



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

Avaliação do Desempenho de um Corredor de Turbo-rotundas – Capacidade e Impactes Ambientais

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

Autor

Pedro Carvalho Mariano

Orientador

Professora Doutora Ana Maria César Bastos Silva

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

Coimbra, Janeiro, 2014

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus pais que, com grande esforço e dedicação, me proporcionaram as condições necessárias para poder estudar no ensino superior, dando-me liberdade e confiando na minha responsabilidade para gerir este percurso de grande crescimento e aprendizagem para a minha vida futura. Aos meus irmãos que sempre me deram o seu apoio. A todos os meus familiares que, de forma directa ou indirecta, me ajudaram ao longo desta fase da minha vida.

À professora Doutora Ana Bastos que, como orientadora desta dissertação, demonstrou grande preocupação e disponibilidade para me apoiar na realização deste trabalho, dando-me igualmente importantes conselhos e sugestões.

Aos investigadores Luís Neto, Sílvia Santos e Rui Garrido, pela sua participação durante as sessões de recolha de dados e pela ajuda prestada com os programas necessários à realização da presente dissertação.

A todos os meus amigos que conheci durante o meu percurso académico e que me acompanharam nesta fase muito importante da minha vida, com os quais também aprendi bastante, sendo que de diferentes formas também contribuíram para a concretização deste trabalho.

Por fim, um muito especial agradecimento aos meus grandes amigos da residência universitária João Jacinto, os quais considero como uma segunda família, tendo estado presentes na minha vida ao longo dos últimos 5 anos, aturando-me nos momentos mais difíceis e festejando comigo em momentos de pura descontração e diversão.

RESUMO

O conceito de turbo-rotunda surgiu recentemente na Holanda através do investigador Lambertus Fortuijn, da Universidade de Delft, enquanto solução alternativa às rotundas convencionais com múltiplas vias, com o objectivo de resolver os problemas de segurança associados aos movimentos de entrecruzamento na zona de negociação e atravessamento das rotundas convencionais.

A principal característica das turbo-rotundas é a introdução de elementos de delimitação física entre vias para definição de circuitos em espiral que garantem a devida canalização dos veículos de forma continua desde a entrada à saída pretendida. Evidenciam assim duas grandes potencialidades comparativamente às rotundas convencionais: (i), diminuição do número de pontos de conflito gerados pelos entrecruzamentos no anel de circulação e, (ii) aumento do nível de deflexão imposto pelos elementos físicos de canalização, o que traduz numa redução de velocidade e no aumento significativo de segurança.

Dentro da comunidade científica existe um consenso generalizado relativo ao aumento da segurança rodoviária com a transformação de uma rotunda convencional de duas vias numa turbo-rotunda, mas o mesmo não acontece relativamente aos seus efeitos na capacidade, havendo mesmo alguns autores que afirmam uma pequena redução de capacidade, principalmente nos ramos sujeitos a maiores volumes de tráfego.

Neste sentido, esta tese centra-se na avaliação do desempenho da solução turbo-rotunda, quando aplicada em corredor, comparativamente a uma rotunda normal de duas vias, sendo que a análise incidiu em dois níveis fundamentais: capacidade e impactes ambientais. O trabalho foi suportado pela aplicação de técnicas de microsimulação do *software* AIMSUN, e pela construção de um modelo baseado numa situação real depois de devidamente calibrado e validado.

Foi possível concluir que o nível de desempenho das turbo-rotundas é fortemente condicionado pela carga de tráfego afetado à rede, perdendo desempenho de forma acentuada quando atingidas as condições de saturação. A solução mostrou-se ainda particularmente sensível à repartição do tráfego, tanto ao nível das entradas como do corredor. Em termos gerais, foi ainda possível concluir que os indicadores ambientais, seguem de perto o andamento dos indicadores caracterizadores da capacidade.

ABSTRACT

The concept of turbo-roundabout has recently emerged in the Netherlands by a researcher of the University of Delft, named Lambertus Fortuijn, as an alternative solution to conventional roundabouts with multiple lanes, in order to solve the security problems associated with weaving movements on negotiation and crossing zones of conventional roundabouts.

The main characteristic of turbo-roundabouts is the introduction of physical raised splitters to define spiral lines that ensure vehicle channeling continuously from the entrance to the desired exit. Turbo-roundabouts thus show two major potentialities compared to conventional roundabouts: (i) reduction of conflict points generated by waving maneuvers in the circulation ring, and (ii) increasing of the deflection level imposed by physical channeling elements, which leads to speed reduction and significant increase on road safety.

Within the scientific community there is widespread consensus on a sharp increase road safety with the transformation of a conventional two-way roundabout in a turbo-roundabout, but the same is not true for their effects on capacity, as there are some authors who claim a small reduction in capacity, especially in branches with higher traffic volume.

In this sense, the thesis proposal is based on the evaluation of the performance of a turbo-roundabout compared to a normal two-way roundabout, when applied in corridor, as the analysis focused on two main levels: capacity and environmental impacts. The work was supported by microsimulation techniques, using the software AIMSUN, and by developing a virtual model based on a real case, once properly calibrated and validated.

It was possible to conclude that the performance of turbo-roundabouts is strongly influenced by the traffic load on the network, as there is a sharp degradation of their performance at saturation levels. This solution proved to be particularly sensitive to traffic distribution, both in the entrances and on the corridor. Generally, it was even possible to conclude that environmental indicators results are similar to capacity results.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento do tema	1
1.2 Estrutura da dissertação	3
2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	4
2.1 Origem do conceito de rotunda.....	4
2.2 Evolução do Conceito.....	5
2.2.1 Das rotundas antigas às rotundas contemporâneas.....	5
2.2.2 Rotundas com múltiplas vias – o problema	7
2.3 A turbo-rotunda.....	9
2.3.1 O conceito	9
2.3.2 Modo de funcionamento	10
2.3.2 Domínio de aplicação e tipologias	12
2.4 Os níveis de desempenho	14
2.4.1 Segurança Rodoviária	14
2.4.2 Capacidade	16
2.4.3 Impactes Ambientais	23
2.5 Considerações finais.....	25
3 CONSTRUÇÃO DOS MODELOS DE MICROSSIMULAÇÃO	26
3.1 Introdução	26
3.2 Metodologia	27
3.3 Selecção do local.....	28
3.4 Construção do modelo	28
3.4.1 Recolha de dados de tráfego	29
3.4.2 Tratamento dos dados	31
3.4.3 Avaliação do nível de funcionamento da rede	32
3.4.4 Codificação da rede	33
3.5 Calibração e validação do modelo	34
3.5.1 Calibração	34
3.5.2 Calibração do modelo matemático de escolha de rota	36
3.5.3 Validação	39
3.6 Definição dos cenários a estudar.....	39
4 Avaliação do desempenho de um corredor de turbo-rotundas	42

4.2.1 Condições saturadas	45
4.2.1.1 Desempenho em termos de Capacidade.....	46
4.2.1.2 Desempenho em termos de Impactes ambientais	51
4.2.1.3 Considerações sobre os resultados.....	56
4.2.2 Condições não saturadas	57
4.2.2.1 Efeito do carregamento da Rede.....	57
4.2.2.2 Efeito da repartição direccional – condições não saturadas.....	60
4.2.2.2.1 Em termos de capacidade	60
4.2.2.2.2 Impactes ambientais	63
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	66
5.1 Conclusões	66
5.2 Trabalhos futuros	69
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
ANEXO	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Rotunda Marquês de Pombal, 1930. (ruasdelisboacomhistoria @2014)	4
Figura 2.2 – Comparação dos pontos de conflito entre um cruzamento de nível e uma rotunda com uma via de circulação (Bastos Silva e Seco, 2008)	6
Figura 2.3 – Pontos de conflito em rotundas com duas vias de circulação: a) comportamentos correctos; b) comportamentos erráticos. (Bastos Silva et al, 2011)	8
Figura 2.4 – Conflitos mais comuns observados em rotundas com múltiplas vias de circulação (Bastos Silva, 2004)	8
Figura 2.5 – Exemplos de uma turbo-rotundas (Google@2014)	10
Figura 2.6 – Manobra de um veículo pesado sobre o delimitador (Fortuijn, 2003)	11
Figura 2.7 – Pontos de conflito: a) rotunda convencional de 2 vias; b) turbo-rotunda. (Bastos Silva et al, 2013)	11
Figura 2.8 – Diferentes <i>layouts</i> de turbo-rotunda: a) “oval”; b) “knee”; c) “spiral”; d) “rotor”. (Bastos Silva et al, 2011)	13
Figura 2.9 – Características geométricas das rotundas avaliadas (Yperman e Immers, 2003)	17
Figura 2.10 – Soluções comparadas: a) rotunda convencional de 2 vias; b) turbo-rotunda. (Mauro e Branco, 2010)	18
Figura 2.11 – Comparação entre a capacidade das entradas da rotunda convencional de duas vias e a turbo-rotunda (Fortuijn, 2011)	19
Figura 2.12 – Capacidade de cada por via de entrada das três soluções (Fortuijn, 2011)	20
Figura 2.13 – Comparação da capacidade global entre a turbo-rotunda e a rotunda convencional de duas vias (Bastos Silva et al, 2011)	22
Figura 3.1 – Corredor de rotundas em estudo (Google@2014)	28
Figura 3.2 – Simbologia associada à codificação da rede	29
Figura 3.3 – Postos de contagem e respectivos movimentos observados	30
Figura 3.4 – Postos de recolha direcional do tráfego	31
Figura 3.5 – Representação da codificação da rede atual desenvolvida no AIMSUN	33
Figura 3.6 – Codificação das rotundas convencionais (em cima) e das turbo-rotundas (em baixo)	34
Figura 3.7 – Valores adoptados no menu de atribuição dinâmica de tráfego do AIMSUN	37

Figura 4.1 – Parâmetros base relativos ao consumo definidos para a classe de veículo “car” (TSS, 2012)	43
Figura 4.2 – Dados de entrada para estimação das emissões poluentes recorrendo ao modelo QUARTET (TSS, 2012).	44
Figura 4.3 – Dados de entrada das emissões de CO ₂ definidos pelo modelo Panis et al.	44
Figura 4.4 – Evolução dos indicadores de capacidade com o aumento da procura global: a) demoras; b) filas de espera; c) tempos médios de percurso.	46
Figura 4.5 – Demoras obtidas (s/km/veíc.)	47
Figura 4. 6 – Comprimento das filas de espera (veíc.)	47
Figura 4.7 – Tempos médios de percurso (s/veíc.)	47
Figura 4.8 – Comparação das condições de circulação da rotunda C, em ambos os modelos de microsimulação, para o cenário C15.	48
Figura 4.9 – Demoras nos dois modelos de microsimulação para os cenários C16 a C27	50
Figura 4.10 – Evolução do consumo de combustível com o aumento da procura global	52
Figura 4.11 – Evolução das emissões globais de CO, HC e NOx com o aumento da procura	52
Figura 4.12 – Emissões dos poluentes globais: a) CO ₂ ; b) PM	53
Figura 4.13 – Níveis de consumo das duas soluções para os cenários C1 a C15	53
Figura 4.14 – Emissões de CO para os cenários C1 a C15 (kg)	54
Figura 4.15 – Emissões de HC para os cenários C1 a C15 (kg)	54
Figura 4.16 – Emissões de NOx para os cenários C1 a C15 (kg)	54
Figura 4.17 – Emissões de CO ₂ para os cenários C1 a C15 (g/veíc./km)	55
Figura 4.18 – Emissões de PM para os cenários C1 a C15 (g/veíc./km)	55
Figura 4.19 – Evolução dos indicadores de capacidade com o aumento da procura: a) demoras; b) filas de espera; c) tempos médios de percurso	58
Figura 4.20 – Evolução do consumo de combustível com o aumento da procura global	58
Figura 4.21– Evolução das emissões de CO, HC e NOx com o aumento da procura global	59
Figura 4.22 – Evolução das emissões de CO ₂ (a) e PM (b) com o aumento da procura	59
Figura 4.23 – Demoras (s/km/veíc.)	61
Figura 4.24 – Filas de espera (veíc.)	61
Figura 4.25 – Tempos de percurso (s/veíc)	61
Figura 4.26 – Evolução das demoras nos cenários C16 a C27	62
Figura 4.27 – Evolução dos tempos médios de percurso nos cenários C16 a C27	62
Figura 4.28 – Consumo de combustível (l/veículo)	63
Figura 4.29 – Emissões de CO (kg)	64
Figura 4.30 – Emissões de HC (kg)	64

Figura 4.31 – Emissões de NOx (kg)	64
Figura 4.32 – Emissões de CO ₂ (g/veíc/km)	64
Figura 4.33 – Emissões de PM (g/veíc/km)	65

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Resultados do número de conflitos e velocidades médias relativas (Vasconcelos et al, 2014)	16
Quadro 2.2 – Capacidade máxima das rotundas convencionais de duas vias e das turbo-rotundas (Engelsman e Uken, 2007)	18
Quadro 2.3 – Cenários analisados (via secundária) e variação diferencial de capacidade (Bastos Silva et al, 2011).	21
Quadro 2.4 – Variação das emissões por tipo de rotunda em relação à rotunda convencional de uma via para todos os cenários de procura (Vasconcelos et al, 2014)	24
Quadro 3.1 – Matriz O/D de veículos ligeiros, no período 8:15-8:30	32
Quadro 3.2 – Volumes de tráfego na rede em cada período de 15min	32
Quadro 3.3 – Taxas de saturação nas entradas principais das rotundas A e B (8:15-8:30)	32
Quadro 3.4 – Parâmetros da distribuição de Velocidades	35
Quadro 3.5 – Parâmetros de calibração do modelo de atribuição dinâmica de tráfego	38
Quadro 3.6 – Comparação dos tempos médios ao longo do corredor medidos no local com os obtidos no AIMSUN	39
Quadro 3.7 – Cenários associados aumento da procura global	40
Quadro 3.8 – Cenários de variação da repartição direccional	40
Quadro 4.1 – Relação entre os resultados dos cenários C16-C17 e os cenários C1-C14	51

SIMBOLOGIA

CO – Monóxido de carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

DCI – Diâmetro do círculo inscrito

HC – Hidrocarbonetos

Initial K-SPs – Parâmetro de calibração do modelo *Logit* incluído no *software* AIMSUN

NO_x – Óxido de Azoto

O/D – Origem destino

P_k – Probabilidade de escolha de um percurso alternativo k

PM – Matéria Particulada

t_k^i – Tempo de viagem previsto para o percurso k de um par O/D i

U_k^i – Utilidade de um percurso entre pares O/D i

Δt – Intervalo de tempo correspondente ao ciclo

ε_k^i – Termo aleatório da função de utilidade do modelo *Logit*

Θ – Factor de escala do modelo *Logit*

ABREVIATURAS

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

AROUND – Improving Capacity and Emission Models of Roundabouts

DEC – Departamento de Engenharia Civil

EMSURE – Energy and Mobility for Sustainable Regions

LIOS – Laboratório de Investigação Operacional e Simulação

SSAM – Surrogate Safety Assessment Model

SWOV – Institute for Road and Safety Research

TRL – Transportation Research Laboratory

VSP – Vehicle Specific Power

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do tema

Os benefícios das rotundas são amplamente conhecidos enquanto soluções rodoviárias, sendo habitualmente associadas a um modo de funcionamento simples, respondendo simultaneamente a múltiplas funções, designadamente de acalmia de tráfego, de regulação do trânsito e de transição entre ambientes rodoviários distintos. Uma das principais vantagens das rotundas face aos cruzamentos prioritários de nível, e por ventura a principal razão para a sua grande difusão por todo o mundo, é o seu elevado desempenho ao nível da segurança rodoviária, com uma significativa redução do número de acidentes e, principalmente, a quase eliminação das fatalidades (FHWA, 2000; Brown, 1995).

No entanto, a necessidade de responder a elevados volumes de tráfego, tem justificado o recurso a soluções com múltiplas vias de modo a assegurar elevados níveis de capacidade e fluidez. Apesar destas soluções assegurarem um bom nível de desempenho geral, principalmente em termos de custo-benefício, as mesmas tendem a gerar problemas de segurança associados a comportamentos de risco dos condutores, e que frequentemente se traduzem em manobras de entrecruzamento, levando a um aumento do número de acidentes.

Este problema tem vindo a preocupar a comunidade técnica e científica, pelo que ao longo do tempo diversas soluções têm vindo a ser testadas, designadamente em termos de marcações rodoviárias. A turbo-rotunda surge assim na Holanda, no final do século XX, enquanto solução alternativa às rotundas convencionais de múltiplas vias, introduzindo circuitos em espiral no anel de circulação, delimitados por elementos físicos que visam impedir os entrecruzamentos e reduzir as velocidades de atravessamento. Após a sua implementação piloto, observaram-se 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 adoptarem esta nova solução a título piloto (referencia).

O sucesso desta nova solução tem merecido a atenção da comunidade científica, tendo sido já efectuados vários estudos sobre o seu desempenho (referencias). Embora as melhorias ao nível da segurança rodoviária sejam, na sua generalidade, consensuais, o mesmo não acontece

ao nível da capacidade, havendo autores que apontam para um aumento generalizado da capacidade, enquanto outros contestam estes resultados. Em termos de avaliação de impactes ambientais os resultados são ainda muito escassos. Deste modo, considera-se relevante a realização de trabalhos de investigação científica que permitam contribuir para um melhor conhecimento sobre o real desempenho das turbo-rotundas, num domínio alargado de aplicações, cenários de estudo, e numa perspectiva integrada de preocupações ambientais e de regulação do tráfego.

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.

Embora inicialmente, o objectivo da dissertação passasse pela avaliação do desempenho de uma turbo-rotunda aos diferentes níveis (capacidade, segurança e impactes ambientais), tendo como estudo de caso a rotunda do Choupal, em Coimbra, o mesmo teve de ser revisto. Esse estudo foi entretanto desenvolvido por Vasconcelos et al (2014), onde se comparou a rotunda de uma via referida com uma solução convencional de duas vias e uma turbo-rotunda, tendo por base os três níveis de desempenho mencionados. É ainda possível identificar a existência de outros estudos (Yperman e Immers, 2003; Engelsman e Uken, 2007; Mauro e Branco, 2010; Fortuijn, 2011; Bastos Silva et al, 2011; Vasconcelos et al, 2013) com o mesmo fim, mas todos numa perspectiva de aplicação isolada da solução. Neste sentido, achou-se pertinente alargar o objetivo do trabalho à aplicação 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.

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 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 capacidade e impactes ambientais.

Em Portugal ainda não existem turbo-rotundas construídas, não sendo por isso possível monitorizar o seu desempenho por recurso a estudos comparativos do tipo “antes e depois”, pelo que a simulação se afigura como a metodologia mais adequada para potenciar este tipo de avaliação. 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. Os modelos de microssimulação 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, aumento da procura global da rede e, por outro, variação na repartição direccional do tráfego nas entradas das rotundas.

1.2 Estrutura da dissertação

A estrutura da presente dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos.

No presente capítulo, 1, é feito um enquadramento geral do tema, sendo depois referidos a motivação e os objetivos que nortearam o trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma súpula da revisão da literatura, onde são apresentados alguns conceitos assim como os principais resultados de estudos sobre o tema. É apresentada a origem do conceito de rotunda, percorrendo algumas etapas da sua evolução até às soluções com múltiplas vias, apontando-se os problemas mais comuns associados ao seu funcionamento. Depois é apresentado o conceito de turbo-rotunda, referindo as características do seu modo de funcionamento, algumas vantagens e limitações, assim como o seu domínio de aplicabilidade. Por fim, referem-se vários estudos sobre o nível de desempenho geral das turbo-rotundas, designadamente ao nível da segurança, capacidade e impactes ambientais.

No capítulo 3 começa-se por mencionar a utilização de técnicas de microssimulação e a metodologia adoptada no estudo. Seguidamente são referidas todas as etapas inerentes à construção dos modelos de microssimulação, incluindo a selecção do local, as seções de recolha de dados, a codificação da rede e respetiva calibração e validação. Indicam-se também os cenários considerados no estudo.

No capítulo 4 são apresentados os resultados comparativos para os vários indicadores de desempenho das duas soluções, com base na análise aos vários cenários e diferentes períodos de estudo.

No capítulo 5 é feita uma síntese das principais conclusões, destacando os aspectos mais relevantes do estudo para ambas as soluções. Por fim, apresentam-se algumas considerações sobre possíveis trabalhos futuros.

2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

2.1 Origem do conceito de rotunda

As rotundas são instrumentos anteriores ao próprio veículo automóvel, tendo surgido como elementos arquitectónicos e decorativos que constituíam marcos nos locais imponentes das cidades.

Embora alguns autores (Thaweesak Taekratok, 1998; Brilon, 2011) refiram que o conceito surgiu no início do século XX com a construção da rotunda “*Columbus Circle*”, em Nova Iorque, a primeira aplicação, enquanto solução rodoviária, terá sido portuguesa através da construção das rotundas “Marquês de Pombal” (Figura 2.1), “Entre-Campos” e “Saldanha”, integradas nos planos de reformulação da cidade de Lisboa, no final do século XIX (1890) (Brown, 1995; Bastos Silva, 2004).



Figura 2.1 – Rotunda Marquês de Pombal, 1930. (ruasdelisboacomhistoria @2014)

As primeiras rotundas consistiam na imposição de movimentos giratórios com dois sentidos de circulação em volta do ilhéu central, que podiam ser bairros ou quarteirões (Bastos Silva, 2004). No entanto, devido aos conflitos inerentes a esse modelo de circulação, em 1906, o arquitecto francês, Eugéne Henárd, propôs o desenvolvimento da rotunda como um cruzamento de avenidas onde se circula em torno de uma ilha central (Bastos Silva e Seco, 2008) apenas com um único sentido de circulação no anel (Bastos Silva, 2004).

Algumas décadas mais tarde, foram construídas em Portugal as primeiras rotundas segundo os princípios de Hénard (Bastos Silva, 2012), sendo que a partir da década de 80 o conceito se expandiu em larga escala por todo o país (Bastos Silva, 2004). Actualmente existirão alguns milhares de exemplos por toda a infra-estrutura rodoviária portuguesa.

2.2 Evolução do Conceito

As características geométricas das rotundas, assim como os princípios de circulação nas mesmas, têm sofrido alterações ao longo dos tempos, em parte devido aos problemas de segurança rodoviária registados nas antigas rotundas e também devido ao aumento das exigências ao nível da capacidade.

2.2.1 Das rotundas antigas às rotundas contemporâneas

As rotundas na origem do conceito eram caracterizadas por soluções de grande dimensão que integravam trechos para entrecruzamento entre as várias correntes de tráfego, entre cada entrada e a saída consecutiva. Por outro lado, a regra de prioridade estabelecida privilegiava o tráfego que se apresentava pela direita, ou seja, nos movimentos de entrada (Fortuijn, 2003).

O aumento dos níveis de procura de tráfego e o conseqüente aumento dos movimentos de entrecruzamento refletiu-se na criação de inúmeros conflitos, culminando frequentemente em acidentes. Ao mesmo tempo a regra de prioridade à direita, traduzia-se em constantes paragens das correntes no interior do anel para cedência de prioridade ao tráfego de entrada, gerando congestionamentos, particularmente nas horas de ponta. Em resposta a este problema, surge a construção de rotundas de grandes dimensões, as quais se traduziram na prática de velocidades elevadas, levando a um aumento dos acidentes graves, particularmente os que envolviam pedestres e ciclistas (Fortuijn, 2003).

Atendendo aos problemas referidos, foi necessário repensar o funcionamento deste tipo de intersecção rodoviária. Surgiram assim as rotundas contemporâneas (ou convencionais), que diferiam das suas antecessoras nos seguintes aspetos:

- A prioridade de circulação foi dada ao tráfego que circula no anel;
- A interacção entre as correntes de tráfego assentou em baixas velocidades de circulação;
- As vias das entradas intersectam o anel com um ângulo de 90 graus, garantindo a prática de velocidades reduzidas. (Fortuijn, 2003 e 2007)

Segundo Fortuijn (2003), a alteração da regra de prioridade traduziu-se num aumento da fluidez de circulação e numa diminuição dos atrasos, ao mesmo tempo que permitiu diminuir a área de implantação.

O mesmo autor defende que, quando as intersecções compreendem ângulos rectos, os pontos de conflito são mais facilmente reconhecidos entre os vários utilizadores da estrada (Fortuijn, 2003). O objectivo é os condutores terem a percepção clara de que vão atravessar um local que deve ser negociado com velocidades reduzidas, sendo assim possível conciliar elevados níveis de capacidade com bons níveis de segurança rodoviária (Fortuijn, 2009).

A imposição de entradas próximas de 90 graus não se revelou contudo consensual, assumindo maioritariamente maior expressão na Holanda e na Alemanha (este último com aplicações em meio urbano). O principal problema deste tipo de solução prende-se com o facto da deflexão de movimentos junto das entradas ser muito acentuada, pelo que haverá maior probabilidade de ocorrerem colisões próximas de 90 graus entre os veículos, podendo resultar num maior número de acidentes graves.

As rotundas, quando comparadas aos cruzamentos prioritários de nível, apresentam diversas vantagens, aliadas a um funcionamento simples e facilmente interpretável por parte dos condutores. São amplamente reconhecidas por serem muito boas soluções em termos de custo-benefício, garantindo bons níveis de fluidez e capacidade, para além de serem extremamente seguras. (Bastos Silva e Seco, 2008; Brilon, 2011).

Este tipo de geometrias resultou em elevados níveis de desempenho, refletindo-se numa redução superior a 95% no número de fatalidades (FHWA, 2000; Brown, 1995), sendo esta, porventura, uma das grandes razões para a difusão de rotundas um pouco por todo o mundo nas décadas de 60 e 70 (Bastos Silva et al, 2011). As significativas melhorias ao nível da segurança rodoviária estão maioritariamente associadas à redução do número de pontos de conflito, face aos cruzamentos prioritários, e à diminuição das velocidades praticadas. Uma rotunda com uma via de circulação reduz o número de pontos de conflito de 32 para apenas 8 (ver Figura 2.2).

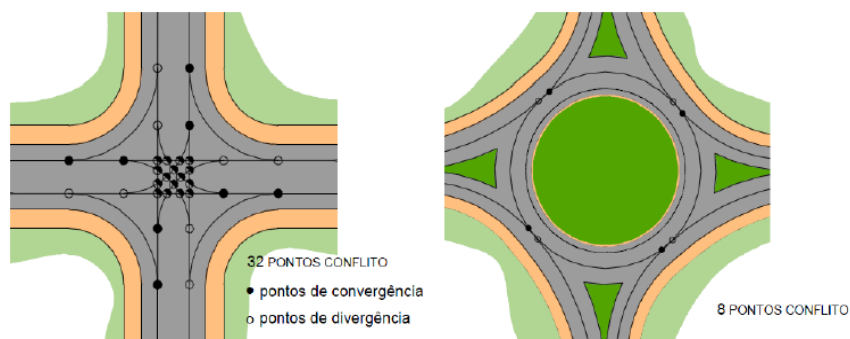


Figura 2.2 – Comparação dos pontos de conflito entre um cruzamento de nível e uma rotunda com uma via de circulação (Bastos Silva e Seco, 2008)

Com um vasto domínio de aplicações, as rotundas apresentam excelentes desempenhos tanto em meio urbano como interurbano (FHWA, 2000; DfT, 1993), podendo assegurar funções de acalmia de tráfego, de regulação do trânsito e de demarcação de zonas de transição (Bastos Silva e Seco, 2008). Asseguram igualmente bons níveis de funcionamento para uma gama alargada de fluxos e velocidades de aproximação (Fortuijn, 2011), e acrescentam flexibilidade ao funcionamento do sistema viário, pois permitem fáceis inversões de marcha (Bastos Silva e Seco, 2004).

Outros benefícios frequentemente apontados são os potenciais arranjos paisagísticos da ilha central, que contribuem para a requalificação dos espaços envolventes (Bastos Silva, 2012), com grande aceitabilidade por parte dos cidadãos e decisores políticos (Brilon, 2011).

Contudo, este tipo de soluções apresenta igualmente alguns problemas de funcionamento os quais se têm vindo a agravar com a procura de soluções que respondam a elevados níveis de capacidade e fluidez.

2.2.2 Rotundas com múltiplas vias – o problema

O uso da solução rotunda em meio urbano e os crescentes níveis de tráfego foram, ao longo do tempo, justificando a procura de soluções capazes de assegurar níveis elevados de fluidez, por vezes, em detrimento dos níveis de segurança. As soluções com múltiplas vias têm vindo a ser apontadas como soluções eficientes, assegurando níveis de desempenho elevados a baixo custo. Apesar disso, estas soluções têm vindo a evidenciar alguns problemas de funcionamento, principalmente relacionados com a segurança (Brilon, 2005) e que tendem a ser mais graves quanto maior for o número de vias na rotunda (Bastos Silva et al, 2011). Estes problemas devem-se sobretudo à adoção de comportamentos erráticos por parte dos condutores que se traduzem em manobras de entrecruzamento e atravessamento do anel, associadas a “invasões sistemáticas” das vias contíguas. Tais manobras resultam, por vezes, em acidentes, ainda que de pouca gravidade na sua generalidade (Bastos Silva et al, 2011).

Fortuijn (2009) refere que “as rotundas convencionais com múltiplas vias reintroduziram um dos grandes problemas das rotundas antigas, que se prende com a necessidade de mudança de via em curva, por parte dos veículos que circulam na via interior do anel, junto das saídas”.

Enquanto que numa rotunda de uma via, o aumento do percurso dos veículos em curva reduz a velocidade relativa entre os veículos, levando a uma diminuição dos acidentes entre os que circulam e os que pretendem sair (FHWA, 2000), nas rotundas convencionais com múltiplas vias, quanto maior for esse comprimento em curva, maior o “atrito lateral” entre correntes de tráfego adjacentes, potenciando-se a ocorrência de colisões laterais (Fortuijn, 2003 e 2009).

Uma rotunda convencional de duas vias contabiliza 24 pontos de conflito, ou seja, o triplo dos da rotunda com uma via de circulação, podendo mesmo subir para 32 no caso de se considerar a prática de comportamentos de risco (Bastos Silva et al, 2011), tal como consta na Figura 2.3.

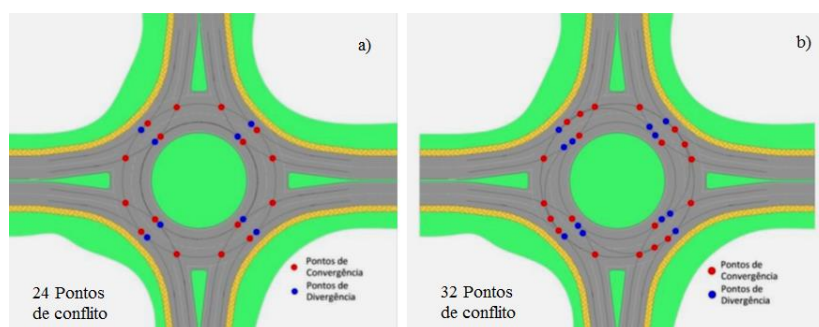


Figura 2.3 – Pontos de conflito em rotundas com duas vias de circulação: a) comportamentos correctos; b) comportamentos erráticos. (Bastos Silva et al, 2011)

Trabalhos de investigação desenvolvidos por Bastos Silva (1997 e 2004), nos quais se estudou a prática de comportamentos de risco e as trajectórias adoptadas pelos condutores nas vias de circulação, em rotundas portuguesas de duas vias, permitiram concluir que:

- Cerca de 40% dos condutores que circulam pela via da direita tendem a cortar directamente a via da esquerda na zona de atravessamento do anel (com vista a obter trajectórias directas e confortáveis);
- Mais de 20% dos condutores que optam pela via da esquerda, nas imediações da entrada, decidem sair do anel através da via da direita (minimizando assim o seu incómodo de condução).

Este estudo veio confirmar que os condutores tendem frequentemente a adoptar trajectórias directas ou que minimizem o incómodo de condução (ver Figura 2.4_a).

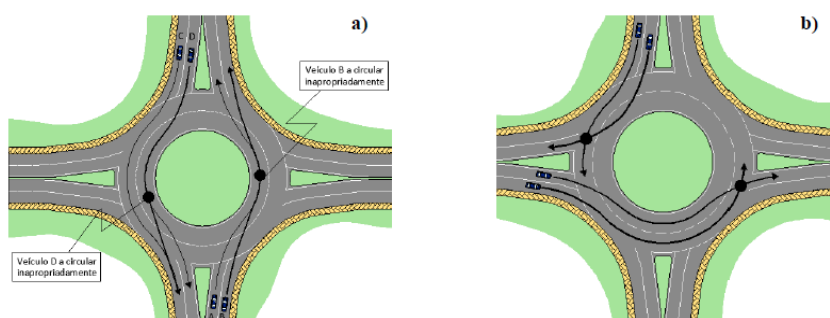


Figura 2.4 – Conflitos mais comuns observados em rotundas com múltiplas vias de circulação (Bastos Silva, 2004)

A agravar, em determinados países, como é o caso de Portugal, a falta de enquadramento legal que defina especificamente os procedimentos comportamentais a adoptar pelo condutor, quando circula numa rotunda, está igualmente na base da geração de um conjunto alargado de entrecruzamentos, os quais geram frequentemente acidentes, designadamente nas zonas das saídas (ver Figura 2.4_b).

Outros problemas ainda devem-se à dificuldade acrescida de garantir uma deflexão de movimentos adequada em soluções com múltiplas vias, onde é necessário salvaguardar larguras elevadas no anel de circulação (Bastos Silva et al, 2011), a deficiências de sinalização (principalmente de pré-sinalização), que dificultam uma escolha atempada da via mais adequada ao destino pretendido e à existência de soluções geometricamente mal concebidas que potenciam velocidades elevadas de atravessamento (Bastos Silva, 2012).

Para evitar os problemas decorrentes das soluções de múltiplas vias, alguns países como a França, Alemanha e Suíça têm vindo a restringir fortemente a aplicação destas soluções, enquanto a Inglaterra e a Austrália procuraram incorporar ilhéus complementares, fisicamente materializados, junto entradas, para assegurar maior deflexão e menores velocidades. Apesar da implementação destas medidas, acompanhadas por um enquadramento legal adequado, os acidentes nas rotundas continuam a ser comuns, embora de pouca gravidade, pelo que o estudo de soluções alternativas tem merecido o interesse da comunidade científica (Bastos Silva et al, 2011 e 2013).

2.3 A turbo-rotunda

2.3.1 O conceito

O conceito de turbo-rotunda surgiu em 1996, através do investigador Lambertus Fortuijn, da universidade de Delft (Holanda), enquanto solução alternativa às rotundas convencionais de múltiplas vias, com vista à resolução dos conflitos associados aos movimentos de entrecruzamento e atravessamento na zona de negociação.

O objectivo foi o de conceber um novo tipo de rotunda com níveis de capacidade semelhantes à rotunda convencional de duas vias e ao mesmo tempo muito segura, assente nos seguintes princípios das rotundas de uma via: (i) eliminação das manobras de entrecruzamentos, com a diminuição dos pontos de conflito e, (ii) salvaguarda de velocidades reduzidas (Fortuijn, 2003). Mantiveram-se igualmente algumas regras de desenho aplicadas às rotundas compactas holandesas, designadamente os ângulos rectos entre as vias de aproximação e a rotunda, e a superfície transponível no ilhéu central dimensionada para facilitar as manobras dos veículos longos (Fortuijn, 2009).

2.3.2 Modo de funcionamento

A turbo-rotunda constitui um novo formato de rotunda, com a definição de circuitos em espiral, e apresenta como característica inovadora a introdução de elementos físicos de delimitação, entre as vias de circulação, que asseguram a canalização dos veículos, de uma forma contínua, desde a entrada à saída pretendida, prevenindo assim o risco de colisões laterais (Fortuijn, 2007). O formato em espiral das vias no anel visa garantir níveis de deflexão adequados e, ao mesmo tempo, baixas velocidades de circulação (Bastos Silva et al, 2011).

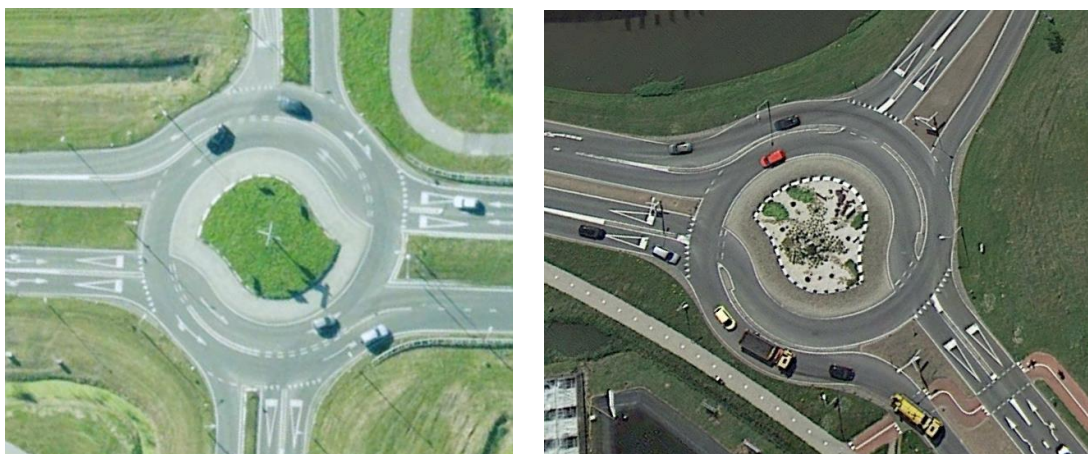


Figura 2.5 – Exemplos de uma turbo-rotundas (Google@2014)

Ao nível da concepção, as características específicas da turbo-rotunda são as seguintes (Fortuijn, 2009):

- A segunda via no anel é inserida opostamente a, no mínimo, uma via de entrada;
- O tráfego de entrada terá de ceder a prioridade de passagem a um máximo de duas vias;
- Cada segmento de entrada disponibiliza um trecho onde os condutores podem optar por sair ou continuar a circular na rotunda;
- No mínimo duas entradas são compostas por duas vias;
- O diâmetro da rotunda é reduzido.

Outra característica importante é a resposta eficaz às exigências de operacionalidade dos veículos pesados, uma vez que os delimitadores físicos no anel são compostos por lancis galgáveis e o ilhéu central inclui uma orla transponível (Bastos Silva et al, 2011). Por sua vez, estes elementos são suficientemente elevados para desincentivar o atravessamento de veículos ligeiros (Fortuijn, 2009) – ver Figura 2.6.



Figura 2.6 – Manobra de um veículo pesado sobre o delimitador (Fortuijn, 2003)

Identificam-se os seguintes benefícios da turbo-rotunda (Fortuijn, 2003; Giuffrè et al, 2009):

- Eliminação da necessidade de mudança de via junto das saídas;
- Redução do número de pontos de conflito para 14 (2 vias de circulação);
- Sinalização e marcações mais eficazes que auxiliam os condutores na escolha da via de entrada;
- As velocidades reduzidas promovem a segurança de pedestres e ciclistas;
- Minimização do risco de colisões laterais.

A Figura 2.7 mostra a visível redução dos pontos de conflito em comparação com a rotunda convencional de duas vias, indicando uma redução global na probabilidade de ocorrência de acidentes. No entanto, alguns dos conflitos da turbo-rotunda são passíveis de ter maior severidade, devido ao aumento dos ângulos de impacto e também devido a uma maior concentração de tráfego na via exterior do anel (Bastos Silva et al, 2013).

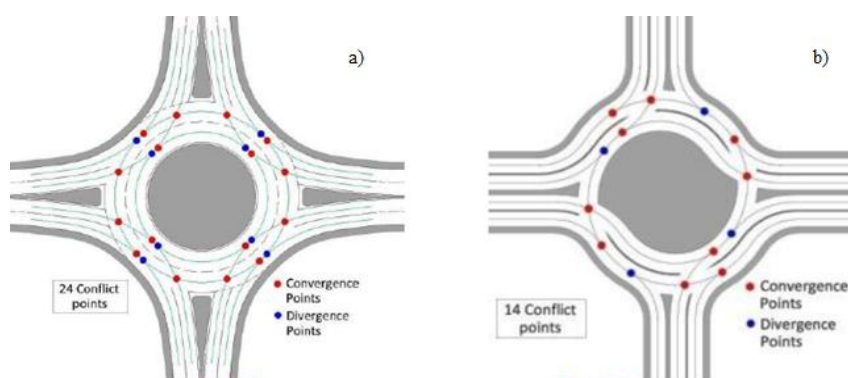


Figura 2.7 – Pontos de conflito: a) rotunda convencional de 2 vias; b) turbo-rotunda. (Bastos Silva et al, 2013)

O conceito teve a sua primeira aplicação prática em 2000, na Holanda, tendo sido posteriormente o exemplo seguido pela Polónia, e mais recentemente pela Alemanha (Brilon

2005), Itália, Finlândia, Noruega e Eslovénia (Tollazzi et al, 2010), onde estão a decorrer experiências a título piloto (Bastos Silva et al. 2011). Até ao ano de 2013, já existiam mais de 190 turbo-rotundas na Holanda (Bastos Silva et al, 2013) e inclusivamente já foram desenvolvidas normas de apoio à sua concepção (editadas em Abril de 2008). Entretanto, a administração central holandesa aboliu a construção de rotundas tradicionais com múltiplas vias, substituindo-as por turbo-rotundas (Fortuijn, 2009).

2.3.2 Domínio de aplicação e tipologias

O domínio de aplicabilidade das turbo-rotundas é bastante alargado, pois à semelhança das rotundas normais com múltiplas vias, adaptam-se facilmente tanto a meios urbanos como interurbanos, e são igualmente aplicáveis na delimitação de diferentes ambientes rodoviários. A sua utilização deve privilegiar os locais sujeitos a grandes níveis de procura, mas onde os critérios de segurança se sobrepõem aos de capacidade (Bastos Silva et al, 2011).

São apropriadas na transformação de rotundas convencionais com duas vias, frequentemente sujeitas a níveis mais elevados de sinistralidade, em consequência dos comportamentos erráticos, havendo portanto a necessidade de se garantir maiores níveis de segurança (Bastos Silva et al, 2011; Corriere e Guerrieri, 2012), tendo ainda maior importância na presença constante de tráfego não motorizado (Fortuijn, 2003).

Através das experiências desenvolvidas na Eslovénia, concluiu-se que a sua aplicação é mais apropriada fora dos ambientes urbanos, onde é mais comum haver uma clara hierarquia viária (uma via principal e outra secundária), no que diz respeito ao fluxo de tráfego (Tollazzi, 2010). Refere-se ainda que a turbo-rotunda tem bom desempenho tanto na presença de baixas como elevadas percentagens de ciclistas e pedestres (Tollazzi et al, 2012).

Originalmente, a turbo-rotunda foi desenvolvida para situações de tráfego típicas de estradas nacionais/regionais sujeitas a volumes de tráfego moderado a alto, que intersectam vias secundárias com volume de tráfego reduzido (Engelsman e Uken, 2007). Entretanto, várias versões foram desenvolvidas, sendo que cada *layout* foi concebido para responder especificamente a diferentes repartições de tráfego (Engelsman e Uken, 2007; Bastos Silva et al, 2011).

Existem essencialmente quatro tipologias diferentes de turbo-rotundas (ver Figura 2.8) Os diferentes formatos variam consoante o número de ramos (três ou quatro) e o número de vias de entrada ou saída (Fortuijn, 2009), decorrendo dos mais comuns vários outros *layouts*. O principal factor para a escolha do *layout* é direcção do fluxo de tráfego dominante (Tollazzi, 2010; Bastos Silva et al, 2011).

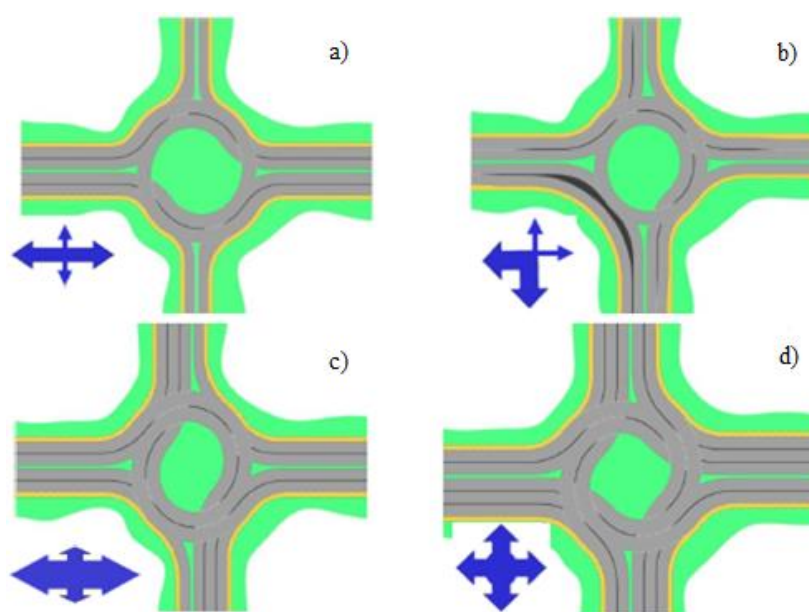


Figura 2.8 – Diferentes *layouts* de turbo-rotunda: a) “oval”; b) “knee”; c) “spiral”; d) “rotor”. (Bastos Silva et al, 2011)

O *layout* “oval” (Figura 2.8_a) foi o primeiro formato de turbo-rotunda a ser concebido e é igualmente o mais aplicado. É a solução mais adequada na presença de vias com hierarquias distintas, onde uma é sujeita a maiores níveis de tráfego (Bastos Silva et al, 2011). O formato “standard” de turbo-rotunda não é mais que uma extensão da solução referida, na qual é acrescentada uma segunda via de entrada nos ramos secundários para aumento de capacidade (Fortuijn 2007). Este *layout* é definido de modo a minimizar os conflitos entre a via principal e as vias do anel de circulação, e é apropriado a fluxos dominantes associados aos movimentos de ida em frente (Bastos Silva et al, 2011).

Por sua vez, o *layout* “knee” (Figura 2.8_b) é aplicado em situações onde se pretendem privilegiar os movimentos de viragem à direita (Engelsman e Uken, 2007), no qual existe inclusivamente uma via segregada de viragem (Bastos Silva et al, 2011).

O *layout* “spiral” (Figura 2.8_c) é particularmente adequado a grandes fluxos de tráfego na via principal, onde o movimento dominante é o de ida em frente, combinado com elevados níveis de procura na via secundária, em que os movimentos são predominantemente de viragem à esquerda ou direita (Fortuijn 2007).

À semelhança do anterior, o *layout* “rotor” (Figura 2.8_d) é também indicado para responder a significativos níveis de procura, mas onde os movimentos de todas as entradas são relativamente equilibrados (Fortuijn 2007; Engelsman e Uken, 2007; Bastos Silva et al,

2011). Fortuijn (2007) adianta ainda que este formato nem sempre é o que fornece maior capacidade, dado não ser possível, em todas as entradas, virar à esquerda através de duas vias, já que tal violaria os princípios de concepção das turbo-rotundas.

Segundo Bastos Silva et al (2011), de entre as tipologias acima apresentadas (Figura 2.8), as três primeiras são as mais adequadas ao desempenho de uma turbo-rotunda. Uma característica importante deste conceito é portanto a sua versatilidade, pois permite responder eficazmente a intersecções entre vias com hierarquias distintas ou similares, e para uma gama elevada de níveis de procura.

Todavia, existe um problema comum a todos os *layouts* relacionado com as inversões de marcha (Bastos Silva et al, 2011). Atendendo às tipologias apresentadas, pode verificar-se que, nas vias secundárias, nem sempre é possível este tipo de movimentos de forma natural.

2.4 Os níveis de desempenho

A avaliação do desempenho global de uma rotunda é geralmente condicionada por dois factores: segurança rodoviária e capacidade. No entanto, atendendo às crescentes preocupações com o meio ambiente, reveste-se também de grande importância a necessidade de estimar os impactes ambientais neste tipo de cruzamentos, tendo como prospectiva as emissões poluentes e o nível de ruído.

Procede-se de seguida a uma revisão da literatura existente acerca dos três níveis de desempenho referidos, designadamente a segurança rodoviária, a capacidade e os impactes ambientais, onde se procura resumir as metodologias adoptadas e os resultados obtidos em alguns dos estudos levados a cabo por diferentes autores.

2.4.1 Segurança Rodoviária

Comparativamente à rotunda convencional de duas vias, o aumento do desempenho de uma turbo-rotunda em termos de segurança rodoviária é consensual dentro da comunidade científica. São vários os autores que apontam como principais benefícios deste tipo de solução o aumento de segurança, devido à redução dos pontos de conflito através da imposição de trajectórias apropriadas consoante o tipo de manobra e a redução das velocidades praticadas de entrada e circulação no anel, induzida pelos elementos físicos de separação de via que impõem uma deflexão de movimentos mais acentuada (Bastos Silva et al, 2011; Fortuijn, 2003 e 2009; Giuffrè et al, 2009; Corriere e Guerrieri, 2012).

Estudos de segurança efectuados por Fortuijn (2009), relativos à transformação de diversos cruzamentos de nível (com ou sem semaforização) e de algumas rotundas antigas em rotundas contemporâneas (rotundas de uma via e turbo-rotundas), entre 1991 e 2002, revelaram uma redução significativa no risco de acidentes. No caso particular das turbo-rotundas, os estudos do tipo “antes-depois” apontam para uma redução de cerca de 82% na taxa de acidentes, sendo esta depois corrigida para aproximadamente 72%, com base em alguns factores de correlação associados ao estudo estatístico. Realça-se que estes resultados obtidos são da mesma ordem de grandeza dos alcançados com a transformação de rotundas de duas vias em rotundas de uma via, nos quais se obtiveram reduções de aproximadamente 68%, já com os devidos ajustes de correlação.

Numa publicação do *Institute for Road and Safety Research* (SWOV, 2007) é ainda referida uma redução de 70% no número de acidentes com vítimas. Importa aqui referir que nesta publicação não é indicado o tipo de estudo nem a metodologia seguida.

Também Mauro e Cattani (2010) estudaram o problema tendo por base a aplicação de um modelo matemático para estimação de acidentes potenciais com base no nível de serviço de rotundas convencionais (Ha and Berg, 1995). Nesse trabalho foi comparado o desempenho da turbo-rotunda com o da rotunda convencional de duas vias, com o objectivo de avaliar o efeito da ausência de colisões laterais. Foram consideradas quatro tipologias de acidentes (representando cerca de 80% do total dos registados) e aplicado o modelo a nove *layouts* sujeitos a diferentes cenários de procura, tendo como resultado uma redução da frequência de acidentes potenciais entre 40 e 50% e uma redução do número de acidentes potenciais com vítimas entre 20 e 30%.

No mesmo estudo é ainda feita uma análise de sensibilidade aos volumes de tráfego, onde se conclui que o número de acidentes potenciais tem, de forma geral, um crescimento linear com o aumento do volume de tráfego, contrariamente ao que sucede nas rotundas convencionais, onde a tendência de crescimento é superior. Deste modo, 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 adoptado, nomeadamente o facto de o modelo de análise de conflitos ter sido calibrado para um número limitado de rotundas convencionais, não podendo ser extensível a todas as intersecções deste tipo, e do facto da validade dos resultados estar dependente, em parte, da adaptação do modelo às características específicas das turbo-rotundas, não existindo, na altura, nenhum caso prático construído 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* adoptado.

Quanto às velocidades praticadas nas turbo-rotundas, Fortuijn (2007) aponta para uma redução considerável comparativamente às rotundas convencionais de duas vias (onde as velocidades mínimas rondam os 48km/h), para aproximadamente 38km/h, valor semelhante ao registado nas rotundas de uma via em ambiente rural. Valores similares foram obtidos por Bastos Silva et al (2011) recorrendo a técnicas de microssimulação aplicadas a uma turbo-rotunda em comparação com uma rotunda convencional de duas vias com um diâmetro inscrito próximo de 40m.

A segurança nas turbo-rotundas tem sido igualmente objecto de investigação nacional. Num estudo desenvolvido por Vasconcelos et al (2014), onde se comparou o desempenho de uma rotunda de uma via, existente em Coimbra, com uma solução convencional de duas vias e uma turbo-rotunda, efectuou-se uma análise de conflitos recorrendo ao *software* SSAM (Surrogate Safety Assessment Model), suportada por técnicas de microssimulação.

Quadro 2.1 – 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 (Quadro 2.1) mostraram que, ao nível da segurança, a turbo-rotunda é melhor solução das três avaliadas, tendo ainda menos conflitos que a rotunda de uma via, embora de maior gravidade, devido ao maior ângulo entre as entradas e as trajectórias de circulação no anel. Verificou-se igualmente uma redução das velocidades de circulação nas turbo-rotundas comparativamente às rotundas convencionais de duas vias, mas um aumento relativamente às soluções de uma via.

2.4.2 Capacidade

A capacidade assegurada por uma turbo-rotunda tem vindo a ser muito estudada por diversos autores tendo por base diferentes métodos e abordagens. No entanto, ao contrário do que

sucedem com o desempenho em termos de segurança rodoviária, não existe um consenso alargado relativamente sobre os efeitos ao nível da capacidade das turbo-rotundas.

Em seguida, são apresentados alguns resultados de estudos efectuados para a capacidade das turbo-rotundas, sendo referidos os modelos e as abordagens adoptadas, assim como eventuais simplificações assumidas no processo de cálculo.

Yperman e Immers (2003) desenvolveram um estudo comparativo entre a capacidade de uma rotunda convencional com três vias de entrada e circulação e uma turbo-rotunda com igualmente três vias de entrada nos quatro ramos (Figura 2.9), recorrendo a técnicas de microssimulação. O modelo de microssimulação foi calibrado para rotundas convencionais por comparação com os resultados da aplicação do modelo suíço (Bovy, 1991) o qual posteriormente foi adaptado para o *layout* de turbo-rotunda em estudo.

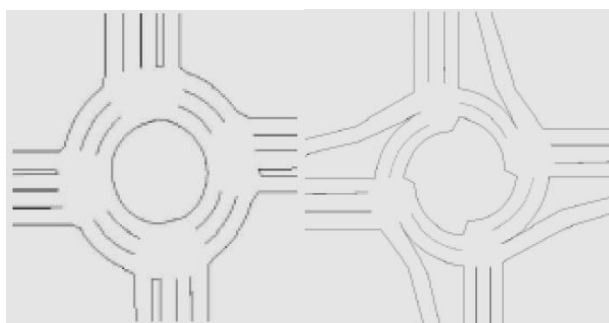


Figura 2.9 – Características geométricas das rotundas avaliadas (Yperman e Immers, 2003)

A aplicação do modelo permitiu concluir que a capacidade global da turbo-rotunda excede a da rotunda convencional entre 12 e 20%, dependendo da distribuição do fluxo de tráfego na via secundária, sendo que a capacidade da turbo-rotunda atinge o seu máximo com uma distribuição equitativa do volume de tráfego pelos quatro ramos.

O processo de cálculo baseou-se em algumas simplificações derivadas do método utilizado: (i) boas condições atmosféricas, (ii) não se considerou o efeito do atravessamento de peões e ciclistas e (iii) tráfego homogéneo, ou seja, todos os veículos têm as mesmas características. Por fim, salienta-se que apenas foi considerada uma repartição de tráfego específica e um tipo de *layout*.

Engelsman e Uken (2007) através da aplicação de um modelo simplificado, desenvolvido por Fortuijn e Carton (2000) para comparar a capacidade de uma turbo-rotunda com uma rotunda convencional de duas vias, tendo em consideração duas situações de distribuição de tráfego (Quadro 2.2), obtiveram ganhos de capacidade para as turbo-rotundas na ordem de 25-35%.

Quadro 2.2 – Capacidade máxima das rotundas convencionais de duas vias e das turbo-rotundas (Engelsman e Uken, 2007)

Balance of traffic volumes on the approaches	Approximate maximum entry capacity** (in private car equivalents per hour)	
	Two lane roundabout	Turbo roundabout
	2300	3050
	3200	4050

É referido que os resultados ao nível da capacidade dependem do comportamento dos condutores e do formato da rotunda, pelo que devem servir apenas como dados comparativos entre os dois tipos de rotunda e não como conclusões absolutas para os valores reais de capacidade de ambas as opções.

Mauro e Branco (2010) desenvolveram uma análise robusta, baseada na teoria “*gap acceptance*”, usando um modelo com as mesmas simplificações que foram assumidas na sua integração no HBS 2001 (equivalente na Alemanha ao *Highway Capacity Manual* americano) para comparar o desempenho ao nível da capacidade e dos atrasos entre as turbo-rotundas e as rotundas convencionais. O estudo abrange cinco matrizes de diferentes repartições de tráfego. Os *layouts* da rotunda convencional e da turbo-rotunda comparados são apresentados na Figura 2.10.

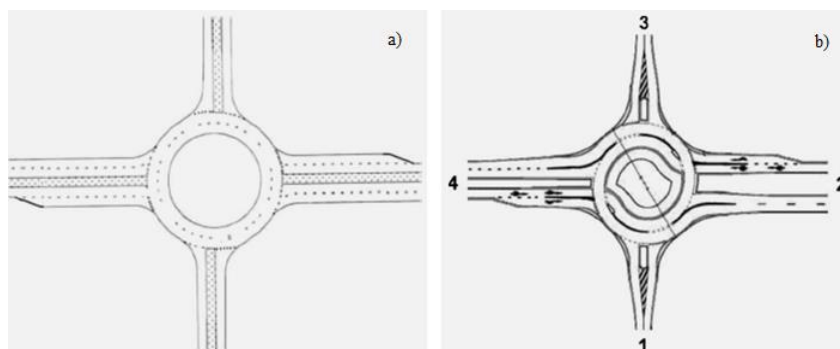


Figura 2.10 – Soluções comparadas: a) rotunda convencional de 2 vias; b) turbo-rotunda.
 (Mauro e Branco, 2010)

Obtiveram as seguintes conclusões (Mauro e Branco, 2010):

- Relativamente à capacidade de uma via isolada das entradas secundárias, as turbo-rotundas são adequadas para elevados fluxos de tráfego na via interior do anel de circulação e fluxos mais baixos na via exterior;
- Nas entradas principais, a capacidade de uma via de entrada da turbo-rotunda é sempre inferior à da rotunda convencional;
- Na maior parte dos casos analisados, para repartições de tráfego equilibradas, e tendo em consideração o funcionamento das quatro entradas, as turbo-rotundas têm melhor desempenho ao nível da capacidade global face às rotundas tradicionais, tanto em condições saturadas como de não saturadas;
- Para as condições que abrangem repartição de tráfego desequilibrado, as turbo-rotundas são ineficientes;
- Em situações onde o tráfego se encontra repartido de forma equilibrada, as turbo-rotundas têm atrasos ligeiramente inferiores aos das rotundas convencionais.

É importante ter em atenção que as conclusões do processo analítico são teóricas e que resultam, de entre outros factores, de adaptações efectuadas às fórmulas de capacidade das rotundas convencionais para as turbo-rotundas. É razoável prever que, num futuro próximo, seja possível obter processos de cálculo mais realistas por intermédio da recolha de dados concretos de turbo-rotundas em funcionamento (Mauro e Branco, 2010).

Fortuijn (2011) estudou a capacidade das vias de entrada e circulação de uma turbo-rotunda comparativamente à determinada para rotundas convencionais na Alemanha, com base num trabalho de Brilon e Bäumer (2006). Pelo estudo efectuado, concluiu-se que, para a maioria das entradas, a capacidade das turbo-rotundas é geralmente superior. Os resultados globais de capacidade estão representados na Figura 2.11.

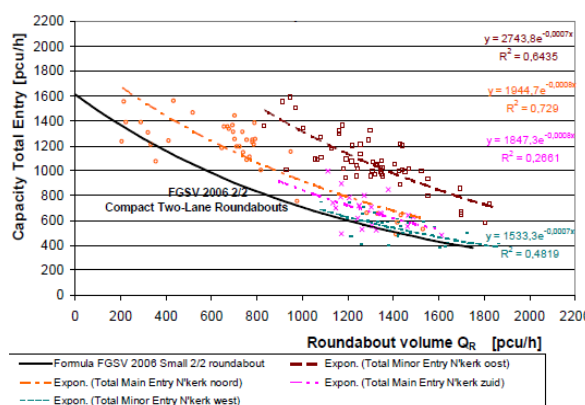


Figura 2.11 – Comparação entre a capacidade das entradas da rotunda convencional de duas vias e a turbo-rotunda (Fortuijn, 2011)

Foi adoptada a teoria “*gap acceptance*” combinada com a fórmula de Hagrind (1998) aplicada a rotundas com múltiplas vias. Complementarmente, foram feitas diversas observações *in situ* a turbo-rotundas na Holanda para auxiliar a calibração do modelo, tendo-se verificado que a teoria do “*gap acceptance*” conduz a uma sobrestimação da capacidade das vias interiores de circulação da turbo-rotunda. Adicionalmente, estimou-se a capacidade de cada uma das diferentes vias da turbo-rotunda, comparativamente à rotunda de uma via e à rotunda de duas vias Figura 2.12.

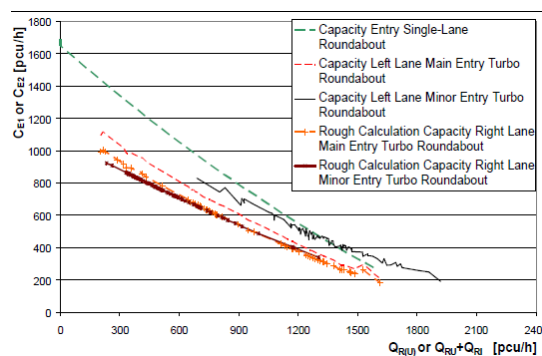


Figura 2.12 – Capacidade de cada por via de entrada das três soluções (Fortuijn, 2011)

Entre os autores até agora citados, é comum atribuir-se como razão para o aumento da capacidade global da turbo-rotunda face à rotunda tradicional com múltiplas vias, a maior utilização das vias interiores de circulação (Yperman e Immers, 2003; Mauro e Branco, 2010; Fortuijn, 2011).

Segundo Yperman e Immers (2003), o uso “forçado” das vias interiores tem um grande impacto na capacidade global da turbo-rotunda, ao invés das rotundas convencionais, onde a via exterior é muito mais atractiva por não ser necessário mudar de via à saída. Os mesmos autores acrescentam ainda que por não haver movimentos de entrecruzamento nas turbo-rotundas, as vias interiores são mais eficientes, e não havendo incerteza quanto à possibilidade de mudar de via, a capacidade das entradas é aumentada. As mesmas conclusões foram obtidas por Fortuijn e Carton (2000), mas para a situação particular da intersecção de duas vias com hierarquias distintas, uma com o fluxo dominante de tráfego e outra secundária.

De uma forma mais conservadora que os anteriores autores, Giuffrè et al (2009) alertam que os modelos geralmente aplicados na avaliação do desempenho de rotundas não são aplicáveis às turbo-rotundas devido ao sistema de cedência de prioridade e, particularmente, às novas condições em que são efectuadas as manobras de viragem, concluindo que a capacidade das entradas deve ser baseada numa análise diferenciada por via de circulação.

Giuffrè et al (2009) realizaram um estudo para avaliar a transformação de rotundas em turbo-rotundas, aplicada a três casos de estudo concretos de rotundas com múltiplas vias, com alguns problemas associados à sua concepção geométrica, a elevados volumes de tráfego e a velocidades excessivas de entrada. Os resultados obtidos confirmaram, para os três casos, muito bons níveis de serviço em termos de segurança e operacionalidade, respectivamente devido à redução de pontos de conflito e a uma melhor canalização do tráfego, sendo que num dos casos foi ainda registado um aumento de capacidade. Registaram igualmente reduções significativas nos comprimentos das filas.

Os autores concluem ainda que, para além dos evidentes benefícios ao nível da segurança e operacionalidade, as turbo-rotundas podem oferecer maiores níveis de capacidade, segundo certas condições de tráfego. Alertam no entanto que os resultados obtidos não podem ser generalizados, sendo necessários estudos aprofundados para diferentes *layouts* que sejam mais apropriadas consoante o caso de estudo.

Contrariamente ao defendido por Yperman e Immers (2003), Engelsman e Uken (2007) e Fortuijn (2007), é de esperar que nem sempre o desempenho de uma turbo-rotunda seja superior ao assegurado por uma rotunda convencional, ao nível da capacidade, sendo importante analisar-se detalhadamente cada situação em particular, pois é espectável que o desempenho dependa do *layout* adoptado e da repartição do tráfego (Vasconcelos et al, 2013).

Num estudo comparativo entre uma rotunda convencional de duas vias e uma turbo-rotunda de dimensões similares, levado a cabo por Bastos Silva et al (2011), baseado na utilização do modelo probabilístico desenvolvido por Brilon (2005), e em técnicas de microsimulação, foram considerados quatro cenários de repartição da procura, culminando nos resultados indicados no Quadro 2.3. Foi testado um conjunto complementar de cenários, com variação de repartição em função de matrizes de procura propostas por Mauro e Branco (2010).

Quadro 2.3 – Cenários analisados (via secundária) e variação diferencial de capacidade (Bastos Silva et al, 2011).

CENÁRIOS	FLUXOS DOMINANTES NA VIA SECUNDÁRIA	REPARTIÇÃO DO TRÁFEGO	DIFERENÇA DE CAPACIDADE
CENÁRIO 1	Ida em frente		-28,2%
CENÁRIO 2	Viragem à esquerda		-22,9%
CENÁRIO 3	Viragem à direita		-1,9%
CENÁRIO 4	Viragem à direita muito elevada		17,5%

As análises efectuadas com base nos modelos probabilísticos e de microssimulação, aplicados apenas a um *layout* (cruzamento entre duas vias de hierarquia diferente), permitiram concluir que a capacidade global da turbo-rotunda tende a ser ligeiramente inferior à da rotunda normal. Pôde-se verificar que o desempenho da turbo-rotunda é semelhante ao da rotunda normal, nas seguintes circunstâncias: (i) volumes significativos associados a movimentos de viragem à esquerda, a partir da via secundária, (ii) repartição equilibrada do tráfego pelos vários ramos e direcções, e (iii) elevados volumes de ida em frente na via principal. Neste último caso, constatou-se que o desempenho da turbo-rotunda supera mesmo o da rotunda convencional (Bastos Silva et al, 2011). A Figura 2.13 contém os resultados comparativos para a capacidade global, em função dos cenários de repartição.

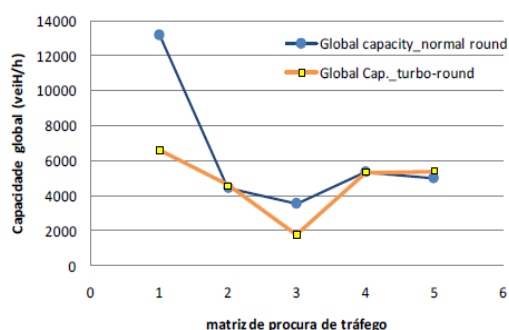


Figura 2.13 – Comparação da capacidade global entre a turbo-rotunda e a rotunda convencional de duas vias (Bastos Silva et al, 2011)

Numa publicação de Vasconcelos et al (2013) é possível encontrar as seguintes críticas aos procedimentos utilizados por alguns autores na avaliação da capacidade de turbo-rotundas:

- A análise efectuada por Yperman e Immers (2003) foi suportada por um modelo de microssimulação calibrado com base no modelo de regressão Suíço (Bovy, 1991), e que portanto não garante uma previsão adequada da capacidade quando a geometria e as condições operacionais estão fora do seu domínio de modelação;
- Na abordagem de Mauro e Branco (2010) foi assumida como constante a proporção de tráfego que opta por cada uma das vias de entrada, o que não descreve fielmente a realidade, dado que os condutores têm várias estratégias de escolha em função do seu comportamento, resultando em condições operacionais distintas.

Vasconcelos et al (2013) indicam as principais diferenças que afectam as estimativas de capacidade, na situação do cruzamento de duas vias de hierarquia distintas: (i) numa rotunda convencional, a via exterior do anel, junto das entradas principais, é usada em parte pelos movimentos de ida em frente das entradas secundárias, enquanto que na turbo-rotunda o tráfego conflituante é concentrado numa única via de circulação, resultando numa perda de capacidade; (ii) numa rotunda convencional, os condutores na via exterior das entradas

secundárias são condicionados por todos os veículos em circulação no anel, sendo que numa turbo-rotunda, como a via exterior é apenas utilizada para as viragens à direita, o tráfego conflituante é reduzido, já que parte do tráfego no eixo principal é fisicamente separado à saída; e (iii) ao invés de uma rotunda, onde as viragens à direita devem utilizar somente a via exterior, numa turbo-rotunda, podem ser usadas ambas duas vias para este movimento nas entradas secundárias.

No estudo desenvolvido (Vasconcelos et al, 2013), consideraram-se dois cenários de procura aplicados a um *layout*, onde o primeiro tipifica a intersecção entre uma via principal e uma secundária com níveis de tráfego semelhantes em ambas as direcções, e o segundo contempla uma situação em que a maioria do tráfego das vias secundárias adopta o mesmo destino na via principal. Seguiu-se um processo de atribuição de tráfego às vias por meio de incrementos, com base no método de Fisk (1991), conduzindo às seguintes conclusões, semelhantes às do estudo anterior:

- A capacidade das entradas principais das turbo-rotundas é sempre inferiores à das rotundas convencionais porque o tráfego conflituante está concentrado apenas numa via do anel;
- O desempenho relativo das turbo-rotundas piora com o aumento da procura na direcção principal, podendo atingir perdas de capacidade na ordem de 42 e 43%;
- Nas entradas secundárias, as turbo-rotundas asseguram melhor desempenho, mas apenas para cenários específicos de procura, especialmente quando a proporção de viragens à direita é muito elevada (superior a 60%).

2.4.3 Impactes Ambientais

São ainda extremamente raros os estudos sobre o desempenho da turbo-rotunda em termos de impactes ambientais. Procurou-se portanto alargar este subcapítulo às rotundas convencionais e estabelecer pontos de comparação com os cruzamentos prioritários.

Num documento do *Institute for Road and Safety Research*, na Holanda (SWOV, 2007), citando Hydén e Várhelyi (2000), é referido que, quando um cruzamento prioritário é substituído por uma rotunda, as emissões poluentes de monóxido de carbono (CO) e óxido nítrico (NOx) aumentam em 6% e 4%, respectivamente. Inversamente, no caso da substituição de um cruzamento semaforizado, as emissões poluentes são reduzidas em 29% para o CO e 21% para o NOx. Em ambas as situações, há um decréscimo no nível de ruído. Neste documento não constam as metodologias adoptadas, nem as razões para os resultados obtidos.

Brilon (2011) afirma que, em comparação com os cruzamentos semaforizados, as rotundas contribuem para a redução da energia consumida e emissões poluentes. Ao nível de ruído, aponta para uma redução entre 3 e 5%.

Relativamente às turbo-rotundas, a preocupação é a de perceber até que ponto os padrões de velocidade, aceleração e desaceleração dos veículos irão variar, em função da imposição de trajetórias específicas consoante o destino pretendido, podendo as variações de velocidade ter um impacto negativo nas emissões poluentes deste tipo de solução (Vasconcelos et al, 2014).

No artigo de Vasconcelos et al (2014) estudou-se igualmente as emissões de poluentes CO₂ (dióxido de carbono), CO, NO_x e HC (hidrocarbonetos), com recurso ao programa VSP (Vehicle Specific Power) para estimar as emissões dos veículos. O modelo utilizado permitiu estimar de uma forma dinâmica as emissões, tendo por base a velocidade e aceleração dos veículos e o declive do terreno, sendo estes dados exportados do *software* de microsimulação AIMSUN. Foram ainda tidos em conta 14 modos de condução (associados ao VSP) e diferentes tipos de veículos (em função do consumo), os quais foram aplicados nos dois cenários principais considerados, onde no primeiro se testou o desempenho com o aumento da procura e mudanças nas repartições das entradas, e no segundo se avaliou o desempenho face a diferentes *layouts*, sujeitos a repartições diferentes nas entradas, mas sem aumento do tráfego nas mesmas.

Quadro 2.4 – Variação das emissões por tipo de rotunda em relação à rotunda convencional de uma via para todos os cenários de procura (Vasconcelos et al, 2014)

Demand Factor (%)	Roundabout Type	Emissions (kg)			
		CO ₂	CO	NO _x	HC
100	Single-lane	3001.21	20.44	9.29	0.58
	Two-lane	-17%	-21%	-17%	-20%
	Turbo	-15%	-24%	-16%	-33%
130	Single-lane	3886.40	25.73	11.92	0.75
	Two-lane	-15%	-15%	-14%	-17%
	Turbo	-14%	-19%	-14%	-31%
150	Single-lane	4800.46	29.86	14.49	0.93
	Two-lane	-21%	-15%	-18%	-22%
	Turbo	-19%	-18%	-17%	-34%
Directional Split (%)	Roundabout Type	Emissions (kg)			
Right-Through-Left	Type	CO ₂	CO	NO _x	HC
60-20-20	Single-lane	2576.73	13.06	7.41	0.45
	Two-lane	-11%	-13%	-10%	-13%
	Turbo	-8%	-11%	-7%	-26%
20-60-20	Single-lane	2899.02	18.81	8.81	0.56
	Two-lane	-14%	-15%	-13%	-17%
	Turbo	-8%	-14%	-8%	-27%
20-20-60	Single-lane	3751.45	18.05	10.71	0.69
	Two-lane	-29%	-7%	-23%	-29%
	Turbo	-23%	-13%	-20%	-38%

Os resultados obtidos (Quadro 2.4) mostram que as emissões de CO₂ e NO_x são superiores nas turbo-rotundas comparativamente às rotundas convencionais de duas vias, pelo que não há vantagem na implementação da solução turbo-rotunda, tendo como principal preocupação a redução dos poluentes referidos. Pelo contrário, relativamente às emissões de CO e HC a turbo-rotunda é a melhor solução.

2.5 Considerações finais

O conceito de rotunda tem vindo a evoluir consideravelmente ao longo do tempo. Desde as antigas rotundas, de grandes dimensões e onde eram recorrentes os conflitos associados a entrecruzamentos junto das saídas, até às rotundas contemporâneas, de dimensão compacta e concebidas de forma a promover baixas velocidades de atravessamento atribuindo a prioridade ao tráfego que circula no anel.

Para responder a níveis elevados de capacidade, tem-se recorrido com frequência a rotundas com múltiplas vias. Apesar destas rotundas preservarem muito bons níveis de desempenho, possuem alguns problemas de segurança, associados comportamentos erráticos por parte dos condutores, que têm gerado a atenção da comunidade científica.

A turbo-rotunda configura-se como uma solução alternativa capaz de resolver os problemas descritos, na medida em que reduz fortemente o número dos pontos de conflito em comparação com as rotundas convencionais com múltiplas vias, e contribui para a prática de menores velocidades de atravessamento e circulação, entre outras vantagens.

Enquanto que os benefícios em termos de segurança são amplamente reconhecidos, havendo ligeiras variações nos ganhos obtidos, não existe consenso quanto aos efeitos sob a capacidade. São vários os autores que indicam ganhos globais de capacidade não menosprezáveis, que variam entre 10 e 35%, dando particular ênfase ao uso mais eficiente da via interior de entrada. Contudo, outros autores defendem que as abordagens adotadas se baseiam em modelos que não representam fielmente as complexas interações entre as correntes de tráfego ou que contêm simplificações grosseiras no seu processo de calibração.

É espectável que esses ganhos nem sempre sejam alcançados, pois dependem do *layout* e da repartição de tráfego considerados. Por outro lado, a turbo-rotunda impõe um funcionamento mais rígido, onde a escolha das vias de entrada é essencial, podendo haver um impacto negativo na capacidade tanto maior quanto maior for o número de viragens à esquerda.

Através dos poucos estudos revistos no âmbito das emissões poluentes, pode afirmar-se que as rotundas apresentam um ligeiro aumento de emissões comparativamente a cruzamentos prioritários (sem semaforização) e importantes reduções face aos cruzamentos semaforizados.

Quanto ao desempenho das turbo-rotundas ao nível das emissões, ainda não existem estudos suficientes que permitam uma avaliação conclusiva, comparativamente com as rotundas convencionais. O único estudo revisto neste âmbito aponta para um aumento das emissões de CO₂ e NO_x e uma redução das emissões de CO e HC das turbo-rotundas comparativamente às rotundas convencionais de 2 vias.

3 CONSTRUÇÃO DOS MODELOS DE MICROSSIMULAÇÃO

3.1 Introdução

Os modelos de microsimulação são ferramentas que foram desenvolvidas para facilitar a análise dos sistemas de tráfego, sendo particularmente úteis para testar novos sistemas de controlo de tráfego e políticas de gestão (Vasco, 2013). Mais recentemente, estes modelos têm vindo a ganhar popularidade como ferramentas de análise de tráfego, uma vez que permitem uma avaliação mais pormenorizada dos sistemas que a oferecida pelos modelos macroscópicos e mesoscópicos (Vasco, 2013). 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 submodelos 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.

O trabalho foi suportado pela aplicação de técnicas de microsimulação, tendo-se recorrido ao *software* AIMSUN, disponibilizado pela área científica do Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação do Departamento de Engenharia Civil (DEC). 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 seleção deste *software* deveu-se ao facto do mesmo constituir uma das mais conceituadas plataformas de simulação disponíveis no mercado internacional, com resultados validados em

várias referências bibliográficas e cujas características e potencialidades básicas permitiam responder aos objetivos do trabalho em curso.

3.2 Metodologia

Existem diferentes abordagens para avaliar o desempenho das intersecções rodoviárias, designadamente o desenvolvimento de estudos com base em dados reais recolhidos no campo (estudos do tipo “antes e depois”), a aplicação de modelos tradicionais (de base estatística ou probabilística) e as técnicas de simulação.

Quando o objectivo é o de comparar duas soluções, a metodologia mais utilizada é a baseada em estudos do tipo “antes e depois”, para os quais os resultados obtidos apresentam um elevado nível de fiabilidade. Contudo, a realização deste tipo de estudo requer a implementação das soluções a testar de modo a proporcionar o desenvolvimento de análises comparativas.

A inexistência de turbo-rotundas construídas em Portugal inviabiliza a aplicação deste tipo de análise, sendo que também se desconhece a existência de modelos matemáticos tradicionais devidamente adaptados e calibrados para este novo tipo de rotunda, pelo que a simulação se afigura como a metodologia alternativa.

O desenvolvimento do trabalho assentou assim numa análise comparativa do desempenho de soluções correspondentes a dois cenários possíveis: (1) a solução atual, composta por rotundas convencionais com duas vias no anel de circulação, e; (2) uma nova solução, onde as três rotundas existentes são substituídas por turbo-rotundas. O objectivo global do trabalho consistiu na avaliação do desempenho das soluções integradas aos três níveis fundamentais de funcionamento: (i) capacidade; (ii) segurança rodoviária; (iii) impactes ambientais. As limitações temporais associadas a um trabalho desta natureza, agravadas pela dificuldade de disponibilização dos *softwares* de base (designadamente do módulo do SSAM), justificaram a subdivisão de tarefas, pelo que a presente tese inclui a avaliação em termos de desempenho funcional (capacidade e fluidez) e ambiental, sendo o desempenho em termos de segurança rodoviária desenvolvido no âmbito de outra dissertação de mestrado.

Importa ainda referir que, sendo a zona de estudo comum às duas dissertações, o trabalho de recolha e tratamento de dados, assim como a construção, calibração e validação do modelo foram efetuados conjuntamente e envolvendo o esforço dos dois mestrandos.

3.3 Selecção do local

A presente dissertação pretende avaliar o desempenho da solução turbo-rotunda, quando aplicada em corredor. Optou-se por suportar o estudo com um exemplo real de modo a proporcionar uma análise mais realista do problema.

Para o efeito, considerou-se adequado seleccionar uma sucessão mínima de 3 intersecções reais com potencial de transformação em turbo-rotunda. A selecção do local recaiu sobre a cidade de Coimbra, por razões de facilidade logística e conhecimento do funcionamento da rede viária local.

O domínio privilegiado de aplicação das turbo-rotunda recai sobre o domínio urbano/periurbano, sujeito a níveis de tráfego moderados/elevados, pelo que se optou por seleccionar um conjunto de intersecções inseridas na circular da cidade. De modo a retirar da análise o efeito associado à inclinação longitudinal, optou-se ainda por seleccionar locais inseridos em traneis de inclinação pouco acentuadas (inferiores a 2%).

Tendo por base estes critérios de selecção, optou-se assim por escolher um corredor de três rotundas consecutivas inseridas na Avenida Fernando Namora, integrada na Circular Externa de Coimbra (ver Figura 3.1).



Figura 3.1 – Corredor de rotundas em estudo (Google@2014)

3.4 Construção do modelo

O modelo de microsimulação a desenvolver no AIMSUN está dependente de dados de *input* que permitam, numa primeira fase, correr o programa através da distribuição dos fluxos de tráfego (matrizes O/D) e, numa segunda fase, calibrar e validar o modelo, recorrendo ao

ajustamento de alguns parâmetros de calibração de modo a procurar representar a realidade com elevado nível de rigor.

3.4.1 Recolha de dados de tráfego

A construção da matriz O/D cobre-se de grande dificuldade técnica e obriga, habitualmente à disponibilização de elevados recursos humanos e económicos. Face a essas limitações, optou-se por simplificar a caracterização da procura, limitando a análise ao período de ponta manhã, entre as 7:30 e as 9:30, de um dia normal de funcionamento. Atendendo à separação espacial das intersecções, à dimensão das rotundas existentes, assim como aos volumes de tráfego envolvidos, revelou-se impraticável a obtenção direta (por observação local) dos volumes O/D, pelo que se optou por recorrer a uma metodologia simplificada assente na obtenção dos seguintes dados:

- Valores globais de tráfego nas entradas e saídas na rede simulada;
- Repartição direccional dos movimentos de entrada nas rotundas.

As sessões de recolha foram distribuídas por dois dias consecutivos envolvendo o esforço de 13 observadores por sessão. Na Figura 3.2 encontra-se representado o corredor de rotundas em estudo, assim como a nomenclatura adotada e os centróides associados às entradas e saídas da rede.

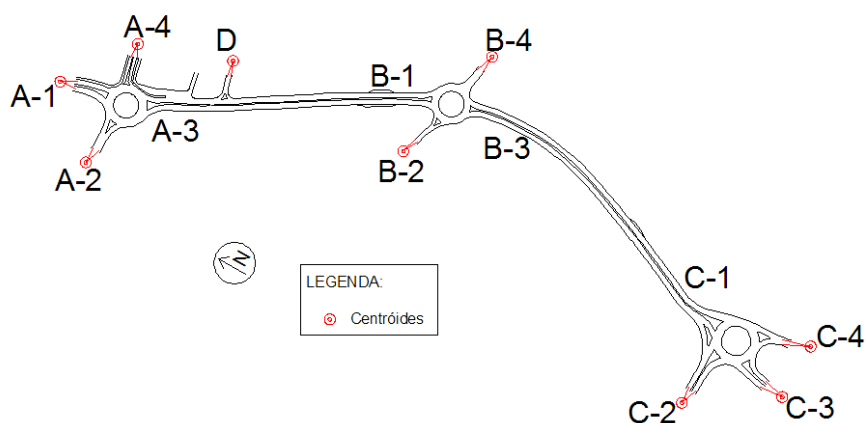


Figura 3.2 – Simbologia associada à codificação da rede

O número de observadores necessários para a recolha de dados foi definido consoante o número de entradas e saídas da zona de estudo, tendo por base os dois tipos de dados a obter.

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. Esta questão assumiu particular relevância nos postos mais sobrecarregados, de modo atestar a sua exequibilidade e posteriormente definir o número de pessoas a atribuir em cada posto de contagem. 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.

As contagens de tráfego decorreram nos dias 11 e 12 de novembro de 2013 e envolveram um total de 13 observadores por dia, entre os quais, investigadores do projeto AROUND e alunos do Ensino Superior. Em ambos os dias, as contagens foram segregadas por períodos de 15 minutos e por tipo de veículo, tendo sido consideradas duas classes: ligeiros e pesados.

No primeiro dia, efetuaram-se as contagens globais de tráfego na qual foram diferenciados dois tipos de movimentos de entrada nas rotundas: (i) total de veículos que viram à direita e (ii) restantes movimentos de entrada. Este tipo de contagem foi feito apenas para as entradas das rotundas que estão ligadas diretamente a centróides, isto é, que constituem entradas e saídas da rede. Foram ainda contabilizados os movimentos de entrada e de saída, correspondentes aos dois acessos localizados entre a rotunda A e B.

Para aferir a qualidade dos resultados finais, designadamente em termos de erro associado à resolução dos sistemas lineares de equações que permitem determinar as matrizes O/D, optou-se por complementarmente obter os valores globais dos movimentos de saída (associadas a centróides).

Na Figura 3.3, estão numerados os postos de contagem e estão igualmente indicados os movimentos controlados por cada observador.

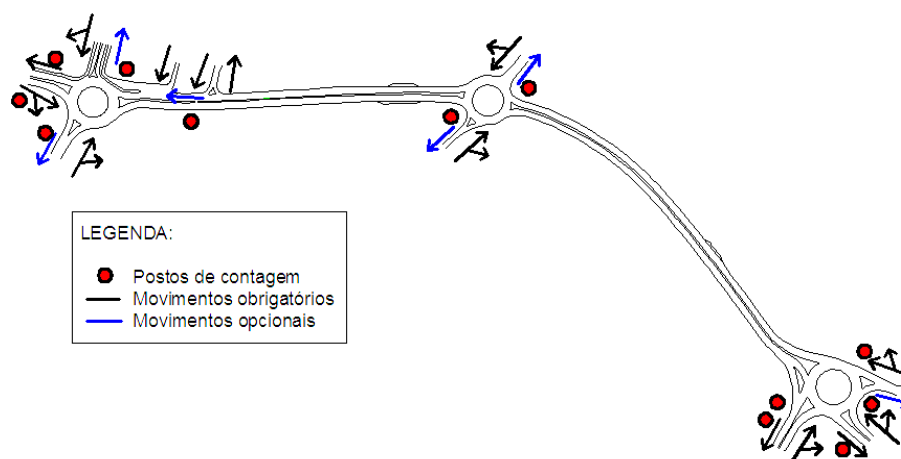


Figura 3.3 – Postos de contagem e respectivos movimentos observados

No segundo dia, fizeram-se contagens aleatórias para determinar a repartição direccional nas quatro entradas de cada rotunda. O trabalho consistiu no seguimento de veículos isolados (seleccionados aleatoriamente) desde que iniciam a entrada no anel até abandonarem a rotunda, de forma a estimar a distribuição percentual dos movimentos direccionais. Nas entradas internas à rede (entradas que não estão directamente ligadas a centróides), as contagens incluíram ainda as viragens à direita.

A Figura 3.4 contém os postos de contagem, distinguidos em função do número de movimentos a contabilizar.

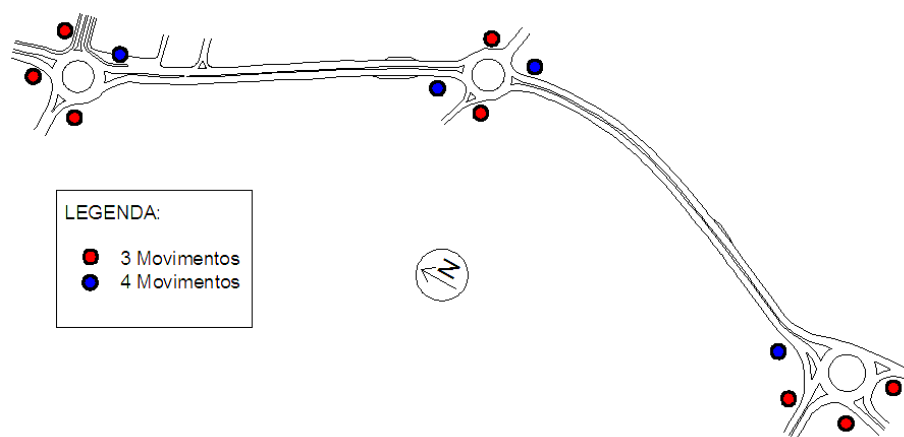


Figura 3.4 – Postos de recolha direccional do trafego

3.4.2 Tratamento dos dados

O tratamento dos dados foi dividido em duas fases: (i) compilação os dados em ficheiro Excel (ii) sistematização de operações para estimativa automatizada das matrizes O/D.

Apesar dos movimentos de inversão de marcha terem sido contabilizados, optou-se por despreza-los face aos seus valores negligenciáveis. O tratamento dos dados resultou na estimação das 16 matrizes O/D correspondentes à atribuição de tráfego no modelo, respectivamente por cada quarto de hora e por classe de veículo.

As matrizes O/D têm a dimensão 9x9, correspondentes ao número de origens e destinos definidos pelos centróides inseridos no modelo. Apesar de existirem dois acessos entre as rotundas A e B, um deles não registou qualquer movimento de entrada ou de saída, pelo que só se colocou um centróide adicional. O Quadro 3.1 representa a matriz O/D dos 15min de maior procura, sendo as restantes matrizes apresentadas no Anexo, e o Quadro 3.2 resume os totais de veículos por cada período de 15min.

Quadro 3.1 – Matriz O/D de veículos ligeiros, no período 8:15-8:30

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 3.2 – Volumes de tráfego na rede em cada período de 15min

Volumes totais de tráfego		
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

3.4.3 Avaliação do nível de funcionamento da rede

Embora o corredor de rotundas não esteja visivelmente congestionado no período analisado, sendo este um troço da Circular Externa de Coimbra, sujeito a volumes de tráfego elevados, particularmente no período entre as 8h15 e as 8h45, considerou-se revelante avaliar o nível de funcionamento da rede. Por forma a poder perceber se ocorre congestionamento nas rotundas convencionais no período indicado, foi aplicado o método do TRL, de base estatística, desenvolvido por Kimber (1980), a algumas das entradas com maior fluxo de tráfego da rede, no intuito de obter as taxas de saturação. Efectuaram-se os cálculos para as entradas A-1, A-3, B-1 e B-3 (ver figura 3.2), para o período entre as 8h15 e as 8h30, estando os valores das taxas de saturação dispostos no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Taxas de saturação nas entradas principais das rotundas A e B (8:15-8:30)

Entrada	Taxa de saturação (%)
A-1	0,58
A-3	0,90
B-1	0,61
B-3	0,89

Os valores obtidos mostram que, embora algumas entradas mantenham uma reserva considerável de capacidade, verifica-se que para o período de maior procura, algumas entradas de encontram a funcionar muito próximas das condições saturadas. É expectável que, possa ocorrer algum nível de instabilidade no funcionamento das entradas A-3 e B-3 (sentido Sul-Norte), dado que a taxa de saturação é de 90%.

3.4.4 Codificação da rede

A codificação da rede foi suportada pelo *software* AIMSUN e baseada na cartografia em formato AutoCad com escala apropriada. Foram codificados dois modelos de rede: (1) Modelo-1 correspondente à situação viária actual, composta por três rotundas convencionais (Figura 3.5); (2) Modelo-2 correspondente à solução alternativa, constituída por três turbo-rotundas de dimensões similares as rotundas convencionais.

A rede atual é constituída por 3 rotundas de grandes dimensões, com duas vias no anel de circulação e um DCI que varia entre os 55m e 60m. O afastamento entre as rotundas é de aproximadamente 400m entre A e B, e de 470m entre B e C. A via circular é composta por 2 faixas de rodagem, com 2 vias em cada sentido, com 3,5m de largura cada. O estudo abrange, para além dos trechos entre as três rotundas, os trechos de ligação a outras duas rotundas do corredor da circular, perfazendo um comprimento global de cerca de 1760m.

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, que na grande maioria são autocarros.

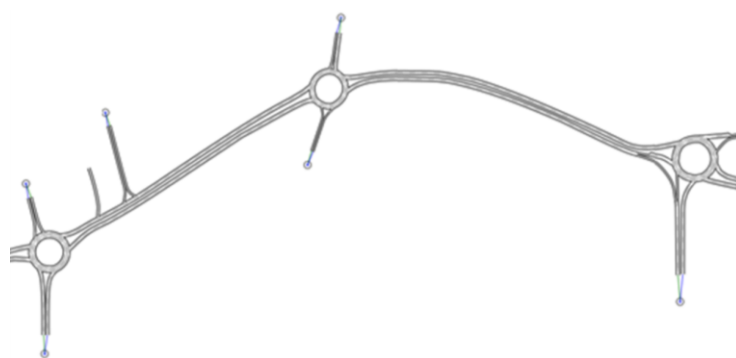


Figura 3.5 – Representação da codificação da rede atual desenvolvida no AIMSUN

Na construção do modelo com as soluções de turbo-rotunda definiram-se diferentes *layouts* em função da importância dos movimentos direcionais envolvidos. Optou-se assim por atribuir o *layout* tipo “standart” às intersecções A e B e o *layout* tipo “knee” à 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 colectora). Por sua vez, o *layout* “knee” escolhido, para a rotunda C, permitiu manter o funcionamento da via segregada de viragem à direita já existente na via colectora.

A adaptação das rotundas ao formato de turbo-rotunda obrigou a alterar o número de vias de saída nos ramos secundários, já que para assegurar a eliminação dos entrecruzamentos, teve de se eliminar uma via de saída nos ramos mencionados. Ainda para a 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 de saída.

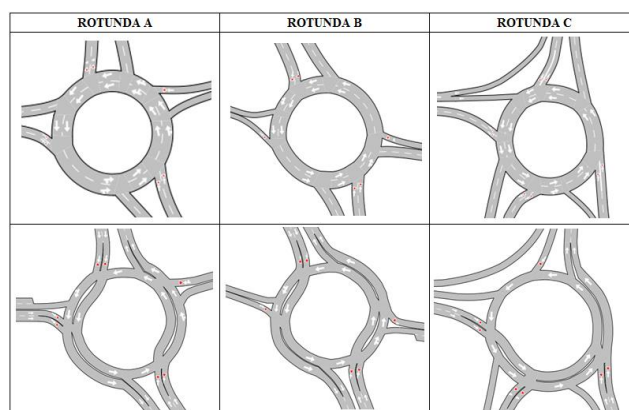


Figura 3.6 – Codificação das rotundas convencionais (em cima) e das turbo-rotundas (em baixo)

Em termos gerais, importa ainda referir que se optou por codificar uma rede simplificada, sem consideração dos atravessamentos pedonais e da respetiva travessia semaforizada localizada entre a rotunda A e B. Apesar de esta simplificação introduzir alterações à realidade, tal não foi valorizado atendendo a que o objetivo desta dissertação é a comparação entre duas soluções e não a replicação exata da rede existente. A planimetria foi assumida como 100% plana, embora exista um ligeiro desnível (inferior a 2%) entre a rotunda B e C.

3.5 Calibração e validação do modelo

3.5.1 Calibração

O recurso a um exemplo real teve por principal objetivo permitir calibrar o correspondente modelo e desta forma proporcionar a representação de uma situação real. Os trabalhos de

calibração tiveram por objetivo procurar aproximar os resultados simulados aos valores reais observados através do ajustamento de um conjunto limitado de parâmetros de calibração.

Importa contudo sublinhar que, tal como já foi referido, não sendo o principal objetivo deste estudo a representação de uma realidade, mas uma análise comparativa, o processo de calibração não assume uma importância muito relevante, pelo que se optou por apenas ajustar o valor das velocidades em regime livre de circulação e o tempo de reacção. Para o efeito, recorreu-se aos dados de velocidades registadas em regime livre para a zona de estudo com base em veículo instrumentado, no âmbito do projeto AROUND, assim como aos tempos médios de percurso associados aos dois sentidos da Circular Externa. O Quadro 3.3 resume os dados função da média, máximo, mínimo e desvio padrão e os respectivos coeficientes do parâmetro “*speed acceptance*” dos veículos ligeiros.

Quadro 3.4 – Parâmetros da distribuição de Velocidades

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

Os coeficientes do parâmetro “*speed acceptance*” dos veículos ligeiros (Quadro 3.3) foram obtidos dividindo os valores das velocidades em regime livre pelo limite legal de velocidade no corredor de 70 km/h. Paralelamente, foi-se ajustando o valor do tempo de reacção médio dos condutores nas vias com cedência de passagem, até obter comprimentos de filas de espera nas várias entradas similares às observadas localmente. No final deste processo optou-se por adotar o valor de 0,8s (sendo que o valor *default* do programa é 0,75s).

Durante o processo de calibração do modelo foram identificados alguns problemas pontuais de funcionamento. O modelo apontava para problemas de congestionamento nas entradas A-4 e B-4 com ocorrência de filas de espera superiores às detetadas no decorrer das contagens. Tais problemas não foram particularmente valorizados. A pior situação, na entrada A-4, deveu-se ao facto de não se ter considerado o atravessamento pedonal semaforizado, existente entre as rotundas A e B, cujo funcionamento altera a distribuição de chegada dos veículos à rotunda A através da geração de intervalos de tempo suficientes alargados e que se reflete num aumento da capacidade da entrada A-4.

Por não se tratar de um problema de calibração, mas de simplificação da codificação, optou-se por ajustar o nível de procura na entrada A-4, nos períodos mais condicionantes, até atingir comprimentos de filas similares às observadas. Esta nova simplificação não acrescentou alterações ao estudo comparativo a desenvolver e permitiu viabilizar a análise de cenários

com aumento gradual da procura global na rede, sem congestionamento imediato das referidas entradas.

3.5.2 Calibração do modelo matemático de escolha de rota

A calibração do ponto anterior foi efectuada com base no Modelo-1 relativo às rotundas convencionais. O passo seguinte passou por avaliar o modelo matemático que está na base da atribuição dinâmica de tráfego. Por defeito, o AIMSUN define o modelo de escolha estocástica de rota como sendo “fixo baseado nos tempos de percurso em condições livres de circulação”, ou seja, para os minutos iniciais de simulação onde os volumes de tráfego são menores. Porém, uma vez que o volume de tráfego sofre grandes variações ao longo do tempo, o modelo mais indicado é o *Logit*, pois este, contrariamente ao anterior, permite ter em conta as demoras nas rotundas nos períodos de ponta. O *Logit* é um modelo de escolha discreta no qual é adoptado o princípio de que um decisor escolhe a alternativa com maior utilidade para si em detrimento das restantes.

A probabilidade de escolha P_k de um percurso alternativo k ($k \in K_i$) pode ser expressa como uma função da diferença entre a utilidade medida para esse percurso e todos os restantes (equação 1):

$$P_k = \frac{e^{V_k \theta}}{\sum_{i \in K_i} e^{V_i \theta}} \quad (1)$$

onde V_i é a utilidade percebida para a alternativa i e θ é o factor de escala.

A utilidade U_k^i de um percurso entre pares O/D i (equação 2) é dada por:

$$U_k^i = -\theta t_k^i + \varepsilon_k^i \quad (2)$$

onde t_k^i é o tempo de viagem previsto para o percurso k de um par O/D i , e ε_k^i é o termo aleatório.

Neste modelo, é assumido que os termos ε_k^i são independentemente distribuídos seguindo uma lei de *Gumbel*, e portanto a probabilidade de escolha de um percurso k de entre todas as alternativas de um par O/D i segue uma distribuição logística.

Se por um lado, os resultados obtidos no Modelo-1, não alteram significativamente consoante o tipo de modelo de escolha de rota, pois numa rotunda convencional um veículo pode optar livremente por qualquer via de entrada, independentemente do destino pretendido, numa turbo-rotunda já é fundamental a utilização de um modelo matemático adequado, dado que este tipo de rotunda impõe um funcionamento mais rígido, onde é determinante a escolha da

via de entrada conforme a saída pretendida. Devido à delimitação física das vias de entrada numa turbo-rotunda, e atendendo ao facto de que duas vias podem ambas servir os movimentos de ida em frente, passam a existir duas alternativas de escolha, sendo que modelo *Logit* permite equilibrar o uso destas duas vias, particularmente nos períodos de maior volume de tráfego, onde a utilidade, ou seja, o custo de cada via permanece em constante mudança.

Simulou-se sucessivamente o Modelo-2 de forma a ajustar os vários parâmetros passíveis de alteração no modo de rotas variadas. Este processo de simulação inclui um cálculo inicial dos percursos mais curtos entre cada par O/D, uma “componente de menor percurso” que calcula periodicamente novos percursos de acordo com os novos tempos de viagem obtidos pelo simulador e um “modelo de selecção de rota”. A Figura 3.7 mostra os valores finais considerados em cada parâmetro no menu de atribuição dinâmica de tráfego.

The screenshot shows the 'Dynamic Traffic Assignment' menu in AIMSUN. The 'Cycle' is set to 0:00:12, 'Number of Intervals' is 1, 'Attractiveness Weight' is 0,00, and 'User-Defined Cost Weight' is 1,00. Below this is a table titled 'Use of O/D Routes and Path Assignment Results' with columns for Vehicle Type, Following O/D Routes, and Following Path Assignment Results. The table shows 100% for both Car and Bus. The 'Stochastic Route Choice' section has 'Model' set to 'Logit'. The 'SP Trees' section has 'Initial K-SPs' set to 5, 'Maximum Number in Memory' set to 10, and 'Maximum Number of Paths' set to 5.

Vehicle Type	Following O/D Routes	Following Path Assignment Results
53: Car	100,00%	100,00%
58: Bus	100,00%	100,00%

Figura 3.7 – Valores adoptados no menu de atribuição dinâmica de tráfego do AIMSUN
O “ciclo” é o parâmetro que define o intervalo de tempo Δt que corresponde ao período para o qual o modelo recalcula os percursos mais curtos. Chegou-se ao valor de 12s.

Para o “número de intervalos” para qual o custo de cada via é avaliado, manteve-se o valor pré-definido pelo programa de 1.

A atractividade de uma *link* tem em conta o número de vias de uma secção que são usadas para cada o movimento de viragem e o número de movimentos partilhados por cada via. O valor deste parâmetro determina o peso que a atractividade tem no custo de um percurso face ao tempo de viagem. Definiu-se o valor da atractividade como nulo.

O parâmetro “User-Defined Cost Weight” representa a influência que o custo pré-definido pelo utilizador tem no custo total de um percurso. Por defeito o AIMSUN define que a função deste custo tem apenas em consideração o tempo de viagem, não considerando qualquer outro

tipo de custo (i.e. demoras, distância, experiência do condutor, etc.). Escolheu-se o valor de 1 para este parâmetro, significando que a escolha do percurso é totalmente condicionada pelo tempo de viagem.

O modelo de escolha estocástica de rota foi o *Logit*. Dentro deste modelo ajustaram-se os seguintes parâmetros: “*Initial K-SPs*”, “número máximo na memória”, “número máximo de percursos” e o factor de escala Θ .

O parâmetro “*Initial K-SPs*” define o número dos percursos mais curtos calculados no início da simulação por centróide; O “número máximo na memória”, como o próprio nome sugere, é o parâmetro que limita o número de ramificações para cada percurso e centróide, que estão na memória no decurso da simulação; o “número máximo de percursos” é o parâmetro que define o número máximo de percursos diferentes usados no processo de selecção por tipo de veículo; O factor de escala Θ desempenha o papel duplo ao tornar o processo de decisão baseado nas diferenças entre utilidades (das diferentes alternativas) independente da sua escala unitária e ao influenciar o erro padrão da distribuição dos tempos de viagem. Quando $\Theta < 1$, existe uma tendência de utilização equilibrada dos vários percursos alternativos, enquanto que para $\Theta > 1$, o processo de escolha tende para a alternativa com menor custo, em detrimento de todas as restantes.

O Quadro 3.4 resume os valores adoptados, no fim da calibração, para o menu de atribuição dinâmica de tráfego, incluindo os parâmetros do modelo *Logit*.

Quadro 3.5 – Parâmetros de calibração do modelo de atribuição dinâmica de tráfego

Parâmetros - Atribuição Dinâmica de Tráfego	
Ciclo (s)	12
Nº de intervalos	1
Peso da atratividade	0,00
Peso do custo pré definido	1,00
Modelo Logit	
Fator de escala - Θ	1,0
K-SPs Inicial	5
Número máximo na memória	10
Número máximo de percursos	5

3.5.3 Validação

A validação de um modelo consiste na avaliação da proximidade entre os resultados simulados pelo modelo calibrado, para determinados parâmetros de desempenho, com valores reais recolhidos para a rede no trabalho de campo.

No estudo desenvolvido, a validação do modelo assentou na comparação dos tempos médios de percurso entre os centróides *A-1* e *C-3* (percursos de ida em frente ao longo da circular externa e em ambos os sentidos), resultantes da aplicação do modelo de simulação, com os valores médios reais recolhidos no terreno, em condições livres de circulação.

Para o 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 3.5 contempla os tempos médios de percurso, medidos no local, e os tempos médios de percurso obtidos no programa com a matriz O/D auxiliar.

Quadro 3.6 – Comparação dos tempos médios ao longo do corredor medidos no local com os obtidos no AIMSUN

Tempo médio de percurso medidos no local (s)		Tempo médio de percurso AIMSUN (s)	
Sentido A1-C3	Sentido C3-A1	Sentido A1-C3	Sentido C3-A1
114	117,6	133	137

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 superiores em 17% (cerca de 20s) aos medidos no local (Quadro 3.5). Este erro pode ter-se devido aos padrões de velocidade dos veículos, durante o atravessamento das rotundas, diferirem do modelo de microsimulação para a realidade e, por outro lado, a uma eventual deformação da cartografia AutoCad utilizada para codificar a rede.

3.6 Definição dos cenários a estudar

Este trabalho insere-se na sequência de outros trabalhos previamente desenvolvidos no âmbito do projeto AROUND, designadamente da avaliação do desempenho de uma turbo-rotunda aplicada isoladamente (Vasconcelos et al, 2014). Nesse sentido optou-se por estudar o funcionamento das turbo-rotundas aplicadas em corredor, para os mesmos cenários estudados anteriormente, de modo a proporcionar comparações diretas. São assim definidos dois tipos

de cenários: (i) aumento da procura global na rede e, (ii) variação da repartição direccional do tráfego.

Na primeira análise, pretendeu-se avaliar o desempenho do corredor de turbo-rotundas impondo incrementos de 10% na procura global, mantendo a repartição direccional das contagens, desde a situação de base correspondente a um factor de 100% (matrizes O/D iniciais) até a uma situação de congestionamento global da rede (ver Quadro 3.4), estabelecendo no fim as devidas comparações entre os dois modelos desenvolvidos.

Quadro 3.7 – Cenários associados aumento da procura global

Cenário	Factor de procura (%)
A	100
B	110
C	120
D	130

A segunda análise procura avaliar o efeito da repartição direccional no desempenho das turbo-rotundas. Trabalhos anteriores (Mauro e Branco, 2010; Bastos Silva et al, 2011; Vasconcelos et al, 2012; Vasconcelos et al, 2014) demonstram que o desempenho da turbo-rotunda é fortemente condicionado pela repartição do tráfego, pelo que a análise consistiu na criação de cenários onde se fez variar a repartição direccional das entradas com incrementos de 25%, sem alterações no fluxo total por entrada, percorrendo todas as combinações possíveis.

Foram consideradas duas situações distintas: (i) a variação da repartição direccional é idêntica nas 3 rotundas analisadas e, (ii) a repartição direccional na rotunda intermédia evolui de forma oposta às rotundas extremas, ou seja, quando a percentagem de viragens à direita aumenta nas rotundas A e C, aumenta a percentagem de viragens à esquerda na rotunda B e vice-versa. No total foram estudados 27 cenários diferentes (ver Quadro 3.5).

O objectivo de considerar cenários onde a repartição direccional varia da rotunda intermédia para as restantes é o de poder perceber até que ponto o aumento dos movimentos de entrecruzamento no corredor poderá ter implicações na capacidade e no nível de emissões, e por fim poder estabelecer comparações entre os dois modelos de microsimulação.

Quadro 3.8 – Cenários de variação da repartição direccional

Cenários	Movimentos - rotunda A (%)			Movimentos - rotunda B (%)			Movimentos - rotunda C (%)		
	Direita	Frente	Esquerda	Direita	Frente	Esquerda	Direita	Frente	Esquerda
C1	100	0	0	100	0	0	100	0	0
C2	75	0	25	75	0	25	75	0	25
C3	50	0	50	50	0	50	50	0	50
C4	25	0	75	25	0	75	25	0	75
C5	0	0	100	0	0	100	0	0	100
C6	75	25	0	75	25	0	75	25	0
C7	50	25	25	50	25	25	50	25	25
C8	25	25	50	25	25	50	25	25	50
C9	0	25	75	0	25	75	0	25	75
C10	50	50	0	50	50	0	50	50	0
C11	25	50	25	25	50	25	25	50	25
C12	0	50	50	0	50	50	0	50	50
C13	25	75	0	25	75	0	25	75	0
C14	0	75	25	0	75	25	0	75	25
C15	0	100	0	0	100	0	0	100	0
C16	100	0	0	0	0	100	100	0	0
C17	75	0	25	25	0	75	75	0	25
C18	25	0	75	75	0	25	25	0	75
C19	0	0	100	100	0	0	0	0	100
C20	75	25	0	0	25	75	75	25	0
C21	50	25	25	25	25	50	50	25	25
C22	25	25	50	50	25	25	25	25	50
C23	0	25	75	75	25	0	0	25	75
C24	50	50	0	0	50	50	50	50	0
C25	0	50	50	50	50	0	0	50	50
C26	25	75	0	0	75	25	25	75	0
C27	0	75	25	25	75	0	0	75	25

4 Avaliação do desempenho de um corredor de turbo-rotundas

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta um conjunto de análises comparativas entre o funcionamento de um corredor de turbo rotundas relativamente a um corredor de rotundas. As análises abrangem indicadores representativos do funcionamento do sistema viário em termos de capacidade e de emissões ambientais.

4.1.1 Seleção dos indicadores de desempenho

O *software* AIMSUN disponibiliza uma grande variedade de *outputs*, capazes de caracterizar o funcionamento do sistema aos seus diferentes níveis. São disponibilizados indicadores de desempenho globais caracterizadores do funcionamento do sistema quando afetada a matriz O/D a toda a rede codificada e indicadores parciais, correspondentes, por exemplo, a um determinado elemento infraestrutural, ou a um determinado par O/D. Para efeitos do presente trabalho, e de modo a limitar a quantidade de análises, optou-se por seleccionar um conjunto limitado de indicadores capazes de caracterizar em termos globais o funcionamento do corredor, embora traduzido por valores individualizados por veículo.

Indicadores de capacidade:

- Demoras (s/km/veíc)
- Filas de espera (número de veículos)
- Tempos de percurso (s/veíc.)

As demoras representam o acréscimo de tempo de percurso de um veículo comparativamente ao tempo de percurso em condições livres de circulação. O indicador avaliado corresponde às demoras médias por veículo em s/km. O segundo indicador representa o comprimento médio das filas de espera, medido em número de veículos. Por último, os tempos de percurso representam o tempo médio de viagem por veículo, medido em segundos. O AIMSUN não fornece directamente este último indicador, pelo que o mesmo foi obtido através da relação entre o tempo total de viagens na rede e o fluxo total de veículos simulado.

Refira-se, a título complementar, que foi ainda ponderada a possibilidade de recorrer ao indicador velocidade média de percurso. Contudo, optou-se por abandoná-lo na medida em

que este indicador tende a ser redundante relativamente ao indicador tempos médios de percurso.

Relativamente aos indicadores ambientais, optou-se por seleccionar indicadores globais representativos da produção de gases com efeito de estufa (CO_2), de poluentes locais (HC, CO e NO_x), eficiência energética (Consumo combustível) e indicadores representativos do impacte nocivo na saúde da população (PM - Partículas). Assim foram considerados os seguintes indicadores de impactes ambientais:

- Consumo de combustível (l/veíc.)
- Emissões de poluentes (CO, HC, NO_x , CO_2 e PM)

Por defeito, o AIMSUN não dispõe directamente de dados relativos ao consumo de combustível e às emissões poluentes dos veículos. No entanto, segundo o manual de simulação dinâmica do programa (TSS, 2012) foi possível ativar modelos que permitem estimar os dois indicadores referidos.

O modelo de consumo de combustível do AIMSUN considera quatro situações de circulação dos veículos: veículo em marcha lenta, em velocidade cruzeiro, em aceleração e em desaceleração. Para cada situação, a aplicação informática aplica modelos de estimação do consumo de combustível, tendo por base um conjunto de parâmetros de consumo a definir para cada uma das classe de veículos considerados. No âmbito do presente trabalho optou-se por considerar os valores de referência que constam do manual para a classe dos veículos ligeiros (ver Figura 4.1).

Consumption Rate	
Fi (idling):	0,33 ml/s
C1 (accelerating):	0,42 ml/s
C2 (accelerating):	0,26 ml/s
Fd (decelerating):	0,53 ml/s
F1 (at 90 km/h):	4,70 l/100 km
F2 (at 120 km/h):	6,50 l/100 km

Minimum Consumption Speed	
Vm:	50,00 km/h

Figura 4.1 – Parâmetros base relativos ao consumo definidos para a classe de veículo “car” (TSS, 2012)

Uma vez que o AIMSUN não define valores de consumo para outras classes de veículos, o indicador considerado foi o consumo médio de combustível dos veículos ligeiros, em l/veíc., resultante da divisão do consumo total na rede pelo volume total de veículos ligeiros simulados. Considera-se que este indicador é representativo do funcionamento da rede uma vez que a percentagem de ligeiros corresponde a 98% do total de veículos.

Ao nível das emissões poluentes, o AIMSUN disponibiliza dois modelos: o modelo QUARTET e o modelo *Panis et al.*

O modelo QUARTET permite estimar, para as mesmas quatro condições de circulação do modelo de consumo de combustível, e com base na velocidade/aceleração do veículo, as emissões de CO, NOx e HC por cada veículo ao longo do período de simulação. Os indicadores resultantes da aplicação deste modelo (Figura 4.2) correspondem assim ao valor global de emissões, para cada poluente, em kg, de todos os veículos simulados que terminaram o seu percurso.

Emission rates for cars (g/s)	CO	NOx	HC	Emission rates for buses (g/s)	CO	NOx	HC
Idling emission rate (g/s)	0.060	0.0008	0.0067	Idling emission rate (g/s)	0.050	0.0050	0.0383
Accelerating emission rate (g/s)	0.377	0.0100	0.0200	Accelerating emission rate (g/s)	0.377	0.0100	0.0200
Decelerating emission rate (g/s)	0.072	0.0005	0.0067	Decelerating emission rate (g/s)	0.072	0.0005	0.0067
Cruising emission rate (g/s)				Cruising emission rate (g/s)			
10 km/h	0.060	0.0006	0.0063	10 km/h	0.097	0.018	0.078
20 km/h	0.091	0.0006	0.0078	20 km/h	0.056	0.020	0.044
30 km/h	0.130	0.0017	0.0083	30 km/h	0.050	0.023	0.042
40 km/h	0.129	0.0022	0.0128	40 km/h	0.069	0.036	0.056
50 km/h	0.090	0.0042	0.0097	50 km/h	0.056	0.067	0.078
60 km/h	0.110	0.0050	0.0117	60 km/h	0.042	0.083	0.067
70 km/h	0.177	0.0058	0.0136	70 km/h	0.000	0.133	0.067

Figura 4.2 – Dados de entrada para estimação das emissões poluentes recorrendo ao modelo QUARTET (TSS, 2012).

O modelo *Panis et al.* permitiu estimar as emissões poluentes, em cada instante da simulação, associadas às manobras de aceleração/desaceleração e velocidade dos veículos. Em particular, o modelo considera as emissões de CO₂ (Figura 4.3), NOx, e PM, e determina o valor dos mesmos, tendo em conta a classe e o tipo de combustível dos veículos. Os indicadores que resultam deste modelo são as emissões instantâneas dos poluentes indicados, medidas em g e g/km percorrido.

Emission Vehicle Type		Emission Values							
Vehicle:	Car	Pollutant:	CO2						
Fuel Type	Lower Limit	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6		
Petrol %:	75								
Diesel %:	25								
LPG %:	0								
Petrol	0	0.553	0.161	-0.00289	0.266	0.511	0.183		
Diesel	0	0.324	0.0859	0.00496	-0.0586	0.448	0.23		
LPG	0	0.6	0.219	-0.00774	0.357	0.514	0.17		

Figura 4.3 – Dados de entrada das emissões de CO₂ definidos pelo modelo Panis et al.

Os indicadores a avaliar no âmbito das emissões poluentes foram os seguintes: (i) Total de emissões na rede de CO, HC e NOx, em kg, decorrentes do modelo QUARTET e, (ii) Emissões de CO₂ e PM, por veículo em g/km percorrido, determinadas pelo modelo *Panis et al.*

4.2 Análise dos resultados

Para cada cenário de procura, os resultados tendem a diferir entre replicações sucessivas atendendo aos fenómenos estocásticos do tráfego. De modo a esbater esse efeito e garantir resultados suficientemente robustos, optou-se por considerar como resultado de cada cenário, a média de 10 replicações.

O nível de desempenho do corredor foi avaliado para duas situações de carregamento da rede: (i) procura de tráfego real observada – incluindo um período de pico com funcionamento acima do limiar de saturação, (ii) procura de tráfego reduzida – funcionamento abaixo do limiar de saturação das turbo-rotundas. Por simplificação passar-se-á a designar (i) condições saturadas e (ii) condições não saturadas.

Numa primeira análise, foram estudados os diversos cenários pré-definidos para a procura de tráfego real correspondente às 2 horas de simulação observadas. De modo a avaliar o efeito associado ao carregamento da rede, em termos de procura reduzida, foram ainda considerados cenários adicionais relativos a procuras globais de 60%, 70%, 80% e 90%, mantendo fixa a repartição direcional real.

Numa segunda análise foram avaliados os cenários de variação da repartição direcional nas diferentes entradas para o período completo de simulação (condições saturadas) e para os volumes de tráfego reduzido – condições não saturadas - correspondentes ao carregamento da matriz correspondente aos primeiros 30min da recolha de dados (mantendo esse nível de procura constante ao longo das 2 horas de período de simulação).

Finalmente e de modo a avaliar o efeito dos movimentos de entrecruzamento nos trechos de ligação entre rotundas, optou-se ainda por avaliar duas situações diferenciadas: (a) imposição da mesma repartição direcional nas três rotundas e em todas as entradas de cada uma das rotundas; (b) imposição da mesma repartição direcional em todas as entradas de cada uma das rotundas, mantendo as mesmas repartições nas duas rotundas extremas e fazendo variar em sentido contrário na rotunda intermédia.

4.2.1 Condições saturadas

Neste ponto são apresentados os resultados correspondentes à procura real observada entre as 7:30 e as 9:30, incluindo o período de pico o qual foi registado entre as 8h00 as 8h30. Essa procura de tráfego foi subdividida em matrizes O/D individualizadas por períodos de 15 minutos e por tipo de veículo (ligeiros e pesados).

4.2.1.1 Desempenho em termos de Capacidade

EFEITO DO CARREGAMENTO DA REDE

A Figura 4.4 apresenta os resultados relativos aos quatro cenários de aumento da procura de tráfego e aos três indicadores de capacidade.

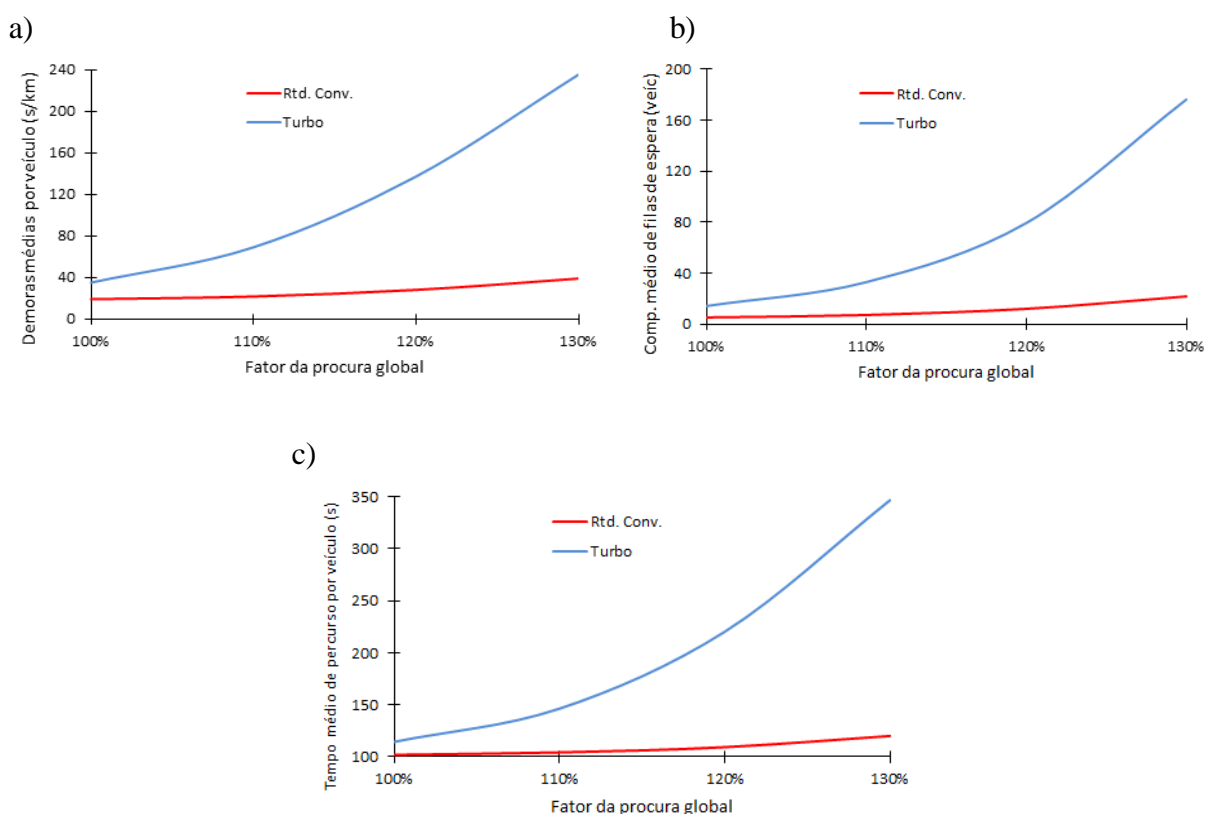


Figura 4.4 – Evolução dos indicadores de capacidade com o aumento da procura global: a) demoras; b) filas de espera; c) tempos médios de percurso.

A análise das figuras anteriores evidencia uma diferença significativa entre o nível de desempenho global entre o corredor de rotundas convencionais e o de turbo-rotundas, com vantagem das primeiras em todos os indicadores e nos quatro cenários de procura.

A análise das mesmas figuras permite ainda concluir que o corredor de turbo-rotundas atinge a saturação, logo para o cenário de procura atual (factor de 100%), atendendo ao aumento acentuado das demoras, das filas de espera e dos tempos de percurso. Em contrapartida o corredor de rotundas convencionais mantém uma reserva de capacidade, mesmo para o cenário de 130% da procura global, mantendo praticamente constantes os diferentes indicadores de desempenho.

EFEITO DA REPARTIÇÃO DIRECIONAL (CENÁRIO DE VARIAÇÃO UNIFORME POR ENTRADA E POR ROTUNDA)

Por sua vez, a análise da variação da repartição direcional (cenários C1 a C15) é apresentada de forma resumida para os diferentes indicadores nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7.

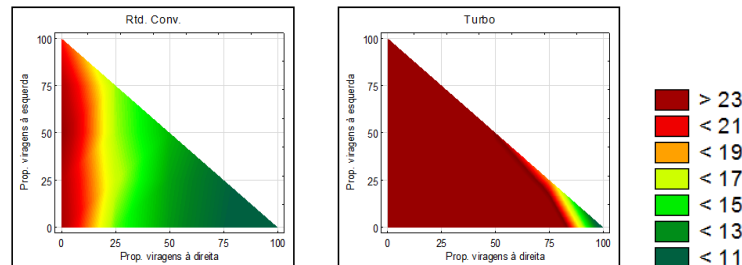


Figura 4.5 – Demoras obtidas (s/km/veic.)

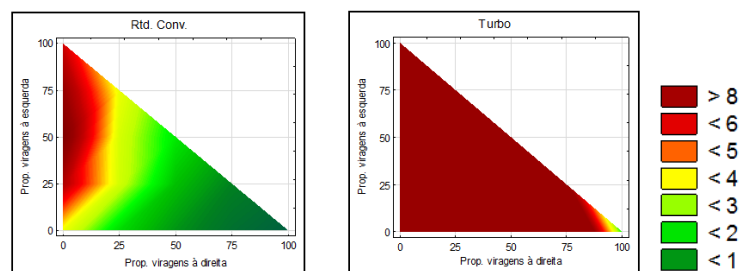


Figura 4.6 – Comprimento das filas de espera (veic.)

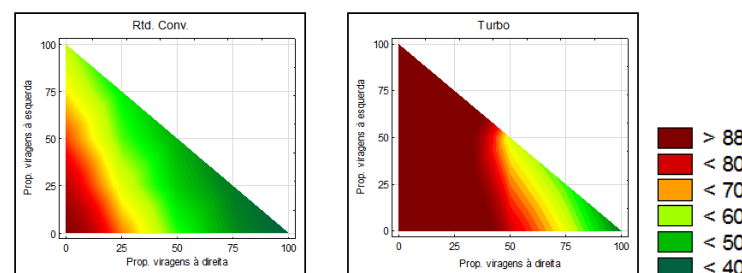


Figura 4.7 – Tempos médios de percurso (s/veic.)

Numa primeira fase foram estudados 15 cenários, onde a repartição direcional dos movimentos varia em simultâneo e da mesma nas três rotundas consecutivas. Os resultados permitem concluir que as rotundas convencionais apresentam de forma quase generalizada um melhor desempenho que as turbo-rotundas. A única exceção corresponde ao cenário C1 (100% de viragens à direita) e ao indicador das demoras, onde se regista uma ligeira redução

em cerca de 3% a favor das turbo-rotundas, sendo que, para este cenário particular o desempenho das duas soluções tende a ser semelhante.

Assim, pode concluir-se que, comparativamente às rotundas convencionais, as turbo-rotundas tendem a ter níveis de desempenho mais aproximados sempre que o número de viragens à direita é elevado, particularmente sempre que a sua proporção seja igual ou superior a 50% (correspondente aos cenários C2, C3, C6, C7 e C10). Por oposição, sempre que a proporção de viragens à esquerda aumenta, o desempenho das duas soluções é afetado de forma significativa, embora com um agravamento mais acentuado nas turbo-rotundas.

Analisando os resultados dos três cenários com grande percentagem de movimentos de ida em frente (C13, C14 e C15) verifica-se que, apesar dos *layouts* adoptados para as turbo-rotundas A e B favorecerem os movimentos de circulação no corredor principal, as rotundas convencionais são muito mais eficientes que as turbo-rotundas. A visualização detalhada da simulação, permitiu concluir que a diferença de desempenho registada se deveu maioritariamente à rotunda C, cujo *layout* de turbo-rotunda escolhido “*knee*” embora favoreça os movimentos de viragem à direita se revela claramente menos eficaz na resposta aos movimentos de ida em frente. A Figuras 4.8 mostra, de forma comparativa para as duas soluções em análise, os resultados da simulação para o mesmo período de simulação (próximo das 8h30, correspondentes ao cenário C15).

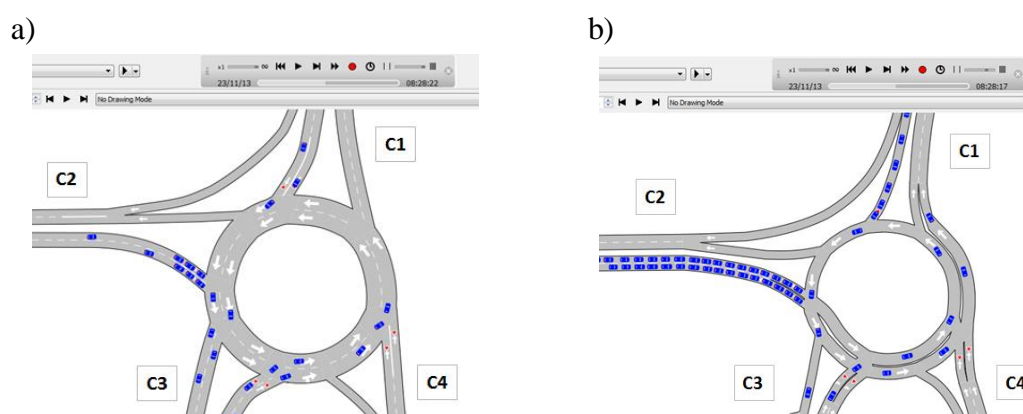


Figura 4.8 – Comparação das condições de circulação da rotunda C, em ambos os modelos de microssimulação, para o cenário C15.

É evidente a formação de filas de espera na entrada C-1 devido à diminuição da capacidade da entrada na turbo-rotunda, decorrente da eliminação de uma via de entrada. Por outro lado, é igualmente visível a formação de filas de espera significativas na entrada C-2. O congestionamento acentuado dessa entrada tende a justificar a diminuição significativa do desempenho do corredor de turbo-rotundas, para os cenários associadas a elevadas repartições

de movimentos de ida em frente comparativamente ao corredor de rotundas convencionais. Na rotunda C, contrariamente às restantes duas rotundas, existem três entradas sujeitas a um nível de procura elevado, designadamente os ramos C-1 e C-3, pertencentes à via circular, e o ramo C-2 com tráfego proveniente do Vale das Flores. Verifica-se que a geometria da rotunda convencional, com duas vias em todas as entradas, permite responder com maior eficiência aos níveis de procura de tráfego nas várias entradas, comparativamente à turbo-rotunda, onde maioritariamente apenas é disponibilizada uma via única de saída.

Ou seja, enquanto na rotunda convencional os veículos na entrada C-2 podem utilizar de forma equilibrada as duas vias de entrada para sair em direção a C-4, no caso da turbo-rotunda, apenas é possível aceder à mesma saída pela via exterior. A perda de capacidade dessa entrada é ainda agravada pelos seguintes problemas: (i) diminuição das oportunidades de entrada no anel de circulação devido à concentração dos movimentos de C-1 para C-3 numa única via de circulação no anel e, (ii) vários condutores optam por adotar a via interior para sair em C-4, o que os obriga a realizar um movimento de 360 graus no anel, agravando o fluxo conflituante.

EFEITO DA REPARTIÇÃO DIRECIONAL (CENÁRIO DE VARIAÇÃO UNIFORME POR ENTRADA MAS COM DIFERENCIAÇÃO NA ROTUNDA B)

Nos cenários C16 a C27, optou-se por fazer variar a repartição direccional na rotunda B inversamente às rotundas A e C, ou seja, à medida que aumenta a proporção de viragens à esquerda nas rotundas A e C, diminui na rotunda B. Curiosamente os resultados obtidos seguem a mesma tendência dos cenários de repartição anteriores. Em todos cenários estudados, o corredor de rotundas convencionais representa a melhor solução, embora seja evidente que, quanto maior for a percentagem de viragens à direita, melhor tende a ser o desempenho das turbo-rotundas. O cenário C16, representativo de 100% viragens à direita nas rotundas A e C e 100% viragens à esquerda na rotunda B é o que apresenta melhores resultados para as turbo-rotundas, sendo também o que mais se aproxima dos valores obtidos para as rotundas tradicionais.

A Figura 4.9 mostra, a título de exemplo, a variação do indicador das demoras para os dois modelos em comparação (cenário C16 ao C27, com incrementos de 25%). Refira-se no entanto que os resultados para os outros dois indicadores de desempenho, seguem o mesmo tipo de andamento.

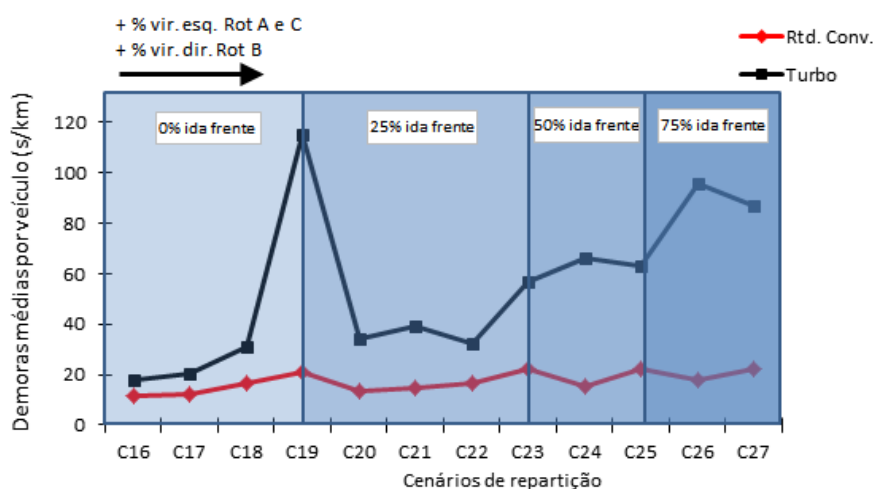


Figura 4.9 – Demoras nos dois modelos de microsimulação para os cenários C16 a C27

A figura acima representada divide os cenários em função da porcentagem de movimentos de ida em frente, sendo que em cada subdivisão vão aumentando as viragens à esquerda nas rotundas A e C ao mesmo tempo que diminuem na rotunda B.

A análise da Figura 4.9 evidencia uma tendência de aumento das demoras à medida que aumenta a importância dos movimentos de ida em frente. É ainda visível um tendencial aumento das demoras com a proporção de viragens à esquerda embora esse efeito não seja tao evidente para níveis elevados dos movimentos de ida em frente. É ainda de realçar que o cenário C19 é o que apresenta pior desempenho para as turbo-rotundas, sendo este o que comporta maior número de viragens à esquerda (100% nas rotundas A e C e 100% viragens à direita em B).

EFEITO DA REPARTIÇÃO DIRECIONAL - SÍNTESE COMPARATIVA

O Quadro 4.1 estabelece a relação entre os resultados das demoras e dos tempos de percurso obtidos para as duas análises anteriores ou seja: (a) repartição igual nas três rotundas; (b) com variação da repartição na rotunda B contrária às rotundas A e C. Os valores constantes do quadro correspondem à relação dos resultados dos indicadores para o cenário C16 sobre o C1, e assim sucessivamente.

Quadro 4.1 – Relação entre os resultados dos cenários C16-C17 e os cenários C1-C14

Cenários comparados	Demoras		Tempos de percurso	
	Rotd. Conv.	Turbo	Rotd. Conv.	Turbo
C16 e C1	1,1	1,7	1,1	1,2
C17 e C2	1,0	1,0	1,0	1,0
C18 e C4	1,0	0,5	1,0	0,7
C19 e C5	1,0	0,5	1,0	0,6
C20 e C6	1,1	1,2	1,1	1,1
C21 e C7	1,0	1,3	1,0	1,1
C22 e C8	1,0	0,6	1,0	0,8
C23 e C9	1,0	0,2	0,9	0,4
C24 e C10	1,1	1,6	1,1	1,3
C25 e C12	0,9	0,4	0,9	0,5
C26 e C13	1,1	1,0	1,0	1,0
C27 e C14	0,9	0,7	1,0	0,8

Tendo por base os valores do Quadro 4.1, confirma-se que a tendência evidenciada pelos dois indicadores de desempenho (demoras e tempos de percurso) é similar, sendo praticamente redundantes quando aplicados ao corredor de rotundas convencionais. É igualmente evidente que os resultados relativos às rotundas convencionais não sofrem grandes alterações, registando-se acréscimos ou decréscimos, de desempenho, nas duas situações estudadas, praticamente negligenciáveis. O mesmo não acontece nas análises aplicadas às turbo-rotundas onde as variações nos resultados são extremamente significativas. Verifica-se que a turbo-rotunda é particularmente sensível à repartição direcional, baixando consistentemente o seu nível de desempenho à medida que aumenta a proporção de viragens à esquerda. Na realidade os resultados correspondem ao expectável. O cenário C1 não integra viragens à esquerda pelo que as demoras são negligenciáveis, pelo que o cenário C16 tende a assumir pior desempenho (inclui viragens à esquerda na rotunda B). Por oposição o cenário C5 corresponde à pior situação onde todas as rotundas assumem a repartição máxima de viragens à esquerda, enquanto que no cenário C19, a rotunda B apenas responde a viragens à direita (melhor desempenho de C19 relativamente a C5).

A título conclusivo, é dedutível desta análise comparativa que as rotundas convencionais apresentam uma maior flexibilidade para acomodar as alterações na repartição direcional, sendo portanto menos sensíveis às variações de repartição direcional inter-rotundas.

4.2.1.2 Desempenho em termos de Impactes ambientais

EFEITO DO CARREGAMENTO DA REDE

Tal como referido anteriormente, a análise desenvolvida limitou-se aos veículos ligeiros. A Figura 4.10 apresenta a análise comparativa do indicador consumo de combustível para as

duas soluções em estudo. A diferença registada para 100% de carregamento da rede é praticamente negligenciável, cifrando-se num acréscimo de cerca de 1,7% para as turbo-rotundas. Contudo, essa diferença acentua-se com o carregamento da rede registando-se um crescimento significativo do consumo nas turbo-rotundas, acompanhando a tendência apresentada anteriormente para os indicadores de capacidade. Para um nível de carregamento de 130% é atingindo um aumento de cerca de 45% no consumo comparativamente ao corredor de rotundas convencionais (ver Figura 4.10).

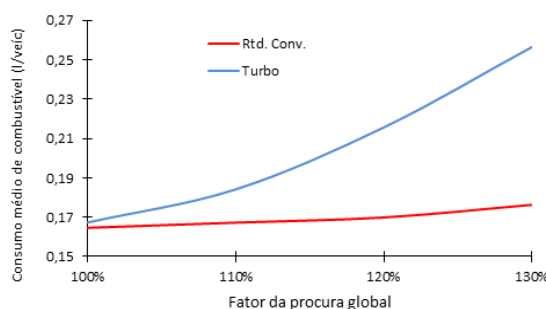


Figura 4.10 – Evolução do consumo de combustível com o aumento da procura global

Também os resultados obtidos ao nível das emissões de poluentes locais seguem o mesmo tipo de andamento dos indicadores de capacidade, embora as diferenças observadas variem consoante o tipo poluente (ver Figura 4.11).

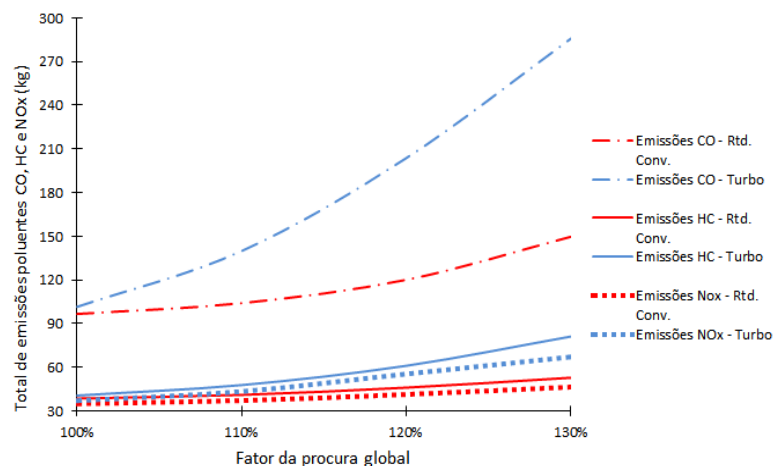


Figura 4.11 – Evolução das emissões globais de CO, HC e NOx com o aumento da procura

Para os quatro cenários de procura, o corredor de turbo-rotundas conduzem a maiores níveis de emissões de CO, HC e NO_x comparativamente ao de rotundas convencionais. À semelhança do observado para os indicadores de capacidade, à medida que o carregamento da

rede aumenta, a diferença de desempenho entre as duas soluções alternativas tende a aumentar. Esse aumento é particularmente significativo em termos de emissões de CO, atingindo-se no cenário de 130% da procura, um aumento de 91%, sendo superior às diferenças registadas para os poluentes HC e NO_x, onde se atingiu aumentos de 54% e de 44%, respetivamente.

Para as emissões globais de CO₂ e de PM por veículo, os resultados apresentados na Figura 4.12 mostram consistentemente um melhor desempenho do corredor de rotundas convencionais para os quatro cenários de procura estudados. À semelhança do que acontece com as emissões de CO, é igualmente evidente um aumento acentuado das emissões nas turbo-rotundas, com o aumento da carga na rede.

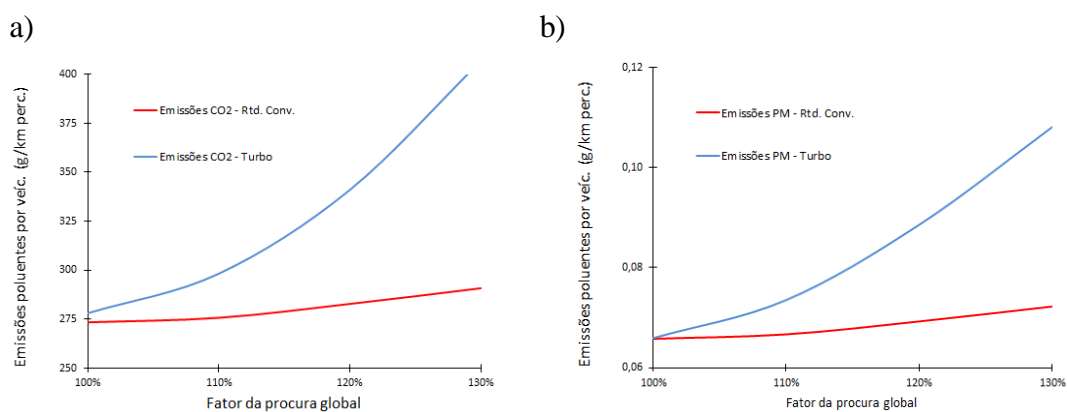


Figura 4.12 – Emissões dos poluentes globais: a) CO₂; b) PM

EFEITO DA REPARTIÇÃO DIRECIONAL (CENÁRIO DE VARIAÇÃO UNIFORME POR ENTRADA E POR ROTUNDA)

A Figura 4.13 compara os resultados para o indicador *consumo de combustível*, para os diferentes cenários de variação da repartição direccional.

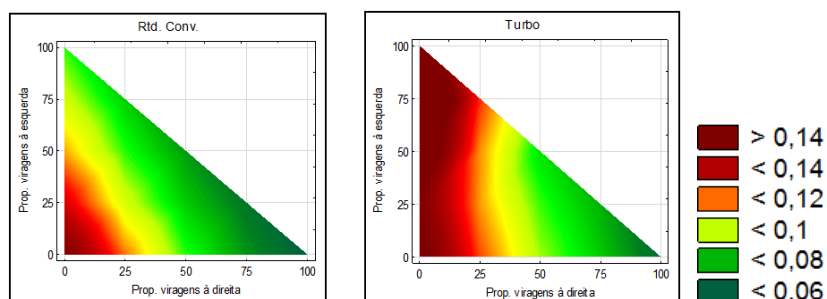


Figura 4.13 – Níveis de consumo das duas soluções para os cenários C1 a C15

A Figura 4.13 evidencia uma aproximação dos níveis de consumo relativos às duas soluções, para os cenários correspondentes a elevadas percentagens de viragens à direita (igual ou superior a 50%). Contudo, para os restantes cenários, o corredor de rotundas convencionais tende a assegurar um melhor nível de desempenho. Nos cenários com maior percentagem de viragens à esquerda, designadamente o C5, C9 as diferenças entre as duas soluções excedem os 90%, favoravelmente às rotundas convencionais.

A avaliação dos mesmos cenários em termos de emissões dos poluentes CO, HC e NO_x (Figuras 4.14, 4.15 e 4.16) e dos poluentes CO₂ e PM (Figuras 4.17 e 4.18), aponta igualmente para um melhor desempenho do corredor de rotundas convencionais na generalidade dos cenários.

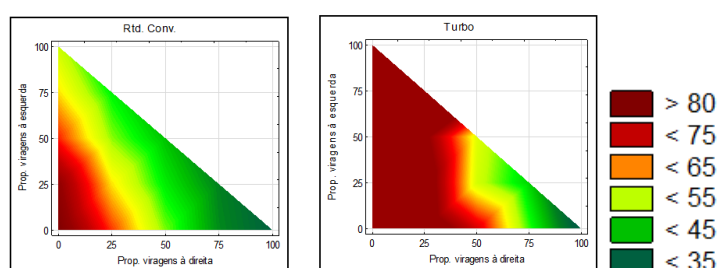


Figura 4.14 – Emissões de CO para os cenários C1 a C15 (kg)

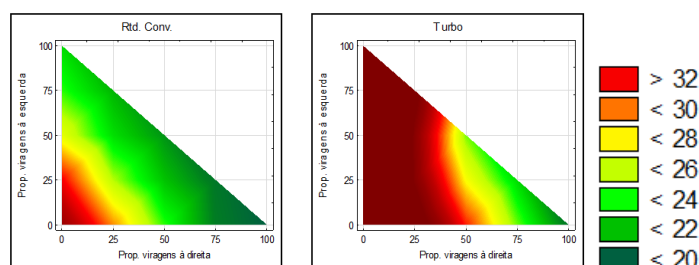


Figura 4.15 – Emissões de HC para os cenários C1 a C15 (kg)

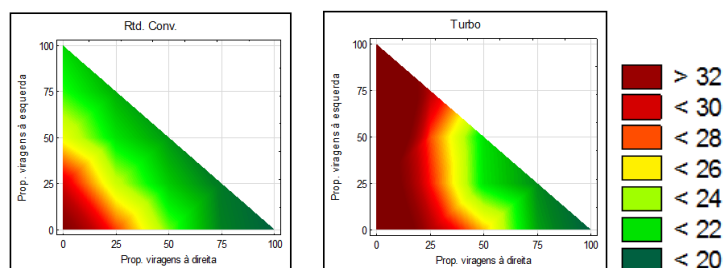


Figura 4.16 – Emissões de NOx para os cenários C1 a C15 (kg)

Para os poluentes CO, HC e NO_x, o único cenário favorável às turbo-rotundas é o C1, que atinge uma redução de 6% comparativamente às rotundas convencionais. As Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 evidenciam um maior equilíbrio entre o desempenho das duas soluções quando a percentagem de viragens à direita é significativa (igual ou superior a 50%), sendo que nestas condições, o aumento de emissões nas turbo-rotundas face às rotundas convencionais é inferior a 30% para o CO e inferior a 20% para o HC e o NO_x.

Por sua vez, para os poluentes CO₂ e PM (ver Figuras 4.17 e 4.18), o desempenho das duas soluções alternativas é mais aproximado na maioria dos cenários, embora se continuem a evidenciar vantagens associadas ao corredor de rotundas. São atingidos aumentos médios de emissões de cerca de 15% com a transformação em turbo rotundas, excetuando-se os cenários associados a uma percentagem elevada de viragens à esquerda (C5, C9 e C12), onde os aumentos de emissões foram muito significativos.

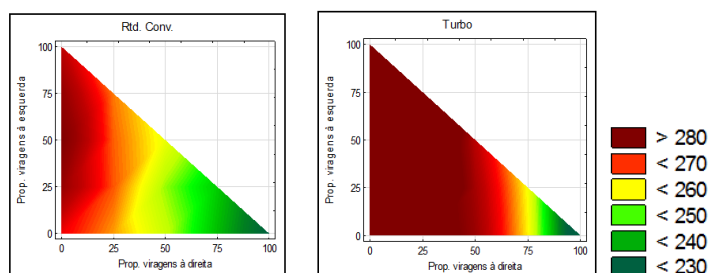


Figura 4.17 – Emissões de CO₂ para os cenários C1 a C15 (g/veíc./km)

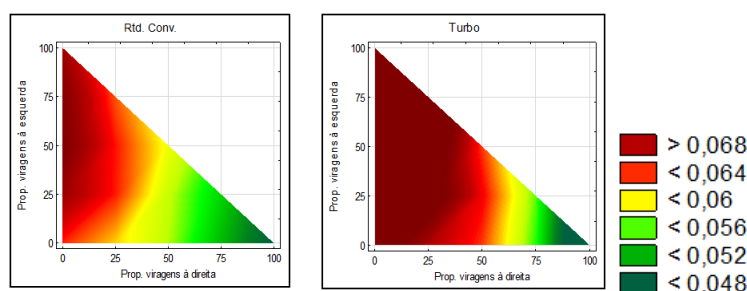


Figura 4.18 – Emissões de PM para os cenários C1 a C15 (g/veíc./km)

EFEITO DA REPARTIÇÃO DIRECIONAL (CENÁRIO DE VARIAÇÃO UNIFORME POR ENTRADA MAS COM DIFERENCIAÇÃO NA ROTUNDA B)

A análise desta repartição direcional (cenários C16 a C27) conduziu a resultados similares à análise anterior. Em termos gerais, constata-se um melhor desempenho das rotundas convencionais relativamente à turbo-rotundas e com uma tendência de aproximação das

emissões nas turbo-rotundas, nos cenários com maior percentagem de viragens à direita, particularmente no cenário C16.

As diferenças registadas para os poluentes HC e NO_x, contrariamente aos restantes poluentes analisados, não seguem a mesma lógica dos resultados dos indicadores de capacidade. É ainda importante referir que os resultados obtidos diferem dos obtidos no estudo de Vasconcelos et al (2014), uma vez que apontam para um aumento generalizado deste tipo de emissões contrariamente ao referido estudo. No entanto, os resultados obtidos derivam de modelos de emissões mais antigos e igualmente menos rigorosos, pelo que os resultados aqui obtidos deverão ser encarados com precaução, exigindo análises complementares.

4.2.1.3 Considerações sobre os resultados

Tendo por base níveis elevados de carregamento da rede, torna-se evidente o melhor desempenho do corredor de rotundas convencionais comparativamente ao de turbo-rotundas, tanto ao nível da capacidade como ao nível das emissões ambientais.

Apesar do estudo ao nível de um corredor turbo-rotundas nunca ter sido feito anteriormente, considerando os resultados existentes de outros estudos comparativos aplicados a soluções isoladas, para os quais se recorreu igualmente a técnicas de microsimulação (Bastos Silva et al., 2011 e Vasconcelos et al., 2014), não seria de esperar, à partida, que a diferença de desempenho se revelasse tão acentuada, identificando-se apenas dois cenários (C1 e C16), entre os 31 avaliados, onde as turbo-rotundas apresentam um desempenho similar ou ligeiramente superior.

Analisando apenas os cenários de variação global da procura, verifica-se logo para o cenário correspondente à procura atual observada já existem diferenças significativas, principalmente ao nível das demoras, agravando acentuadamente com o aumento global de procura, o que indicia que as turbo-rotundas já estarão a funcionar no limiar da sua capacidade, motivo pelo qual o seu desempenho poderá ter sido fortemente condicionado.

De fato importa enfatizar que uma diferença relevante em relação ao estudo apresentado por Vasconcelos et al. (2014) se prende com o volume de tráfego de base às análises. O caso de estudo consistiu na transformação de uma rotunda convencional, com uma só via de circulação, numa turbo-rotunda, pelo que os volumes de tráfego envolvidos eram consideravelmente inferiores aos valores recolhidos para as três rotundas em estudo nesta dissertação.

Relativamente aos cenários de variação da repartição direccional, os resultados mostram que o desempenho das turbo-rotundas piora significativamente com o aumento da percentagem de viragens à esquerda, sendo que mesmo para os cenários com maior proporção de viragens à direita, as turbo-rotundas mantenham um ligeiro pior desempenho, muito possivelmente devido à ocorrência de condições saturadas.

Assim, considerou-se relevante reavaliar o funcionamento dos dois sistemas viários alternativos, para condições não saturadas.

4.2.2 Condições não saturadas

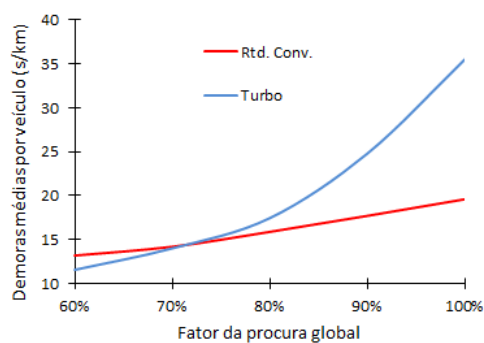
Tal como avaliado no ponto 3.4.3, é previsível que algumas das entradas mais carregadas das rotundas existentes já se encontrem a funcionar no limiar de saturação e portanto em condições próximas da saturação, é expectável que o desempenho do corredor de turbo-rotundas seja francamente afetado por essa condição de base. Optou-se assim por estudar alguns cenários adicionais tendo por base a matriz O/D original, sujeita a fatores de redução. Foram definidos quatro cenários, com fatores de redução compreendidos entre 60% e os 90%, para o período completo entre as 7:30 e as 9:30.

4.2.2.1 Efeito do carregamento da Rede

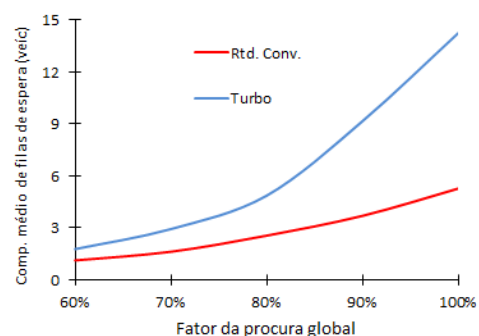
DESEMPENHO EM TERMOS DE CAPACIDADE

A Figura 4.19 mostra a evolução dos três indicadores da capacidade, nos diferentes níveis de procura.

a)



b)



c)

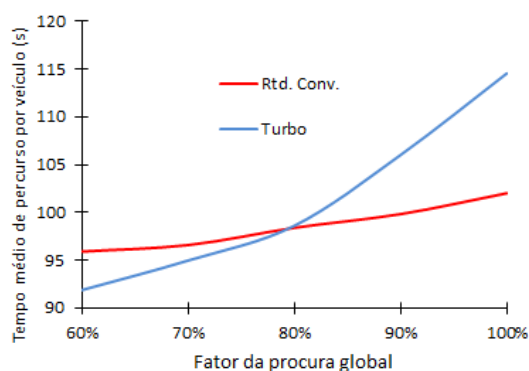


Figura 4.19 – Evolução dos indicadores de capacidade com o aumento da procura: a) demoras; b) filas de espera; c) tempos médios de percurso

A análise cuidada das figuras acima permite concluir que o corredor de turbo-rotundas, para condições não saturadas assume um nível de desempenho similar ou mesmo ligeiramente superior ao associado ao corredor de rotundas convencionais. Esse benefício, embora pouco significativo, tende a aumentar com o abaixamento da carga na rede (carga inferior a 70%). Em termos de demoras e tempos de percurso, a degradação do desempenho do corredor de turbo rotundas acentua-se, particularmente a partir do factor 80%, onde as rotundas convencionais já se revelam mais eficientes. Em termos de filas de espera, as rotundas tradicionais apresentam sempre melhores resultados, à semelhança dos resultados já obtidos anteriormente por Vasconcelos et al. (2014).

IMPACTES AMBIENTAIS

A Figura 4.20 apresenta a evolução do consumo de combustível para os quatro cenários de procura estudados.

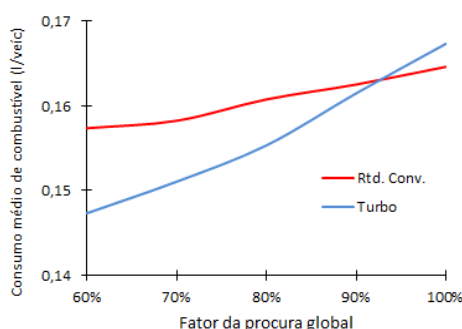


Figura 4.20 – Evolução do consumo de combustível com o aumento da procura global

A análise da Figura 4.20 mostra uma redução do consumo de combustível nas turbo-rotundas, cuja diferença para as rotundas tradicionais vai reduzindo à medida que a procura aumenta, havendo um desempenho equilibrado entre ambas as soluções na procura global de 90%. É

contudo de notar que, à semelhança das demoras e tempo de percursos, também ao nível deste indicador, o afastamento das curvas seja particularmente sensível ao aumento da carga na rede.

Ao nível das emissões de poluentes, as figuras seguintes contêm os resultados das emissões locais de CO, HC e NO_x (Figura 4.21) e das emissões por veículo de CO₂ e PM (Figura 4.22).

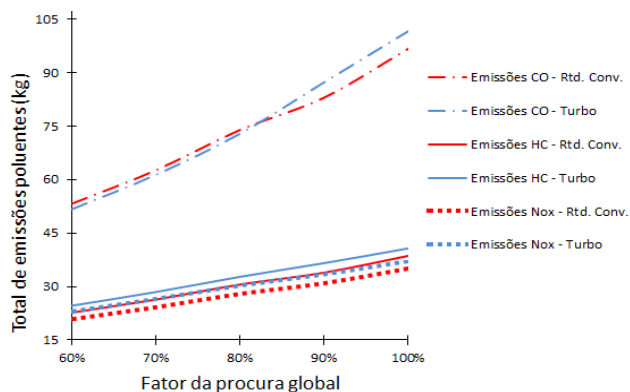


Figura 4.21– Evolução das emissões de CO, HC e NOx com o aumento da procura global

Também ao nível destes indicadores, se verifica algum equilíbrio entre o desempenho das duas soluções, registando-se uma redução marginal das emissões de CO nas turbo-rotundas, face às convencionais, para cargas na rede interiores a 80%. Contudo e para o cenário de 90% as turbo-rotundas conduzem a um aumento de 5% nas emissões de CO. Em todos os cenários de procura, as turbo-rotundas registam aumentos nas emissões de HC e NOx entre 8 e 10%, comparativamente à rotundas tradicionais.

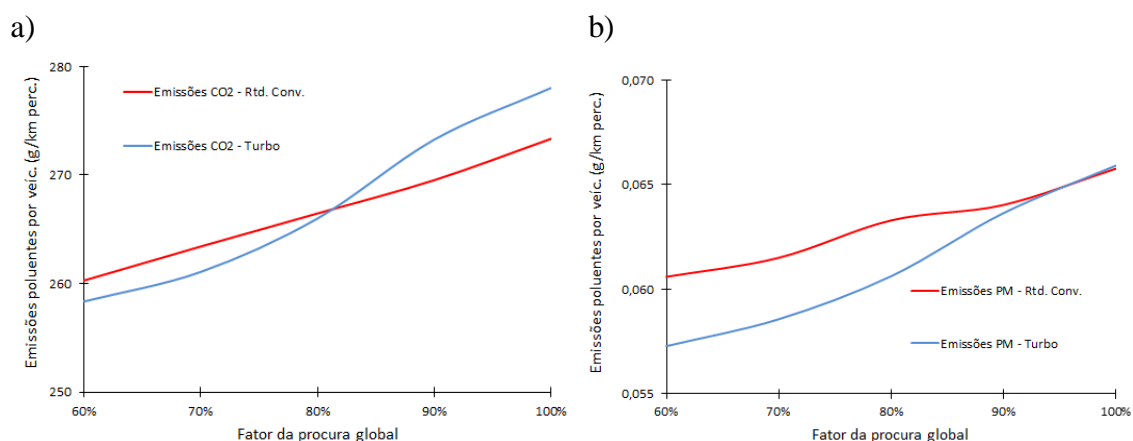


Figura 4.22 – Evolução das emissões de CO₂ (a) e PM (b) com o aumento da procura

Os resultados das emissões de CO₂ são similares aos obtidos nos indicadores de capacidade. Nos cenários de 60 e 70%, da procura as turbo-rotundas revelam-se ligeiramente mais eficientes, mas sofrem uma redução acentuada do desempenho a partir da procura de 80%, sendo que para procura de 90% as rotundas convencionais já se apresentam como a melhor solução. Verificam-se resultados semelhantes para as emissões de PM, ainda que as turbo-rotundas apresentam melhor desempenho nos 4 cenários, com uma redução marginal de 0,6% no cenário de procura de 90%.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise destes cenários complementares permitiu confirmar a sensibilidade dos diversos indicadores de desempenho ao nível de carregamento da rede e, em particular em relação às condições saturadas/não saturadas. O nível de redução do desempenho é francamente mais acentuado para condições de saturação, onde os níveis de desempenho decaem acentuadamente. No entanto, para condições não saturadas, o desempenho das turbo-rotundas aproxima-se das rotundas convencionais atingindo melhores resultados para cargas de rede inferiores a 60%.

Os resultados obtidos mostram que as turbo-rotundas tendem a degradar o seu modo de funcionamento de forma mais acentuada que as rotundas convencionais, depois de atingido o limiar de saturação. A avaliação efetuada é válida para a repartição real do tráfego, contudo, é importante estender a análise aos vários cenários de variação da repartição direccional, sob condições de procura reduzida.

4.2.2.2 Efeito da repartição direccional – condições não saturadas

Neste ponto pretende-se avaliar as diferenças de desempenho das duas soluções alternativas, quando se faz variar a repartição direccional nas diferentes entradas, tendo por base condições de procura de tráfego não saturadas. Dadas as limitações da extensão do documento não se revelou viável refazer as análises aplicadas aos 27 cenários de repartição para os quatro factores de procura estudados (60 a 90%), pelo que se optou por construir uma matriz O/D correspondente aos dados reais dos primeiros 30min, e mante-los constantes ao longo do período de 2h de simulação.

4.2.2.2.1 Em termos de capacidade

EFEITO DA REPARTIÇÃO DIRECCIONAL (CENÁRIO DE VARIAÇÃO UNIFORME POR ENTRADA E POR ROTUNDA)

Tendo como perspetiva os cenários de variação da repartição direccional, apresentam-se nas Figuras (4.23, 4.24 e 4.25) os resultados obtidos para os cenários C1 a C15.

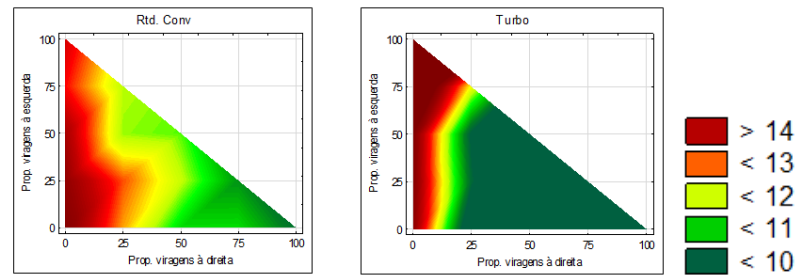


Figura 4.23 – Demoras (s/km/veíc.)

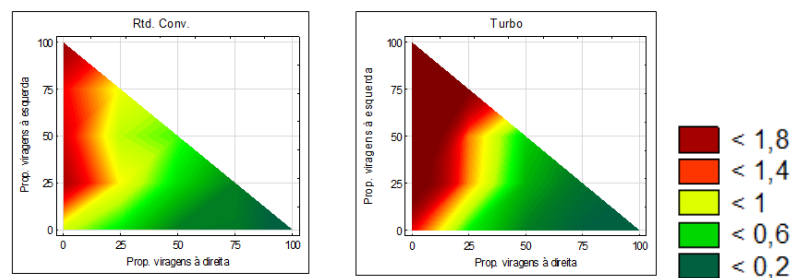


Figura 4.24 – Filas de espera (veíc.)

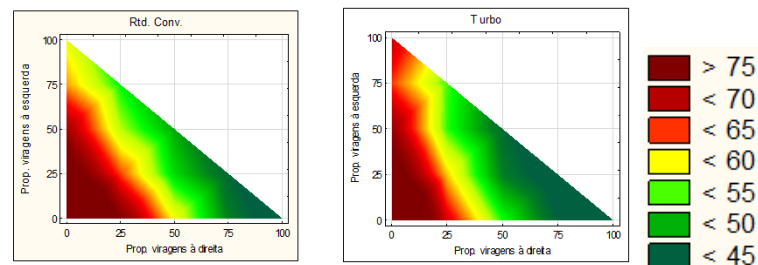


Figura 4.25 – Tempos de percurso (s/veíc)

Na maioria repartições consideradas, as turbo-rotundas revelam um desempenho similar ou ligeiramente superior aos das rotundas convencionais. Para os cenários onde a percentagem de viragens à esquerda é relevante, particularmente nos cenários C5 e C9 as rotundas convencionais continuam a revelar-se como mais adequadas.

EFEITO DA REPARTIÇÃO DIRECIONAL (CENÁRIO DE VARIAÇÃO UNIFORME POR ENTRADA MAS COM DIFERENCIAÇÃO NA ROTUNDA B)

Relativamente aos cenários C16 a C27 verifica-se consistentemente um melhor desempenho das turbo-rotundas comparativamente às convencionais, tanto nas demoras como nos tempos de percurso, principalmente nos cenários onde a percentagem de viragens à direita é elevada.

As Figuras 4.26 e 4.27 resumem os resultados dos cenários C16 a C27 ao nível das demoras e tempos de percurso.

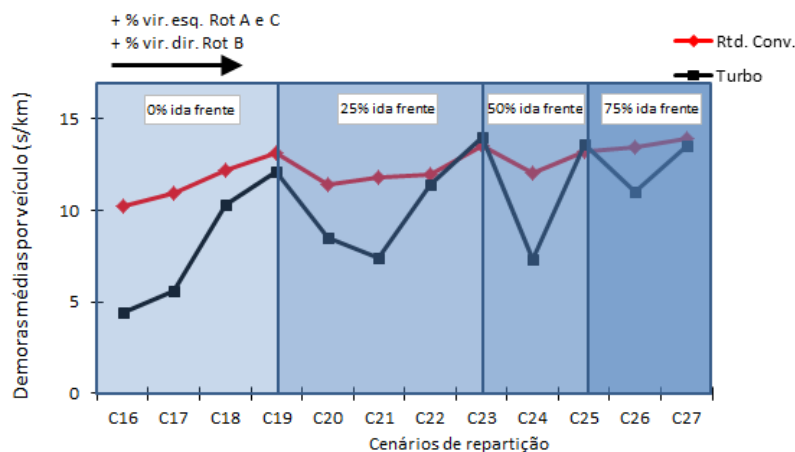


Figura 4.26 – Evolução das demoras nos cenários C16 a C27

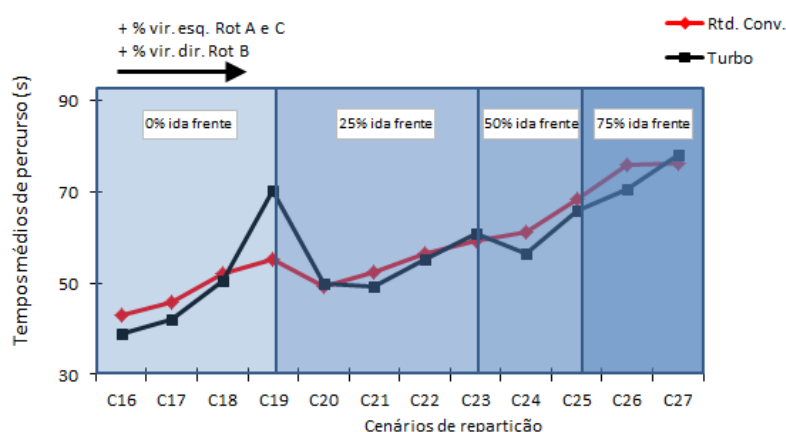


Figura 4.27 – Evolução dos tempos médios de percurso nos cenários C16 a C27

Os gráficos das Figuras 4.26 e 4.27 apontam para o melhor desempenho das turbo-rotundas na maioria dos cenários, ainda que, para percentagens muito elevadas de viragens à esquerda, ambas as alternativas assegurem níveis de desempenho semelhantes, com exceção do cenário C19, onde há um aumento de 27% nos tempos de percurso nas turbo-rotundas.

Relativamente às demoras, a diferença entre o desempenho das duas soluções sofre grandes oscilações consoante as diferentes repartições direcionais, enquanto que para os tempos de percurso os resultados revelam um nível de desempenho mais equilibrado, com diferenças inferiores a 10%, à exceção do cenário C19. Esta conclusão é igualmente válida para os

cenários C1 a C15, novamente com a excepção do cenário C5, onde a diferença entre os tempos de percurso é de 17%.

Em termos de filas médias de espera, a análise efectuada aos diferentes cenários (C1 a C27) mostrou que as rotundas convencionais mantiveram o melhor desempenho face à generalidade dos cenários, havendo apenas uma redução de filas nas turbo-rotundas em 6 dos 27 cenários avaliados, todos associados a elevadas percentagens de viragens à direita. Porém, devido à baixa procura, os comprimentos das filas de espera nos dois modelos de microsimulação são muito reduzidos, pelo que este indicador não terá grande significado para este período de análise.

4.2.2.2 Impactes ambientais

A Figura 4.28 resume os resultados obtidos para os cenários C1 a C15 em termos de consumo de combustível.

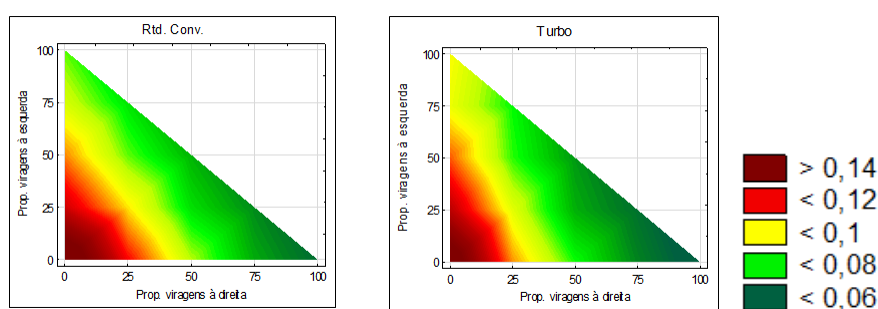


Figura 4.28 – Consumo de combustível (l/veículo)

Da análise efectuada às Figuras 4.28 pòde-se concluir que as turbo-rotundas conduzem a uma diminuição do consumo de combustível sempre que a percentagem de viragens à direita é superior ou igual a 50%.

Para os cenários C16 a C27 foram obtidos resultados análogos, com um melhor desempenho geral das turbo-rotundas, exceptuando alguns cenários com elevada importância nos movimentos de viragem à esquerda. O cenário C19 foi o que comportou o pior desempenho relativo das turbo-rotundas, tendo-se registado um aumento do consumo de 33%.

As figuras seguintes resumem os resultados obtidos ao nível das emissões poluentes dos cenários C1 a C15.

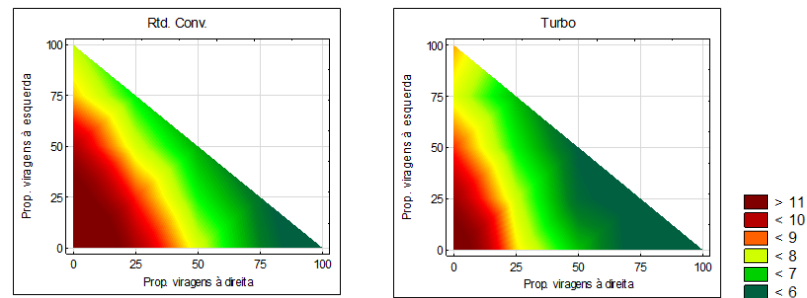


Figura 4.29 – Emissões de CO (kg)

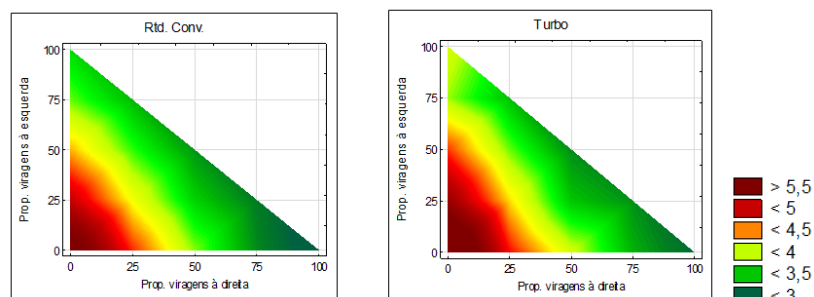


Figura 4.30 – Emissões de HC (kg)

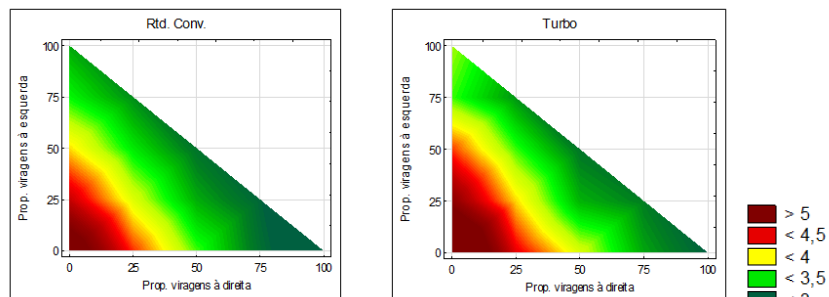


Figura 4.31 – Emissões de NOx (kg)

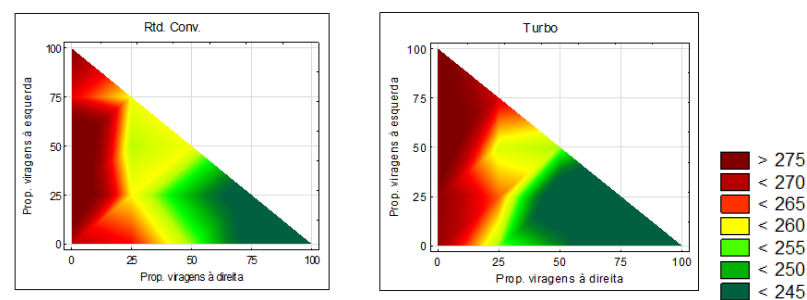


Figura 4.32 – Emissões de CO₂ (g/veíc/km)

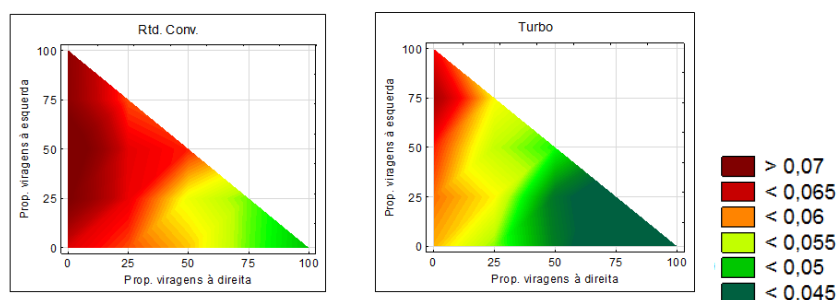


Figura 4.33 – Emissões de PM (g/veic/km)

Para o poluente CO, as turbo-rotundas revelam um desempenho melhor ou similar na generalidade dos cenários. Os resultados das emissões de CO₂ são ainda mais nivelados, com diferenças iguais ou inferiores a 5%, com excepção dos cenários com maior percentagem de viragens à direita. Ao nível das emissões de PM, o desempenho das turbo-rotundas é superior em todos os cenários e com diferenças significativas, particularmente nos cenários com maior percentagem de viragens à direita, nos quais se verificam reduções entre 19 e 37%. Para os três poluentes é verificada uma melhoria no desempenho das turbo-rotundas com o aumento das viragens à direita.

Pelo contrário, nas emissões de HC e NO_x o desempenho das rotundas convencionais é tendencialmente superior na grande maioria dos cenários, ainda que a diferença seja quase sempre inferior a 10%. Atendendo ainda à heterogeneidade dos resultados destes dois poluentes, não foi possível retirar conclusões precisas sob aos efeitos da variação da repartição direccional ao nível das emissões.

As mesmas conclusões puderam ser retiradas da análise aos cenários C16 a C27, nos quais as turbo-rotundas apresentam uma redução nas emissões de CO, CO₂ e PM e um aumento nas emissões de HC e NO_x.

4.2.3.3 Considerações sobre os resultados

Os resultados obtidos nesta análise revelam importantes alterações comparativamente à análise para as condições de saturação. Enquanto que na primeira análise existe uma clara vantagem das rotundas convencionais nos dois níveis de desempenho, com a diminuição do nível de procura há uma inversão dos resultados. Relativamente aos impactes ambientais, as turbo-rotundas apresentam a uma redução das emissões de CO, CO₂ e PM, e do nível de consumo, acompanhando os resultados dos indicadores de capacidade. Por outro lado, nas turbo-rotundas há um aumento sistemático das emissões de HC e NO_x comparativamente às rotundas convencionais.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

A turbo-rotunda tem vindo a afigurar-se como uma solução alternativa às rotundas convencionais com múltiplas vias, face às já comprovadas melhorias que assegura ao nível da segurança rodoviária e, em particular, na resolução dos problemas de entrecruzamentos nas entradas, anel e saída das rotundas convencionais. São ainda escassos os trabalhos de investigação que avaliem o seu nível de desempenho, desconhecendo-se a existência de trabalhos científicos centrados na avaliação da sua aplicação em corredor. Por essa razão, a presente dissertação elegeu como objetivo principal a avaliação do funcionamento de um corredor de turbo-rotundas, aos diferentes níveis, designadamente em termos de capacidade e de eficiência energético-ambiental.

Em termos metodológicos, e à semelhança de trabalhos científicos anteriores, optou-se por avaliar o aumento/redução dos níveis de desempenho comparativamente às rotundas convencionais de duas vias de circulação, na medida em que constituem alternativas diretas de regulação do tráfego. Na impossibilidade de recorrer a análises do tipo “antes de depois”, pelo fato de não existirem soluções piloto construídas em Portugal, optou-se por recorrer a uma plataforma de microssimulação (modelo AIMSUN). O modelo construído foi baseado na codificação de uma situação real e calibrado para os níveis de procura de tráfego/modo de funcionamento atuais.

Em termos gerais, considera-se que os objetivos inicialmente propostos no âmbito desta na dissertação foram cumpridos, tendo sido possível chegar a um conjunto de conclusões particularmente interessantes, designadamente quando comparados com os resultados de trabalhos anteriores.

As análises desenvolvidas procuraram avaliar dois efeitos fundamentais: (i) efeito da carga de tráfego atribuída à rede; (ii) efeito da repartição direcional nas entradas. Os resultados encontrados apontaram para uma consistente redução do desempenho do corredor de turbo-rotundas comparativamente às rotundas convencionais, com o aumento da procura de tráfego global. O corredor de turbo rotundas atingiu o limiar de saturação para cargas próximas dos 90% enquanto que o corredor de rotundas convencionais, responderam a níveis de

carregamento bastante superiores, atingindo a saturação para níveis de carregamento próximos dos 120%. Complementarmente, verificou-se que, independentemente do indicador de desempenho adotado, a perda do nível de desempenho, com o aumento de carregamento da rede, é francamente mais acentuado no corredor de turbo-rotundas, depois de atingido o limiar de saturação.

O primeiro grupo de análises baseou-se na atribuição à rede dos volumes de tráfego reais observados, os quais corresponderam a um modo de funcionamento das turbo-rotundas em condições saturadas. Os resultados obtidos apontaram consistentemente, e independentemente dos cenários de repartição direcional em estudo, para uma perda do desempenho das turbo-rotundas relativamente as rotundas convencionais. Apenas nos cenários com elevada percentagem de viragens à direita (> a 50%) se registou uma aproximação dos níveis de desempenho associados às duas soluções alternativas.

O segundo grupo de análises centrou-se na avaliação do desempenho do sistema quando sujeito a carregamentos de rede abaixo do limiar de saturação (condições não saturadas). Os resultados obtidos foram particularmente interessantes e diferentes dos obtidos para as condições saturadas. Apesar da sensibilidade do sistema ao carregamento da rede ser francamente menos acentuada, verificou-se que para níveis de carga inferiores a 70% as turbo-rotundas tenderam a oferecer maiores níveis de desempenho de capacidade (embora ligeiros), associada a demoras e tempos de percurso ligeiramente inferiores aos associados ao corredor de rotundas convencionais. Para cargas de 80%, as duas soluções apresentaram níveis de desempenho semelhantes (com a exceção do consumo de combustível que se manteve inferior nas turbo-rotundas), sendo que para cargas superiores a 90%, o corredor de rotundas convencionais já se apresentou como a melhor solução.

A avaliação dos diferentes cenários de repartição direcional em condições não saturadas confirmou os resultados da análise anterior, onde se pôde constatar que, para volumes de tráfego reduzidos, o corredor de turbo-rotundas tende a assegurar um melhor nível de desempenho comparativamente às rotundas convencionais, tanto em termos de capacidade como de impactes ambientais. No entanto, face a elevadas percentagens de viragens à esquerda, obteve-se consistentemente um melhor desempenho no corredor de rotundas convencionais.

A imposição de diferentes combinações de repartição direcional nas duas rotundas extremas e na rotunda central, evidenciou uma maior dificuldade das turbo-rotundas para responderem à variação da repartição direcional. Por sua vez, as rotundas convencionais mostraram-se pouco sensíveis a essa variação repartição direcional.

Em termos de emissões poluentes, concluiu-se que, sob condições de procura reduzida, as turbo-rotundas levam a uma redução potencial das emissões de CO, CO₂ e PM, sendo estas tanto mais elevadas quanto maior for a percentagem de viragens à direita. Por outro lado, os resultados mostraram que as turbo-rotundas tendem a aumentar as emissões de HC e NO_x, comparativamente às rotundas convencionais, independentemente do nível de procura.

Estes resultados estão, de forma geral, em consonância com os resultados obtidos em trabalhos anteriores a nível nacional, aplicados a uma turbo-rotunda isolada quer ao nível da redução da capacidade global, da influência da repartição do tráfego, bem como em termos de emissões poluentes. Apesar disso, verificou-se que a sua aplicação em corredor tende a revelar-se mais sensível à repartição direcional na sequência de rotundas, atingindo variações muito acentuadas do nível de desempenho em função das diferentes combinações de repartição direcional estudadas.

Apesar das análises incluídas nesta dissertação apontarem maioritariamente para uma vantagem (particularmente acentuada em condições de saturação) do corredor de rotundas convencionais comparativamente ao de turbo-rotundas, importa sublinhar que a análise desenvolvida não incluiu as análises de segurança rodoviária. Considera-se assim que a seleção da solução a adotar, deverá ser baseada numa análise global que não poderá descurar esta análise fundamental, onde tendencialmente a turbo-rotunda se revela tendencialmente favorável.

Finalmente, os resultados permitem ainda confirmar o domínio privilegiado de aplicação das turbo-rotundas. Independentemente das mesmas serem aplicadas em termos isolados ou em corredor, a sua aplicação revela-se particularmente adequadas em domínio suburbano sujeita a níveis de procura de tráfego moderadas, garantindo um nível de funcionamento abaixo do limiar de saturação, ou em locais onde se pretenda aumentar os níveis de segurança geral.

5.2 Trabalhos futuros

O presente estudo de investigação apresenta um trabalho não acabado deixando em aberto caminhos e linhas de investigação complementares que importa identificar. A robustez dos resultados deverá obrigar ao estudo de um conjunto de cenários complementares envolvendo designadamente diferentes combinações de carga e de repartição direcional nos ramos principais e secundários.

É igualmente pertinente o alargamento deste tipo de estudo a outros *layouts*, testando diversas combinações de soluções geométricas, no sentido de otimizar a solução global, face a diferentes cenários de repartição direcional, de modo a perceber melhor a influência desses layouts no desempenho global do corredor.

Por outro lado, o próprio modelo *Logit* adoptado para escolha discreta dos trajetos assume uma grande importância na modelação das turbo-rotundas. Tendo este sido calibrado, no âmbito desta dissertação, por um processo teórico de “tentativa erro”, este campo justifica o desenvolvimento de investigação complementar no sentido calibrar a escolha de trajectos com base em observações reais. Para tal, sublinha-se a importância de se construir em Portugal, um caso piloto que permita calibrar de forma fidedigna os modelos de estimação de capacidade/emissões poluentes.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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. e Seco, Á.J.M. (2008). “Dimensionamento de Rotundas – Manual de Boas Práticas”, Edição INIR (Instituto de Infraestruturas Rodoviárias, Coimbra, Portugal.
- Bastos Silva, A.M.C., Vasconcelos 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.M.C. (2012) “Das Rotundas às Turbo-Rotundas”. Conferências@dec 2012, Departamento de Engenharia Civil, FCTUC, 18 – 19 abril, Coimbra, Portugal.
- Bastos Silva, A.M.C, Santos, S. e Gaspar, M. (2013) “Turbo-roundabout use and design”, CITTA 6th Annual Conference on Planning Research, Coimbra, Portugal.
- Bovy, H., Dietrich, K. e Harmann A. (1991). “Guide Suisse des Giratoires, mandat de recherche” 9/98, VSS/FSR/EPFL, ISBN 2 – 8298-0065-6, Février, Lausanne, Suisse. Citado por Yperman e Immers (2003).
- Brilon, W. (2005). “Roundabouts: A State of the Art in Germany”, National Roundabout Conference, May 22 – 25, Vail, Colorado, USA.
- Brilon, W. (2011). “Experiences with Modern Roundabouts in Germany – a State of Art Report”, Ruhr-University Bochum, Institute for Transportation and Traffic Engineering, February 2011, Athens, Greece.
- Brown, M. (1995). “The Design of Roundabouts – State of the Art Review”, Transport Research Laboratory (TRL).
- Corriere, F., Guerrieri, M. (2012). “Performance Analysis of Basic Turbo-Roundabouts in Urban Context”, In SIIV – 5th International Congress – Sustainability of Road Infrastructures, Procedia – Social and Behavioral Sciences. Volume 53, 622–632.
- DfT (1993). “Geometric Design of Roundabouts (TD 16/93)” – Department for Transport. Design Manual for Roads and Bridges, Volume 6, Section 2, Part 3.

- Engelsman, J., e Uken, M. (2007). "Turbo Roundabouts as an alternative to two lane Roundabouts", proceedings of 26th Annual Southern African Transport Conference (SATC), Pietermaritzburg, KwaZulu-Natal, South Africa.
- FHWA (2000). "Roundabouts: An Informational Guide". Report 672 – U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration – Publication nº RD-00-067, June, Virginia, USA.
- Fisk C.S. (1991). "Traffic Performance Analysis at roundabouts", *Transportation Research* 25B(2–3):89–102. Citado por Vasconcelos et al (2013).
- Fortuijn, L.G.H. e Carton, P.J. (2000). "Turbo circuits: A well-tried concept in a new guise", *Verkeerskundige werkdagen*, CROW, Ede, The Netherlands.
- Fortuijn, L.G.H. (2003). "Pedestrian and Bicycle-Friendly Roundabouts; Dilemma of Comfort and Safety", Delft University of Technology, The Netherlands.
- Fortuijn, L.G.H. (2007). "Turbo-Kreisverkehre Entwicklungen und Erfahrungen", Seminar Aktuelle Theme der Strassenplanung, January, Bergisch Gladbach, Germany.
- Fortuijn, L.G.H. (2009). "Turbo Roundabouts – Design Principles and Safety Performance". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2096, pp. 16–24.
- 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.
- Giuffrè, O., Guerrieri, M. e Granà, A. (2009). "Turbo-Roundabouts General Design Criteria and Functional Principles. Case Studies from Real World", 4th International Symposium on Highway Geometric Design, Valencia, Transportation Research Board, Spain.
- Ha, T.J. e Berg, W.D. (1995). "Development of safety-based level-of-service criteria for isolated signalized intersections", in *Transportation Research Record*, National Research Council, Washington DC, USA. Citado por Mauro e Cattani (2010)
- Hagring, O. (1998). "A further generalization of Tanner's formula", *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 32. Citado por Fortuijn (2011).
- Hydén, C. e Várhelyi, A. (2000). "The effects on safety, time consumption and environment of large scale use of roundabouts in an urban area: a cast study. In: *Accident Analysis & Prevention*". Vol. 32, nr. 1 p. 11-23. Citado por SWOV (2007).
- 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.
- 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.

- Seco, Á.J.M. e Bastos Silva A.M.C. (2008). “Manual do Planeamento de Acessibilidades e Transportes: Rotundas”, Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte (CCDR-N), dezembro, Portugal.
- SWOV (2007). “Fact Sheet: Roundabouts”, Institute for Road Safety Research, August, Leidschendam, The Netherlands.
- Thaweesak Taekratok (1998). “Modern Roundabouts for Oregon”, Oregon Department of Transportation Research Unit, June, Oregon, USA.
- 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.
- Tollazzi, T., Rencelj, M. e Turnsek, S. (2012). “Slovenian Experiences with Turbo-Roundabouts”, Broj 3, godina.
- TSS (2012). “Aimsun Dynamic Simulators User’s Manual” v7, Transport Simulation Systems, October.
- Vasco, M.A.A. (2013). “Análise Energético-ambiental de Rotundas” – Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade de Aveiro, Portugal.
- 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., 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”, 93ª Conferência Anual do Transportation Research Board (TRB), Washington DC, USA.
- 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.

Sites consultados:

- 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/> (acedido em janeiro de 2014).
- Google@2014 – Site oficial do Google. <https://maps.google.pt/> (acedido em janeiro de 2014).
- Ruadelisboacomhistoria @2014 – blog http://aps-ruadelisboacomhistoria.blogspot.pt/2010_10_01_archive.html/ (acedido em Janeiro de 2014).

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 os veículos ligeiros