



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

Avaliação do Impacto das Regras Comportamentais em Rotundas

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

Autor

Carolina Pereira Mesquita Domingues

Orientadores

Professor Doutor Álvaro Jorge da Maia Seco

Professora Doutora Ana Maria César Bastos Silva

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

Coimbra, Julho, 2016

AGRADECIMENTOS

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

Exprimo os meus sinceros agradecimentos aos Professores Doutores Ana Maria César Bastos Silva e Álvaro Jorge da Maia Seco pela orientação e ensinamentos transmitidos que são sempre um gosto de receber da sua parte. Grata por todo o apoio, conselhos e disponibilidade oferecidos e pela exemplar dedicação à profissão.

Aos meus amigos/colegas, Paulo, Ana Rita, Marta, Luís e Rodrigo pela disponibilidade imediata nos trabalhos de recolha de dados essenciais à concretização desta dissertação.

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

Ao Nuno, que acompanhou mais que ninguém a fase final do meu percurso académico, celebrando comigo todos os meus sucessos e ouvindo pacientemente todos os desabafos e frustrações. Obrigada pela partilha, palavras de incentivo e amizade incondicional.

Finalmente, um agradecimento muito especial à minha família. Aos meus pais e avós por me proporcionarem as melhores condições possíveis para a conclusão dos meus estudos no Ensino Superior. Em especial aos meus pais, por acompanharem de uma forma ativa todo o meu percurso académico e por depositarem toda a confiança e apoio em qualquer fase da minha vida. À minha irmã e ao meu cunhado, para além da amizade e defesa dos meus interesses, estou grata pela melhor prenda de conclusão de curso, o Gonçalo.

Um muito obrigada.

RESUMO

As rotundas têm vindo a difundir-se um pouco por todo o mundo dado o seu excelente desempenho geral. Apesar disso, não existe a nível nacional um enquadramento legal adequado que defina regras e procedimentos de condução adaptados a este tipo de interseção e, que apoie, de forma clara, os condutores na sua tarefa de condução ao longo da aproximação e atravessamento, em função do movimento direcional pretendido. Este problema é significativamente agravado face a soluções com múltiplas vias de circulação, onde o número de conflitos tende a aumentar significativamente face à adoção de comportamentos erráticos por parte do condutor. Acresce que a necessidade de salvaguardar níveis elevados de capacidade, designadamente em meios urbanos, frequentemente obriga ao recurso a soluções com múltiplas vias, o que torna este problema ainda mais relevante e premente. As recentes alterações ao Código da Estrada, através da Lei n.º 72/2013 de 3 de setembro, paradoxalmente vieram agravar o problema, impondo práticas de condução que tendem a assumir sérias penalizações quer em termos de capacidade geral, quer mesmo potencialmente de segurança rodoviária da interseção, resultantes das próprias deficiências intrínsecas dos princípios regulatórios assumidos, e da deficiente interpretação e baixo nível de acolhimento das novas regras por parte dos condutores.

Neste contexto, a presente dissertação centra-se na avaliação do impacte de diferentes regras e procedimentos comportamentais aplicados a rotundas com múltiplas vias de circulação, em termos de capacidade, dando particular ênfase às regras patentes na legislação em vigor. Para o efeito e em termos comparativos, são tidos em consideração o enquadramento legal e as boas práticas assumidas por diferentes países considerados *benchmarking*.

O trabalho apoiou-se na aplicação de modelos de microssimulação, que depois de devidamente calibrados e validados, permitiram avaliar o efeito associado às diferentes regras comportamentais pré-selecionadas. Esse efeito foi quantificado em termos de capacidade da entrada e da rotunda, tendo por base um conjunto alargado de cenários de repartição da procura que procuraram avaliar o efeito associado à variação da carga de tráfego na rede e da repartição direcional na entrada.

Foi possível concluir que o respeito pela atual legislação portuguesa em vigor se traduz numa redução muito significativa da capacidade da rotunda, quando comparada com a resultante da aplicação de outros esquemas de circulação, designadamente o inglês e o australiano. Concluiu-se ainda, que a adoção das atuais regras se refletem numa perda de desempenho comparativamente à legislação anterior, entretanto revogada.

ABSTRACT

Roundabouts have been spreading all over the world due to their excellent overall performance. Nevertheless, there is no appropriate national legal framework, which sets driving rules and adapted procedures to this type of intersection, that clearly supports drivers through their driving task along the approach and roundabout crossing, on the basis of the desired directional movement. This problem is significantly worsened as a result of solutions with multiple traffic lanes, where the number of conflicts tends to increase significantly due to the adoption of erratic driver's behaviours. Moreover, the need to maintain high capacity levels, particularly in urban areas, often requires the use of solutions with multiple pathways, which makes this problem even more relevant and urgent. Recent changes to the *Código da Estrada* on *Lei n.º 72/2013 de 3 de setembro*, paradoxically have worsened the problem by imposing driving practices that tend to take serious penalties either in terms of overall capacity, or even potentially in security road intersection, resulting from its own intrinsic deficiencies of assumed regulatory principles, and also a poor interpretation and low level of acceptance of new driving rules by drivers.

In this context, this dissertation focuses on the impact assessment for different rules and behavioural procedures applied to roundabouts with multiple traffic lanes, in terms of capacity, giving special emphasis to the applied rules in the current legislation. To achieve this end and for comparison purposes, legal framework and good practices undertaken by different countries considered benchmarking are taken into account.

This work was based on a microsimulation models' application, which once properly calibrated and validated, allowed to assess the effect associated with the different pre-selected behavioural rules. This effect was quantified in terms of entry capacity input and global roundabout capacity, based on a wide range of demand distribution scenarios that sought to assess the effect associated with the variation of the traffic load on the network and the directional entry distribution.

It was concluded that respect for the current Portuguese legislation translates into a significant reduction of the roundabout's capacity compared to other circulation schemes application, namely English and Australian's. It was also concluded that the adoption of the current rules are reflected in performance loss compared to previous legislation, since revoked.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento ao tema	1
1.2	Objetivos do trabalho	2
1.3	Metodologia adotada	3
1.4	Estrutura do documento.....	3
2	OS MODELOS DE REFERÊNCIA.....	5
2.1	Introdução.....	5
2.1.1	Princípios gerais de definição de regras processuais de circulação em rotundas.....	6
2.1.1.1	Princípios básicos de funcionamento das rotundas.....	7
2.2	O modelo inglês.....	8
2.3	O modelo australiano.....	11
2.4	O modelo americano.....	13
2.5	O modelo francês.....	15
2.6	O modelo português	17
2.6.1	Decreto-Lei nº 44/2005 de 23 de fevereiro	17
2.6.2	Lei n.º 72/2013, de 3 de setembro	19
2.7	Avaliação comparativa dos modelos analisados	21
2.7.1	Generalidades	21
2.7.2	Definição das trajetórias e respetivos procedimentos.....	23
2.7.3	Prioridades relativas entre veículos no anel de circulação	23
3	CONSTRUÇÃO DO MODELO DE MICROSSIMULAÇÃO.....	25
3.1	Introdução.....	25
3.2	Metodologia geral de abordagem	26
3.3	Simulador de tráfego AIMSUN.....	27
3.4	Seleção do local de estudo.....	28
3.5	Construção do modelo	29
3.5.1	Abordagem geral	29
3.5.2	Codificação da rede	30
3.5.3	Recolha de dados de tráfego	31
3.5.4	Tratamento de dados recolhidos	33
3.5.5	Calibração do modelo	34
3.5.6	Validação do modelo	35

3.6	Considerações finais	36
4	AVALIAÇÃO DO IMPACTE DAS REGRAS VIGENTES NO DESEMPENHO DA ROTUNDA.....	37
4.1	Introdução.....	37
4.1.1	Abordagem geral	37
4.2	Definição dos modelos em estudo	38
4.2.1	Codificação da rede	38
4.2.2	Codificação das regras de circulação.....	39
4.2.3	Calibração complementar da rede	39
4.3	Cenários de procura.....	41
4.4	Indicadores de desempenho.....	42
4.5	Avaliação do impacte em termos de capacidade	42
4.5.1	Capacidade global.....	42
4.5.2	Capacidade da entrada crítica.....	48
4.5.2.1	Cenários com movimentos de ida em frente	48
4.5.2.2	Cenários com todos os movimentos direcionais	51
4.5.2.3	Cenários sem movimentos de viragem à direita.....	52
4.5.2.4	Cenários sem movimentos de viragem à esquerda.....	54
4.6	Considerações finais	55
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS	57
6	REFERÊNCIAS	60
	ANEXO I.....	63
	ANEXO II	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Trajetórias corretas numa rotunda segundo o modelo inglês	10
Figura 2.2 – Trajetórias corretas numa rotunda segundo o modelo irlandês	10
Figura 2.3 – Marcações no pavimento de rotundas Australianas e Neozelandesas (NZTA, 2015a)	12
Figura 2.4 – Trajetórias corretas segundo o modelo australiano: a) com setas de seleção (exemplo); b) sem setas de seleção (de acordo com a Convenção de Viena)	13
Figura 2.5 – Trajetórias corretas numa rotunda segundo o modelo americano	14
Figura 2.6 – Trajetórias corretas numa rotunda segundo o modelo francês	16
Figura 2.7 – Trajetórias corretas numa rotunda segundo o modelo português revogado	19
Figura 2.8 – Trajetórias corretas numa rotunda segundo o modelo português vigente	21
Figura 2.9 – Quadro resumo dos modelos de referência apresentados	22
Figura 3.10 – Rotunda em estudo: a) vista entre as entradas C e D; b) vista da entrada B	28
Figura 3.11 – Fluxograma da construção do modelo de microsimulação	29
Figura 3.12 – Codificação da rede de simulação	30
Figura 3.13 – Nomenclatura dos centróides da rede simulada	32
Figura 3.14 – Fluxos de tráfego contabilizados na Fase 2	32
Figura 4.15 – Fluxograma da construção e análise dos modelos estudados	37
Figura 4.16 – Codificação da rede de simulação – Modelos UK, AUS, FR e PT	38
Figura 4.17 - Codificação da regra de viragem à esquerda segundo o modelo AUS	39
Figura 4.18 - Capacidade Global dos modelos de referência (uvle/h)	43
Figura 4.19 – Capacidade Global em relação ao Modelo PT (de referência) (%)	47
Figura 4.20 – Capacidades registadas nas entradas A e D para o Cenário 1	49
Figura 4.21 – Capacidades registadas nas entradas A e D para o Cenário 5	51
Figura 4.22– Capacidades registadas na entrada A para o Cenário 7	52
Figura 4.23 – Capacidades registadas na entrada D para o Cenário 7	53
Figura 4.24– Capacidades registadas nas entradas A e D para o Cenário 6	54
Figura 4.25 – Curvas-tipo para a capacidade da entrada de uma rotunda vs. carregamento da rede	56
Figura II.26 – Capacidades registadas na entrada A para o Cenário B	64
Figura II.27 – Capacidades registadas na entrada D para o Cenário B	64
Figura II.28 – Capacidades registadas na entrada A para o Cenário 2	64

Figura II.29– Capacidades registadas na entrada D para o Cenário 2	65
Figura II.30– Capacidades registadas na entrada A para o Cenário 3	65
Figura II.31 – Capacidades registadas na entrada D para o Cenário 3	65
Figura II.32– Capacidades registadas na entrada A para o Cenário 4	66
Figura II.33– Capacidades registadas na entrada D para o Cenário 4	66

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Matriz O/D no período 8:30h – 8:45h (uvle)	33
Quadro 3.2 – Parâmetros da distribuição de velocidades	35
Quadro 3.3 – Fluxos de entrada, saída e conflituantes referentes ao ramo A (cada 5min).	36
Quadro 3.4 – Fluxos de entrada, saída e conflituantes referentes ao ramo C (cada 5min).	36
Quadro 4.5 – Parâmetros de calibração do modelo de escolha estocástica de rota <i>Logit</i>	40
Quadro 4.6 – Cenários de Repartição Direcional de Tráfego	41
Quadro I.7 – Matriz O/D no período 8:00h – 8:15h (uvle)	63
Quadro I.8 – Matriz O/D no período 8:15h – 8:30h (uvle)	63
Quadro I.9 – Matriz O/D no período 8:45h – 9:00h (uvle)	63

ABREVIACOES

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

ANN – Largura da faixa de rodagem no anel da rotunda

ANSR – Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária

ARR – *Australian Road Rules*

CE - Código da Estrada

DCI – Diâmetro do Circulo Inscrito

DGV – Direção Geral de Viação

FHWA – *Federal Highway Administration*

NTC – *National Transport Commission*

RU – Reino Unido

UVC – *Uniform Vehicle Code*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento ao tema

As rotundas têm vindo a garantir níveis de desempenho elevados, enquanto soluções de regulação de tráfego. Habitualmente, são associadas a um modo de funcionamento simples e extremamente eficaz aos diferentes níveis, traduzindo-se em excelentes resultados quer do ponto de vista de capacidade, quer da segurança, quer ainda em termos ambientais (FHWA, 2000; Bastos Silva e Seco, 2008).

Contudo, o crescente aumento do tráfego automóvel tem vindo a tornar-se um problema cada vez mais presente no planeamento e gestão viária em meios urbanos. De modo a assegurar elevados níveis de capacidade e fluidez, as soluções encontradas para as rotundas passam pelo aumento do número de vias nas entradas e no anel, o que se tende a refletir num aumento da prática de comportamentos de risco por parte dos condutores associados a manobras de entrecruzamento tanto na aproximação como no atravessamento e saída das rotundas. Estas práticas erráticas tornam-se tanto mais graves e frequentes, quanto maior for o número de vias disponibilizadas na intersecção (Bastos Silva e Seco, 2002), e a desinformação e desadequação do enquadramento legal aplicável.

É, por isso, essencial promover a criação de legislação específica aplicada à circulação em rotundas, de modo a garantir níveis de desempenho geral elevados, simultaneamente em termos de capacidade e de segurança. Esses procedimentos devem ser claros e fáceis de aplicar, independentemente do movimento direcional pretendido.

A Convenção de Viena de 1968, especifica regras de conduta na estrada aplicadas ao continente europeu que se traduzem em práticas relativamente similares entre os países aderentes. Contudo, existem algumas particularidades no que se refere à condução em rotundas, as quais são detalhadas nos documentos de cada país aderente (Brilon, 2014).

Como tal, o enquadramento legal e as boas práticas assumidas por diferentes países considerados *benchmarking*, não só europeus como americanos e da Oceânia, pouco têm em comum com o atual Código da Estrada português.

De facto, a atual legislação portuguesa aplicada a rotundas resulta de uma alteração progressiva do Código da Estrada ao longo das últimas 3 décadas, a par da evidente necessidade de resolver questões essenciais, nomeadamente o elevado número de conflitos causado pela dificuldade e falta de consenso na interpretação do enquadramento legal aplicável. Até recentemente, as leis

aplicáveis a este tipo de intersecção resultavam da interpretação conjunta de diversos artigos referentes a intersecções em geral (ANSR, 2005), o que não traduz a clareza necessária ao correto procedimento em rotundas com todas as suas particularidades face a outras intersecções tradicionais de nível.

As atuais regras impostas às rotundas pela Lei n.º 72/2013, de 3 de setembro, com entrada em vigor desde 1 de janeiro de 2014, surgem como um aditamento e revogação de outras anteriores institucionalizadas no Decreto-Lei n.º 44/2005 de 23 de fevereiro (MAI, 2005). Se, por um lado, existe finalmente um Artigo no Código da Estrada inteiramente dedicado à imposição de procedimentos a tomar em rotundas, por outro, impõe práticas de condução que suscitam fortes reservas pelos tendenciais impactos em termos de capacidade global de escoamento do tráfego resultante e, potencialmente, também em termos de segurança rodoviária da intersecção.

Revela-se assim pertinente o desenvolvimento de investigação que permita, com base em técnicas comparativas, avaliar o potencial de desempenho associado ao atual enquadramento legal nacional, relativamente a outros esquemas de referência internacional. Idealmente essa análise comparativa deverá envolver dimensões que integrem o desempenho da rotunda aos diferentes níveis, designadamente ao nível da capacidade, da segurança e dos impactes ambientais.

Neste contexto, considera-se relevante a realização de trabalhos de investigação que permitam avaliar cientificamente o nível de desempenho das rotundas quando impostos diferentes esquemas de circulação, face a diferentes níveis de procura de tráfego e da sua repartição direcional.

1.2 Objetivos do trabalho

Com o presente estudo pretendeu-se avaliar o impacte de diferentes modelos de regras e procedimentos comportamentais aplicados a rotundas com múltiplas vias de circulação, dando particular ênfase às regras patentes na legislação portuguesa em vigor e pondo-as em confronto com enquadramentos regulatórios de referência a nível internacional.

Embora e idealmente essa análise, para ser completa, devesse abordar de forma integrada o impacte nas diferentes dimensões, com particular ênfase em termos de capacidade, segurança e impactes ambientais, as limitações de tempo levaram a que a análise fosse condicionada à avaliação do desempenho em termos de capacidade.

Procura-se assim perceber e comprovar se o atual enquadramento legal aplicável às rotundas tende a resultar em benefícios evidentes em termos de capacidade, comparativamente à lei anterior assim como em relação a procedimentos adotados noutros países considerados referência nesta matéria. Procura-se ainda perceber se o nível de desempenho associado a cada

um dos esquemas de circulação pré-selecionados, são ou não sensíveis quer ao aumento dos níveis de procura de tráfego, quer da repartição direcional do tráfego da entrada.

1.3 Metodologia adotada

Dada a impossibilidade de testar os modelos referenciados num ambiente rodoviário real, optou-se por recorrer a modelos de simulação de tráfego, os quais se afiguram como ferramentas de apoio adequadas aos objetivos deste trabalho. Este tipo de opção viabiliza a análise e teste de uma vasta gama de soluções e situações alternativas que podem ser testadas de um modo seguro e económico, sem necessidade de implementação no sistema real. (Vilarinho et al., 2014)

O âmbito da presente dissertação passa pela avaliação e comparação do desempenho, resultante da aplicação dos vários princípios regulatórios da prioridade em rotundas. Tendo a consciência de que existem inúmeros fatores a ter em conta na globalidade do desempenho de uma rotunda, por motivos de limitação de tempo e impossibilidade de disponibilização de outros programas de *software* específicos, a presente dissertação foca-se e aprofunda a análise em termos dos níveis de capacidade gerados, quer ao nível da entrada, quer da rotunda em termos gerais. O trabalho foi suportado por técnicas de microssimulação, com recurso ao *software* de origem espanhola AIMSUN (*Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks*), de referência a nível internacional.

Considerou-se um estudo de caso de uma rotunda real de duas vias de circulação no anel e quatro ramos de aproximação como base para a construção dos modelos de microssimulação, prosseguindo-se com trabalhos fundamentais de calibração e validação como forma de ajuste à realidade da rotunda. Efetuaram-se análises de sensibilidade associadas a cada modelo, tendo por base um conjunto alargado de cenários de procura, resultantes de múltiplas combinações de diferentes níveis globais de tráfego e de repartição da procura de tráfego pelas diferentes entradas.

1.4 Estrutura do documento

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, incluindo o presente capítulo 1, onde é apresentado sucintamente o enquadramento do problema assim como os objetivos e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo procede-se a uma síntese da revisão de literatura relativamente a conceitos relevantes ao tema, assim como à apresentação dos modelos de referência selecionados para o estudo.

O capítulo 3 começa por abordar a metodologia utilizada no presente estudo, definindo os indicadores de desempenho em análise. Faz-se uma apresentação sumária das técnicas de

simulação utilizadas, justificando a utilização de modelos de microsimulação. Seguidamente, o capítulo dedica-se à apresentação das várias fases processuais da construção dos modelos, desde a seleção do local e recolha de dados, à codificação da rede e respetivos trabalhos de calibração e validação.

O capítulo 4 apresenta a aplicação de técnicas de microsimulação na avaliação do desempenho associado às diferentes regras de conduta face aos diferentes cenários de tráfego estudados. Por fim, apresentam-se os resultados obtidos referentes às análises comparativas entre os modelos referenciados.

No quinto e último capítulo discutem-se e sintetizam-se as principais conclusões obtidas relativas ao problema estudado. São ainda apontadas algumas perspectivas sobre trabalhos futuros.

2 OS MODELOS DE REFERÊNCIA

2.1 Introdução

A experiência internacional na aplicação de rotundas tem vindo a fomentar uma opinião consensual relativamente às vantagens deste tipo de interseção em termos de condições de fluidez e de segurança comparativamente a outras intersecções tradicionais de nível (Bastos Silva e Seco, 2002). Contudo, é igualmente consensual que o desempenho da interseção depende significativamente do comportamento adotado pelos condutores e outros utilizadores. Para isso, importa cada vez mais, ter presente o enquadramento legal aplicável.

No entanto, as leis aplicáveis diferem entre países e, portanto, refletem diferentes comportamentos do condutor nomeadamente na seleção da via de aproximação e entrada, bem como na trajetória a adotar durante a negociação e atravessamento da rotunda. Consequentemente, os níveis de desempenho em termos de capacidade e de segurança tendem a ser afetados, o que justifica o desenvolvimento de trabalhos científicos fundamentados que permitam avaliar o impacto que essas diferentes regras processuais podem assumir ao nível do desempenho global da rotunda.

É, por isso, evidente a relevância em conhecer as práticas vigentes em diferentes países por forma a melhor perceber e identificar as debilidades associadas à legislação portuguesa, para que de um modo geral, “(...) o comportamento de cada condutor responda às expectativas dos restantes condutores que circulam nas vias adjacentes e que no seu conjunto minimizem o número de conflitos rodoviários.” (Bastos Silva e Seco, 2002).

Existem vários exemplos a nível internacional (Reino Unido (DFT, 2015; DOE, 2013; DOE, 2015), Austrália (ATC, 2012; RMS, 2012), Nova Zelândia (NZTA, 2015b; NZTA, 2005), Estados Unidos (Rodegerdts et al., 2010) e França (legifrance.gouv.fr, 2015)) de legislação clara e específica aplicada à definição de regras e de procedimentos comportamentais em rotundas. Aí são definidas as vias a adotar na aproximação em função do destino pretendido, os procedimentos comportamentais vigentes e clarificado o nível de prioridade associado a cada movimento.

Note-se que alguns dos modelos apresentados de seguida, nomeadamente o modelo inglês e o modelo australiano seguem o sistema da “mão inglesa”, ou seja “circulam pela esquerda”. No entanto, não constitui qualquer impedimento na comparação entre os modelos apresentados, e por este motivo, as regras foram convertidas para o sistema da “mão francesa” (sentido retrógrado de circulação).

Além disso, é importante referir que nem todos os modelos apresentados seguem as regras impostas pela Convenção de Viena (ITC, 1968) sobre Trânsito Viário, não sendo este tratado assinado por todos os países apresentados neste capítulo. De facto, a Convenção de Viena defende a importância das marcações rodoviárias como instrumentos de orientação aos utilizadores da estrada, que definem claramente o comportamento que estes devem tomar, nomeadamente, perante a definição inequívoca de “ (...) *zonas da faixa de rodagem destinadas aos diferentes sentidos de circulação, ou à circulação de determinados tipos de veículos (...)* ” (Rodrigues et al., 2008).

Destaca-se, contudo, a importância das marcações no pavimento na orientação dos condutores nas diferentes fases da negociação e atravessamento da rotunda, nomeadamente das setas de seleção na zona de aproximação. Os países que subscreveram a Convenção de Viena por princípio, não devem (exceto para situações muito específicas) recorrer a estas marcas, pois são suscetíveis de se confundirem com entroncamentos ou cruzamentos nos quais é usada de forma sistemática este tipo de marcações. (Rodrigues et al., 2008)

2.1.1 Princípios gerais de definição de regras processuais de circulação em rotundas

A rotunda, como forma de ordenamento de tráfego, sofreu uma interessante evolução histórica desde a primeira metade do século 20, devendo o seu progresso à vasta experiência internacional no que se refere aos problemas de segurança rodoviária e à contínua exigência de aumento dos níveis de capacidade.

De facto, o conceito de Rotunda Moderna apenas tomou forma em meados da década de 20, em Inglaterra, onde investigadores do *Road Research Laboratory* (agora *Transport Research Laboratory*) estudaram o impacto da substituição de outras práticas em intersecções giratórias, pela “regra de prioridade no anel”, registando-se um aumento de 10% dos níveis de capacidade e também uma diminuição dos atrasos em 40% (Jacquemart, 1998). Esta inovação permitiu, inclusivamente, outras adaptações, como a redução do diâmetro da ilha central de rotundas de grandes dimensões e o aumento da largura de entrada dos ramos afluentes ao anel, resultando em incrementos de 10 a 50% nos níveis de capacidade (Jacquemart, 1998).

A Rotunda Moderna passou assim, a obedecer a duas características fundamentais, que permitiram afetar positivamente o comportamento do condutor relativamente à redução da velocidade:

- cedência de passagem nos ramos de entrada aos veículos que já circundam a rotunda;
- deflexão mínima do movimento de entrada, que permita salvaguardar o atravessamento linear da rotunda aliada a velocidades elevadas. (Jacquemart, 1998)

Espalhando-se um pouco por todo mundo, particularmente pela Europa (incluindo Portugal), América do Norte, Austrália e Nova Zelândia (Bastos Silva et al., 2014; Bastos Silva e Seco,

2004), a Rotunda Moderna é atualmente uma das soluções mais frequentemente consideradas na aplicação de intersecções de nível, registando-se excelentes resultados nas seguintes matérias: i) capacidade e fluidez; ii) segurança; iii) redução das demoras; iv) redução do impacto ambiental e v) estética e *design* urbano. (Jacquemart, 1998)

Nas últimas décadas, a comunidade científica tem-se centrado em investigar maioritariamente, os critérios de capacidade e de segurança, propondo manuais de apoio à conceção de rotundas que beneficiam de um ou de ambos os princípios, não transparecendo, geralmente, o critério de dimensionamento adotado (Bastos Silva e Seco, 2004). Estes documentos defendem e impõem as regras de dimensionamento de uma rotunda, alertando para o benefício que se reflete no comportamento do condutor. De facto, alguns estudos (Turner et al., 2009; Rodegerdts et al., 2010) comprovam que uma boa conceção geométrica leva o condutor a adotar determinado tipo de comportamento, nomeadamente a redução de velocidade na aproximação e atravessamento da rotunda, resultando em maiores níveis de segurança. Mais, o guia informativo americano sobre rotundas (Rodegerdts et al., 2010), refere que a geometria desta intersecção (número de vias de circulação e os ângulos de entrada), reflete-se também no nível de conforto e confiança do condutor para avançar para o anel de circulação simultaneamente com outros veículos, e consequentemente, nos níveis de capacidade.

Verifica-se que não existem, no entanto, manuais ou outros suportes científicos que justifiquem o comportamento do utilizador relativamente às trajetórias na rotunda com mais de uma via, com base em princípios básicos definidos de regras processuais nesta intersecção. Por outro lado, atendendo à variada informação sobre os princípios básicos de conceção de uma rotunda, é logicamente intenção de qualquer código de estrada ou guia informativo, defender, possivelmente com diferentes níveis de prioridade, a: (i) minimização do número de conflitos; (ii) maximização da capacidade. Pretende-se assim com este estudo, avaliar o efeito que as diferentes regras processuais de condução em rotundas, a nível nacional e internacional, assumem ao nível da capacidade.

2.1.1.1 Princípios básicos de funcionamento das rotundas

Os princípios básicos de funcionamento de uma rotunda fazem parte da sua própria definição como intersecção, sendo normalmente, transversal a todos os Códigos e Normas a nível internacional.

De facto, em Portugal, o código da estrada em vigor (Lei n.º 72/2013, de 3 de setembro), define “rotunda” como uma *“praça formada por cruzamento ou entroncamento onde o trânsito se processa em sentido giratório e sinalizada como tal”*, à qual se aplica a regra de “prioridade no anel”. Também na sua definição técnica, Bastos Silva e Seco (2008) consideram uma rotunda como uma intersecção giratória, ou seja, *“(…) um ordenamento geométrico simples, caracterizado pela convergência de diversos ramos numa praça central de forma geralmente*

circular, em torno da qual é estabelecido um sentido único de circulação, assumido como prioritário em relação aos diferentes movimentos de entrada”.

Por outro lado, a versão anterior ao guia informativo americano sobre rotundas discorda desta última definição, sublinhando que todas “*as rotundas são um tipo de intersecções giratórias, mas nem todas as intersecções giratórias podem ser classificadas como rotundas (...)*”, devido à obrigatoriedade de se ceder a passagem ao tráfego que circula no anel de uma rotunda.

As rotundas assumem, deste modo, os seguintes princípios básicos de funcionamento (FHWA, 2000) :

- i. Cedência de passagem pelas correntes de entrada, em relação ao tráfego que circula no anel de circulação;
- ii. Atravessamentos pedonais, quando existentes, dão prioridade de passagem aos peões. Os atravessamentos devem ser remetidos para os ramos e localizados a uma distância definida da linha de cedência do direito de passagem;
- iii. Estacionamento deve ser proibido dentro do anel da rotunda ou nas imediações à entrada.;
- iv. A circulação dentro do anel é estabelecida em sentido único, dando a esquerda à ilha central (segundo a “mão inglesa”).

2.2 O modelo inglês

A Inglaterra obedece às regras de conduta de estrada aplicadas no Reino Unido (DFT, 2015), à exceção da Irlanda do Norte que tem um código de estrada próprio mas muito semelhante (DOE, 2015). De facto, o *Highway Code*, cuja primeira edição é datada de 1931, é um documento que visa clarificar e agregar a legislação aplicável ao utilizador da estrada, e integra um conjunto de regras de conduta obrigatórias identificadas pela expressão “*MUST/ MUST NOT*”. As restantes regras que utilizam expressões como “*should/ should not*” ou “*do/ do not*” surgem por forma a dar credibilidade aos assuntos desta matéria tratados por via jurídica, embora por si só não sejam consideradas lei.

Assim, o documento reconhece os utilizadores vulneráveis da estrada atribuindo-lhes capítulos onde se expõem as regras comportamentais, nomeadamente para peões, utilizadores portadores de deficiência, animais, ciclistas e motociclistas.

Além disso, nas duas versões do *Highway Code* existentes no Reino Unido (uma para a Irlanda do Norte, outra para os restantes países que constituem o RU) existe um capítulo imutável de regras aos utilizadores em geral onde inclui um conjunto de regras apenas aplicáveis a rotundas. Esta agregação da legislação para este tipo de intersecção de nível permite esclarecer mais especificamente os procedimentos fundamentais que o utilizador deve tomar na aproximação, negociação e atravessamento da rotunda.

Recorde-se que no Reino Unido, a regra geral de circulação numa estrada baseia-se na “mão inglesa” e, para melhor compreensão, é interpretado e transcrito nesta dissertação para a “mão francesa”.

Como tal, na aproximação à rotunda, o condutor deve assimilar toda a informação que se lhe encontra disponível, tal como sinais de trânsito, sinais luminosos e marcações na estrada, que lhe permitirão decidir, de forma legível, qual a saída pretendida e, ajustar a sua velocidade e posição para tal.

Na aproximação à rotunda, o código da estrada alerta o condutor para os veículos que circulam à esquerda e ao tráfego que eventualmente poderá surgir à direita. Deste modo, o veículo apenas deverá entrar na rotunda após ceder o direito de passagem aos veículos que se aproximam à esquerda e, se o tráfego à direita o permitir. Por outro lado, poderá existir a situação em que as marcações na estrada permitem que o veículo entre na rotunda sem ceder o direito de passagem aos que já circulam dentro do anel e, nesse caso, é igualmente necessário olhar para a esquerda de modo a evitar conflitos. Quanto aos procedimentos de sinalização e posição correta a tomar, o código da estrada inglês reparte-se em três hipóteses de trajetórias que abrangem todas as situações de saída da rotunda (ver Figura 2.1):

1. Quando o condutor pretende tomar a primeira saída à direita, deve sinalizar a manobra e aproximar-se da via da direita, entrar na rotunda através da via mais exterior da rotunda, sinalizando continuamente a sua saída.
2. Se, por outro lado, o condutor pretender sair numa via à esquerda, ou contornar a totalidade da rotunda, deve começar por sinalizar a sua intenção e aproximar-se da via esquerda. Chegando à rotunda, deve prosseguir a sua marcha pela via mais interior do anel até necessitar de mudar de via para sair da rotunda. Após passar a saída imediatamente anterior à que pretende tomar, deve sinalizar a sua intenção, aproximando-se da via direita, se possível, e abandonar a rotunda pela mesma.
3. Por fim, todas as saídas entre as supracitadas são referidas como intermediárias. As normas de conduta para este caso passam pelo bom senso do condutor em escolher as vias de aproximação e do anel mais adequadas, tanto para duas como para três ou mais vias, não sendo normalmente necessário a sua sinalização, exceto para sair da rotunda. Neste caso, deve prosseguir a sua trajetória dentro do anel e abandonar a rotunda pela mesma via em que se encontra na aproximação.

A Figura 2.1 ilustra os procedimentos a adotar na negociação e atravessamento na rotunda, sendo que a linha a traço interrompido indica um movimento alternativo e não proibido pelo Código de estrada inglês.

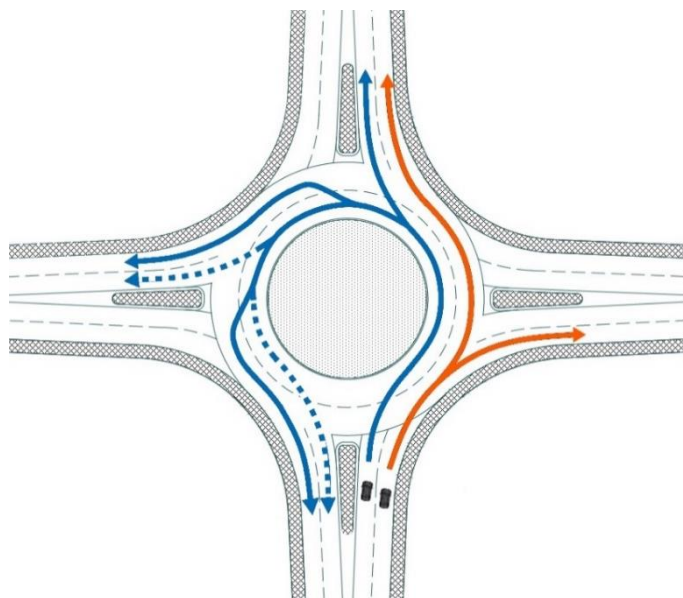


Figura 2.1 – Trajetórias corretas numa rotunda segundo o modelo inglês

Mantendo os mesmos princípios gerais, a versão norte-irlandesa do *Highway Code* contém um anexo que ajuda o condutor a entender o comportamento que deve tomar perante uma rotunda (Figura 2.2). A interpretação desta versão baseia-se num relógio, onde as 6 horas representam a posição de aproximação e as saídas como as restantes posições horárias do relógio.

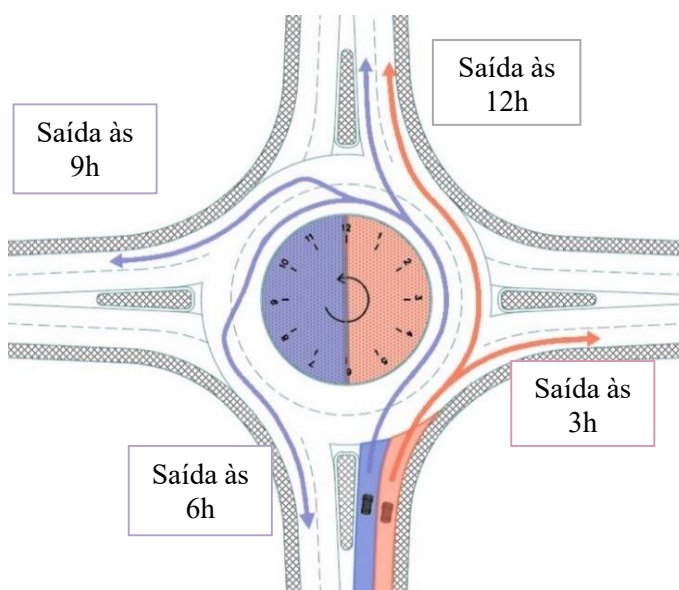


Figura 2.2 – Trajetórias corretas numa rotunda segundo o modelo irlandês

Assim, consideram-se viragens à direita, os trajetos que incluem as saídas que se encontram na metade direita do “relógio” (a laranja), sendo as restantes que se encontram na metade esquerda (a azul), consideradas manobras de viragem à esquerda. Sublinha-se que o sentido obrigatório de circulação na rotunda é o sentido retrógrado para o sistema da “mão francesa”.

Em todo o caso, os utilizadores da rotunda devem ser mais cautelosos com outros utilizadores considerados mais vulneráveis e com veículos pesados, devendo oferecer o espaço necessário às suas manobras. Devem assim, ter especial atenção a situações em que ciclistas ou veículos à tração animal que contornam a rotunda passando mais do que uma saída, pretendem continuar a fazê-lo pela via exterior, e finalmente, a possíveis manobras de entrecruzamentos, especialmente provocadas por veículos que pretendem abandonar a rotunda na saída seguinte e que têm prioridade sobre os demais por se posicionarem à frente destes.

Para os ciclistas, estão contempladas normas específicas de atravessamento de uma rotunda, obrigando os mesmos a prestarem atenção aos outros veículos e a agirem de forma segura, sinalizando as suas pretensões, por forma a evitar conflitos entre cruzamentos nas saídas. Cabe ao ciclista decidir conscientemente, se a sua trajetória passa pelo atravessamento dentro do anel da rotunda ou fora, pelo passeio.

2.3 O modelo australiano

A definição das normas de circulação em estradas australianas são da responsabilidade da *National Transport Commission*, que anualmente revê o *Australian Road Rules*, embora o último documento oficial seja datado em 2008 (NTC, 2008). Existe no entanto, um documento não oficial que agrega as emendas realizadas até 2012 (ATC, 2012).

No que se refere ao assunto da presente dissertação, a referência a rotundas no ARR, direciona o condutor para um único capítulo que concentra os procedimentos a tomar na aproximação, negociação e atravessamento de uma rotunda.

Existe um conceito que é necessariamente definido no ARR e funciona como referência para as hipóteses de trajetória percorrida pelo condutor: *halfway around the roundabout*, ou seja, a distância percorrida entre a via de entrada na rotunda, à saída substancialmente em frente a esta.

À semelhança do modelo inglês, o modelo australiano reparte-se em três regras específicas: abandonar a rotunda numa saída entre a primeira metade do anel, sair na via aproximadamente em frente (a 180°) e, finalmente, abandonar a rotunda na segunda metade do anel. Parece ser, desta forma, muito semelhante ao modelo inglês, procedendo-se da mesma maneira tanto para a escolha das vias de aproximação como para a circulação dentro do anel da rotunda.

A diferença mais significativa entre estes modelos centra-se na zona da saída da rotunda: no caso do modelo inglês, para uma viragem à esquerda ou inversão de marcha, o condutor, junto à saída imediatamente anterior à pretendida deve mudar de via aproximando-se da mais exterior ao anel da rotunda por forma a sair pela via da direita. Por sua vez, o modelo australiano, através das suas marcações de pavimento, convida o condutor a manter-se na mesma via de circulação do anel até à zona da saída, não pondo de parte, no entanto, a situação de mudança de via (ver Figura 2.4).

Esta é também uma prática Neozelandesa para rotundas com multivias, sendo as Normas comportamentais para rotundas neste país, muito semelhantes às presentes no Código Australiano (NZTA, 2015b; NZTA, 2005). Note-se que também na Nova-Zelândia se cumpre a regra da “mão inglesa”, e como tal, para efeitos de conformidade, a Figura 2.3 foi invertida, de modo a representar a circulação em conformidade com a “mão francesa”.



Figura 2.3 – Marcações no pavimento de rotundas Australianas e Neozelandesas (NZTA, 2015a)

É, portanto, reforçada a obrigatoriedade de o condutor respeitar as marcações no pavimento e prosseguir a sua marcha pela direção indicada. De facto, a Austrália não é um país aderente da Convenção de Viena, pelo que, quando existentes, as setas de seleção inscritas no pavimento à entrada das rotundas, assim como as linhas delimitadoras das vias desempenham um papel fundamental de orientação e apoio aos condutores (Figura 2.4). O caso de ciclistas ou animais surge como uma exceção, podendo estes ignorar a última regra se pretenderem percorrer mais de metade da rotunda, pela via exterior. No entanto, devem ceder o direito de passagem a qualquer outro veículo que pretenda sair da rotunda.

Excetuam-se, igualmente, os condutores de veículos de grande porte, que devido a razões óbvias, não lhes é possível efetuar uma manobra de viragem à esquerda sem transpor outras

vias, e por isso, podem, se as condições de segurança o permitirem, posicionar-se tanto na via de aproximação à esquerda como na via imediatamente à direita desta, ou em ambas.

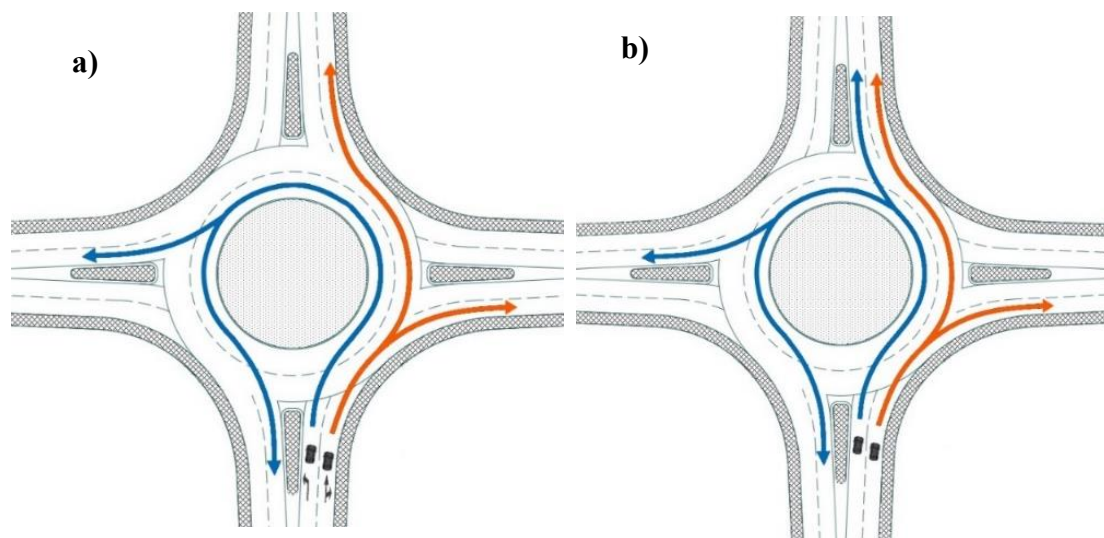


Figura 2.4 – Trajetórias corretas segundo o modelo australiano: a) com setas de seleção (exemplo); b) sem setas de seleção (de acordo com a Convenção de Viena)

Em todo o caso, o ARR apresenta procedimentos pormenorizados quanto à sinalização das manobras, devendo o condutor sinalizar atempadamente as suas intenções, e ininterruptamente dentro do anel a menos que pretenda mudar de via. Se o condutor abandonar a rotunda pela saída posicionada sensivelmente em frente à entrada (cerca de 180°), não deve acionar os sinais intermitentes de mudança de direção por forma a não confundir outros condutores, tal como se refere no modelo inglês.

2.4 O modelo americano

Paralelamente a Portugal, os Estados Unidos não dispõem ainda nos seus documentos legais, guias suficientes para os utilizadores de rotundas. De facto, o principal problema legal, de onde muitos outros derivam, presente no *Uniform Vehicle Code* (NCUTLO, 2000), começa pela falta de referências a rotundas originando uma ambiguidade na sua definição como intersecção, podendo ser considerada como uma intersecção única ou uma série de entroncamentos (Rodegerdts et al., 2010).

Existe, no entanto, um manual bastante completo e documentos técnicos que contemplam guias informativos de conceção e utilização de rotundas, da responsabilidade da *Federal Highway Administration* (FHWA) e resultantes de programas de investigação apoiados pelo Departamento de Transportes Americano.

Identifica-se ainda um apêndice no guia informativo de rotundas onde são descritos os procedimentos a adotar como utilizador de veículo, peão ou mesmo como ciclista, baseados nos anexos criados por alguns Estados Americanos, como Oregon ou Kansas, a edições anteriores do mesmo guia (Rodegerdts et al., 2010).

Assim, para um condutor, são igualmente referidas três situações de trajetória de atravessamento da rotunda com normas a obedecer (Figura 2.5), que devem ser decididas atempadamente na via a aproximação, e que não contrariam as normas presentes no modelo australiano tanto no correto procedimento de posicionamento do veículo, como de sinalização de manobras.

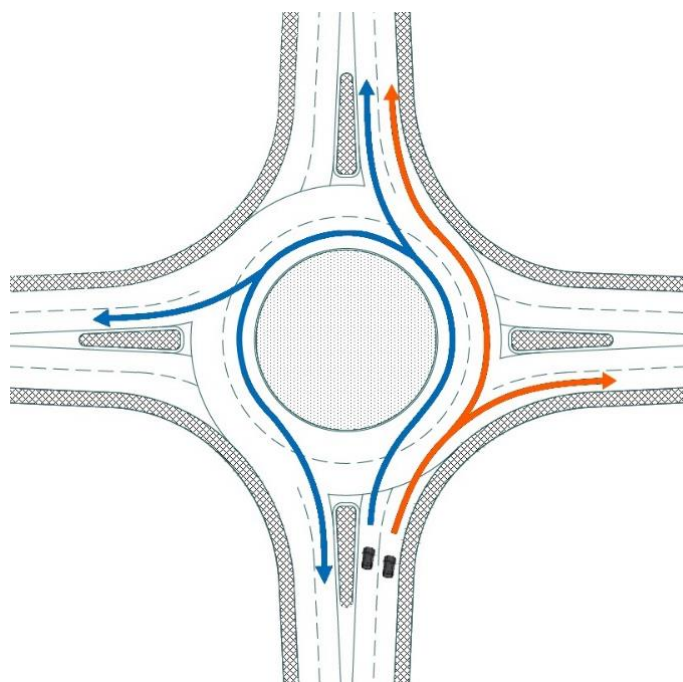


Figura 2.5 – Trajetórias corretas numa rotunda segundo o modelo americano

De entre outras regras e cuidados gerais a ter em conta, também comuns às regras de conduta inglesas e australianas, reforça-se a importância de se evitar as ultrapassagens. Os veículos devem manter uma posição relativa entre si e com outros ciclistas (que devem ser tratados como qualquer outro veículo) ou veículos de grande porte, mantendo-se na via por onde entraram até abandonarem a rotunda. Assim, tal como no modelo australiano, promove-se a simultaneidade da utilização de vias de saída da rotunda, e conseqüentemente, constata-se uma preocupação crescente com os níveis de capacidade, revezando os níveis de segurança.

O guia informativo procura complementarmente, chamar especial atenção do condutor para a presença de outros utilizadores como motociclistas, ciclistas, veículos pesados e veículos de emergência:

- O condutor do veículo deve oferecer um espaço de segurança suficiente às manobras dos veículos pesados, que, tal como referido nos modelos supracitados, poderão ocupar mais do que uma via mesmo que pretendam efetuar a viragem à esquerda ou inverter o sentido de marcha;
- Ao contrário do correto procedimento nos modelos inglês e australiano, os ciclistas devem, no modelo americano, proceder da mesma forma que um veículo. No entanto, em manobras de viragem à esquerda podem, erroneamente, circular pela via exterior do anel e impedir a saída de outros condutores ou ainda, provocar entrecruzamentos, pelo que se deve dar especial atenção a este tipo de usuário da rotunda.
- Não entrar na rotunda quando um veículo de emergência se aproxima da mesma, com o intuito de facilitar a passagem;
- Ao contrário dos veículos longos, proíbem-se os motociclistas de atravessar a zona galgável da ilha central, quando existente.

2.5 O modelo francês

O conceito de rotunda em França subdivide-se em duas definições: *rond-point* e *carrefour à sens giratoire*. De facto, rotundas como a *place de l'Étoile* consistem em *ronds-points*, intersecções circulares onde é imposta a regra de prioridade à direita, inclusive nos ramos de entrada das intersecções cujos veículos são prioritários sobre os demais que já circulam no anel. Na verdade, poucas são as referências no código de estrada francês (legifrance.gouv.fr, 2015) a rotundas tradicionais, que desafiam esta regra de prioridade na entrada do anel da rotunda, referidas na legislação francesa como *carrefours à sens giratoire*.

Assim, no que respeita aos procedimentos que o condutor deve adotar neste tipo de intersecção de nível, não existem muitas linhas diretivas, apenas se tratam como pequenas exceções à legislação existente para intersecções e circulação corrente em geral.

No que se refere aos princípios gerais de circulação, exprime-se a obrigatoriedade de um veículo transitar o mais à direita possível em circulação corrente desde que não exista sinalização que imponha o contrário.

Constata-se assim, uma das primeiras orientações ao utilizador da rotunda, que em manobras de ida em frente ou viragem à direita, deve sempre aproximar-se através da via da direita, e usar a via mais exterior do anel, ao contrário do modelo inglês cujos condutores podem adotar qualquer via, desde que se mantenha na mesma via desde a aproximação ao atravessamento. (Tal como nos modelos de referência internacional referidos anteriormente, entende-se que traçando um eixo a 180° da entrada do anel, se separam manobras de viragem à esquerda e à direita).

No entanto, o *Code de La Route* refere o seguinte: quando pretende efetuar a manobra de viragem à esquerda numa rotunda em relação ao eixo de entrada, o veículo pode (não sendo obrigado), posicionar-se na via mais à esquerda tanto na aproximação como na circulação dentro do anel. Esta é uma das grandes discrepâncias entre os modelos inglês e francês, para além da manobra de ida em frente. A Figura 2.6 representa a traço interrompido a manobra de viragem à esquerda, quando se ocupa a via mais exterior do anel.

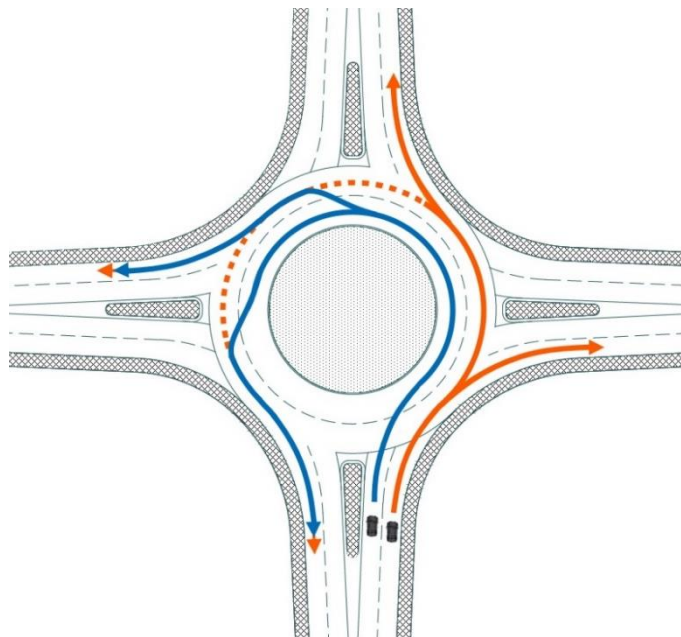


Figura 2.6 – Trajetórias corretas numa rotunda segundo o modelo francês

Do ponto de vista geométrico, refira-se que a França tem uma grande tradição no uso de rotundas com uma só via de circulação, de forma a salvaguardarem níveis elevados de segurança. Nesse sentido é comum, nos ramos de aproximação a uma rotunda, optar-se por rebater as múltiplas vias na aproximação numa única via de entrada.

Portanto, a posição da legislação francesa, no que se refere aos procedimentos comportamentais dentro do anel, obriga o condutor a aproximar-se da via exterior do anel quando pretende abandonar da rotunda, devendo sair pela mesma. Assim, qualquer manobra de circulação, incluindo uma manobra de mudança de via no interior do anel está sujeita às regras de prioridade à direita, e deve ser devidamente sinalizada por parte do condutor de modo a evitar conflitos. Neste caso, um veículo que circule numa via interior do anel e que pretenda abandonar a rotunda numa saída próxima, deve abrandar a sua marcha de modo a ceder a passagem aos condutores que eventualmente circulem na via à sua direita, ou contornar a totalidade do anel até encontrar uma nova oportunidade para se aproximar da via direita de modo a poder sair da rotunda, não podendo optar pela via esquerda de saída.

Esta ênfase das regras comportamentais de prioridade à direita, inclusive dentro do anel da rotunda contribui para uma legislação direcionada a resguardar os níveis de segurança em detrimento dos níveis de capacidade.

2.6 O modelo português

O modelo português resulta de uma mudança gradual do código da estrada a par das necessidades legislativas das infraestruturas portuguesas ao longo do tempo, sendo importante conhecer e compreender essa evolução no que respeita ao tema da presente dissertação. No entanto, comparativamente aos Códigos e Normas acima mencionados, parece evidente o défice que ainda hoje existe, de um enquadramento legislativo que aborde diretamente todos os procedimentos a tomar face a uma rotunda (Bastos Silva e Seco, 2002).

Na década de 80, Portugal reconheceu a necessidade de implantar novas regras face ao crescimento do número de rotundas nas suas redes de estradas. Assim, a revisão do Código da Estrada em 1994 (MAI, 1994) institucionalizou a regra de cedência de “*prioridade a quem circula no anel da rotunda*” pelo Art.º 31 do C.E: “*Deve sempre ceder a passagem o condutor: (...) c) Que entre numa rotunda com trânsito giratório*”. Sendo, neste documento, a única referência a este tipo de intersecção, é evidente a enorme lacuna de legislação que permite avaliar coerentemente situações contraditórias ocorridas em rotundas, potenciando dúvidas quer a nível no sistema de regulação, quer a nível dos comportamentos e procedimentos a tomar face à presença de uma rotunda (Bastos Silva e Seco, 2002).

Em 2005, os inúmeros incidentes relacionados com esta subjetividade regulamentar, nomeadamente os provocados pelo comportamento erróneo dos condutores, obrigaram a DGV (agora extinta e substituída pela ANSR na suas funções) a emitir e transparecer sob forma de um comunicado elucidativo, as novas alterações ao Código da Estrada revisto nesse mesmo ano (alteração ao CE pelo Decreto-Lei nº 44/2005 de 23 de fevereiro) (MAI, 2005), que continuavam a ser pouco claras em relação a este tipo de intersecção. O referido comunicado pretendeu esclarecer que o enquadramento legal aplicado a rotundas resulta da interpretação conjunta de diversos artigos referentes a intersecções em geral (ANSR, 2005).

Desta forma, cabe ao sistema jurídico português, em função dos múltiplos fatores que descrevem a situação em causa, aplicar a legislação geral desenvolvida para intersecções ou para circulação em secção corrente (Bastos Silva e Seco, 2002).

2.6.1 Decreto-Lei nº 44/2005 de 23 de fevereiro

Relativamente a manobras de mudança de direção, os artigos 43º e 44º do CE enquadram a trajetória do condutor quando este se aproxima de uma intersecção, no início da manobra de viragem à esquerda, ou à direita:

- Artº 43 do C.E “1 - O condutor que pretenda mudar de direção para a direita deve aproximar-se, com a necessária antecedência e quanto possível, do limite direito da faixa de rodagem e efetuar a manobra no trajeto mais curto.”

- Artº 44 do C.E “1 - O condutor que pretenda mudar de direção para a esquerda deve aproximar-se, com a necessária antecedência e o mais possível, do limite esquerdo da faixa de rodagem ou do eixo desta, consoante a via esteja afeta a um ou a ambos os sentidos de trânsito, e efetuar a manobra de modo a entrar na via que pretende tomar pelo lado destinado ao seu sentido de circulação”.

Esclarece-se acima, qual a via que o condutor deve escolher na aproximação à intersecção, podendo-se adaptar para a situação de intersecção giratória, com entradas de pelo menos duas vias. No entanto, são descuradas as soluções que disponibilizam múltiplas vias na entrada apontando-se apenas para a utilização das vias da direita e da esquerda.

No que se refere à circulação dentro do anel, aplica-se, grosseiramente, a interpretação dos artigos que abordam a circulação em secção corrente. No entanto, constitui uma tentativa de aproximar situações que diferem muito na funcionalidade das suas vias, pelo que as seguintes regras são suscetíveis de penalizar uma rotunda em termos de fluidez, capacidade e segurança (Bastos Silva e Seco, 2002):

- Artº 13 do CE “1 – O trânsito de veículos deve fazer-se pelo lado direito da faixa de rodagem e o mais próximo possível das bermas ou passeios, conservando destes uma distância que permita evitar acidentes.”

- Artº 14 do CE “1 - Sempre que, no mesmo sentido, sejam possíveis duas ou mais filas de trânsito, este deve fazer-se pela via de trânsito mais à direita, podendo, no entanto, utilizar-se outra se não houver lugar naquela e, bem assim, para ultrapassar ou mudar de direção.”

- Artº 14 do CE “2 - Dentro das localidades, os condutores devem utilizar a via de trânsito mais conveniente ao seu destino, só lhes sendo permitida a mudança para outra, depois de tomadas as devidas precauções, a fim de mudar de direção, ultrapassar, parar ou estacionar.”

- Artº 15 do CE “1 - Sempre que, existindo mais de uma via de trânsito no mesmo sentido, os veículos, devido à intensidade da circulação, ocupem toda a largura da faixa de rodagem destinada a esse sentido, estando a velocidade de cada um dependente da marcha dos que o precedem, os condutores não podem sair da respetiva fila para outra mais à direita, salvo para mudar de direção, parar ou estacionar.”

- Artº 36 do CE “1 - A ultrapassagem deve efetuar-se pela esquerda.”

- Artº 42 do CE “*Nos casos previstos no nº 2 do artigo 14º e no artigo 15º, o facto de os veículos de uma fila circular em mais rapidamente que os de outra não é considerado ultrapassagem para os efeitos previstos neste Código.*”

A nota da DGV esclarece, ainda no que se refere à situação dentro do anel da rotunda, que se o condutor pretender tomar a primeira saída deve ocupar a via da direita. Mais, os condutores com destino às restantes saídas devem ocupar, dentro da rotunda, a via de circulação que lhes for mais conveniente consoante o destino que pretendam. Após a seleção da via mais adequada, o condutor deve aproximar-se progressivamente da via da direita, até passar a saída imediatamente anterior à pretendida, devendo sempre sinalizar as suas opções. (ANSR, 2005)

Desta maneira, sem esta nota de esclarecimento, os artigos do decreto mencionado, adotados para uma interseção circular, não seriam interpretados da mesma forma, visto que a via da direita em secção corrente é vista como preferência às demais.

Perante o que se assiste na realidade, os procedimentos comportamentais dos condutores, continuam a ser os mesmos que a legislação até então definia, como se representa na Figura 2.7.

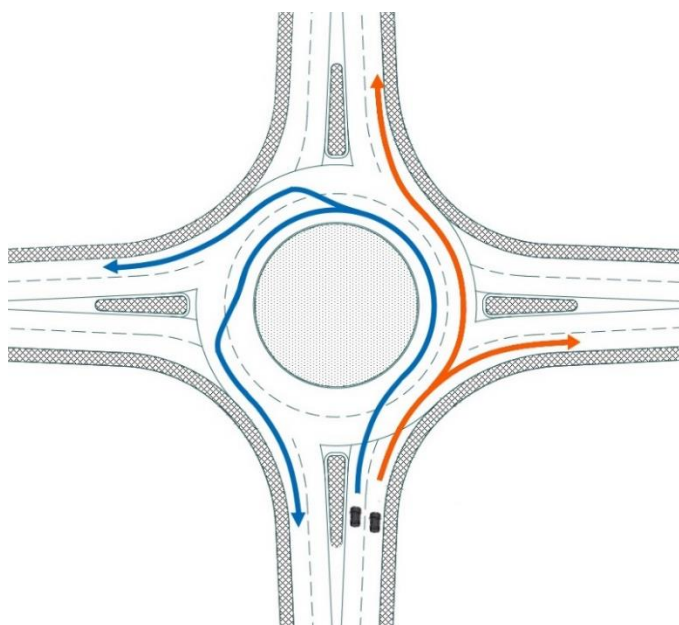


Figura 2.7 – Trajetórias corretas numa rotunda segundo o modelo português revogado

2.6.2 Lei n.º 72/2013, de 3 de setembro

Recentemente, o CE foi alterado e aditado através da Lei n.º 72/2013, de 3 de setembro, onde se institucionaliza, pela primeira vez, um conjunto de regras e procedimentos objetivos e inteiramente dedicados às rotundas que vem alterar em alguns termos o Decreto-Lei nº 44/2005

de 23 de fevereiro, e revogar alguns artigos, nomeadamente o número 1 do Artigo 14º de modo a evitar contradições com a nova lei.

São assim impostas novas regras de conduta pela forma de um aditamento ao Artigo 14º, que obriga o condutor a adotar os seguintes comportamentos nas rotundas (ANSR, 2013):

- Artº 14-A do CE “1 –a) *Entrar na rotunda após ceder a passagem aos veículos que nela circulam, qualquer que seja a via por onde o façam;*

- Artº 14-A do CE “1 –b) *Se pretender sair da rotunda na primeira via de saída, deve ocupar a via da direita;*

- Artº 14-A do CE “1 –c) *Se pretender sair da rotunda por qualquer das outras vias de saída, só deve ocupar a via de trânsito mais à direita após passar a via de saída imediatamente anterior àquela por onde pretende sair, aproximando-se progressivamente desta e mudando de via depois de tomadas as devidas precauções;*

- Artº 14-A do CE “1 –d) *Sem prejuízo do disposto nas alíneas anteriores, os condutores devem utilizar a via de trânsito mais conveniente ao seu destino.*

- Artº 14-A do CE “2- *Os condutores de veículos de tração animal ou de animais, de velocípedes e de automóveis pesados, podem ocupar a via de trânsito mais à direita, sem prejuízo do dever de facultar a saída aos condutores que circulem nos termos da alínea c) do n.º 1.*

Conclui-se a partir deste acrescento à legislação, passa a ser expressamente proibida a circulação pela via mais à direita da rotunda, salvo se se pretender sair da rotunda na saída imediatamente a seguir, como se observa na Figura 2.8. Excepcionalmente, os veículos de tração animal, velocípedes e automóveis pesados, podem usar a via direita da rotunda independentemente da saída que pretendam tomar, devendo neste caso facultar a saída aos outros veículos. Esta situação torna-se algo antagónica no sentido em que a nova lei procura evitar a incorreta utilização da via exterior por automobilistas que poderão bloquear as saídas a outros veículos, e simultaneamente aumentar o fluxo da via esquerda de aproximação e do anel da rotunda, focando-se principalmente nos níveis de segurança em detrimento dos níveis de capacidade.

Para além disso, embora se refira que os condutores devem sinalizar as suas manobras e posicionar-se de forma a facilitar as mudanças de via, ficam por abordar questões como as vias de circulação a tomar na presença de mais do que duas vias na aproximação e atravessamento da rotunda, sendo “a via mais conveniente”, uma expressão pouco criteriosa que fica à

interpretação de cada utilizador, podendo-se particularizar como a via esquerda ou qualquer outra via intermediária, e nunca a da direita.

Por outro lado, à falta de objetividade neste aditamento quanto a outros procedimentos, continuam-se a aplicar as normas constantes nos Artigos gerais referentes a intersecções e circulação em seção corrente, nomeadamente para uma manobra de viragem à esquerda, que continua a ser descrita pelo artigo 44º e, sendo este adaptado a uma intersecção circular, obriga o condutor a posicionar-se na via esquerda de aproximação à rotunda

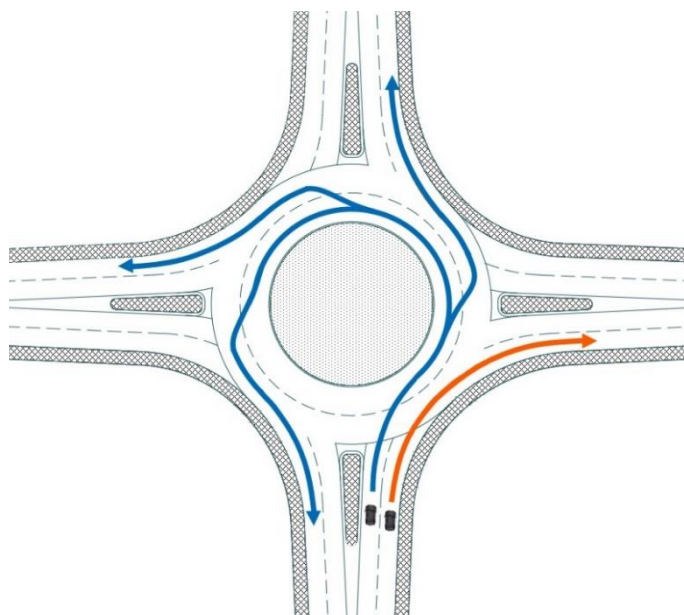


Figura 2.8 – Trajetórias corretas numa rotunda segundo o modelo português vigente

2.7 Avaliação comparativa dos modelos analisados

2.7.1 Generalidades

Considerando que uma definição clara específica de regras e procedimentos é o caminho certo para o entendimento e o que é expectável em termos de comportamento dos condutores numa rotunda, pelo que para elevar os níveis de fluidez, capacidade e segurança, torna-se importante avaliar os diversos esquemas comportamentais relativos aos modelos de referência internacional apresentados.

Identifica-se um alargado quadro legislativo aplicável à circulação em rotundas, que poderá ser estudado em diferentes cenários de procura, encontrando soluções normativas que justifiquem uma eventual alteração e melhoria do Código da Estrada português no que se refere a este tipo de intersecção de nível.

De facto, parece ser comum nos Códigos e guias do Reino Unido, Austrália e mesmo dos EUA uma legislação bem regulamentada e repartida pelos vários utilizadores de rotundas, nomeadamente, automobilistas, peões e ciclistas. Em Portugal e França, a situação é bem diferente, começando por existir uma lacuna de normas de conduta em rotundas para peões e onde os ciclistas são relativamente pouco mencionados.

De forma a avaliar comparativamente os modelos apresentados, a Figura 2.9 resume os procedimentos de posição e sinalização do veículo que se aproxima de uma rotunda, para cada Código de conduta internacional e nacional, figurando-se os três tipos de trajetórias transversais aos modelos.

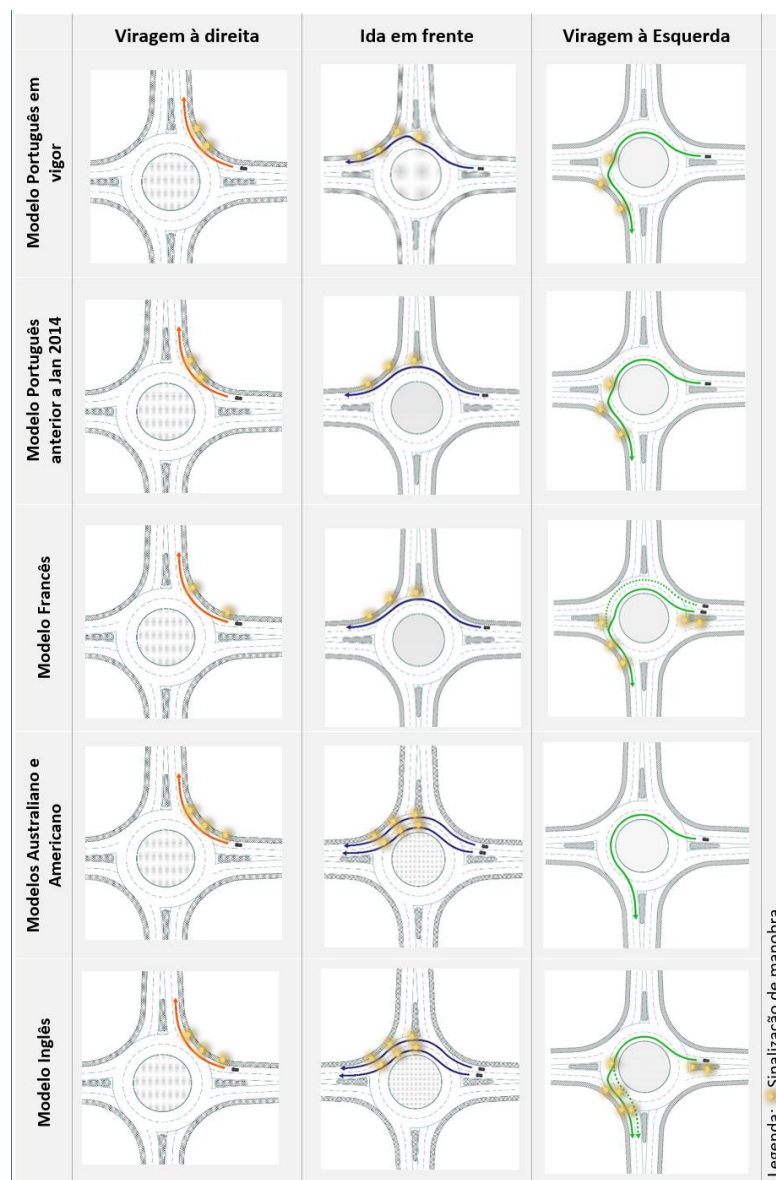


Figura 2.9 – Quadro resumo dos modelos de referência apresentados

2.7.2 Definição das trajetórias e respetivos procedimentos

São vários os países que definem o comportamento que o utilizador da rotunda deve adotar em função do movimento direcional pretendido, perante as várias saídas existentes.

A opinião sobre o comportamento do condutor numa manobra de viragem à direita é transversal para os modelos mencionados, tanto na escolha da via de aproximação, como da circulação dentro do anel, juntamente com os respetivos cuidados de sinalização da manobra.

No entanto, a legislação portuguesa é a única a apresentar a via de circulação direita do anel como exclusiva para os condutores que pretendem sair na primeira saída (salvo algumas exceções), ou para aqueles que passando a saída anterior à pretendida, mudam de via com as devidas precauções de sinalização intermitente. Neste caso, o veículo deve sempre tomar a via da direita de saída da rotunda se esta estiver desocupada, ao contrário do que se pratica no Reino Unido, Austrália e Estados Unidos, que permitem que o condutor abandone a rotunda pela via mais à esquerda se lhes for conveniente.

De facto, todos os modelos apresentados à exceção do português e do francês são da mesma opinião que o veículo poderá usar tanto a via da direita, como quaisquer outras vias de aproximação e circulação no anel, salvo indicação sinalética do contrário, na hipótese de abandonar a rotunda por saídas localizadas no mesmo encaminhamento das entradas (a cerca de 180°), mesmo que não se tratem da primeira saída. Mais, deve fazê-lo sem nunca acionar o indicador de manobra à entrada do anel de modo a não confundir os outros utilizadores da rotunda relativamente à manobra pretendida.

As manobras de viragem à esquerda e inversão de marcha têm também contornos idênticos tanto para o sistema português como para os sistemas internacionais mencionados. No entanto, os últimos são bastante objetivos nas regras a obedecer por parte dos condutores, ao contrário do código da estrada português que propõe ao utilizador da rotunda, utilizar “a via mais conveniente”, e neste caso, aplicar a regra para intersecções gerais numa manobra de viragem à esquerda.

2.7.3 Prioridades relativas entre veículos no anel de circulação

As ultrapassagens que implicam mudanças de via numa rotunda em Portugal não são, por consenso geral, consideradas manobras seguras, pois são suscetíveis de originar conflitos por manobras de entrecruzamento, nomeadamente quando um veículo que circula nas vias interiores do anel da rotunda, pretende abandonar a intersecção, e obrigatoriamente, atravessar as vias à direita (Bastos Silva e Seco, 2002).

No entanto, as alterações ao Código da Estrada anularam essa possibilidade para rotundas de duas vias, pois quem pretende sair da rotunda terá que mudar para a via mais exterior do anel

após a saída anterior à pretendida, além de que quem transita na via direita terá necessariamente que abandonar a rotunda na saída seguinte. A nova lei procura essencialmente aumentar os níveis de segurança, relegando as preocupações de capacidade para um segundo plano. Perante os vários cenários de procura, é do interesse da presente dissertação equacionar se tal regra faz sentido.

O modelo americano destaca-se por ser proibida a ultrapassagem e, portanto, pela posição relativa entre veículos ser constante, não podendo o condutor mudar de via desde a entrada até à saída do anel.

Paralelamente, para casos de rotundas com mais de duas vias, em Portugal, continua a existir a problemática dos atravessamentos entre veículos nas mudanças de via e, por isso, aplica-se a regra geral de ultrapassagens para secção corrente (art.º 36º e nº2 do art.º 14º), que obriga um condutor que transite numa via mais à direita relativamente a outro utilizador, a abrandar de modo a evitar uma ultrapassagem pela direita e, conseqüentemente comprometer os níveis de capacidade e fluidez (Bastos Silva e Seco, 2002).

Por outro lado, no Reino Unido e na Austrália, solicita-se ao condutor especial atenção aos veículos que pretendem abandonar a rotunda na saída seguinte, suscetíveis de provocar entrecruzamentos. Deste modo, esclarece-se que qualquer veículo que se coloque à frente dos demais, mesmo que em vias diferentes, será prioritário e deverão conceder-lhe passagem se este pretender sair da rotunda.

No entanto, o código francês centra-se na regra de prioridade à direita, que pela própria definição, considera que a preocupação do condutor deve ser sempre em ceder passagem a qualquer veículo que se situe na via à sua direita, evitando entrecruzamentos e conflitos desnecessários. Deste modo, a partir destes modelos e usando as ferramentas necessárias, é perfeitamente possível avaliar as suas competências ao nível da fluidez, capacidade e segurança, comparando as vantagens que cada um atribui a uma rotunda de duas vias, destacando as normas que melhor se adaptam a este tipo de intersecção de nível.

3 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE MICROSSIMULAÇÃO

3.1 Introdução

A avaliação do desempenho de uma intersecção rodoviária deve ser baseada na estimação de indicadores de desempenho através de métodos que se incluem em três tipos de modelos: estatísticos (empíricos), probabilísticos e de simulação (Macedo e Benta, 2013; Bastos Silva e Seco, 2008).

Vilarinho et al. (2014) defendem a importância dos modelos de simulação como ferramentas de teste e de análise de problemas dinâmicos de transportes, permitindo simular, com elevada precisão, as condições reais de uma rede a par de um conjunto alargado de cenários de oferta/procura. Substituindo a aplicação física de experiências em estudo, pela representação computadorizada das mesmas, sem que seja necessária a invasão e distúrbio do sistema real *in situ*, é possível retirar conclusões e testar novas técnicas, e conseqüentemente obter novas soluções aos problemas de engenharia de tráfego em causa.

Como tal, a utilização de modelos computadorizados de simulação de tráfego surge com grande relevância, pois interessa modelar e tentar reproduzir o mais próximo da realidade possível, os fluxos de tráfego e a interação entre veículos e, em particular o padrão de deslocações e trajetórias de veículos face a uma determinada procura.

Existem ainda, subclassificações entre os modelos de simulação, nomeadamente ao nível de uma escala temporal (contínuos/discretos), da representação dos processos de escolhas de trajetos (determinísticos/estocásticos), quanto à abordagem metodológica (analíticos/simulação), quanto à opção relativamente à incorporação de efeitos dinâmicos do tráfego (estáticos/dinâmicos) ou ainda relativamente ao nível de detalhe dos elementos modelados (Vasconcelos, 2004; Vilarinho, 2008):

- *Macroscópicos* (ou modelos de macrossimulação) – funcionam como uma representação simplificada da realidade, onde as redes são modeladas através de arcos (vias de comunicação) e nós (intersecções entre as vias), equiparando-se a um modelo de grafos. Assume-se que o conjunto de veículos que circulam na rede modelada têm um comportamento homogéneo caracterizado por parâmetros de valores médios (Figueiredo, 2013) e, portanto, o tráfego é agregado para “um todo”, exigindo, deste modo, menor capacidade computacional (Vilarinho, 2008).
- *Mesoscópicos* (ou modelos de mesossimulação) – constituem um compromisso entre os modelos de macro e de microsimulação, resultando num nível de detalhe intermédio que não faz distinção entre veículos, mas sim de pelotões (Vilarinho, 2008).

- *Microscópicos* (ou modelos de microsimulação) – permitem uma análise mais pormenorizada relativamente aos modelos macro e mesoscópicos. Descrevem o tráfego com grande detalhe, considerando cada veículo como uma entidade com determinadas características espaciais e temporais, sensíveis ao comportamento do próprio veículo e do condutor. A sua parametrização está integrada nos seguintes principais submodelos microscópicos (para informações mais detalhadas ver Vasconcelos 2004):
 - “*Car-following*” ou “seguimento do veículo”, representativo da reação do condutor, perante o movimento do veículo que segue à sua frente;
 - “*Gap-acceptance*” ou “intervalo de aceitação”, que determina se o veículo pode ou não avançar numa intersecção;
 - “*Lane-changing*” ou “mudança de via”, que modela a motivação e a possibilidade de o veículo mudar de via, tendo por base o seu objetivo próximo.

Assim, os modelos de microsimulação constituem uma representação mais robusta da realidade que envolve, no entanto, uma maior exigência em termos de codificação da rede e uma maior quantidade de dados a recolher. Complementarmente, estes modelos implicam um esforço significativo associado aos processos de calibração e de validação, o que requer tomadas de decisão sobre o nível de precisão que se pretende assegurar, considerando que existem inúmeras variáveis e parâmetros que influenciam o desempenho geral e robustez do modelo (Figueiredo, 2013).

3.2 Metodologia geral de abordagem

A metodologia adotada apoia-se num processo de análise comparativa entre o desempenho, em termos de capacidade, associado aos diferentes modelos de regras comportamentais apresentados no capítulo XX. Perante a similaridade das regras implícitas aos modelos australiano e americano, optou-se por apenas apresentar o modelo australiano.

Em termos gerais, a análise comparativa assenta na comparação do desempenho dos seguintes 5 modelos comportamentais:

- i. Modelo 0 – modelo estocástico de rota, usando tempos de viagem calculados sob condição de fluxo livre
- ii. Modelo UK – modelo inglês
- iii. Modelo AUS – modelo australiano
- iv. Modelo FR – modelo francês
- v. Modelo PT – modelo português em vigor de acordo com a Lei n. 73/2013

Dada a impossibilidade de avaliar o nível de desempenho associado a cada modelo por observação real *in situ*, optou-se por recorrer a modelos de microsimulação capazes de representar as diferentes regras de comportamento de condutores.

O modelo 0, representativo de uma situação de fluxo livre, isenta a regras comportamentais associadas à trajetória do veículo, assentou na representação de uma situação real (de forma geral, representativa da situação portuguesa, antes da entrada em vigor da nova lei), tendo o modelo de simulação sido devidamente calibrado e validado para o efeito. Os trabalhos de construção do modelo foram apoiados pela realização de sessões de campo, baseadas na recolha de fluxos de tráfego, filas de espera e distribuições de velocidades.

O modelo calibrado e validado serviu posteriormente de base à construção dos restantes modelos comparativos, associando as respetivas regras comportamentais a cada um dos modelos. As análises desenvolvidas procuraram avaliar as diferenças de desempenho associadas à adoção de diferentes regras comportamentais, comparativamente ao Modelo PT, adotado como modelo de referência. De forma a facilitar a interpretação dos resultados, optou-se por sujeitar cada um dos modelos, ao aumento sistemático e uniforme da procura de tráfego, até atingir a saturação de pelo menos uma das entradas, interpretando-se esta situação de tráfego como o momento em que ocorre a saturação da rotunda.

A mesma análise comparativa assentou na avaliação do efeito da procura de tráfego traduzida a dois níveis fundamentais: (i) assumindo a carga de tráfego real registada; (ii) efeito da repartição direcional do tráfego, assumindo a mesma repartição nas diferentes entradas da rotunda. Em termos genéricos foram considerados os seguintes cenários de procura:

- i. Efeito da carga de tráfego real registada – 1 cenário
- ii. Efeito da repartição de tráfego (imposição incremental de variações de 25%) – 7 cenários;
- iii. Efeito do carregamento sistemático da rede nos 8 cenários mencionados em i e ii.

Face aos objetivos do trabalho as análises comparativas basearam-se na avaliação de dois indicadores de desempenho; (i) Capacidade global da rotunda, correspondente à soma da capacidade associada a cada uma das entradas da rotunda (ii) Capacidade da entrada crítica, correspondente à capacidade da entrada saturada.

Os pontos seguintes apresentam de forma detalhada os aspetos metodológicos.

3.3 Simulador de tráfego AIMSUN

Para cumprimento do objetivo final desta dissertação, considerou-se apropriado recorrer à aplicação de técnicas de microsimulação para desenvolvimento do estudo de caso. De facto, e por se tratar de avaliação do impacto, na capacidade da rotunda, da implementação de diferentes enquadramentos legais, tais avaliações não são passíveis de serem implementados e avaliados

localmente. Nesse sentido, o trabalho foi suportado pela aplicação do software AIMSUN (*Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks*) – versão 8.0.9 - disponibilizado pela área científica de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação do Departamento de Engenharia Civil.

A origem deste *software* assenta nos anos 90, em Barcelona, Espanha, e no trabalho desenvolvido pelo Laboratório de Investigação Operacional e Simulação (LIOS) pertencente à Universidade Politécnica da Catalunha. A evolução do AIMSUN resultou num produto comercial, que proporciona ao utilizador uma plataforma simples de análise e construção de modelos de simulação microscópica de tráfego (Macedo e Benta, 2013). As potencialidades do AIMSUN passam também por poder testar novos sistemas de controlo de tráfego e políticas de gestão baseadas em tecnologias tradicionais, mas também, testar a implementação de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) (Vilarinho et al., 2014). Como tal, a utilização desta aplicação tem provado ser bastante útil e validada entre a comunidade científica, o que justifica também, a utilização desta plataforma para o presente trabalho, de entre as existentes no mercado internacional.

3.4 Seleção do local de estudo

Para a presente dissertação selecionou-se para estudo de caso uma rotunda real de duas vias de circulação e quatro ramos de aproximação. Por questões logísticas, o local selecionado incidiu na cidade de Coimbra, mais especificamente na rotunda que intersecta a Avenida Mendes Silva com a Rua Dom Pedro de Cristo (rotunda junto aos Bombeiros Sapadores de Coimbra) ilustrada na Figura 3.10. Trata-se de uma rotunda que integra a rede estruturante da cidade e está sujeita a níveis elevados de procura de tráfego diário, principalmente em horas de ponta (mais de 3000 veíc. /h/ sentido na via principal).

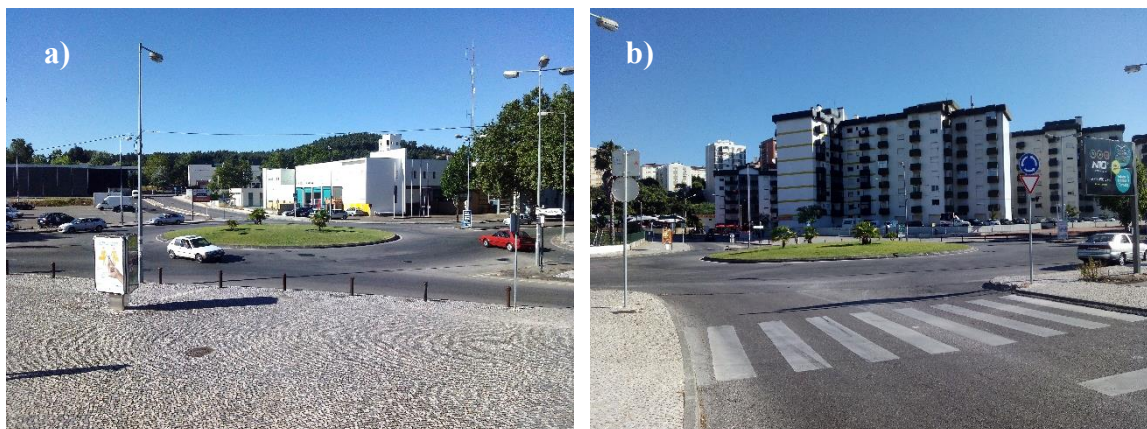


Figura 3.10 – Rotunda em estudo: a) vista entre as entradas C e D; b) vista da entrada B

3.5 Construção do modelo

3.5.1 Abordagem geral

Um modelo de microsimulação pressupõe 4 principais passos fundamentais: (1) codificação da rede simulada, tendo por base as características da infraestrutura real; (2) Caracterização da procura de tráfego automóvel e de outros utilizadores a imputar ao sistema; (3) calibração do modelo, através de ajustes na parametrização do modelo procurando-se obter uma representação realista das condições de circulação na infraestrutura; (4) validação do modelo, recorrendo a recolhas de dados independentes.

O fluxograma em baixo (Figura 3.11) procura sintetizar esses passos de construção do modelo, cujo detalhe e contextualização será desenvolvido adiante.

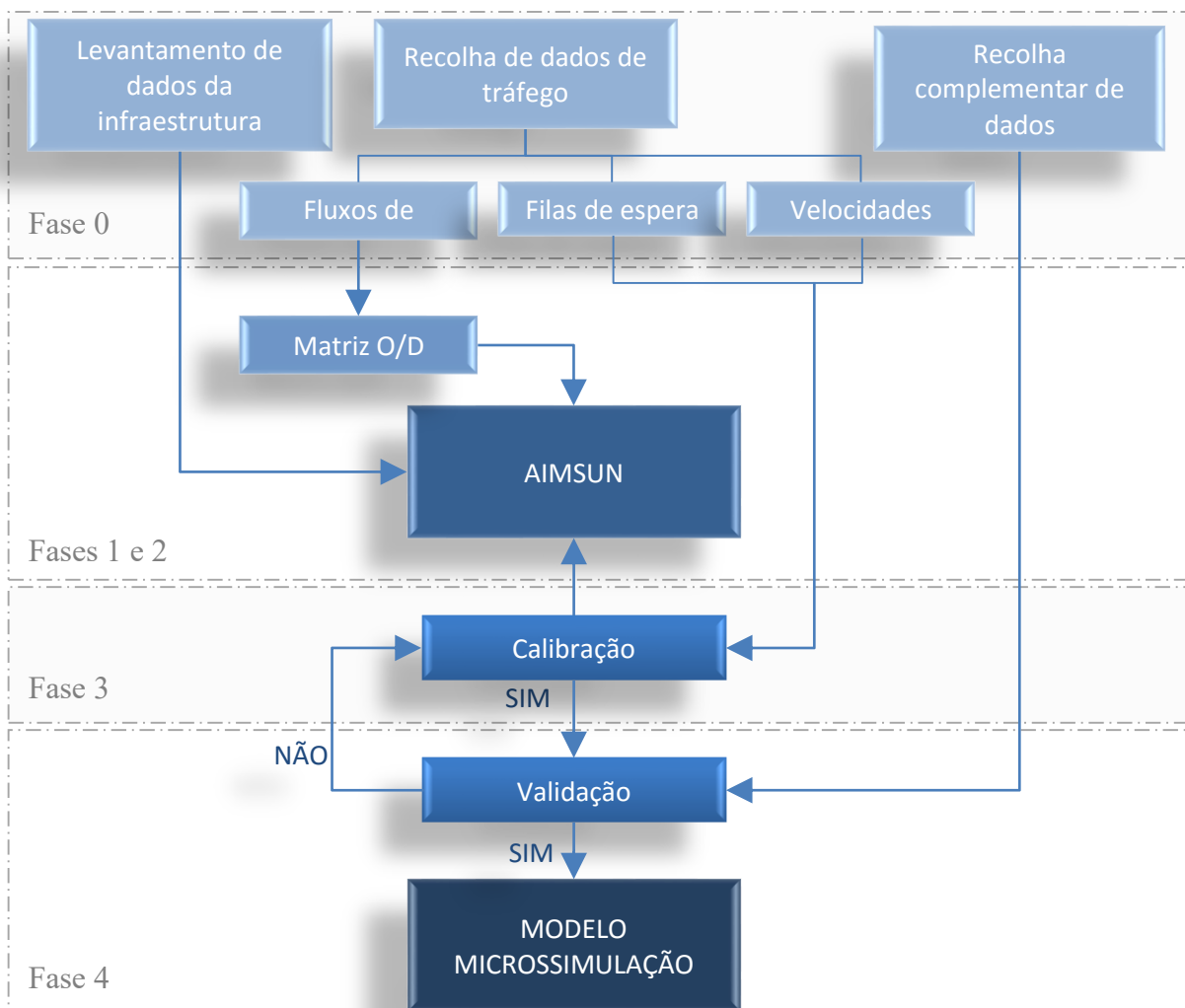


Figura 3.11 – Fluxograma da construção do modelo de microsimulação

Face ao esforço exigido em termos de recolha e tratamento dos dados, a construção do modelo de microsimulação resultou de um esforço conjunto com outra aluna de mestrado integrado da mesma área de especialização, cujas dissertações se baseiam no mesmo local de estudo, embora abordem temáticas diferentes.

3.5.2 Codificação da rede

Os trabalhos de codificação da rede assentaram na cartografia disponibilizada pela Câmara Municipal de Coimbra, atualizada com base na fotografia aérea retirada da plataforma do *Google Earth*. Trata-se de uma rotunda com duas vias no anel de circulação e 4 ramos confluentes, dos quais, 2 constituem dupla faixa de rodagem com duas vias em cada sentido. Genericamente o modelo simulado apresenta as seguintes características geométricas de base:

- i. DCI de 45 metros;
- ii. ANN de 11,50 metros;
- iii. Largura das vias que constituem os ramos da rotunda de 3,50 metros.

A codificação da rede geral apresenta-se na Figura 3.12.

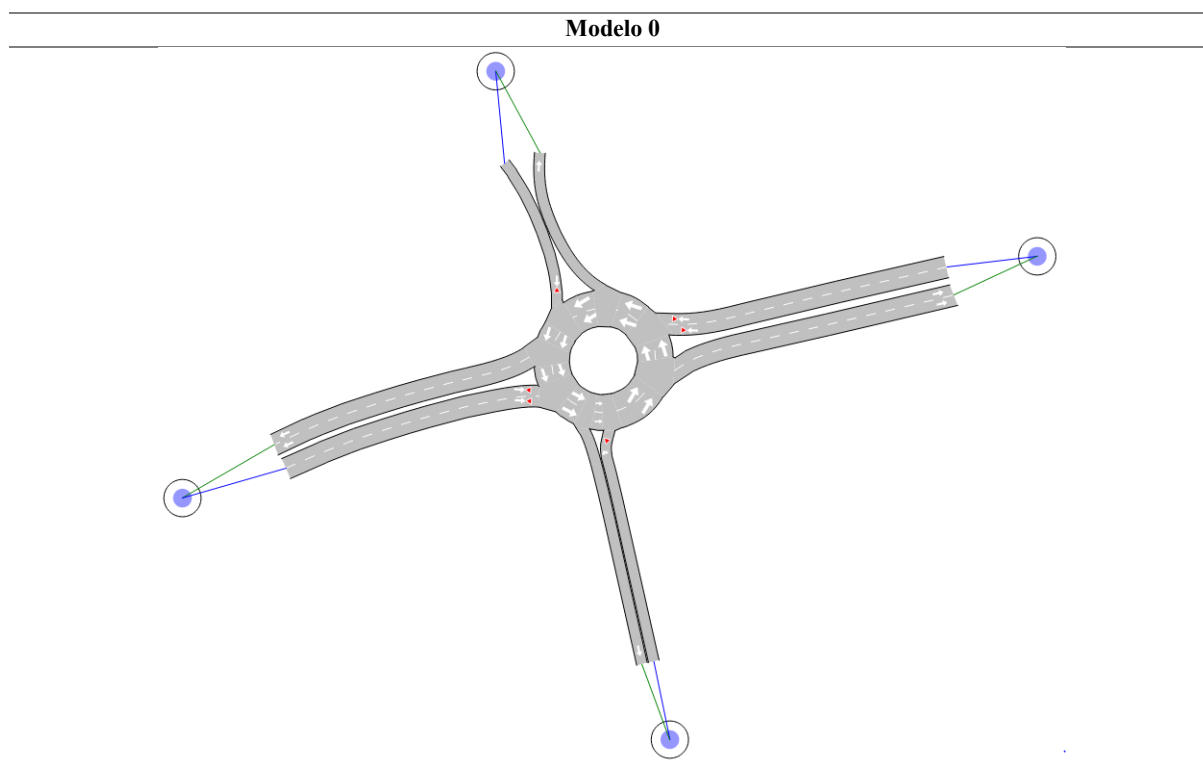


Figura 3.12 – Codificação da rede de simulação

Em conformidade com o problema real, definiram-se outros aspetos intrínsecos ao programa, nomeadamente, a classe dos veículos para “*car*”, por forma a representar os veículos ligeiros, a classificação das vias que constituem o anel da rotunda como “*roundabout*” e, também, o

limite máximo de velocidade nas restantes artérias para 40 km/h, conforme o imposto nas entradas desta rotunda, em particular.

De modo a simplificar o problema, optou-se por não considerar os atravessamentos pedonais e a respetiva semaforização no ramo A, atendendo a que não é objetivo desta dissertação a exata replicação do modo de funcionamento da rotunda, mas sim, efetuar uma análise comparativa entre modelos comportamentais aplicados a rotundas.

3.5.3 Recolha de dados de tráfego

A caracterização dos níveis de procura de uma rotunda ou qualquer outra rede em estudo exige, geralmente, um grande esforço, nomeadamente pela necessidade de usufruir de elevados recursos humanos, económicos ou temporais. Houve por isso a necessidade de simplificar o processo de recolha adaptando-o às necessidades e exigências do problema. Como tal, de entre as diversas metodologias de recolha de dados adotáveis (sessões de inquéritos O/D complementados por contagens de tráfego, registo em vídeo, recolha de matrículas em entradas e saídas da rede, etc.), optou-se por recorrer a um processo simplificado de estimação da matriz O/D. Foram realizadas contagens direcionais dos fluxos de tráfego num período de maior procura (período de ponta da manhã) de um dia útil, complementada por uma amostragem aleatória da repartição direcional.

As sessões de recolha de dados decorreram no dia 27 de novembro de 2015 e envolveram o esforço simultâneo de 6 observadores. A sessão repartiu-se em duas fases temporais com objetivos distintos: (1) construção da matriz O/D, tendo por base os níveis de procura em hora de ponta; (2) recolha da distribuição das velocidades em duas sessões, para apoio aos trabalhos de calibração e recolha complementar de fluxos direcionais de tráfego para apoiar os trabalhos de validação do modelo.

A primeira sessão de recolha de dados ocorreu entre as 8h00 e as 9h00. As contagens de tráfego incidiram sobre as 4 entradas na rotunda e foram segregadas por classe de veículo (ligeiros e pesados) e em períodos de 15 min:

- i. Valores globais de tráfego nas entradas da rotunda (com segregação do movimento de viragens à direita);
- ii. Recolha de uma amostra aleatória para aferição da repartição direcional nas diferentes entradas;
- iii. Evolução das filas de espera, contabilizadas no final de cada período de 15 min.

A Figura 3.13 representa a rede em estudo e as nomenclaturas adotadas para os centróides associados aos ramos de entrada e saída, assim como as posições dos postos de observação.

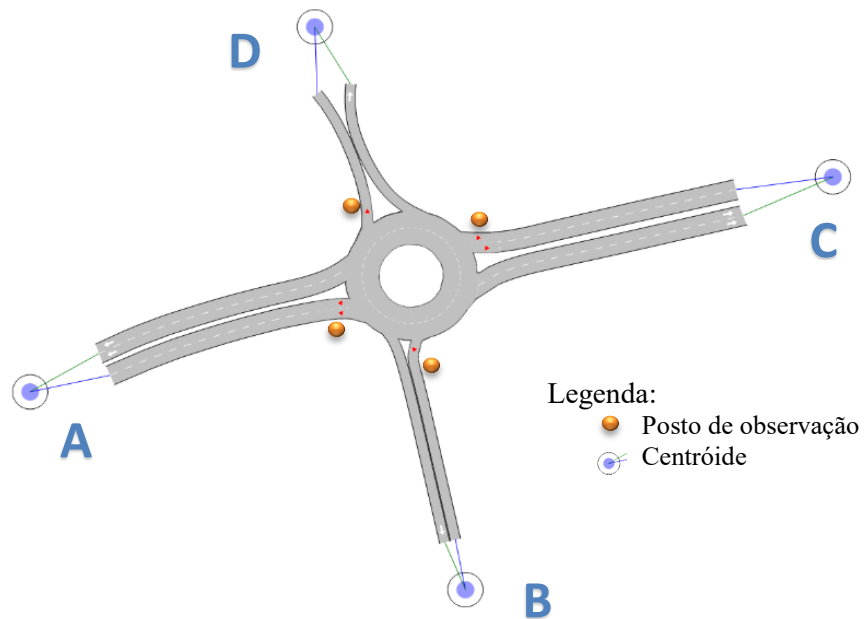


Figura 3.13 – Nomenclatura dos centróides da rede simulada

A segunda sessão de contagens envolveu o esforço de 4 observadores, num período fora da hora de ponta, de modo a salvaguardar uma maior variabilidade de resultados. A segregação por classe de veículo foi igualmente tida em consideração (ligeiros e pesados). Por simplificação, consideram-se apenas os dois ramos de maior afluência de tráfego (ver Figura 3.14).

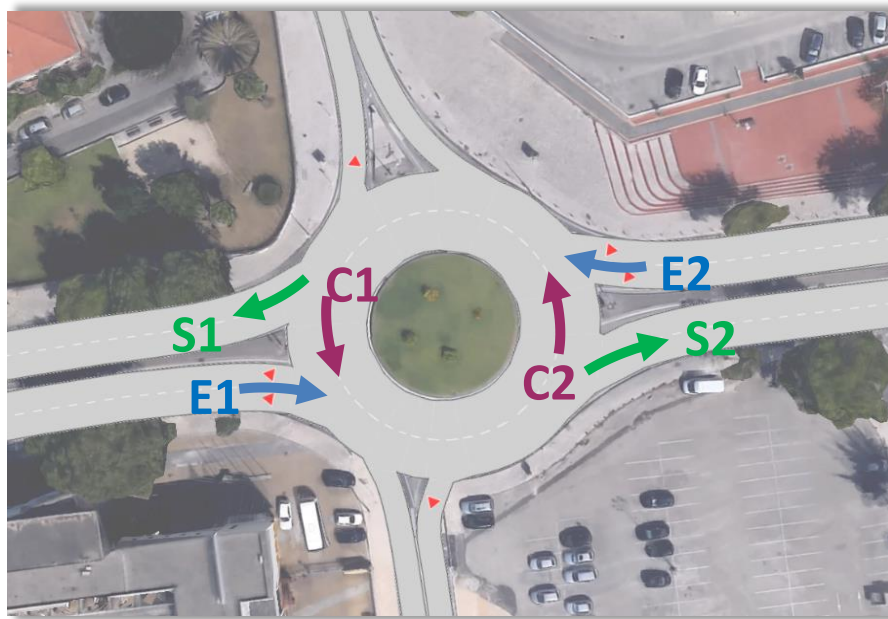


Figura 3.14 – Fluxos de tráfego contabilizados na Fase 2

Deste modo, registaram-se em períodos de 5 min as seguintes informações:

- i. Fluxo de tráfego nas entradas A e C da rotunda (fluxos E1 e E2);
- ii. Fluxo de tráfego nas saídas A e C da rotunda (fluxo S1 e S2);
- iii. Fluxos conflituantes com as entradas A e C (fluxos C1 e C2).

Complementarmente e recorrendo a um radar móvel, procedeu-se à recolha da distribuição das velocidades em duas sessões da Av. Mendes da Silva, para apoio aos trabalhos de calibração do modelo.

Durante ambas as sessões teve-se em conta a experiência de cada observador relativamente a este tipo de trabalho de campo, pelo que se privilegiou a presença de alunos da área científica de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação, os quais ficaram responsáveis pelos postos associados às recolhas mais exigentes de dados (entradas com maior fluxo de tráfego).

3.5.4 Tratamento de dados recolhidos

O tratamento dos dados permitiu criar as matrizes O/D através do cruzamento dos dados das contagens de fluxos e da repartição direcional, na plataforma Excel. Os volumes de tráfego associados aos movimentos de origem-destino foram, assim, calculados multiplicando os valores globais de tráfego segregados para “outras viragens” com os valores percentuais relativos ao levantamento aleatório da repartição direcional. Embora tenham sido recolhidas as inversões de marcha, optou-se por desprezá-las do processo de cálculo por se considerarem valores negligenciáveis. Da mesma maneira que não afeta de forma significativa o estudo em questão, o número de veículos pesados foi convertido (com um fator igual a 2) para a unidade de veículos ligeiros equivalentes (uvle), somando-se os mesmos aos veículos ligeiros.

De todo o processo que envolve o cálculo desta estimativa, resultaram 4 matrizes O/D para cada período de 15 min, e de dimensão 4x4 correspondentes ao número de ramos da rotunda. Verificou-se que os 15 minutos de maior procura, como era expectável, ocorreram entre 8h30 e as 8h45, estando representados no Quadro 3.1. As restantes matrizes encontram-se no Anexo I.

Quadro 3.1 – Matriz O/D no período 8:30h – 8:45h (uvle)

		Destino				Total
		(8:30 - 8:45)	A	B	C	
Origem	A	0	13	268	132	413
	B	37	0	2	15	54
	C	235	21	0	22	278
	D	97	36	19	0	152
Total		369	70	289	169	897

As 4 matrizes O/D foram inseridas no modelo, de modo a inserir no sistema a variabilidade dos níveis de procura ao longo do período de simulação. Foi ainda considerado um período adicional de simulação (alargamento a 1:30h de simulação - sendo as matrizes correspondentes ao primeiro e ao último período de 15 min, extrapoladas para meia hora) de forma a garantir a estabilidade de funcionamento do sistema, tendo-se por inerência rejeitado os resultados referentes ao primeiro e último quarto de hora.

Relativamente ao tratamento de dados recolhidos na Fase 2, visto ser um processo intrínseco à validação do modelo com fins apenas qualitativos, será contextualizado no ponto 3.5.6.

3.5.5 Calibração do modelo

O passo seguinte de construção do modelo centrou-se no processo de calibração. Esta fase consiste na introdução de pequenos ajustamentos aos parâmetros de calibração de modo a garantir que o modelo se revela capaz de reproduzir as condições reais observadas *in situ*. Este processo pode ser, por vezes, bastante exaustivo, aliando-se à necessidade de recolher um elevado número de dados observados e compará-los aos valores simulados.

Sublinha-se que o principal objetivo desta dissertação consiste numa análise comparativa de vários comportamentos e procedimentos aplicáveis a uma rotunda, e não a representação de uma realidade única, exclusiva a esta intersecção. Neste contexto, embora com a sua devida importância, o processo de calibração não assume um papel tão relevante.

Assumindo que os parâmetros presentes no programa AIMSUN estão calibrados por valores “*default*”, tendo por base um grande número de estudo que validam os mesmos, considerou-se apenas necessário ajustar parâmetros que assumissem uma diferença significativa nas condições de circulação simuladas relativamente às condições facilmente observáveis *in situ*.

Deste modo, optou-se por ajustar o *tempo de reação* médio do veículo que se propõe a entrar na rotunda, relacionado com o submodelo de “*gap-acceptance*”, assim como parâmetros relativos às velocidades em regime livre de circulação (*speed acceptance*), que representa a predisposição para os condutores respeitarem a velocidade máxima imposta no local. Estes dois parâmetros foram sucessivamente ajustados até se obterem filas de espera registadas *in situ*, ao fim de cada período de 15 min, com comprimento semelhante aos valores observados na rede simulada, para os mesmos instantes.

Esse ajuste resultou na adoção de um tempo de reação de 0,8s, muito próximo do valor *default* do programa (0,75s). Relativamente à parametrização das velocidades, tendo em conta que a velocidade máxima legal dos ramos de entrada se limita aos 40 Km/h, ajustou-se os valores das velocidades médias, mínimas e máximas praticáveis na rede simulada, mas também o parâmetro de “*speed acceptance*”, que se refere à variação da velocidade média registada numa

determinada secção de estrada, em relação à velocidade máxima legal. Como tal, os valores aqui referidos foram os seguintes (Quadro 3.2).

Quadro 3.2 – Parâmetros da distribuição de velocidades

<i>Parâmetro</i>	<i>Min.</i>	<i>Médio</i>	<i>Max.</i>	<i>Desvio</i>
<i>Aceitação de velocidade</i>	0,92	1,14	1,32	0,10
<i>Velocidade máxima desejada</i>	30 Km/h	37 Km/h	45 Km/h	10 Km/h

3.5.6 Validação do modelo

Os trabalhos de validação devem ser suportados por uma base de dados independente da adotada na construção e calibração do modelo, servindo para comparar a proximidade entre os resultados simulados pelo modelo calibrado e os valores reais recolhidos *in situ*. Desta forma, permite avaliar a robustez dos resultados simulados pelo modelo e, por inerência a sua capacidade para representar a realidade simulada.

Para o efeito, foram analisados e tratados os seguintes dados recolhidos no campo, com algumas considerações.

- i. Número de veículos ligeiros e pesados convertidos (com fatores igual a 1 e 2, respetivamente) em unidade de veículos ligeiros equivalentes (uvle);
- ii. Foram considerados os movimentos de ida em frente e de viragem à direita, para os ramos de entrada A e C, por forma a simplificar o tratamento de dados, sendo estes fluxos segregados de forma equilibrada (50/50);
- iii. Contabilizado o fluxo conflituante em uvle/h.

O tratamento de dados resultou na estimação de 12 matrizes O/D correspondentes a cada período de 5 min de contagens, extrapoladas para um período de simulação de 1h30, por forma a poder rejeitar os primeiros e últimos 15 minutos de simulação, como foi apresentado anteriormente.

A avaliação de qualidade do modelo, baseou-se assim na comparação dos fluxos observados em campo, extrapolados para a hora, com os resultados da simulação individual no AIMSUN de cada uma das matrizes, também durante o período de 1h concluindo-se um resultado positivo de validação considerando que os erros não ultrapassam os 3%, e que os resultados modelados têm um erro médio de aproximadamente 1% dos valores observados. Os mesmos valores podem ser consultados no Quadro 3.3 e no Quadro 3.4.

Quadro 3.3 – Fluxos de entrada, saída e conflituantes referentes ao ramo A (cada 5min).

min	Fluxo Entrada A			Fluxo Saída A			Fluxo Conflituante A		
	REGISTADO	MODELADO	ERRO	REGISTADO	MODELADO	ERRO	REGISTADO	MODELADO	ERRO
5	888	889	0%	780	780	0%	144	147	2%
10	756	753	0%	768	775	1%	228	233	2%
15	972	984	1%	756	769	2%	192	194	1%
20	852	850	0%	816	823	1%	180	183	2%
25	780	786	1%	1092	1102	1%	264	259	2%
30	1008	1005	0%	936	942	1%	156	158	1%
35	984	995	1%	840	844	0%	228	230	1%
40	984	987	0%	864	872	1%	168	172	2%
45	876	885	1%	936	946	1%	192	192	0%
50	840	836	0%	864	873	1%	168	170	1%
55	948	959	1%	1164	1170	1%	216	222	3%
60	1116	1113	0%	936	952	2%	240	237	1%

Quadro 3.4 – Fluxos de entrada, saída e conflituantes referentes ao ramo C (cada 5min).

min	Fluxo Entrada C			Fluxo Saída C			Fluxo Conflituante C		
	REGISTADO	MODELADO	ERRO	REGISTADO	MODELADO	ERRO	REGISTADO	MODELADO	ERRO
5	744	736	1%	708	718	1%	228	231	1%
10	732	730	0%	576	586	2%	288	289	0%
15	576	570	1%	684	691	1%	360	365	1%
20	684	680	1%	684	693	1%	360	366	2%
25	936	941	1%	720	724	1%	336	336	0%
30	816	820	0%	756	764	1%	396	401	1%
35	648	647	0%	900	913	1%	384	385	0%
40	636	629	1%	840	861	2%	240	240	0%
45	744	742	0%	792	808	2%	276	268	3%
50	804	807	0%	660	670	1%	300	306	2%
55	936	942	1%	804	813	1%	396	396	0%
60	828	833	1%	864	869	1%	432	433	0%

3.6 Considerações finais

No presente capítulo foi apresentada a construção de um modelo de microsimulação capaz de apoiar o desenvolvimento de análises comparativas aplicadas à avaliação do desempenho de rotundas face a diferentes esquemas de circulação. O modelo apoiou-se na plataforma AIMSUN a qual se revelou constituir um instrumento adequado à representação fidedigna de diferentes realidades.

Os trabalhos de calibração e de validação permitiram ajustar o modelo simulado à realidade atual, resultando em erros, que embora não negligenciáveis, são considerados aceitáveis para este tipo de análise. Este mesmo modelo validado serviu de base às análises apresentadas no capítulo 4.

4 AVALIAÇÃO DO IMPACTE DAS REGRAS VIGENTES NO DESEMPENHO DA ROTUNDA

4.1 Introdução

O presente capítulo destina-se à análise comparativa do funcionamento duma rotunda com duas vias de circulação em função das regras de condução em vigor e o seu impacte ao nível da capacidade. As análises abrangem vários modelos de referência internacional e nacional, expostos no capítulo 2. Definem-se de seguida a metodologia de abordagem, os cenários estudados e os indicadores de desempenho em análise.

4.1.1 Abordagem geral

Apresenta-se na Figura 4.15 um fluxograma que procura sintetizar a metodologia adotada no presente capítulo, cujo detalhe e contextualização será desenvolvido adiante.

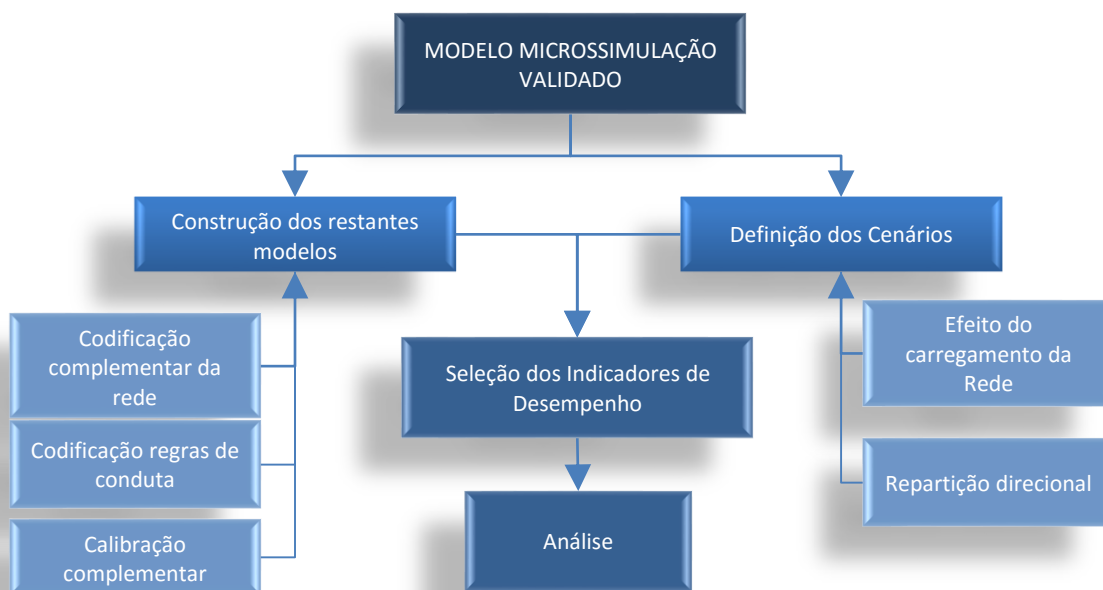


Figura 4.15 – Fluxograma da construção e análise dos modelos estudados

Após a validação do modelo geral – Modelo 0, o processo metodológico passou pela construção dos restantes modelos, a partir do primeiro, como já se referiu no Capítulo 3. Como tal, foi necessário introduzir alterações à codificação da rede, e conseqüentemente, aplicar um processo de calibração sumário baseado na escolha estocástica de rota, indispensável a esta nova alteração de funcionamento das rotundas. A nova rede complementar serviu de base aos

restantes Modelos UK, AUS, FR e PT. Paralelamente, foram definidos os cenários a estudar, assim como os indicadores de desempenho.

Atendendo às conhecidas debilidades do atual Código da Estrada português, o Modelo PT foi considerado como referência para as análises comparativas, facilitando assim a avaliação do potencial eventualmente associado à introdução em Portugal de regras diferentes.

4.2 Definição dos modelos em estudo

4.2.1 Codificação da rede

Como se refere no terceiro capítulo, foi necessário codificar 5 redes com a representatividade de cada modelo comportamental mencionado. Desta forma, tornou-se necessário adaptar a rede original (Modelo 0) aos mesmos, sem alterar a geometria da rede, de modo a facilitar a imposição de diferentes regras vigentes de circulação inerentes a cada modelo, no AIMSUN. As novas modificações da rede consistiram em separar fisicamente as vias de entrada, saída e mesmo do anel, o que não corresponde à realidade, servindo apenas para efeitos de cumprimento das regras de circulação impostas para o correto funcionamento dos modelos de simulação. A Figura 4.16 ilustra esta segunda codificação da rede de simulação.

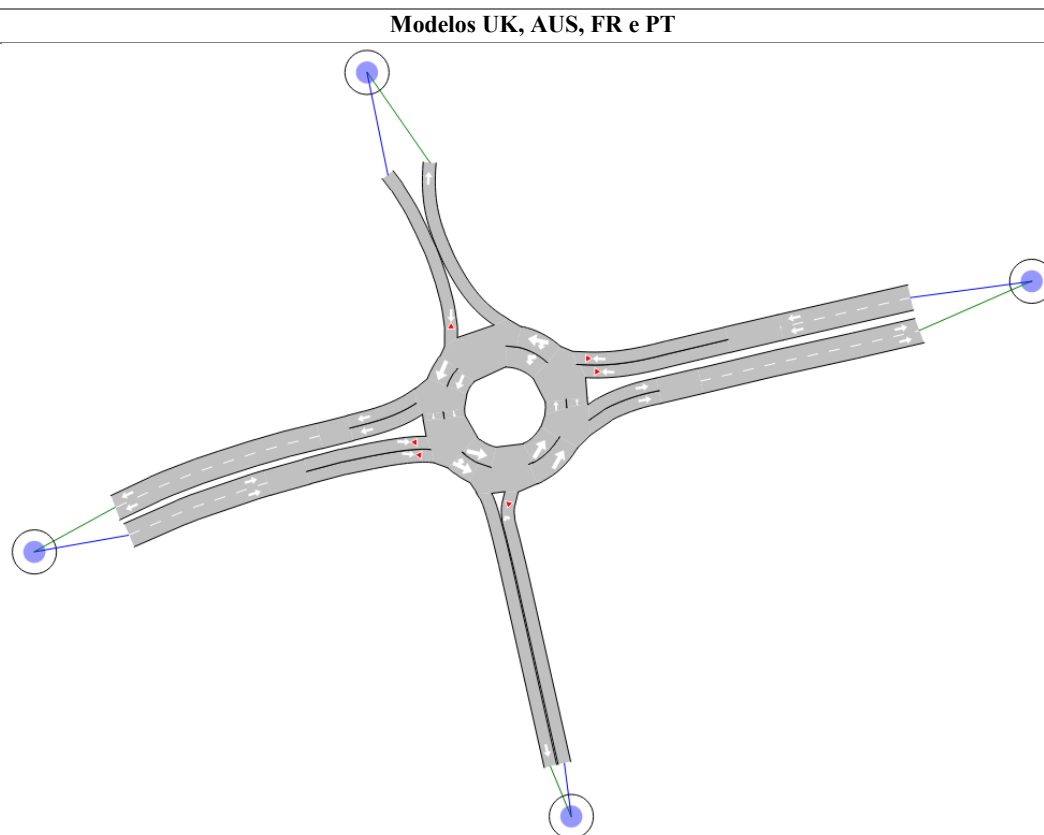


Figura 4.16 – Codificação da rede de simulação – Modelos UK, AUS, FR e PT

4.2.2 Codificação das regras de circulação

O *software* AIMSUN permite criar políticas de circulação do tipo “*movimento forçado*”, adaptando a escolha de trajetória de cada usuário da rede à regra de circulação imposta, dependendo da sua intenção de saída. A criação dessas regras obrigou à adaptação da infraestrutura codificada de forma a segregar nas várias seções as vias da direita e da esquerda em faixas individuais, e, por outro lado, a proceder a um trabalho detalhado e exaustivo de adaptação das regras comportamentais implícitas aos modelos AIMSUN, de modo a as adequarem a cada princípio regulatório em avaliação. Refira-se que as regras de circulação implementadas respeitam a “mão francesa”, pelo que os modelos que originalmente se regem pela “mão inglesa”, Modelos AUS e UK, foram adaptados, no *software*, para o sentido retrógrado de circulação.

A título de exemplo, ilustra-se na Figura 4.17 a regra de circulação de viragem à esquerda do ramo A para o ramo D, segundo o código australiano. Para este conjunto de veículos, com origem na secção 382 e com destino à secção 390, a sua rota deve ser forçada pela via esquerda do ramo A (secção 655). Simultaneamente, os veículos provenientes da via esquerda do anel, na secção 1144, com destino à secção 390, devem continuar a sua rota pela via interior do anel (secção 1132). A restante trajetória é condicionada pela própria codificação da rede relativamente à junção de nós.

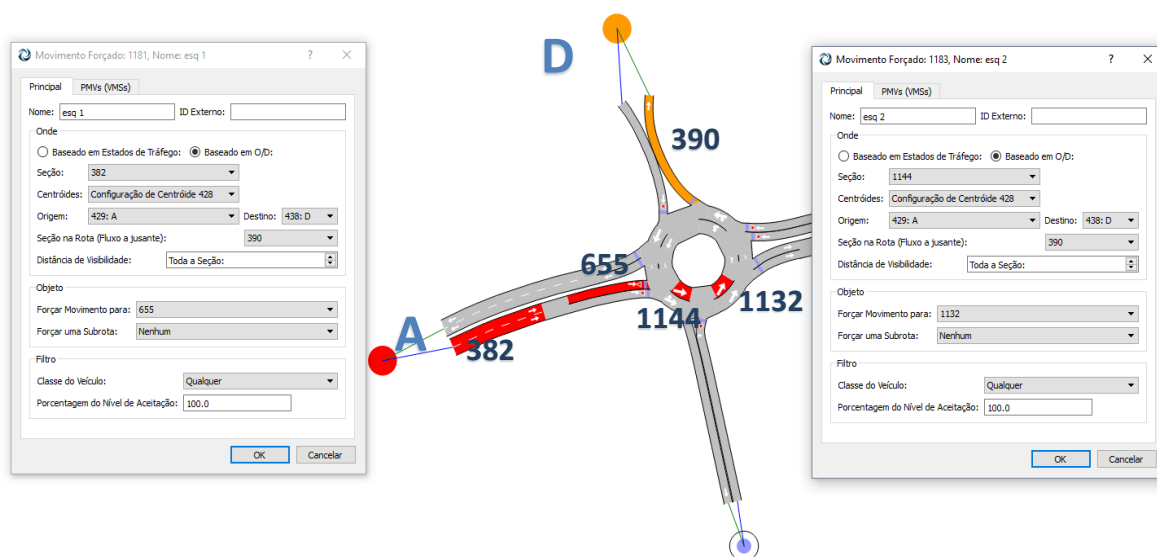


Figura 4.17 - Codificação da regra de viragem à esquerda segundo o modelo AUS

4.2.3 Calibração complementar da rede

O processo de calibração exposto no capítulo anterior foi efetuado tendo como base o Modelo 0, que, por defeito, o *software* define como um modelo de escolha estocástica de rota “fixa” usando tempos de viagem calculados sob condições de fluxo livre, isto é, admitindo que os

condutores optam por um determinado trajeto em função do tempo necessário para o percorrer. Estes percursos são imediatamente calculados no início da simulação, não sendo necessário os seus recálculos pois não existem trajetos alternativos. Por outro lado, a codificação da rede para os restantes modelos traz alterações significativas, nomeadamente pela separação física das vias em faixas de rodagem, implicando um processo de decisão prévio de escolha de rota nos ramos de entrada. Importa, neste sentido, calibrar cada modelo de referência, com as regras de circulação que os definem. Verificou-se que Modelos de referência PT e FR, baseados nesta nova configuração da rede, devido às regras de circulação impostas e à obrigatoriedade de escolher determinada via por parte dos condutores, não implicaram novos trajetos alternativos, e por esta razão manteve-se o *default* para o modelo de escolha estocástica de rota.

Relativamente aos Modelos UK e AUS, em que passam a existir duas alternativas nos movimentos de ida em frente, foi necessário atribuir um modelo *Logit* de escolha discreta, que permite equilibrar a utilização de ambas as vias, particularmente em períodos de maior procura de tráfego, onde a variabilidade do custo do trajeto por cada via é maior. Na calibração deste modelo intervieram alguns fatores, destacando-se o parâmetro K-SPs Inicial que define o número de percursos mais curtos calculados no início da simulação (TSS, 2015), cuja metodologia para o seu acerto se baseou numa calibração manual por iterações de simulação, avaliando-se a extensão das filas de espera em cada via com o registo simultâneo dos fluxos de entrada. Os parâmetros calibrados apresentam-se no Quadro 4.5:

Quadro 4.5 – Parâmetros de calibração do modelo de escolha estocástica de rota *Logit*

<i>Parâmetros</i>	<i>Modelo Inglês</i>	<i>Modelo Australiano</i>
K-SPs Inicial [1-100]	4	9
restantes	<i>default</i>	<i>default</i>

Note-se que a construção do modelo de microssimulação durante a sua fase de calibração foi suportada pelas 4 matrizes O/D referidas no ponto 3.5.4, resultantes do tratamento de dados recolhidos nas sessões de campo da manhã, e representando a variabilidade dos níveis de procura ao longo do período de simulação de hora e meia.

Contudo, a complexidade inerente ao uso de todas estas matrizes não se justificava na fase de análise apresentada no presente capítulo, pois apenas se pretendeu fazer uma análise comparativa e não recriar uma situação específica de tráfego, pelo que se optou por adotar cenários correspondentes a níveis constantes da procura de tráfego global. A matriz O/D inserida no *software* corresponde à matriz usada na fase anterior (Quadro 3.1), relativa ao período das 8:30h às 8:45h, extrapolada para uma hora. Foi novamente, considerado um período

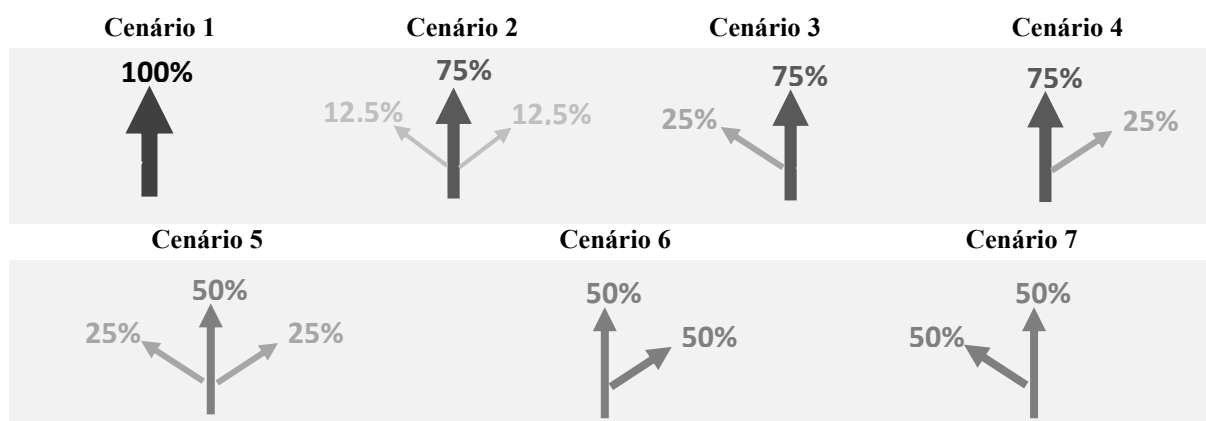
adicional de simulação (alargamento a 1:30h de simulação) de forma a garantir a estabilidade de funcionamento do sistema.

4.3 Cenários de procura

O presente estudo divide e organiza a informação obtida nas simulações por diferentes cenários de procura de tráfego, permitindo avaliar de que maneira cada modelo responde a cada uma dessas variações, e conseqüentemente, efetuar uma análise comparativa entre o desempenho de cada cenário num mesmo modelo e entre os modelos simulados no geral.

Deste modo, foram analisadas duas situações fundamentais de procura, e, portanto, dois conjuntos de cenários. O primeiro conjunto de cenários corresponde à variação da repartição direcional do tráfego de forma sistemática e alternada, assumindo a mesma repartição nas diferentes entradas da rotunda. No Quadro 4.6 estão representados os movimentos (viragem à esquerda, ida em frente e viragem à direita) assim como o volume de tráfego associado aos mesmos, para cada cenário.

Quadro 4.6 – Cenários de Repartição Direcional de Tráfego



Para além destes, foi também analisado o cenário onde se assume a carga real de tráfego registada nas sessões de campo (Cenário B), perfazendo no total 8 cenários de repartição em análise.

O segundo conjunto de cenários procurou cobrir o efeito da variação do carregamento da rede em cada um dos cenários de repartição direcional. Deste modo, foram realizadas simulações sistemáticas, associadas a coeficientes de majoração da matriz O/D, de 5 em 5% até se atingir 200% e a partir deste ponto, de 10 em 10%.

As simulações realizadas individualizaram-se por determinado carregamento da rede, para dado cenário de procura (determinada matriz O/D) e por modelo. Atendendo à lógica de programação

do simulador para os fenómenos estocásticos do tráfego, optou-se por considerar como resultado de cada simulação a média de um total de 10 replicações, garantindo resultados suficientemente estabilizados.

4.4 Indicadores de desempenho

Através do *software* AIMSUN é possível recolher uma grande variedade de *outputs* capazes de caracterizar o desempenho do sistema modelado aos seus diferentes níveis. No interesse do presente trabalho, pretende-se apresentar o mais fielmente possível o caso em estudo, as carências ou eficiências do atual funcionamento dos vários modelos de referência, representadas de uma forma clara e global. Como tal, as análises abrangem a competência dos mesmos modelos ao nível da capacidade de escoamento de tráfego gerada, tendo sido adotados os seguintes indicadores de desempenho:

- i. Capacidade global da rotunda, correspondente à soma da capacidade associada a cada uma das entradas da rotunda (uvle/h);
- ii. Capacidade da entrada crítica, correspondente à capacidade da entrada saturada (uvle/h).

O AIMSUN permite a colocação de detetores em determinados locais da rede codificada e, deste modo, extrair dados relativos à capacidade para cada ramo de entrada, ou mesmo a capacidade global da rotunda, para dado cenário de procura e para dado período de simulação decorrido.

4.5 Avaliação do impacte em termos de capacidade

A avaliação de desempenho dos modelos estudados processa-se em duas fases distintas, de acordo com os indicadores de desempenho em análise. A metodologia adotada passou por fazer entrar na rotunda valores crescentes de tráfego global e, por sua vez, identificar o instante de saturação (i) da rotunda, relacionado diretamente com a capacidade global e (ii) nas diferentes entradas da rotunda.

Refira-se que se considera a rotunda saturada no instante em que uma das entradas (entrada crítica) atinge a saturação, garantindo formação de uma fila de espera contínua na aproximação a essa entrada. Ao mesmo tempo, a capacidade global da rotunda refere-se ao número máximo de veículos que se inserem no anel (no conjunto das 4 entradas) quando, a dado instante, a rotunda deixa de conseguir responder à procura de tráfego de uma das entradas, isto é, quando a entrada crítica satura.

4.5.1 Capacidade global

Na primeira análise, o ponto de saturação associado a cada cenário estudado em cada modelo foi avaliado por inspeção visual das filas de espera nas diferentes entradas. Como tal, foi registada a capacidade global traduzida à unidade de veículo ligeiro equivalente (uvle) para dado carregamento de saturação da rede, resultando no gráfico da Figura 4.18, com indicação

dos máximos e mínimos de cada modelo. Note-se que o gráfico repete a apresentação dos cenários, de modo a facilitar a análise da influência do volume de tráfego correspondente a cada movimento direcional. Desta forma, são recolhidos os seguintes tipos de análise:

- i. Análise A) – Cenários 1, 2 e 5: Incremento proporcionalmente uniforme do volume de tráfego das viragens à esquerda e à direita;
- ii. Análise B) – Cenários 6, 5 e 7: Redução simultânea do volume de tráfego de viragem à direita e o correspondente aumento do volume de tráfego de viragem à esquerda;
- iii. Análise C) – Cenários 1, 3 e 7: Incremento do volume de tráfego de viragem à esquerda, com viragem à direita nula (com representação invertida na Figura 4.18);
- iv. Análise D) – Cenários 1, 4 e 6: Incremento do volume de tráfego de viragem à direita, com viragem à esquerda nula.

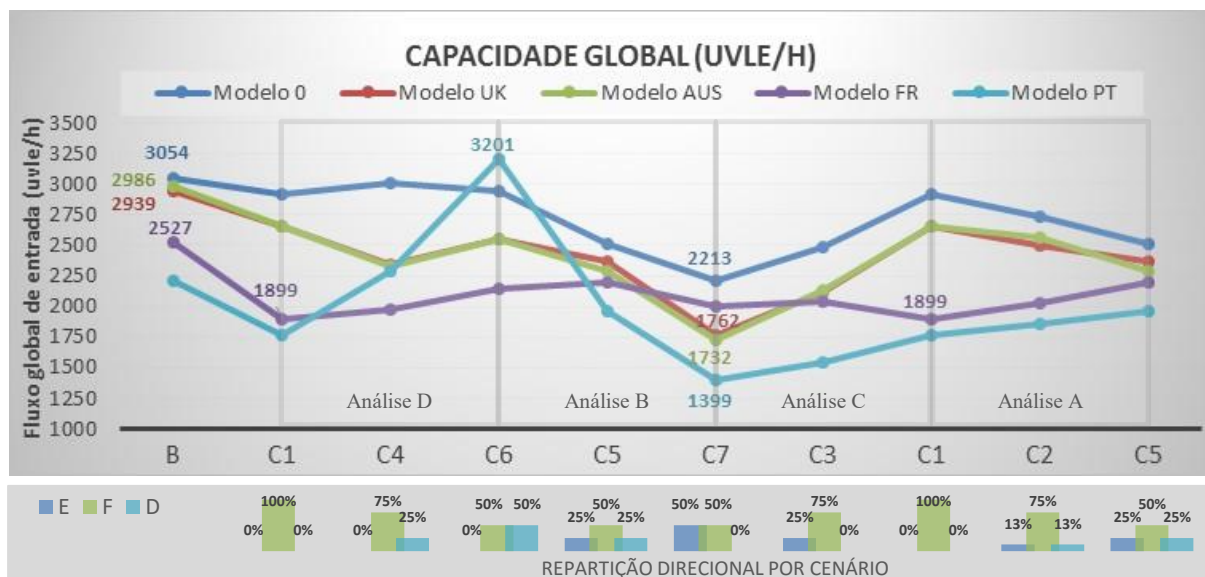


Figura 4.18 - Capacidade Global dos modelos de referência (uvle/h)

A análise do gráfico permite concluir que o Modelo 0 responde, geralmente, às diferentes repartições direcionais analisadas com uma capacidade global acima de todos os outros modelos, devendo-se sobretudo à inexistência de regras rígidas pré-definidas, onde se facilita o trajeto de um veículo por qualquer via de entrada, ou no anel, independentemente do destino pretendido. A flexibilidade permitida de escolha de trajeto poderá, no entanto, implicar menores níveis de segurança associados ao maior número de entrecruzamentos nas vias de aproximação e manobras de negociação da rotunda, questão que terá sempre que ser considerada numa avaliação global integrada do desempenho de diferentes soluções alternativas de regulação.

Por outro lado, os menores níveis de capacidade global analisados pertencem, de forma geral aos Modelos FR e PT.

É igualmente notável a similaridade entre as curvas correspondentes aos Modelos UK e AUS, apresentando capacidades globais muito aproximadas. Deste modo, apresentam-se resultados das simulações expectáveis devido às regras comportamentais igualmente semelhantes, que apenas se diferenciam nos trajetos de saída, numa situação de viragem à esquerda no atravessamento da rotunda.

Verifica-se que o cenário a que correspondem genericamente, maiores valores de capacidade global, é o cenário que evidencia uma procura de tráfego mais realista aos períodos mais requisitados na rotunda do caso de estudo. Por outro lado, as menores capacidades globais analisadas, correspondem ao Cenário 7, onde os movimentos de viragem à esquerda e ida em frente são repartidos de igual forma. Visto que este cenário implica o maior volume de tráfego no movimento de viragem à esquerda entre os vários cenários estudados, transparece deste cenário uma maior utilização da via esquerda na aproximação à rotunda, que naturalmente produz mais rapidamente maiores filas de espera na simulação decorrida, ao mesmo tempo que produz elevado número de conflito no anel.

No entanto, embora com um valor não muito diferente, o Modelo FR não apresenta no Cenário 7 o seu menor pico de capacidade global, pois os movimentos de ida em frente são apenas direcionados pela via direita, aliviando o uso da via da esquerda. Naturalmente, o menor valor de capacidade global para este modelo, com 1899 uvle/h, corresponde ao Cenário 1, que produz apenas movimentos deste tipo nas entradas, o que implica o desuso completo da via esquerda.

Ainda no Cenário 7 regista-se o menor pico geral de capacidade Global entre todos os modelos/cenários estudados, o qual corresponde ao modelo português, com 1399 uvle/h. O modelo PT em conjunto com o cenário referido, implica o desuso completo da via direita, pois ambos os movimentos de ida em frente e viragem à esquerda são direcionados para a via esquerda de aproximação. De forma geral, o Modelo PT é o que regista os menores níveis de capacidade global, na maioria dos cenários, pois apresenta uma maior inutilização geral das vias de aproximação e saída.

O Modelo PT é, por sua vez, responsável nesta análise pelo maior pico de Capacidade Global (3201 uvle/h), que ocorre no Cenário 6, repartindo os movimentos de viragem à direita e ida em frente com igual volume de tráfego. O Cenário 6 representa, desta forma, o cenário ideal para este modelo, pois cada um destes movimentos é direcionado por apenas uma via de aproximação (direita e esquerda, respetivamente) nos ramos de entrada.

A influência do volume de tráfego correspondente a cada movimento direcional foi, assim, avaliada agrupando os cenários por redução ou majoração da matriz dos volumes de tráfego associados a determinados movimentos, possibilitando uma maior perceção dos mesmos.

A análise A) agrupa os Cenários 1, 2 e 5, por forma a avaliar o efeito do incremento proporcional dos movimentos de viragem à esquerda e à direita, e consequentemente do decréscimo de volume de tráfego do movimento de ida em frente. A leitura desta análise revela uma resposta à capacidade global distinta entre modelos. Os que permitem a inserção de veículos que pretendam seguir em frente na rotunda pelas duas vias de aproximação – Modelos 0, UK e AUS, apresentam maior capacidade global relativamente aos que apenas disponibilizam uma via de aproximação para esse movimento, no caso do Modelo FR, a via direita e no Modelo PT, a via esquerda. Esta situação é bastante perceptível para o Cenário 1, e pela subsequente perda suave de capacidade global nos Cenários 2 e 5 relativamente aos primeiros modelos mencionados (perdas de capacidade entre 11 a 14% para os Modelos 0, UK e AUS). Pelo contrário, os Modelos FR e PT apresentam o pior desempenho no cenário que apenas apresenta movimentos de ida em frente e um acréscimo de capacidade global (11% e 16% no total da análise A, respetivamente) quando as duas vias de aproximação começam a ser utilizadas por movimentos de viragem à esquerda (Modelo FR) ou à direita (Modelo PT).

Relativamente à análise B), observa-se uma tendencial perda de capacidade global nos modelos em geral, com o incremento percentual dos movimentos à esquerda, em detrimento dos movimentos à direita. No entanto, a curva de capacidade global do Modelo PT apresenta o decréscimo mais acentuado para esta situação (diminuição de 56% da capacidade global), pois passa, como já referido, de um cenário ideal (Cenário 6), correspondente a uma repartição igualitária do tráfego pelas 2 vias de entrada, para o cenário estudado mais desfavorável (Cenário 7), onde toda a procura se acumula na via da esquerda. Verifica-se que um incremento de 25% de viragens à esquerda (e a correspondente redução nas viragens à direita) afeta severamente a capacidade global do modelo, numa média de 35%, enquanto que os Modelos UK e AUS registam em média perdas de 17%. Por outro lado, o Modelo FR reflete um ligeiro aumento de capacidade global com o incremento das viragens à esquerda, ou mais importante, com a redução das viragens à direita, pois o Cenário 6 pressupõe apenas o uso da via direita de aproximação e do anel.

A análise C) surge por forma a avaliar, mais aprofundadamente, o efeito do aumento das viragens à esquerda na rotunda, com a consequente diminuição dos movimentos de ida em frente. Como tal, a leitura do gráfico da Figura 4.18 faz-se iniciando-se numa situação de movimentos exclusivamente de ida em frente (Cenário 1), para uma situação de volume de tráfego simetricamente dividido entre movimentos de ida em frente e de viragem à esquerda (Cenário 7). A capacidade global em termos gerais, decresce neste sentido (em cerca de 20%

para o Modelo PT, 35% para os Modelos UK e AUS e 24% para o Modelo 0), pois os Cenários 3 e 7 geram um maior número de entrecruzamentos no anel da rotunda e perturbação nas entradas consecutivas. Para além deste aspeto, o Modelo PT, de acordo com as regras de comportamento implícitas, para os presentes cenários, apenas disponibiliza a via esquerda de aproximação, o que se reflete em valores de capacidade global consideravelmente mais baixos relativamente aos Modelos 0, UK e AUS. Novamente, o Modelo FR revela a importância do uso das vias de aproximação, pois ao contrário dos restantes modelos nesta análise, resulta num aumento de capacidade global em cerca de 5%, pois passa de uma situação em que o volume de tráfego é apenas distribuído pela via direita, no Cenário 1, para a distribuição mais ou menos equilibrada pelas duas vias de aproximação no Cenário 7.

Finalmente, a análise D) avalia o efeito do aumento da proporção das viragens à direita no volume total de entrada. Como tal, de forma semelhante à análise C), o agrupamento de cenários estudados neste caso inicia-se pelo Cenário 1, terminando no cenário que divide uniformemente o volume de tráfego pelos movimentos de ida em frente e viragem à direita, Cenário 6. Como referido, este último é considerado entre os analisados, o cenário que mais se adequa ao Modelo PT, em termos de capacidade, registando um acréscimo significativo de capacidade global de cerca de 45%, neste sentido. Também o Modelo FR regista um aumento embora mais ligeiro (de 11%), devido à separação igualitária nos sentidos de ida em frente e viragem à direita, na via direita de entrada, que provocam uma diminuição da fila de espera do anel da rotunda. Relativamente aos restantes modelos, UK e AUS, apresentam curvas com picos de capacidade menores no Cenário 4, intermédio aos incrementos de volume de tráfego de viragem à direita. A razão desta tendência contrária deve-se ao facto de a via direita dos ramos A e C serem a preferência de ambos os movimentos considerados nos cenários em questão.

A variabilidade de cenários estudados permite não só individualizar o comportamento dos modelos para dado efeito de repartição direcional, através de valores concretos de fluxos de capacidade obtidos para o caso de estudo, mas também, para fornecer uma visão alargada do funcionamento de um modelo comportamental de uma rotunda sujeita a várias situações de tráfego. Como tal, optou-se por, simultaneamente, apresentar uma comparação percentual da capacidade global relativamente a um dado modelo referência.

Enquanto o Modelo FR apresenta níveis de capacidade global semelhantes para todos os cenários, verifica-se que a maior variabilidade de capacidade global corresponde ao Modelo PT, que, no entanto, apresenta níveis de capacidade global geralmente abaixo dos restantes modelos na maioria dos cenários simulados. Por este motivo, selecionou-se o Modelo PT para referência (Figura 4.19).

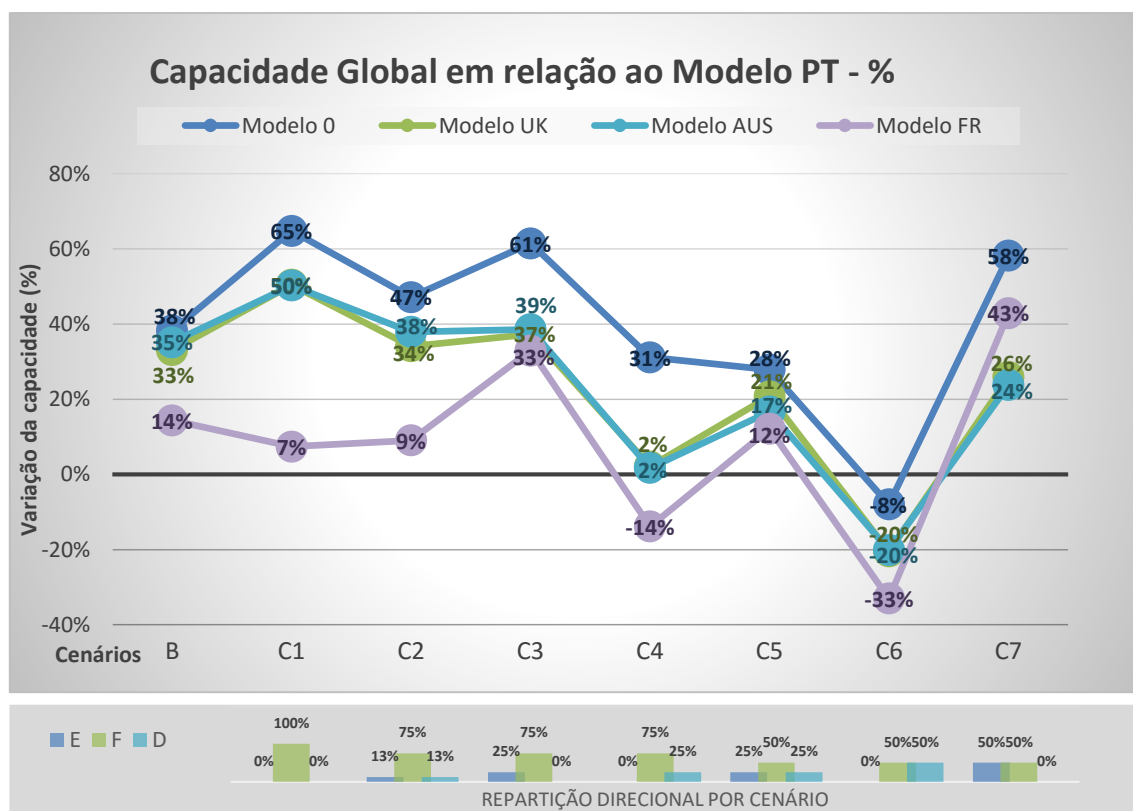


Figura 4.19 – Capacidade Global em relação ao Modelo PT (de referência) (%)

A análise da figura evidencia, claramente, que o modelo PT tende a assegurar níveis de capacidade inferiores aos restantes modelos em avaliação, excetuando-se para o Cenário 6, onde essa tendência se inverte, com um acréscimo de capacidade global de 20% em relação aos Modelo UK e AUS, e 33% em relação ao Modelo FR. Refira-se, contudo, que esse cenário corresponde à distribuição lateral de 50% de viragens à direita e ida em frente (sem viragens à esquerda), cenário pouco habitual e, portanto, representativo de uma situação rara em termos reais.

Particularmente, é notório que o uso das duas vias de aproximação e atravessamento da rotunda nos movimentos de ida em frente têm um efeito significativo em termos de capacidade, como se verifica no Cenário 1 para os Modelos 0, UK e AUS, que aumentam mais de 50% a capacidade global, no seu conjunto, comparativamente aos Modelos PT e FR.

No entanto, no Cenário 4, a imposição de 25% de movimentos de viragem à direita no volume total de tráfego das entradas e a correspondente diminuição dos movimentos de ida em frente, afetam significativamente a diferença de capacidade global entre o conjunto dos Modelos UK e AUS, que registam apenas 2% de melhorias em relação ao Modelo PT.

Por outro lado, os mesmos 25% atribuídos a movimentos de viragem à esquerda no volume total de tráfego das entradas, têm um efeito oposto, continuando, os Modelos UK e AUS, a registar níveis de desempenho significativamente superiores em relação ao Modelo PT, em cerca de 38%.

Relativamente ao Modelo FR, a diferença mais significativa, com 43% de acréscimo de capacidade global relativamente ao Modelo PT regista-se no Cenário 7, chegando a superar os níveis de desempenho dos Modelos UK e AUS, onde as regras de conduta diferem bastante do modelo de referência. Relembre-se que ao contrário do Modelo FR, o Modelo PT, nos ramos com duas vias, canaliza todo o volume de tráfego da entrada pela via esquerda de aproximação.

Em suma, o modelo que mais se aproxima do português em questões de desempenho de capacidade é o Modelo FR, com um acréscimo médio de capacidade, face aos diferentes cenários testados, de 9%, seguindo-se o Modelo UK e o Modelo AUS com 23%. No entanto, como já referido, o desempenho mais significativo ao nível da capacidade potencial corresponde ao Modelo 0, com uma média de todos os cenários estudados de 40% acima do Modelo PT.

4.5.2 Capacidade da entrada crítica

A identificação (por visualização direta das simulações) do instante de saturação de cada um dos modelos permitiu identificar igualmente a entrada crítica da rotunda, como correspondente à primeira entrada a atingir a saturação. Neste subponto apresenta-se a variação da capacidade na entrada crítica, em cada simulação efetuada, a qual, dependendo dos cenários em avaliação, corresponde à entrada A ou D.

Foram gerados gráficos com base nos dados simulados, que relacionam o fluxo de entrada nos ramos A e D para cada modelo comportamental, com o respetivo carregamento da rede, segregando-os por cenário de repartição e por entrada analisada. A discussão dos resultados fez-se tendo por base os diferentes cenários de repartição direcional, escolhendo-se um de cada tipologia, para representação dos restantes. Para controlo da extensão do documento, os restantes cenários são remetidos para o Anexo II.

4.5.2.1 Cenários com movimentos de ida em frente

A Figura 4.20 apresenta os resultados obtidos, em termos de capacidade nas entradas A e D, quando sujeitas a um aumento sistemático de carga de tráfego na rede, tendo por base o Cenário 1 de repartição de tráfego.

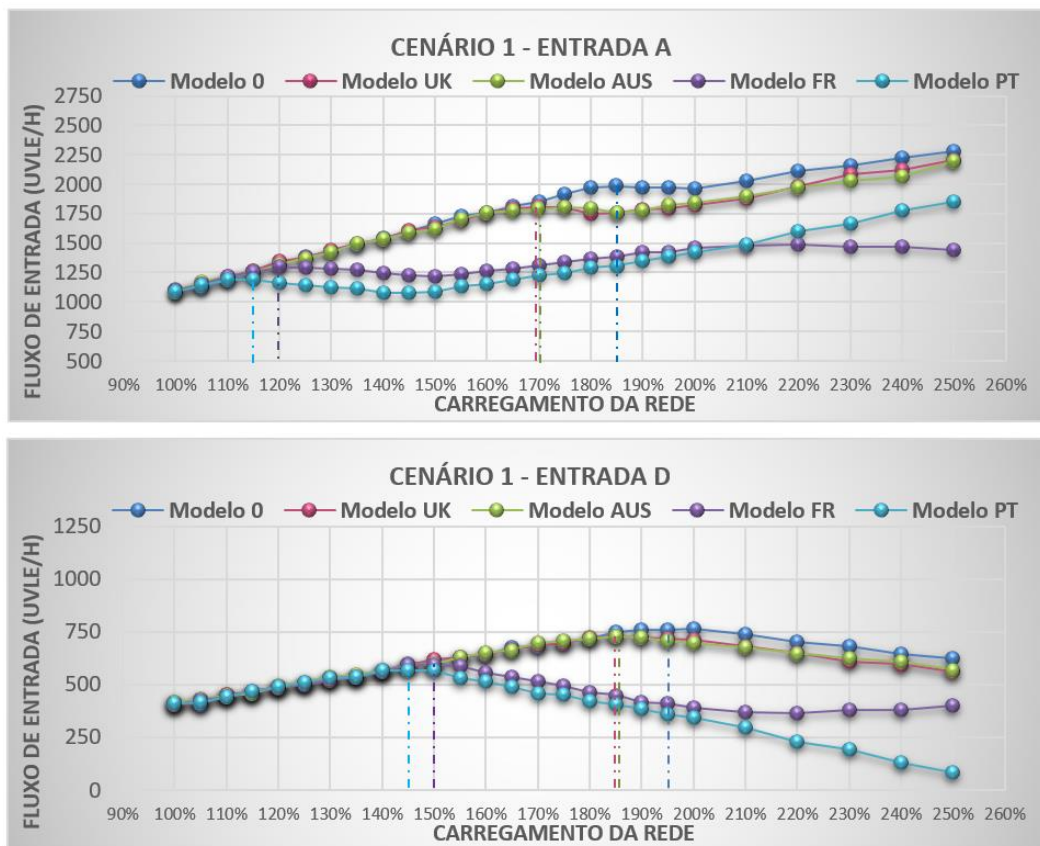


Figura 4.20 – Capacidades registadas nas entradas A e D para o Cenário 1

Mais uma vez, os resultados evidenciam a superioridade dos Modelos 0, UK e AUS, particularmente para situações de procura de tráfego elevada e/ou de congestionamento. Por oposição, os Modelos PT e FR são os que consistentemente apresentam piores níveis de desempenho, pois disponibilizam apenas uma via de aproximação (segundo as regras de circulação) nas entradas A e C, ao mesmo tempo que menosprezam o uso de uma das vias de saída nos mesmos ramos. O Modelo FR caracteriza-se por acumular o fluxo conflituante no anel, atendendo a que as regras de conduta não permitem a utilização da via interior.

A inexistência de movimentos de viragem à esquerda ou à direita no Cenário 1 permite, com mais facilidade a avaliação visual do comportamento da rotunda e do impacto que os movimentos conflituantes exercem sobre as várias entradas, pois o fluxo de entrada de um ramo é igual ao fluxo conflituante registado no ramo consecutivo. Exemplificando para o presente estudo, é claro que o bloqueio de duas entradas opostas é provocado pelo fluxo de entrada que em dado período de simulação é imputado pelas entradas imediatamente anteriores no anel. A análise das curvas de capacidade na Figura 4.20 representa esta mesma situação, registando-se um andamento similar das curvas relativas a todos os modelos aplicados.

Genericamente, a entrada A, por ser a primeira dos 4 ramos a congestionar define o ponto de saturação da rotunda (sinalizado a traço-ponto com a respetiva cor de representação do modelo, e, portanto, para o Modelo PT a cerca dos 115% de carregamento da rede), a partir do qual se regista uma inversão da tendência crescente da curva. A tendência de declínio de capacidade na mesma entrada, deve-se ao aumento do fluxo conflituante na entrada A, correspondente ao fluxo de entrada em D, até à situação de carregamento da rede em que a mesma também satura (para o Modelo PT a cerca dos 145% de carregamento da rede, também sinalizado a traço-ponto com a respetiva cor).

Neste ponto regista-se uma nova inversão do andamento das curvas das entradas analisadas. A saturação na entrada D, provocada pelo aumento do correspondente fluxo conflituante, reflexo do aumento do fluxo de entrada em C, reflete-se num declínio de capacidade em D, e consequentemente, na diminuição do fluxo conflituante na entrada A, que por sua vez, volta a registar aumentos de capacidade (em conjunto com a entrada C). O processo é semelhante para os restantes cenários simulados, tendo em conta que, em cenários que integrem viragens à esquerda, o fluxo conflituante em cada entrada conta com tráfego proveniente das duas entradas imediatamente anteriores.

Note-se que o Modelo FR regista ainda uma segunda inversão, embora associada a uma inclinação pouco acentuada, quando o carregamento da rede se situa nos 210%. Para os restantes modelos, a capacidade da entrada A e D registam um crescimento diretamente associado ao aumento do carregamento da rede, com tendência a atingirem o bloqueio das entradas B e D. Para esta situação, as entradas A e C tendem a registar valores cada vez mais aproximados da capacidade geométrica da própria entrada, ou seja, valores de capacidade apenas condicionados pelas características geométricas, para um fluxo conflituante nulo. O Modelo PT é o que mais se aproxima da capacidade geométrica da entrada A, com um nível de carregamento da rede de 250%, atendendo a que a entrada D regista para esta simulação, valores de capacidade quase nulos.

Atingindo a capacidade geométrica da entrada, para um fluxo conflituante nulo, qualquer que seja o acréscimo no carregamento da rede, a capacidade será apenas ditada pelas características geométricas da rotunda, e por isso, prevê-se a sua estabilização.

Para os restantes cenários, que introduzem os movimentos de viragens à esquerda e/ou à direita, é expectável que o movimento conflituante para as entradas analisadas nunca se anule para os valores de carregamento da rede simulados (abaixo dos 250%). Como tal, poderá ser visível essa estabilização do valor de capacidade, para valores abaixo da capacidade geométrica da entrada. Ainda, é previsível a estabilização da capacidade com valores constantes em todas as entradas, por mais sobrecargas que sejam impostas ao volume de tráfego, atingindo-se uma capacidade limite, que poderá ser tanto maior ou menor que a capacidade global da rotunda.

De facto, a capacidade de uma entrada depende de tal modo do fluxo conflituante, que numa rotunda, o nível de capacidade correspondente ao momento em que esta congestiona pela primeira vez – capacidade global, pode ser inferior àquela que se verifica para níveis de procura global na rotunda muito superiores. O estudo da capacidade de escoamento das entradas, para condições de sobressaturação, ganha por isso, relevância na avaliação do nível de desempenho de uma rotunda e das perspetivas de evolução ao longo do tempo desse desempenho.

4.5.2.2 Cenários com todos os movimentos direcionais

De entre os cenários estudados que integram os três movimentos direcionais de entrada (Cenários 2 e 5), optou-se por apresentar os resultados relativos ao Cenário 5 (Figura 4.21), por estar associado a uma maior percentagem de viragens à esquerda e à direita.

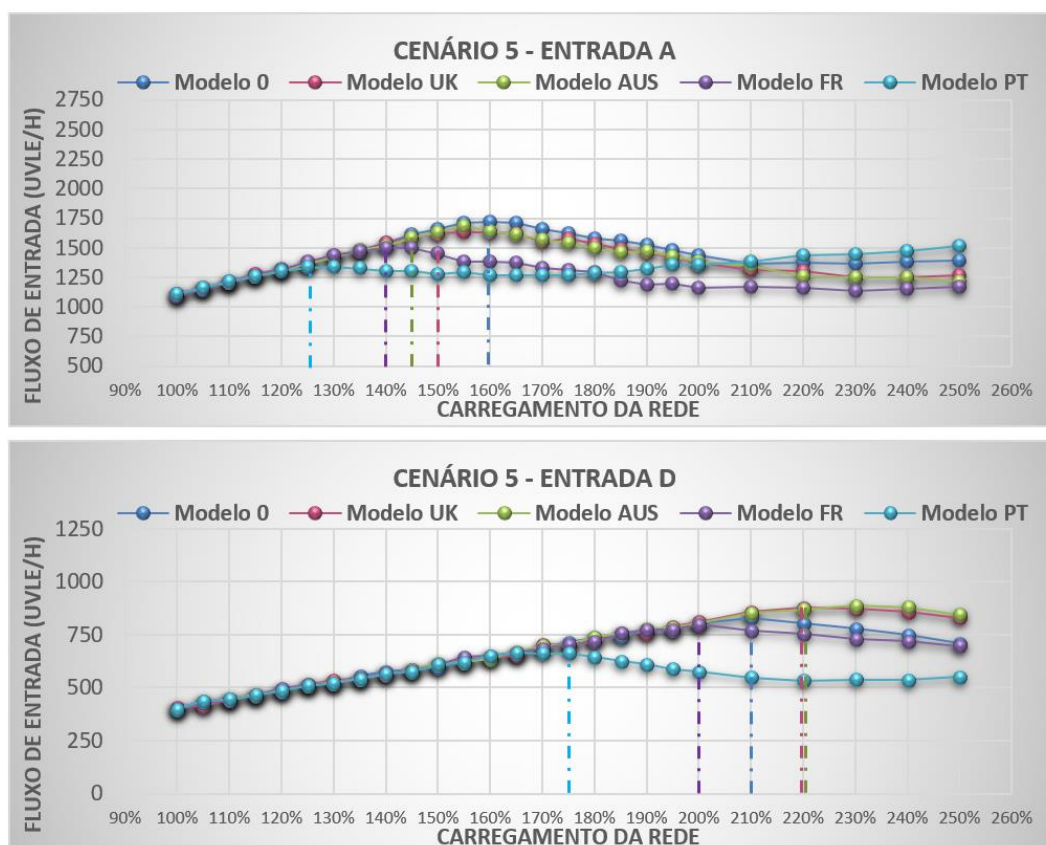


Figura 4.21 – Capacidades registadas nas entradas A e D para o Cenário 5

À semelhança das análises anteriores, os pontos de inversão da tendência das curvas na entrada D (correspondentes, na figura, aos pontos de saturação com representação a traço-ponto) coincidem, com maior ou menor desvio, com os pontos de inversão na entrada A. Por sua vez, a notória estabilização da capacidade na entrada A (para valores entre 1000 e 1500 uvle/h), evidencia a importância do fluxo de entrada em D como principal atuante no fluxo conflituante na entrada A.

Embora se verifiquem, novamente, piores níveis de desempenho nos Modelo FR e PT para situações de congestionamento nas entradas (devido à não utilização das duas vias na saída), a 140% e 125% de carga de rede, respetivamente, o Modelo PT inverte esta tendência para situações de procura de tráfego elevada, apresentando um aumento do fluxo na entrada A a partir dos 165% de carregamento de rede, paralelamente a uma diminuição e estabilização de capacidade na entrada D. Este resultado justifica-se pelo facto de ainda existirem variações de capacidade nas restantes entradas, as quais ainda não atingiram a capacidade limite constante. Por outro lado, nos restantes modelos é visível esta tendência de estabilização da capacidade em ambas as entradas apresentadas, para elevadas cargas de procura de tráfego na rede.

Como já foi referido no ponto 4.5.1, os níveis de capacidade global da sequência ordenada de Cenários 1, 2 e 5, diminuem para os Modelos 0, UK e AUS, e aumentam para os Modelos FR e PT. Significa, deste modo, que os pontos de saturação da entrada crítica (entrada A, para os cenários aqui referidos), ocorrem naturalmente, para níveis de carregamento cada vez menores para os Modelos 0, UK e AUS (com diminuições de entre 20 e 25% de carga da rede), e cada vez maiores para os Modelos FR e PT (com acréscimos de carga de rede de 20% e 10%, respetivamente).

4.5.2.3 Cenários sem movimentos de viragem à direita

No ponto 4.5.1, concluiu-se que a presença de viragens à esquerda tende a agravar mais os níveis de desempenho dos modelos comparativamente a outro tipo de movimento. Como tal, é expectável a semelhança do andamento das curvas relativas ao fluxo de entrada para os cenários 3 e 7 e dos respetivos pontos de saturação. Deste modo, optou-se por apresentar apenas os resultados associados ao cenário com maior percentagem de viragens à esquerda (Cenário 7) (Figura 4.22 e Figura 4.23).

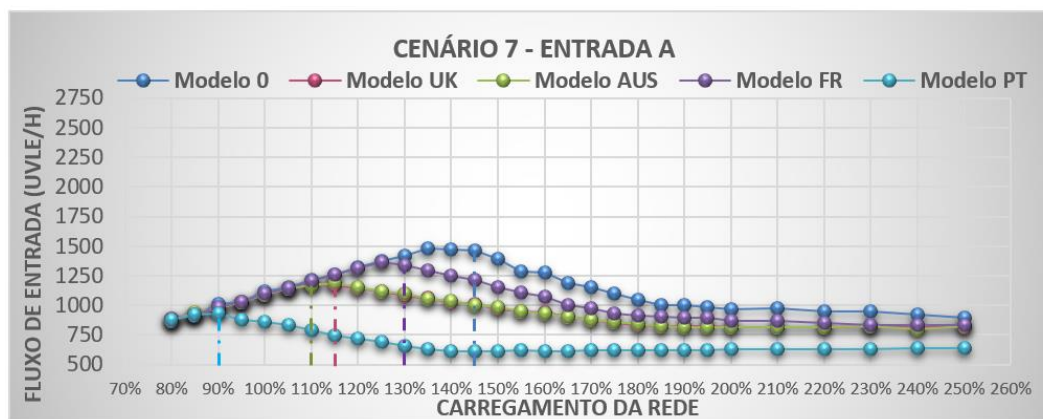


Figura 4.22– Capacidades registadas na entrada A para o Cenário 7

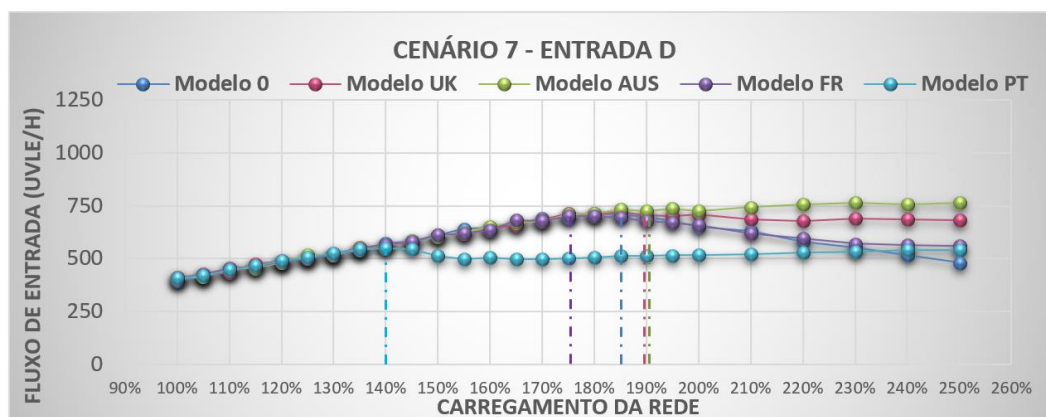


Figura 4.23 – Capacidades registadas na entrada D para o Cenário 7

A estabilização dos valores de capacidade é, nestes cenários, mais notória comparativamente aos cenários precedentes, e tende para valores um pouco inferiores. O facto do Cenário 7 implicar um maior volume de viragens à esquerda traduz-se em maiores níveis de tráfego conflituante no anel da rotunda, e por sua vez na obtenção de pontos de saturação (indicados na figura a traço-ponto) associados a níveis de carregamento mais baixos comparativamente aos cenários anteriores. Tal fenómeno potencia a estabilização dos valores da capacidade, para níveis de carregamento da rede igualmente mais baixos, sendo que todos os modelos tendem a convergir para uma gama de valores relativamente próximos (entre 500 e 1000 uvle/h).

Verifica-se que o Modelo PT é o que atinge o menor nível de desempenho na entrada A, o que está em consonância com os resultados apresentados no ponto 4.5.1. O ponto de saturação deste modelo é atingido para valores de capacidade baixos, muito inferior ao atingido pelos restantes modelos e em qualquer cenário, aproximando-se dos 1000 uvle/h (valor muito aproximado à sua capacidade limite de aproximadamente 550 uvle/h). A estabilização dos valores da capacidade associado a este modelo inicia-se também para níveis de carregamento de tráfego bastante inferiores relativamente aos restantes, e próximos do ponto de saturação da entrada D (a cerca de 140% de carregamento da rede). O facto de não serem utilizadas as 2 vias de aproximação e as 2 vias de saída nas duas entradas não favorece o desempenho do Modelo PT. Também, pelo facto da via exterior ao anel ser reservada aos movimentos de saída, traduz-se num aumento direto do fluxo de tráfego na via interior do anel.

Por outro lado, o Modelo FR, que nas análises anteriores se revelou ser um dos modelos com pior nível de desempenho, verifica-se que no Cenário 7 este modelo atinge níveis de capacidade superiores aos dos Modelos UK e AUS na entrada A, em concordância com os resultados obtidos relativamente à capacidade global no ponto 4.5.1

4.5.2.4 Cenários sem movimentos de viragem à esquerda

Para esta análise foi selecionado o Cenário 6, especificamente o cenário com maior percentagem de movimentos de viragem à direita (Figura 4.24).

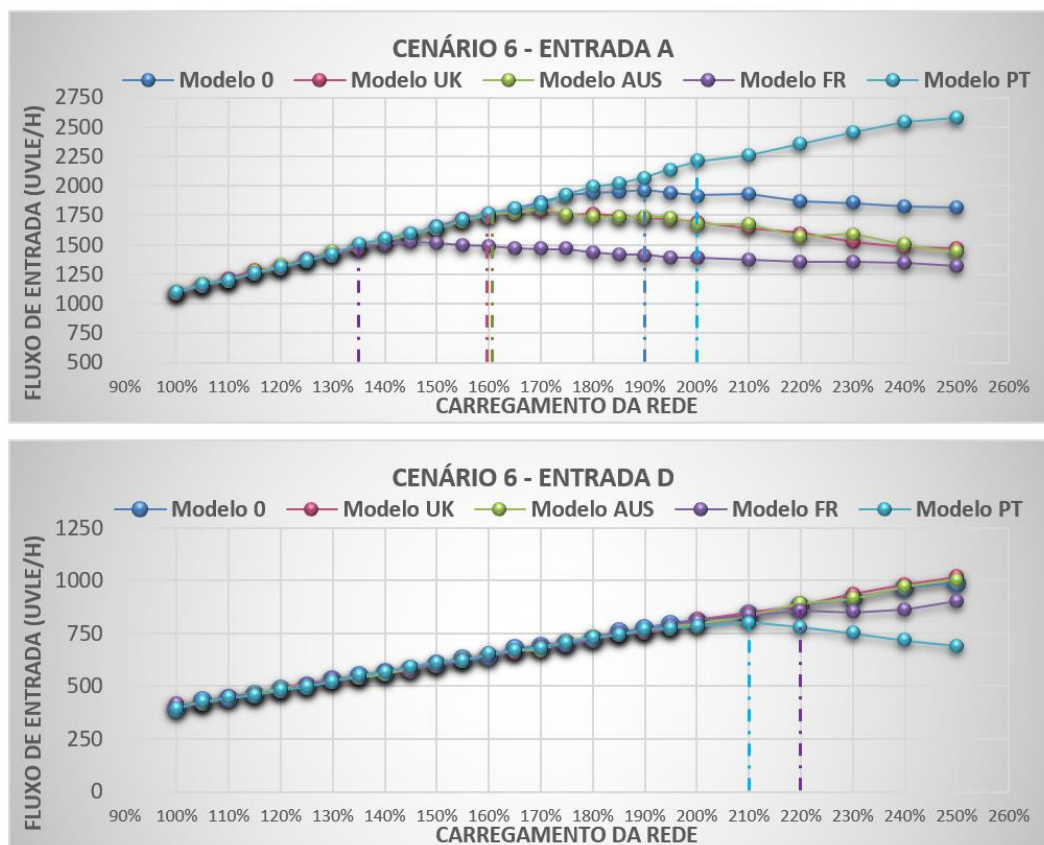


Figura 4.24– Capacidades registadas nas entradas A e D para o Cenário 6

Verifica-se que o Modelo PT, na entrada A, apresenta níveis de desempenho superiores aos resultantes da aplicação dos restantes modelos, através de uma trajetória linear e praticamente proporcional na relação fluxo de entrada/carregamento da rede. O ponto de quebra cifra-se perto dos 200% de carregamento da rede, muito próximo do ponto de saturação da entrada D a 210%. Relembre-se que o movimento de ida em frente na entrada D é a única componente a contribuir para o fluxo conflituante na entrada A, pelo que depois de D atingir a saturação e enquanto a entrada C não saturar, o tráfego conflituante em A tende a diminuir e por sua vez a capacidade na entrada A, tende a aumentar.

Sublinhe-se que em termos gerais, os cenários sem movimentos de viragem à esquerda e particularmente o cenário 6 onde se assume uma percentagem igual para os movimentos de ida em frente e de viragem à esquerda são os que se revelam mais propícios ao modelo PT, uma vez que garantem um nível de utilização equilibrado das duas vias de entrada.

Os restantes modelos aplicados à entrada D não evidenciam o ponto de saturação para carregamentos da rede abaixo dos 250%. Simultaneamente, os valores de capacidade para condições sobressaturadas na entrada A, são superiores aos analisados nos cenários precedentes, variando entre 1250 uvl/h e 2000 uvl/h, levando a induzir o bom desempenho na generalidade dos modelos para este cenário.

4.6 Considerações finais

As análises consideradas no presente capítulo para os indicadores de desempenho selecionados revelaram resultados bastante consistentes ao nível do desempenho dos modelos. De facto, as análises do ponto 4.5.1 identificam os Modelos 0, UK e AUS como os que asseguram maiores níveis de capacidade de escoamento potenciais da rotunda, para a generalidade dos cenários estudados. Esses resultados são confirmados no ponto 4.5.2 quando analisada a capacidade das entradas críticas.

Por outro lado, o modelo de referência português (modelo PT) apresenta níveis de capacidade muito abaixo dos restantes modelos, seguido do modelo FR o qual apresenta igualmente níveis de desempenho bastante baixos. As regras comportamentais definidas no modelo são o fator responsável por estas diferenças de desempenho. De facto, a proibição de uso das vias de aproximação ou no anel associadas a alguns dos modelos resultam na perda de flexibilidade no uso das vias e por consequência em perdas de capacidade para o modelo. Refira-se, contudo que alguns dos cenários estudados tendem a ser raros e, portanto, nem sempre representativos das situações típicas de repartição do tráfego em zona urbana.

Das análises dos vários cenários conclui-se ainda que, para níveis de carregamentos inferiores à saturação, a capacidade é igual ao fluxo de chegada, pelo que a relação associada a todos os modelos é, como seria previsível, a relação linear.

A análise do andamento das curvas que relacionam a capacidade da entrada crítica com o nível de carregamento na rede permite, identificar padrões de variação típicos, independentemente do modelo adotado. A Figura 4.25 representa os três padrões de curvas-tipo mais comuns.

A curva I representa condições de circulação não saturadas. Nestas circunstâncias, a capacidade da entrada é igual ao fluxo de chegada, o qual aumenta em função do nível de carregamento da rede (assim como o correspondente tráfego conflituante (Q_c)). Com o consequente aumento do carregamento da rede e por inerência do tráfego conflituante, a entrada crítica satura, registando-se uma quebra no andamento da reta identificada em (I). Mantendo-se a imposição do aumento da carga na rede é expectável que o tráfego conflituante na entrada crítica continue a aumentar o que se traduz tendencialmente numa redução da capacidade da entrada, tendência que se deverá manter até que outra entrada atinja a saturação (Curva II). Nessa altura, o tráfego

conflituante (dependendo do cenário de repartição) poderá reduzir e por consequência a capacidade da entrada voltar a sofrer um aumento.

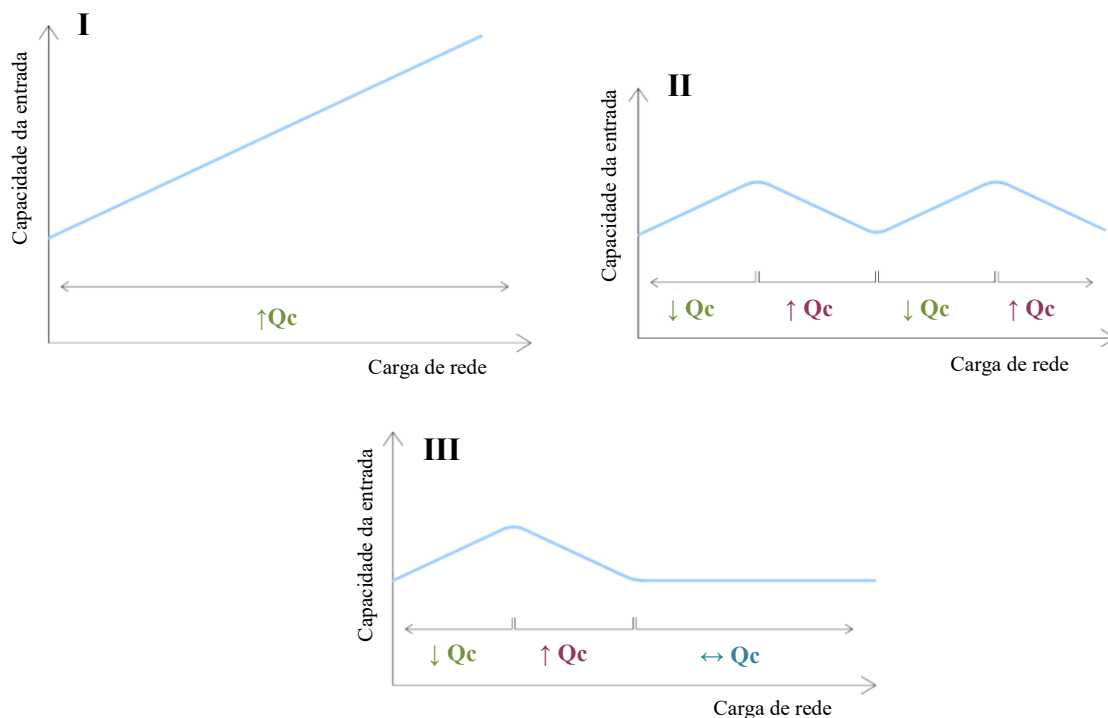


Figura 4.25 – Curvas-tipo para a capacidade da entrada de uma rotunda vs. carregamento da da rede

Conclui-se assim que, sempre que uma entrada atinge a saturação, e face ao contínuo aumento do carregamento da rede, são geradas perturbações no normal crescimento do tráfego conflituante, que se refletem em inflexões sistemáticas na curva de variação da capacidade da entrada, sendo que, previsivelmente, essas variações tendam a ser cada vez menos acentuadas, tendendo para a estabilização dos valores, após todas as entradas atingirem a correspondente saturação (Curva III).

A consciência destas curvas no estudo da capacidade de escoamento das entradas de uma rotunda, para condições de sobressaturação, é relevante na avaliação do seu nível de desempenho, assim como, das perspetivas de evolução ao longo do tempo desse desempenho.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho centrou-se na avaliação do efeito que os diferentes procedimentos comportamentais, patentes nos diversos códigos da estrada assumem em termos do desempenho da rotunda. Mais especificamente, procurou-se perceber qual o efeito que as novas regras estabelecidas na legislação portuguesa vigente assumem ao nível da capacidade da rotunda, tomando como referência, para efeitos comparativos, outros modelos estrangeiros. Por se tratar de uma alteração bastante recente (com entrada em vigor a 1 de janeiro de 2014) são inexistentes estudos nacionais sobre este assunto, desconhecendo-se ainda a existência de estudos científicos a nível internacional, que permitam identificar qual o esquema de circulação mais adequado a cada realidade e que resulte no melhor nível de desempenho global.

O modelo atual português, foi assim, comparado com o modelo antigo (entretanto revogado) e com outros modelos de referência internacional, tendo-se selecionado o inglês, o australiano e o francês. Foram adotados os seguintes indicadores de desempenho: (i) Capacidade global da rotunda, correspondente à soma da capacidade associada a cada uma das entradas da rotunda (ii); Capacidade da entrada crítica, correspondente à capacidade da primeira entrada saturada.

Em termos metodológicos recorreu-se ao modelo de microssimulação AIMSUN aplicado a uma rotunda localizada em Coimbra, caracterizada por dispor 4 ramos de entrada, 2 vias de circulação no anel e 2 ramos com 2 vias de entrada. Foi construído um modelo simulado representativo da situação real, o qual foi calibrado e validado para representar as condições atuais de funcionamento da rotunda. Foram definidas estratégias e políticas de tráfego que permitiram introduzir as regras de conduta associadas aos vários modelos estudados.

Foram estudados diversos cenários de procura, os quais procuraram introduzir dois efeitos fundamentais: (i) repartição direcional de tráfego nas entradas; (ii) efeito do nível de carregamento de tráfego na rede.

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

Concluiu-se que os esquemas de circulação assumem um impacto significativo no desempenho da rotunda, particularmente, quando a sua definição impõe o uso inflexível de determinadas vias de circulação, impedindo assim a utilização otimizada das diferentes vias por parte dos condutores. Esta exigência está particularmente patente nos modelos francês e português, os

quais, de forma genérica, atingiram os piores níveis de desempenho. É ainda importante sublinhar que independentemente do modelo simulado, o nível de desempenho depende significativamente da repartição direcional do tráfego, registando-se, tal como seria expectável, uma perda de capacidade à medida que aumenta o peso associado às viragens à esquerda, especialmente bastante significativa no modelo português, chegando a diminuir mais de 50% da capacidade global entre os cenários analisados.

Nas diferentes análises, o Modelo 0, representativo da inexistência de regras específicas aplicadas a rotundas (genericamente o contexto legal anterior a 2014 em Portugal), foi o que atingiu o maior nível de capacidade para a generalidade dos cenários estudados, com uma média de 40% acima do modelo português. Contudo, note-se que o mesmo é representativo da situação real, o que em Portugal não corresponde à aplicação sistemática de um único conjunto de regras de conduta, antes corresponde ao efeito conjugado de diferentes comportamentos. Como tal, a aleatoriedade de escolha de rotas conduziu a elevados níveis de capacidade, mas existe grande probabilidade que tal não se mantenha ao nível do desempenho em termos de segurança.

Imediatamente abaixo dos níveis de desempenho de capacidade obtidos pelo Modelo 0, situam-se os modelos comportamentais inglês e australiano, que especificam a sua legislação de forma clara e pormenorizada. De facto, em média para os cenários estudados, os modelos referidos detêm um nível de capacidade global de 23% acima do modelo português, chegando a atingir um acréscimo de cerca de 50% no cenário onde se apenas existem movimentos de ida em frente em todas as entradas. Os bons resultados obtidos a este nível, transmitem um bom exemplo de um conjunto de regras e procedimentos a ter em conta em rotundas, considerando-se soluções predispostas à valorização da capacidade, embora previsivelmente também com bom desempenho ao nível da segurança.

Por oposição, o modelo de referência português associa-se aos piores níveis de desempenho em relação aos restantes, à exceção de um cenário, que por sua vez, representa uma repartição direcional pouco comum em domínio urbano, associada a uma repartição equilibrada entre o fluxo de viragem à direita e de ida em frente (e a conseqüente inexistência de viragens à esquerda), o que permite repartir idealmente de forma igualitária o tráfego pelas duas vias de aproximação e do anel. Desta forma, considera-se que o atual modelo português, por se traduzir numa redução substancial do número de pontos de conflito favorece, potencialmente, apenas os níveis de desempenho de segurança em pretérito da capacidade.

Em síntese, os resultados obtidos no âmbito da presente dissertação demonstram que o esquema de circulação em rotundas, introduzido através da última revisão do Código da Estrada se traduz numa perda substancial da capacidade quer da entrada quer da rotunda em termos globais, sendo

mesmo o esquema que atingiu os piores níveis de desempenho, quando comparados com outros modelos comportamentais vigentes noutros países considerados de referência. Face à consistência destes resultados, é ainda dedutível que este novo esquema de circulação se reverta num aumento substancial quer dos níveis de consumo de combustível, quer ainda das emissões poluentes. A agravar a sua falta de clareza e simplicidade levam a que, dois anos após a sua entrada em vigor, a maioria dos condutores continuem a ignorar as novas regras. Apesar disso, é indiscutível que a redução do número de pontos de conflito faz deduzir que o novo esquema de circulação poderá traduzir-se num aumento substancial dos níveis de segurança, o que enfatiza a necessidade de se proceder a uma avaliação multicritério que envolva, de forma integrada, as diferentes dimensões do problema.

6 REFERÊNCIAS

- ANSR (2005). "Circulação em rotundas". Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária, Portugal
- ANSR (2013). "Código da Estrada - Lei n.º 72/2013 de 3 de setembro". Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária, Portugal
- ATC (2012). "Australian Road Rules – February 2012 version" as approved by the Australian Transport Council, published by the National Road Transport Commission, Australia.
- Bastos Silva, A., Santos, S., Vasconcelos, L., Seco, Á., Silva, J. (2014). "Driver Behaviour Characterization in Roundabout Crossings". Transportation Research Procedia, Vol. 3, pp.80-89. 17th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, EWGT2014, Seville, Spain, 2 a 4 July 2014
- Bastos Silva, A., Seco, Á. (2002). "Como se deve comportar o condutor no atravessamento de uma rotunda - Definição de procedimentos e regras". 2º Congresso Rodoviário Português – LNEC, Lisboa, Portugal, 18 a 20 de novembro de 2002
- Bastos Silva, A., Seco, Á. (2004). "Análise Comparativa dos Manuais de Apoio à Conceção Geométrica de Rotundas". 3º Congresso Rodoviário Português – LNEC, Lisboa, Portugal, 24 a 26 de novembro de 2004.
- Bastos Silva, A., Seco, Á. (2008). "Rotundas". Manual de Planeamento das Acessibilidades e da Gestão Viária, Vol.6, 92 pp. Edição CCDR-N.
- Brilon, W. (2014). "Roundabouts: a State of the Art in Germany". Paper presented at the 4th International Conference on Roundabouts, Transportation Research Board (TRB), Seattle, April 2014
- DOE (2013). "Road Safety Education: Roundabouts" [Leaflet]. Department of the Environment. Northern Ireland
- DOE (2015). "The Official Highway Code For Northern Ireland". Department of the Environment. Northern Ireland.
- FHWA (2000). "Roundabouts: An Informational Guide". U.S. Department of Transport, Federal Highway Administration. Publication N° FHWA-RD-00-067, Virginia, USA, June 2000
- Figueiredo, M. (2013). "Avaliação do Efeito da Variação de Parâmetros de Calibração na Qualidade dos Resultados de Estudos de Simulação de Tráfego". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, 1 vol..
- ITC (1968). "Vienna Convention, 1968". United Nation Conference on Road Traffic, Convention on Road Signs and Signals. Inland Transport Committee. Vienne.

- Jacquemart, G. (1998). “Modern Roundabout Practice in the United States”, Synthesis of Highway Practice 264, Transportation Research Board. National Academy Press, Washington, D.C. 1998
- legifrance.gouv.fr@ (2015). “Code de la Route”. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?cidTexte=LEGITEXT000006074228&dateTexte=20151216>. [Acedido em 16 de Dezembro de 2015]
- Macedo, J., 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
- MAI (1994). “Código da estrada - Decreto-Lei 114/94, de 3 de maio”. Ministério da Administração Interna, Portugal
- MAI (2005). “Código da Estrada – Decreto-Lei n.º 44/2005 de 23 de fevereiro”. Ministério da Administração Interna, Portugal
- NCUTLO (2000). “Uniform Vehicle Code (UVC) and Model Traffic Ordinance,” 2000 Edition. National Committee on Uniform Traffic Laws and Ordinances.
- NTC (2008). “National Transport Commission (Road Transport Legislation — Australian Road Rules) Regulations 2006”. National Transport Commission Act 2003.
- NZTA (2005). “Know your Way around Roundabouts” [Leaflet]. NZ Transport Agency.
- NZTA@ (2015). “The Official New Zealand Road Code”. <https://www.nzta.govt.nz/resources/roadcode/about-driving/giving-way-at-roundabouts> [Acedido em 15 de dezembro de 2015]
- RMS (2012). “Road Users’ Handbook”. NSW Government. Roads and Maritime Services. Australia.
- Rodegerdts, L. (2010). “Roundabouts: An Informational Guide - Second Edition”. TRB's National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 672.
- Rodrigues, C., Almeida Roque, C., Macedo, J. (2008). “Sinalização Rodoviária”. Manual de Planeamento das Acessibilidades e da Gestão Viária, Vol.12, 92 pp. Edição CCDR-N.
- TSS (2015). “Aimsun 8 Dynamic Simulators Users’ Manual”. Transport Simulation Systems
- Turner, S., Rosenberg, A., Smith, A. (2009). “Roundabout Crash Prediction Models”. June 2009
- Vasconcelos, A. (2004). “Modelos de atribuição/simulação de tráfego: o impacto na qualidade dos resultados de erros no processo de modelação”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, 1 vol..
- Vilarinho, C. (2008). “Calibração de Modelos Microscópicos de Simulação de Tráfego em Redes Urbanas”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, Porto, 1 vol.

Vilarinho, C., Soares, G., Macedo, J., Tavares, J. P., Rossetti, R. J. (2014). “Capability-Enhanced AIMSUN with Real-Time Signal Timing Control”. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 111, pp. 262-271.

Sites consultados:

DfT@ (2015). “The Highway Code”. <https://www.gov.uk/guidance/the-highway-code>
[Acedido em 15 de dezembro de 2015]

legifrance.gouv.fr@ (2015). “Code de la Route”.
<https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?cidTexte=LEGITEXT000006074228&dateTexte=20151216>. [Acedido em 16 de Dezembro de 2015]

NZTA@ (2015). “The Official New Zealand Road Code”.
<https://www.nzta.govt.nz/resources/roadcode/about-driving/giving-way-at-roundabouts>
[Acedido em 15 de dezembro de 2015]

ANEXO I

Quadro I.7 – Matriz O/D no período 8:00h – 8:15h (uvle)

		Destino				Total
		(8:00 - 8:15)	A	B	C	
Origem	A	0	20	252	119	391
	B	15	0	1	2	18
	C	170	15	0	8	193
	D	78	9	4	0	91
Total		263	43	258	129	693

Quadro I.8 – Matriz O/D no período 8:15h – 8:30h (uvle)

		Destino				Total
		(8:15 - 8:30)	A	B	C	
Origem	A	0	36	240	121	397
	B	44	0	4	16	64
	C	203	18	0	16	237
	D	95	35	18	0	148
Total		342	89	262	153	846

Quadro I.9 – Matriz O/D no período 8:45h – 9:00h (uvle)

		Destino				Total
		(8:45 - 9:00)	A	B	C	
Origem	A	0	27	266	131	424
	B	14	0	1	7	22
	C	165	15	0	29	209
	D	113	26	13	0	152
Total		292	67	280	167	807

ANEXO II

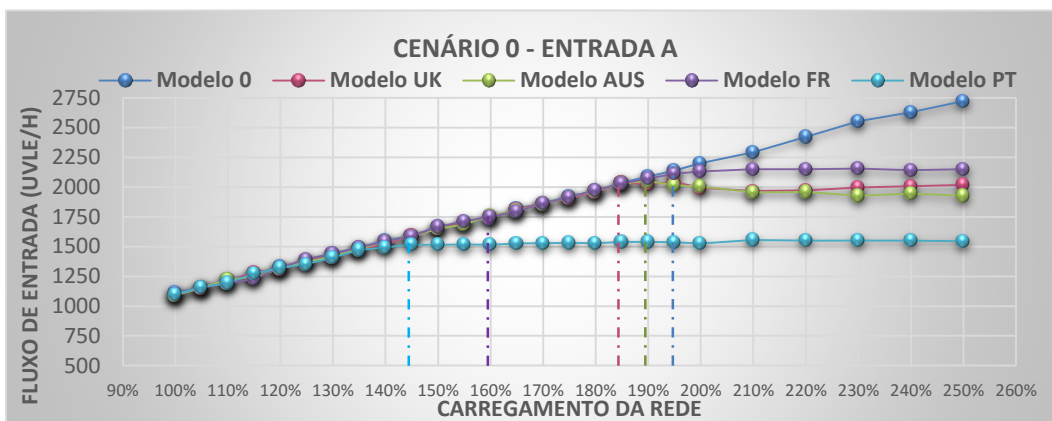


Figura II.26 – Capacidades registadas na entrada A para o Cenário B

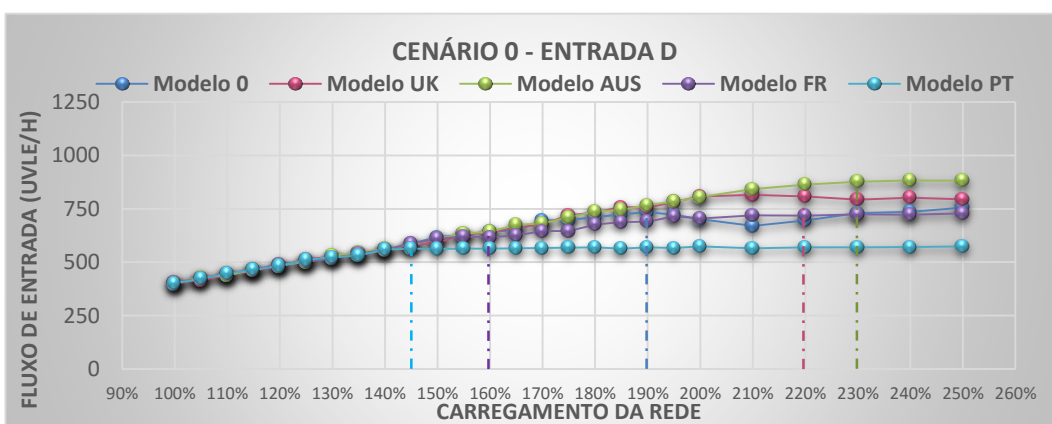


Figura II.27 – Capacidades registadas na entrada D para o Cenário B

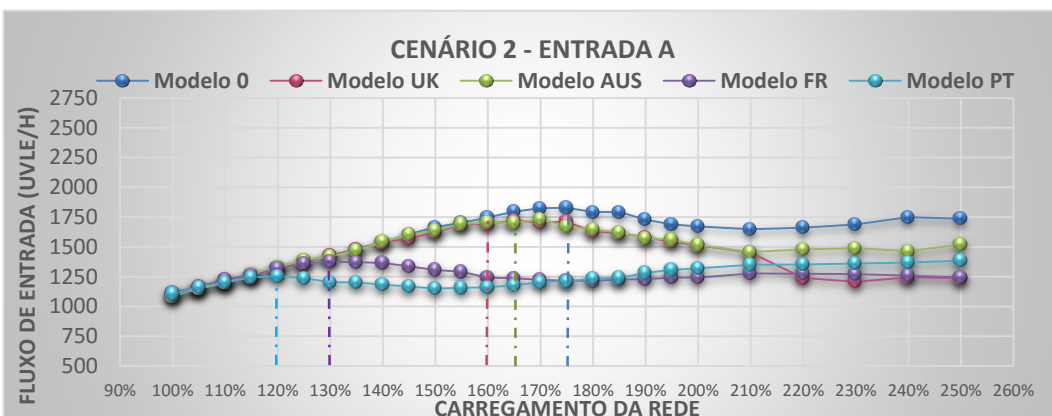


Figura II.28 – Capacidades registadas na entrada A para o Cenário 2

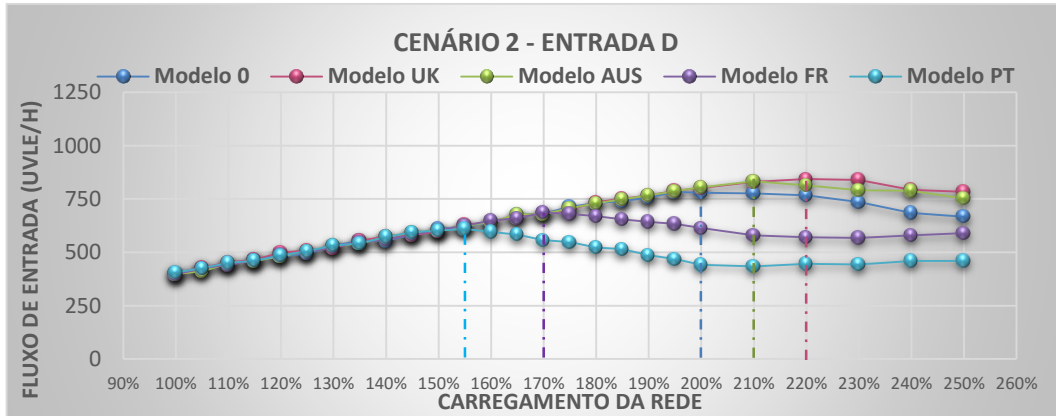


Figura II.29– Capacidades registadas na entrada D para o Cenário 2

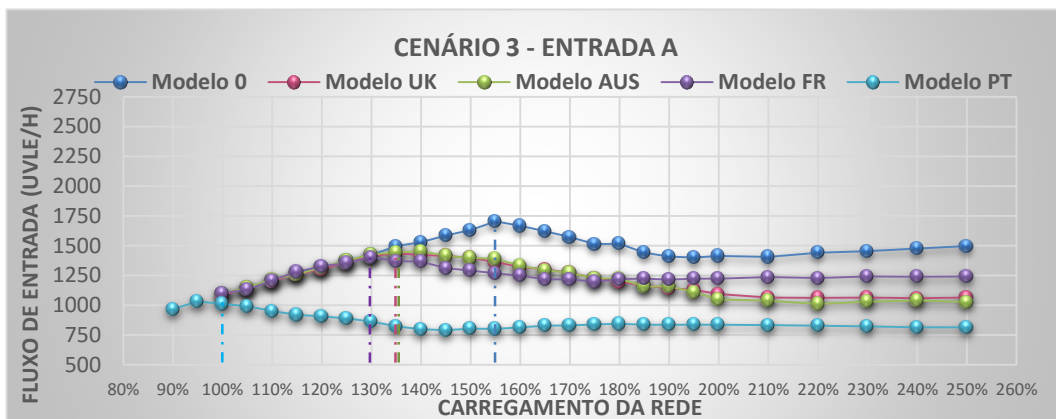


Figura II.30– Capacidades registadas na entrada A para o Cenário 3

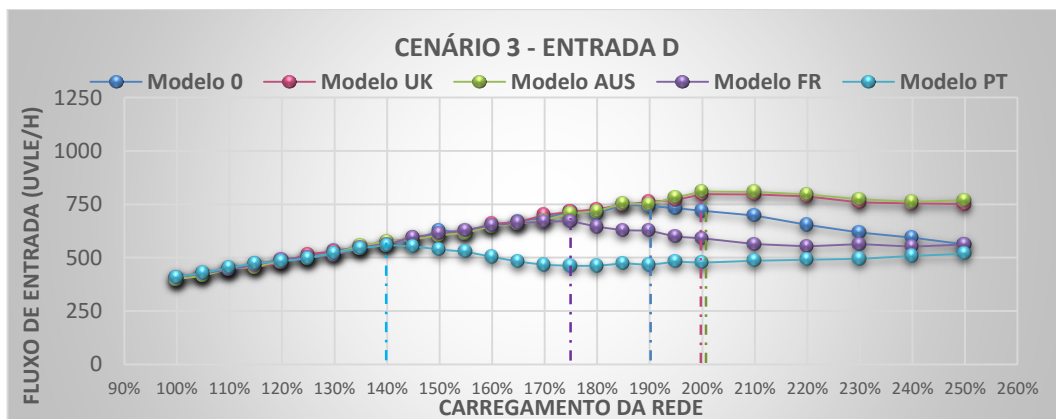


Figura II.31 – Capacidades registadas na entrada D para o Cenário 3

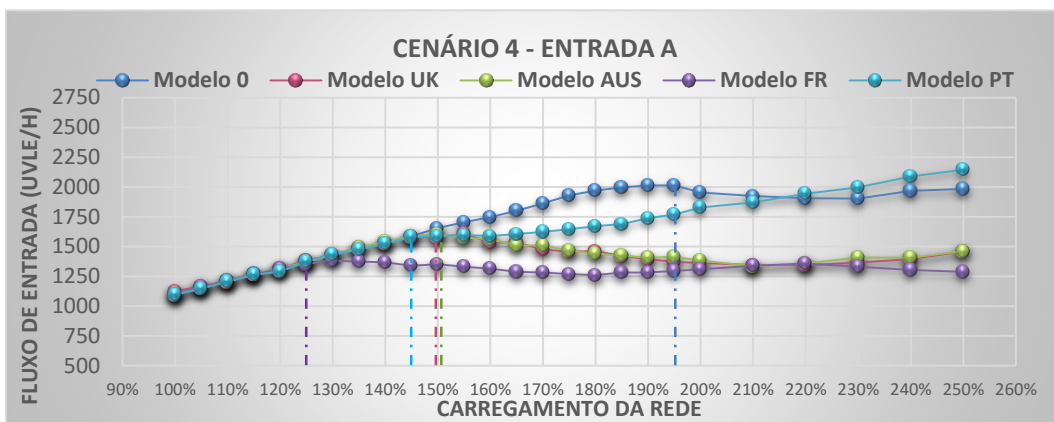


Figura II.32– Capacidades registradas na entrada A para o Cenário 4

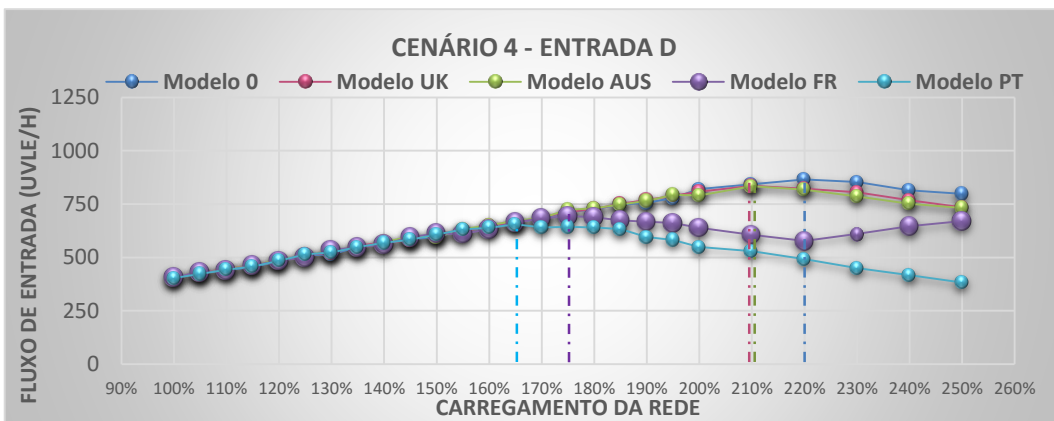


Figura II.33– Capacidades registradas na entrada D para o Cenário 4