3 e 1 para a entrada A1.

### 5.6.2 Repartição direcional (Combinação 13)

No Quadro 5.13 estão representados os resultados obtidos para cada uma das entradas da rotunda A, quer pelo modelo de Maycock, quer pelo SSAM, para a combinação de repartição direcional 13 (onde existe maior percentagem de veículos que viram à esquerda na rotunda), e para os tipos de acidente 1 e 2.

Quadro 5.13 - Resultados obtidos pelos dois modelos para cada entrada da rotunda A e por tipologia de acidente

Entradas	Tipo de acidente 1		Tipo de acidente 2	
	Maycock	SSAM	Maycock	SSAM
A1	0	0	1	310
A2	0	0	0	100
A3	0	0	0	130
A4	0	0	0	20

Tal como acontecia no ponto anterior, o Quadro 5.13 evidencia uma tendência na variação dos valores. Para o tipo de acidente 1, o SSAM não apresenta nenhum conflito nem o modelo de Maycock apresenta qualquer acidente. Esta tendência também se verifica para o tipo de acidente 2 onde o único acidente acontece para a entrada em que ocorre um maior número de conflitos (entrada A1).

Pelo resultado destas análises pode-se concluir que o SSAM é um modelo válido na estimativa de conflitos e possíveis acidentes pois apesar de apresentar, como já seria expectável, um número de conflitos muito superior ao número de possíveis acidentes dado pelo modelo de Maycock, estes seguem uma tendência semelhante quando comparados com os resultados dos modelos estatísticos de estimação de acidentes. Contudo, vale a pena ainda salientar que o modelo de Maycock apresenta um número de acidentes por ano e os resultados fornecidos pelo SSAM dizem apenas respeito às duas horas estudadas.

## 5.7 Considerações sobre os resultados

Os resultados obtidos nesta análise são extremamente interessantes e permitem evidenciar o desempenho, em termos de segurança rodoviária, da aplicação de turbo-rotundas quando inseridas num corredor. Os resultados obtidos revelaram-se extremamente consistentes nas diversas análises, seja associadas ao aumento do carregamento da rede seja na variação das repartições direcionais. Apesar do número de conflitos diminuir no interior da turbo-rotunda (resultados em consonância com a bibliografia da especialidade e autores que estudaram o funcionamento da turbo-rotunda isolada) existe um aumento significativo do número global de conflitos total. Esse aumento é particularmente devido ao acréscimo de conflitos do tipo frente-traseira, nos ramos de aproximação e negociação da rotunda. Verificou-se ainda que esse acréscimo depende significativamente do nível de carregamento da rede (e por sua vez da taxa de saturação), tendo as diversas análises ficado limitadas ao facto de se ter tido por base uma situação de carregamento da rede que se aproxima do limiar de saturação (revelando já condições instáveis de circulação com períodos instáveis).

É ainda de realçar que, apesar de ser ter registado um aumento significativo de conflitos na transformação de um corredor de rotundas para turbo-rotundas, verifica-se que os indicadores de segurança (TTC e *DeltaS*) são menos gravosos na solução turbo-rotunda, o que indicia que os conflitos tendem a ser menos graves e portanto com probabilidade de resultarem em acidentes efetivos num número significativamente inferior.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Conclusões

A turbo-rotunda tem vindo a apresentar-se como uma solução alternativa às rotundas convencionais com múltiplas vias, sendo habitual atribuir-lhe claras melhorias em termos de segurança rodoviária resultantes da resolução dos problemas de entrecruzamentos existentes nas entradas, anel e saída, frequentemente detetados no funcionamento das rotundas convencionais. É possível identificar alguns trabalhos de investigação centrados na avaliação do funcionamento de turbo-rotundas face às rotundas convencionais, contudo, todos assumem a aplicação da turbo-rotunda de forma isolada. Os resultados, em termos de segurança, são consensuais, apontando para reduções significativas dos níveis de sinistralidade. Esses trabalhos, maioritariamente assentes em técnicas do tipo “antes-depois”, justificam essa redução com base na redução da velocidade de negociação da intersecção e na perda de flexibilidade na escolha das vias de circulação, transferindo a decisão sobre a seleção da via para o trecho de aproximação. Considerou-se assim pertinente avaliar a aplicação de turbo-rotundas em corredor, de modo a perceber a forma como este tipo de aplicações sequenciais pode afetar o desempenho deste tipo de soluções. Desconhece-se a existência de trabalhos científicos que integrem a aplicação de turbo-rotundas de forma conjunta, pelo que a presente dissertação teve como objetivo principal avaliar o funcionamento de um corredor de turbo-rotundas, ao nível da segurança rodoviária, comparativamente ao funcionamento de um corredor de rotundas tradicionais com 2 vias de circulação.

Atendendo a que ainda não existem soluções construídas de turbo-rotundas em Portugal e sendo ainda extremamente difícil poder contar com um corredor sequencial de turbo-rotundas mesmo no estrangeiro, não se revela possível a aplicação de técnicas do tipo “antes e depois” ou mesmo de técnicas de análises de conflito, pelo que se optou por recorrer a uma plataforma de microsimulação (AIMSUN). A construção deste modelo foi baseada na codificação de uma situação real, constituída por um corredor de 3 rotundas sequenciais com 2 vias de entrada e circulação, existente na cidade de Coimbra, calibrado e validado para os níveis de procura de tráfego atualmente existentes no local. A aplicação de modelos convencionais ao funcionamento das 3 rotundas comprovou que, para a situação atual (situação considerada de referência), o sistema está a funcionar próximo do limiar de saturação (taxa de saturação de

90%), já se registando por isso períodos pontuais de congestionamento e condições instáveis de circulação.

Foram efetuados dois tipos de análises: (i) efeito da carga de tráfego atribuída à rede; (ii) efeito da repartição direcional nas entradas.

No primeiro tipo de análises, os resultados obtidos apontaram consistentemente para um aumento significativo do número de conflitos na rede codificada quando o corredor de rotundas convencionais é transformado num corredor de turbo-rotundas. Esse aumento mostrou ser sensível ao nível de carregamento de tráfego da rede, crescendo quase que exponencialmente com a taxa de saturação. A análise da distribuição espacial dos conflitos permitiu ainda concluir que os conflitos ocorrem maioritariamente nos trechos de ligação entre turbo-rotundas, sendo do tipo frente-traseira, ou seja, o que poderá estar associado à ligeira degradação do modo de funcionamento do corredor quando associado à implantação das turbo-rotundas. A avaliação dos indicadores de segurança representativos da frequência (TTC) e da gravidade dos acidentes (*DeltaS*) mostra que estes conflitos, apesar de serem em grande número tendem a ser menos gravosos na solução turbo-rotunda do que nas rotundas convencionais. Destas análises foi ainda possível verificar que, independentemente da carga na rede, o número de conflitos do tipo mudança de via e de atravessamento sofrem uma redução significativa quando o corredor de rotundas é transformado em turbo-rotundas, confirmando assim os resultados patentes na bibliografia da especialidade.

Nas análises associadas à avaliação do efeito da repartição modal, os resultados obtidos foram igualmente consistentes, confirmando os resultados gerais das análises anteriores. Para todos os cenários de repartição estudados (15 combinações), o desempenho do corredor de rotundas mostrou ser francamente superior ao corredor de turbo-rotundas. O aumento do número de conflitos é notório em todas as combinações estudadas, assumindo o seu valor máximo nas combinações onde a maior percentagem de veículos segue em frente nas rotundas extremas (A e C) e vira à esquerda na rotunda intermédia (B). Por oposição, a solução que obteve melhor desempenho, corresponde àquela em que, tal como seria expectável, o fluxo dominante vira à direita em todas as rotundas. Tal, deve-se ao facto de, por um lado, os movimentos estarem maioritariamente associados a manobras pouco perigosas e, por outro lado, representar a solução que menos fluxo de tráfego atribui à rede, já que uma parte significativa do tráfego sai do sistema, logo na primeira intersecção. A análise dos indicadores de segurança mostrou consensualmente um aumento do TTC e uma diminuição do *DeltaS* na transformação do corredor de rotundas em turbo-rotundas, mostrando ainda uma maior sensibilidade destes dois fatores à repartição modal no caso dos corredores das turbo-rotundas.



Os resultados obtidos mostram de forma consensual e robusta que a transformação de um corredor de rotundas de 2 vias num corredor de turbo-rotundas, a funcionar perto do limiar de saturação, se traduz num aumento considerável do número de conflitos. Esses conflitos resultam maioritariamente da interação dos veículos nos trechos de ligação entre rotundas, sendo do tipo frente-traseira e associados a níveis de gravidade baixa. Assim, é expectável que em situação real, tais conflitos originem manobras de defesa e possam não resultar em acidentes reais. Por outro lado, importa sublinhar que tais resultados se devem ao facto do corredor de rotundas utilizado nas análises se encontrar a funcionar perto do limiar de saturação (taxa de saturação de 90%), sendo por isso expectável que ao ser transformado num corredor de turbo-rotundas ultrapasse esse limiar e atinja uma situação de congestionamento. É portanto possível que para situações a funcionar abaixo da saturação este efeito de crescimento acentuado dos conflitos nos ramos não se faça sentir.

Estes resultados estão, de uma forma geral, de acordo com os resultados obtidos em trabalhos de investigação anteriores aplicados a uma turbo-rotunda isolada dado que o número de conflitos na entrada e no anel reduzem de forma significativa, independentemente da carga atribuída à rede ou da repartição direcional. Não se pode contudo generalizar estas conclusões a todo o tipo de aplicações de turbo-rotundas designadamente quando aplicadas em corredor. Ficou claro que o nível de desempenho depende consideravelmente da taxa de saturação do sistema, e que o aumento da taxa de saturação se traduz num aumento muito significativo do número de conflitos nos trechos de ligação entre intersecções. Ficou igualmente claro que esses conflitos são de pequena gravidade podendo por isso não resultar em acidentes efetivos.

## 6.2 Trabalhos Futuros

A presente dissertação não representa um produto acabado, deixando por isso em aberto diversos caminhos e linhas de investigação complementares. Considera-se fundamental repetir as análises para uma situação de referência que assuma níveis de tráfego abaixo da saturação nomeadamente abaixo dos 70%.

Importa ainda promover investigação complementar no sentido de validar as técnicas de simulação na avaliação dos níveis de segurança. Isso poderá passar por validar os resultados com base em situações reais construídas, designadamente pela aplicação de estudos comparativos “antes – depois” assim como de técnicas de análise de conflito. A aplicação de modelos tradicionais de estimativa de frequência de acidentes (MEFA) está cada vez mais em desuso, já que a sua calibração depende do historial de acidentes, nem sempre disponíveis, e pelos resultados dependerem das características locais da infraestrutura e dos condutores.

Contudo, não deixam de ser um referencial interessante para balizamento da relação conflito/acidente. Esta questão deverá seguramente justificar investigação futura.

É igualmente pertinente o alargamento deste tipo de estudo a outros indicadores de segurança disponibilizados pelo SSAM procurando perceber, com base em estudos do comportamento do condutor, sobre quais dos indicadores é efetivamente mais representativo, quer da probabilidade de ocorrência de um conflito/acidente, quer da sua gravidade.

Finalmente, o modelo *Logit* adotado para a escolha dos trajetos assume grande importância na modelação das turbo-rotundas. Neste trabalho, este modelo foi calibrado por um processo teórico de “tentativa de erro” pelo que se justifica o desenvolvimento de investigação complementar com o objetivo de calibrar a escolha de trajetos com base em observações reais. Para que tal seja possível seria necessário construir em Portugal um caso piloto que permita calibrar de forma fidedigna os modelos de estimação de acidentes, ou, em alternativa, promover sessões de recolha de dados de campo, em países, onde este tipo de solução já está construída.

---

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, B.L., Shin, B.T., Cooper, P.J. (1977). “Analysis of Traffic Conflicts and Collisions”, Department of Civil Engineering, Mc. Master University, 1977. Citado por Zajic, (2012).
- Amundsen, F.H., Hydén, C. (1987) “Proceedings: First Workshop on Traffic Conflicts”, Oslo: Institute of Transport Economics, Oslo, Norway, 1977. ISBN 82-7133-195-7.
- Archer, J. (2001). “Traffic Conflict Technique”, Historical to current State-of-the-Art. Stockholm: Institutionen för Infrastruktur KTH, Stockholm, 2001. s. 2-3. Citado por Zajic (2012)
- Arndt, O., (2004). “Relationship Between Unsignalised Intersection Geometry and Accident Rates”, Queensland University of Technology, Brisbane.
- Bauer, K. & Harwood, D. (2000). “Statistical models of at-grade intersection accidents Addendum”, FHWARD- 99-094. USDOT, Washington, DC. Citado por Gettman e Head (2013).
- Bastos Silva, A.M.C. (1997). “Aplicabilidade e Concepção de Intersecções Giratórias nas Redes Viárias Urbana e Rural Portuguesas” – Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Edição FCTUC, maio, Coimbra, Portugal.
- Bastos Silva, A.M.C. (2004). “Definição de uma Metodologia de Concepção de Cruzamentos Giratórios”, volume 1 – Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Edição FCTUC, abril, Coimbra, Portugal.
- Bastos Silva, A.M.C., Vasconcelos A.L.P. e Santos, S. (2011). “As Turbo-rotundas, avaliação do seu potencial de desempenho”, XXV ANPET – Congresso De Ensino e Pesquisa Em Transportes, Belo Horizonte, Brasil.
- Bastos Silva, A., Vasconcelos, A.L.P., e Santos, S.M.F. (2013) “Das rotundas convencionais às turborotundas”, 7º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, Portugal, 11-12 Abril.
- Brilon, W. (2005). “Roundabouts: A State of the Art in Germany”, National Roundabout Conference, May 22 – 25, Vail, Colorado, USA.
- Brilon, W. (2008) Turbo-Roundabout - An experience from Germany. In Transportation Research Board, National Roundabout Conference, Kansas City, Missouri. Citado de Bulla e Castro (2011).
- Brown, M., (1995). “The design of Roundabouts – state of the art review”.

- Bulla, L. A. E Castro, W. (2011). “Analysis and Comparison Between Two-Lane Roundabouts and Turbo Roundabouts Based on a Road Safety Audit Methodology and Microsimulation: A Case Study in Urban Area”, 3rd International Conference on Road Safety and Simulation, September, 14 -16, Indianapolis, USA.
- Cunto, F., Saccomanno, F.F. (2008). “Calibration and Validation of Simulated Vehicle Safety Performance at Signalized Intersections”, Elsevier.
- Chin, H.C., Quek, S.T. (1977). “Measurement of Traffic Conflicts”, Safety Science, Vol. 26, No.3, 1977. pp. 169-187. Citado por Zajic, 2012.
- Daniels, S., Wets, G. (2005). “Traffic Safety Effects of Roundabouts: A Review with Emphasis on Bicyclist’s Safety”, Hasselt University, Transportation Research Institute (IMOB), Belgium.
- Elvik, R., Vaa, T. (2004). “The Handbook of Road Safety Measures”. Amsterdam, Elsevier. Citado por Daniel e Wetts (2005).
- Engelsman, J.C. & Uken, M. (2007) Turbo roundabouts as an alternative to two lane roundabouts, Paper presented to the 26th Annual Southern African Transport Conference, South Africa, 9 - 12 July 2007. 8p. Citado de Bulla e Castro (2011).
- FHWA (1989). “Traffic Conflict Techniques for Safety and Operations – Observers Manual – U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration – Publication n° IP-88-027, January, Virginia, USA.
- FHWA (2000). “Roundabouts: An Informational Guide”. Report 672 – U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration – Publication n° RD-00-067, June, Virginia, USA.
- Fortuijn, L.G.H. (2007). “Turbo-Kreisverkehre Turbo-Kreisverkehre Entwicklungen und Erfahrungen.” Aktuelle Theme der Strassenplanung, Donnestag, 2007.
- Fortuijn, L.G.H. (2009). “Turbo Roundabouts - Design Principles and Safety Performance”, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 2096, pp. 16–24 December, 2009.
- Fortuijn, L.G.H. (2011). “Roundabouts in the Netherlands: Development and experiences”, International Roundabout Design and Capacity in connection with TRB 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, July, Stockholm, Finland.
- Gettman, D. e Head, L., (2003). “ Surrogate Safety Measures from Traffic Simulation Models”, TRB 2003 Annual Meeting.
- Hall, R.D. and Surl, A.J. (1981) “Accidents at four-arm roundabouts and dual-carriageway junctions – some preliminary findings”, Traffic Engineering and Control, vol. 22, no. 6, pp. 339–344, 1981. Citado de Bastos Silva et al, (2013).
- Huang, F., Liu, P., Yu, H., Wang, W. (2012). “Identifying if VISSIM simulation model and SSAM provide reasonable estimates for field measured traffic conflicts at signalized intersections”, Elsevier

- Hydén, C., 1975. Relations between Conflicts and Traffic Accidents. Department of Traffic Planning and Engineering, Lund Institute of Technology, Sweden. Citado por Huang et al, (2012)
- Hydén, C. (1987). “The development of a method for traffic safety evaluation: the Swedish traffic conflict technique”. Doctoral Thesis. Lund: Lund University, Department of Traffic Planning and Engineering, 1987. Citado por Zajic, (2012).
- Kaub, A. (2000). “Highway corridor safety levels of service based on annual risk of injury”, 79th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC.
- Krivda, V. (2011) “Video-Analysis of Conflict Situations on Selected Roundabouts in the Czech Republic”. Communications. Žilina: University of Žilina, 2011, roč. 13, č. 3, s. 77-82, ISSN 1335-4205. Citado por Zajic, (2012).
- Laureshyn, A. (2010) “Application of automated video-analysis to road user behavior”, Doctoral Thesis. Lund: Bulletin-Lund Universitet, 2010. ISBN 978-91-628-8003-3. Citado por Zajic (2012).
- Laureshyn, A., Svensson, A., Hydén, C. (2010). “Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioural data”. Theoretical framework and first implementation. Accident Analysis and Prevention, doi: 10.1016/j.aap.2010.03.021, 2010. Elsevier Ltd. Citado por Zajic, (2012).
- 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. Trento, setembro, Itália.
- Mariano, P. (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.
- Mauro, R. e Branco, F. (2010). “Comparative Analysis of Compact Multilane Roundabouts and Turboroudabouts”, Journal of Transportation Engineering 135(4): 316-322.
- Mauro, R. e Cattani, M. (2010). “Potential Accident Rate of Turbo-Roundabouts”, 4th International Symposium on Highway Geometric Design, Transportation Research Board, Valencia, Spain.
- Maycock, G., Hall, R., (1984). “Accidents at 4-arm roundabouts”, Highway appraisal and design - PTRC Summer Annual Meeting, Sussex, England. Citado por Vasconcelos et al, (2013).
- Migletz, D.J., Glauz, W.D., Bauer, K.M. (1985). “Relationship between traffic conflicts and accidents”. Report No.: FHWA/RD-84/042. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, 1985. Citado por Zajic, (2012).
- Perkins, S.R., Harris, J.I. (1968). “Traffic conflicts characteristics: Accident Potential at intersections”. Highway Research Record, 225, 1968. s. 35-43. Citado por Zajic (2012).

- Tarek Sayed & Sany Zein (1999): “Traffic conflict standards for intersections”, *Transportation Planning and Technology*, 22:4, 309-323
- Tollazzi, T. (2010). “New Geometric Type of at-grade Intersections: Turbo and Flower Roundabouts – Slovenian Guidelines and Experiences”, *SIIV Summer School 2010 – Trento*, setembro, Itália.
- 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., A. Bastos Silva, e Á.J.M. Seco (2013). “Capacity of normal and turbo-roundabouts – comparative analysis”, *proceedings of the Institution of Civil Engineers (ICE) – Transport*, 2013.
- Vasconcelos, A.L.P., A. Bastos Silva, e Á.J.M. Seco (2013). “Safety Analysis of Turbo-roundabouts using SSAM technique”, *CITTA 6<sup>th</sup> Annual Conference on Planning Research*.
- Vasconcelos, A.L.P., Neto, L., Á.J.M. Seco, A. Bastos Silva (2014) “ Validation of the SSAM Technique for the Assessment of Intersections Safety”, *93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, January, 12-16.
- Vasconcelos, A.L.P., Bastos Silva, A.M.C., Seco, Á.J.M., Fernandes, P. e Coelho M.C. (2014). “Turbo-roundabouts: A Multi-criteria Assessment on Intersection Capacity, Safety and Emissions”, *93<sup>a</sup> Conferência Anual do Transportation Research Board (TRB)*, Washington DC, USA.
- Vasconcelos A. (2014). “Avaliação do Desempenho Operacional de Rotundas: Modelos e Aplicações”- Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Julho, Coimbra, Portugal.
- Vieira Gomes, S., (2013). “The influence of the infrastructure characteristics in urban road accidents occurrence. *Accident Analysis & Prevention*”. Citado por Vasconcelos et al, (2013).
- Yperman, I. e Immers, L.H. (2003). “Capacity of a Turbo-Roundabout Determined by Micro-simulation”, in *proceedings 10th World Congress on ITS*. Department of Civil Engineering – *Transportation Planning and Highway Engineering*, Leuven, Bélgica.
- Zajíc, P. (2012). “Traffic Conflicts and Road Transport Safety - New Development”, *Number 4, Volume VII*, December.

Sites consultados:

Google@2014 – Site oficial do Google. <https://maps.google.pt/>

UFSC@2014 – Site oficial da Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Transportes e Logística, Brasil. <http://www.labtrans.ufsc.br/pt-br/projetos/engenharia-de-trafego/microsimulacao/>

## ANEXO

Período 7:00-7:45

O/D	A1	A2	A4	B2	B4	C2	C3	C4	D
A1	0	7	4	8	5	20	24	4	0
A2	10	0	1	1	0	1	2	0	0
A4	4	2	0	0	0	1	1	0	0
B2	14	1	0	0	1	1	2	0	0
B4	13	1	0	3	0	1	1	0	0
C2	34	2	1	1	0	0	4	6	0
C3	162	7	4	5	1	14	0	5	1
C4	8	0	0	0	0	23	0	0	0
D	2	0	0	0	0	0	0	0	0

Período 7:45-8:00

O/D	A1	A2	A4	B2	B4	C2	C3	C4	D
A1	0	11	5	9	2	30	39	9	0
A2	13	0	3	0	0	1	2	0	0
A4	4	8	0	1	0	2	2	1	0
B2	14	1	0	0	1	2	3	1	0
B4	25	2	0	5	0	1	2	0	0
C2	67	5	1	7	0	0	3	13	0
C3	167	12	3	18	1	15	0	5	0
C4	12	1	0	1	0	18	7	0	0
D	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Período 8:00-8:15

O/D	A1	A2	A4	B2	B4	C2	C3	C4	D
A1	0	16	1	23	6	65	33	5	0
A2	23	0	4	3	1	8	4	1	0
A4	2	7	0	2	0	5	2	0	0
B2	22	4	1	0	0	5	3	0	0
B4	21	4	1	9	0	3	1	0	0
C2	80	14	3	6	0	0	3	21	0
C3	167	29	7	13	0	18	0	4	0
C4	9	2	0	1	0	29	6	0	0
D	2	0	0	0	0	0	0	0	0

Período 8:30-8:45

O/D	A1	A2	A4	B2	B4	C2	C3	C4	D
A1	0	28	13	67	8	83	80	11	0
A2	38	0	7	10	1	12	12	2	0
A4	3	8	0	2	0	3	3	0	0
B2	32	8	1	0	5	6	5	1	0
B4	17	4	0	11	0	1	1	0	0
C2	100	26	2	13	0	0	5	16	1
C3	157	41	3	21	0	13	0	15	1
C4	14	4	0	2	0	25	7	0	0
D	4	1	0	0	0	0	0	0	0

Período 8:45-9:00

O/D	A1	A2	A4	B2	B4	C2	C3	C4	D
A1	0	53	13	49	5	62	58	11	0
A2	41	0	4	9	1	12	11	2	0
A4	2	11	0	3	0	3	3	1	0
B2	26	3	1	0	1	4	4	1	0
B4	24	3	1	12	0	1	1	0	0
C2	85	10	2	6	0	0	11	33	0
C3	158	18	3	12	1	24	0	8	0
C4	20	2	0	1	0	29	11	0	0
D	4	1	0	0	0	0	0	0	0

Período 9:00-9:15

O/D	A1	A2	A4	B2	B4	C2	C3	C4	D
A1	0	31	8	62	10	87	75	13	0
A2	27	0	9	11	2	16	14	2	0
A4	2	13	0	2	0	3	3	0	0
B2	25	2	2	0	3	6	5	1	0
B4	23	2	2	12	0	2	2	0	0
C2	94	8	6	7	0	0	10	18	1
C3	146	12	10	11	0	22	0	12	1
C4	15	1	1	1	0	21	6	0	0
D	3	0	0	0	0	0	0	0	0

Período 9:15-9:30

O/D	A1	A2	A4	B2	B4	C2	C3	C4	D
A1	0	210	2	5	1	13	9	1	0
A2	19	0	12	4	1	10	7	1	0
A4	2	6	0	2	0	5	3	0	0
B2	20	2	1	0	2	7	5	1	0
B4	19	2	1	7	0	2	1	0	0
C2	66	6	3	3	0	0	11	23	1
C3	106	10	5	5	0	10	0	10	1
C4	14	1	1	1	0	22	7	0	0
D	7	1	0	0	0	0	0	0	0

Anexo – Matrizes O/D para veículos ligeiros