INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil

ISEL



Turbo-rotundas – Definição de Regras de Conceção Geométrica

MARCO ALEXANDRE RODRIGUES GASPAR

Bacharel em Engenharia Civil

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de Especialização de Vias de Comunicação e Transportes

Orientadores:

Mestre João Manuel Sousa Marques

Doutora Ana Maria César Bastos Silva

Júri:

Presidente: Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos

Vogais:

Licenciada Luísa Ferreira Cardoso Teles Fortes

Mestre João Manuel Sousa Marques

Doutora Ana Maria César Bastos Silva

Janeiro de 2013

RESUMO

A introdução de rotundas de nível na rede viária, quando devidamente concebidas, resulta normalmente em índices de segurança e de capacidade elevados, particularmente quando comparados com outras soluções tradicionais, tais como intersecções prioritárias ou semaforizadas. No entanto a experiência retirada da sua utilização em diversos países, designadamente em Portugal, vem realçar a existência de alguns problemas de funcionamento, particularmente nas rotundas com múltiplas vias de circulação.

O conceito da turbo-rotunda surgiu recentemente nos Países Baixos, com o intuito de mitigar este tipo de problemas, através da introdução de elementos físicos de canalização ao longo das entradas, anel e saída de modo a encaminhar de forma contínua e por trajetórias em espiral o condutor desde a entrada até ao destino pretendido, sem que para isso tenha de recorrer a manobras de entrecruzamento. A experiência holandesa tem comprovado a eficiência da solução, o que tem despoletado o interesse quer da comunidade técnica quer académica. Ao longo dos últimos anos tem-se assistido ao desenvolvimento de aplicações piloto em alguns países, contudo o número de manuais técnicos e de trabalhos científicos que possam apoiar a conceção deste tipo de soluções permanece em número extremamente reduzido. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi, primeiramente, contribuir para o aprofundamento dos conhecimentos sobre o funcionamento das turbo-rotundas, procurando identificar as potencialidades e as debilidades associadas ao conceito comparativamente às rotundas tradicionais. Complementarmente e tendo por base as referências técnicas estrangeiras, é desenvolvida uma proposta de recomendações e regras gerais de apoio à conceção geométrica deste tipo de soluções, adaptadas ao contexto nacional. Finalmente a aplicabilidade das regras apresentadas é testada mediante o desenvolvimento de um estudo de caso aplicado a um exemplo real, assente na transformação de uma rotunda tradicional numa turbo-rotunda.

O desenvolvimento deste trabalho permitiu concluir que as turbo-rotundas constituem uma alternativa competitiva em relação às rotundas tradicionais com duas vias de entrada e de circulação, designadamente no âmbito da segurança rodoviária, verificando-se que, sem prejuízo da necessidade de algumas adaptações à lei vigente, assim como de uma forte aposta na sensibilização e familiarização dos condutores, estas condicionantes não devem constituir um obstáculo incontornável à introdução deste tipo de solução inovadora no nosso país.

PALAVRAS - CHAVE:

Turbo-rotunda
Dimensionamento de Rotundas
Segurança Rodoviária

ABSTRACT

The use of properly designed roundabouts at road network can increase both safety and capacity performance, when compared with other forms such as at-grade and signalized intersections. However, the withdrawal from their use in several countries, particularly in Portugal, has also highlighted the existence of some operational problems, especially at multiple lanes roundabouts.

The concept of turbo-roundabout has recently emerged in the Netherlands in order to solve such problems, using mountable raised channelization along the entry lanes, circulatory roadway and exit lanes, which guide the approaching vehicles trough a spiral shape path through the roundabout, preventing sideswipe collisions. The Dutch experience has proven the efficiency of the design, which triggered the interest of both technical and academic community. Despite the development of some pilot applications over the last few years, the variety of technical manuals and scientific papers which may assist the development of such solutions remains extremely low.

Therefore, the foremost objective of this study is to contribute to the improvement of the knowledge on the turbo-roundabouts design, trying to identify the benefits and drawbacks of the concept in comparison with the traditional concentric roundabouts. In addition and based on foreign technical literature, general design guidelines are developed and adapted to the Portuguese context. Finally those guidelines are tested, when applied to a case study, which consists in transforming a traditional concentric roundabout into a turbo-roundabout.

This thesis shows that turbo-roundabouts represent an effective alternative compared to a two-lane concentric roundabout, particularly in the improvement of overall safety performance. Notwithstanding the need for some adjustments in the existing regulations as well as a strong focus on drivers awareness, those constraints must not represent an insurmountable obstacle on the development of this innovative solution in our country.

KEYWORDS:

Turbo-roundabout
Roundabout design
Road Safety

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Eng.º João Sousa Marques, por ter acreditado na minha ideia desde o primeiro momento, e por todo o seu apoio que em muito contribuiu para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha orientadora Eng.ª Ana Bastos Silva, que em todas as circunstâncias mostrou dedicação e disponibilidade totais, partilhando comigo o seu vasto conhecimento, sem o qual não teria sido possível realizar esta dissertação.

À Matilde pela cumplicidade, apoio e incentivo permanentes, sem os quais este objetivo não teria sido alcançado.

Aos meus pais por todo o apoio e confiança que depositam em mim desde sempre.

Por fim, agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho fosse uma realidade.

ÍNDICE

1. Introdução 1
1.1 Enquadramento do Tema 1
1.2 Objetivos do Trabalho 2
1.3 Metodologia Adotada 3
1.4 Estrutura do Trabalho 3
2. As Potencialidades e Debilidades das Rotundas Tradicionais 5
2.1 Conceito e Domínio de Aplicação 5
2.2 Principais Vantagens 8
2.3 Principais Problemas de Funcionamento 13
2.4 Considerações Finais 15
3. As Turbo-rotundas como Forma de Intersecção 17
3.1 Evolução Histórica do Conceito 17
3.2 Definição e Principais Características de Funcionamento 18
3.3 Análise Comparativa Face às Rotundas Tradicionais 20
3.3.1 Características de Capacidade 20
3.3.2 Características de Segurança 22
3.4 Condições Privilegiadas de Aplicação 27
3.5 Considerações Finais 28
4. Definição de Regras Gerais de Conceção 29
4.1 Requisitos Fundamentais e Complementares 29
4.2 Tipologias Base e Domínio Privilegiado de Aplicação 29
4.2.1 Standard (*Standard / Turborotonde*) 31
4.2.2 Oval (*Egg / Eirotonde*) 31
4.2.3 Joelho (*Knee / Knierotonde*) 32
4.2.4 Espiral (*Spiral / Spiraalrotonde*) 33
4.2.5 Rotor (*Rotor / Rotorrotonde*) 33
4.2.6 Outras Soluções 34
4.3 Conceção Geométrica 36
4.3.1 Veículo de Projeto 37
4.3.2 Turbo-bloco 37
4.3.3 Posicionamento do Eixo de Translação 42
4.3.4 Raios de Entrada e Saída 43
4.3.5 Dimensionamento dos Canais de Circulação 44
4.3.6 Disposição dos Ramos Afluentes 55
4.3.7 Área de Ocupação 56
4.4 Elementos Construtivos Específicos 58

4.4.1 Ilha Central ... 58
4.4.2 Separador ... 62
4.4.3 Orlas Exteriores ... 66
4.5 Esquemas de Sinalização ... 67
4.5.1 Sinalização Vertical de Orientação ... 68
4.5.2 Marcação Rodoviária ... 70
4.6 Integração de Grupos Específicos de Utilizadores ... 71
4.6.1 Peões e Velocípedes ... 72
4.6.2 Motociclos ... 73
5. Estudo de Caso – Rotunda na Praça Baden-Powell ... 75
5.1 Enquadramento Geral ... 75
5.2 Caracterização da Situação Existente ... 77
5.2.1 Solução Geométrica ... 77
5.2.2 Caracterização dos Níveis de Procura de Tráfego ... 79
5.2.3 Avaliação do Nível de Serviço da Solução Original ... 82
5.3 Conversão da Rotunda Atual numa Turbo-Rotunda ... 86
5.3.1 Seleção do Tipo de Solução ... 86
5.3.2 Desenvolvimento da Solução Geométrica ... 87
5.3.3 Avaliação do Nível de Serviço da Solução Proposta ... 91
5.4 Considerações Finais ... 93
6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros ... 95
6.1 Conclusões ... 95
6.2 Desenvolvimentos Futuros ... 98
7. Referências Bibliográficas ... 101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Movimentos / conflitos em intersecções de nível 8
Figura 2.2 - Pontos de conflito em intersecções prioritárias / rotundas (adaptado de FHWA, 2000).. 9
Figura 2.3 - Tempo de espera médio em intersecções semaforizadas e rotundas tradicionais (FHWA, 2000) 11
Figura 2.4 - Tipificação de acidentes em rotundas tradicionais (adaptado de Guichet, 1992)..... 13
Figura 2.5 - Entrecruzamentos no anel em rotunda tradicional com duas vias de circulação (Bastos Silva e Seco, 2002) 14
Figura 3.1 - Caracterização dos movimentos principais em turbo-rotunda: (a) Viragem à esquerda / (b) Viragem à direita / (c) Ida em frente 18
Figura 3.2 - Principais características de funcionamento (MVW, 2009) 19
Figura 3.3 - Capacidade de entrada em rotundas tradicionais (adaptado de FHWA, 2000)..... 20
Figura 3.4 - Zonas de conflito em rotunda tradicional com duas vias de circulação e duas vias de entrada/saída (adaptado de Tollazzi, 2010) 23
Figura 3.5 - Conflitos em a) rotunda tradicional com duas vias no anel de circulação e b) turbo-rotunda Standard (adaptado de Fortuijn, 2011)..... 24
Figura 3.6 - Relação entre raio da ilha central e velocidade de atravessamento (adaptado de Fortuijn, 2011) 25
Figura 3.7 - Fluxos dominantes que condicionam o *layout* da turbo-rotunda (Fortuijn, 2007) 27
Figura 4.1 - Tipologia geométrica Standard..... 31
Figura 4.2 - Tipologia geométrica Oval 32
Figura 4.3 - Tipologia geométrica Joelho..... 32
Figura 4.4 - Tipologia geométrica Espiral 33
Figura 4.5 - Tipologia geométrica Rotor..... 34
Figura 4.6 - Turbo-rotunda (a) Parcial / (b) Dupla / (c) Réplica / (d) Elevada Capacidade (*Google Earth*, 2012) 35
Figura 4.7 - Evolução temporal do uso da turbo-rotunda, segregada por tipologia geométrica nos Países Baixos 36
Figura 4.8 - Faixa de ocupação na manobra crítica 37
Figura 4.9 - Espiral aritmética (adaptado de Giuffrè et al., 2009)..... 38
Figura 4.10 - Construção geométrica da espiral dupla (adaptado de Giuffrè et al., 2009)..... 38
Figura 4.11 - Turbo-bloco das tipologias Standard, Oval e Espiral (adaptado de MVW, 2009)..... 40
Figura 4.12 - Turbo-bloco da tipologia Joelho (adaptado do MVW, 2009) 41
Figura 4.13 - Posicionamento do eixo de translação - Primeira iteração (adaptado de Fortuijn, 2007) 42
Figura 4.14 - Posicionamento do eixo de translação - Iteração final (adaptado de Fortuijn, 2007) .. 43
Figura 4.15 - Raios de entrada e saída (adaptado de CROW, 2008) 44

Figura 4.16 - Perfil transversal do anel de circulação (adaptado de MVW, 2009) 45
Figura 4.17 - Dimensões do anel de circulação (adaptado de MVW, 2009) 45
Figura 4.18 - Larguras características dos elementos infraestruturais do anel de circulação 46
Figura 4.19 - Intervalos de translação - Tipologias Standard, Oval e Joelho 47
Figura 4.20 - Dimensionamento das guias - Tipologias Standard, Oval e Joelho 48
Figura 4.21 - Turbo-bloco - Tipologias Standard e Oval 49
Figura 4.22 - Turbo-bloco - Tipologia Joelho 50
Figura 4.23 - Intervalos de translação - Tipologia Espiral 53
Figura 4.24 - Turbo-bloco - Tipologia Espiral 54
Figura 4.25 - Áreas de ocupação do turbo-bloco 56
Figura 4.26 - Elementos constituintes da ilha central 58
Figura 4.27 - Revestimentos da orla galgável 60
Figura 4.28 - Lancil de separação 60
Figura 4.29 - Orla galgável - Corte transversal 61
Figura 4.30 - Início da via interior - Solução clássica (adaptado de MVW, 2009) 62
Figura 4.31 - Início da via interior - Solução atual (adaptado de MVW, 2009) 62
Figura 4.32 - Separador no anel de circulação 63
Figura 4.33 - Transposição do separador 64
Figura 4.34 - Marcadores retrorrefletores 64
Figura 4.35 - Corte transversal do separador 65
Figura 4.36 - Drenagem superficial do anel 65
Figura 4.37 – Rutura de separador com elementos colados 66
Figura 4.38 - Início do separador no anel de circulação 66
Figura 4.39 - Orlas exteriores 67
Figura 4.40 - Transposição da orla exterior 67
Figura 4.41 - Painel de pré-aviso gráfico 68
Figura 4.42 - Painel de seleção de vias simples 69
Figura 4.43 - Painéis de afetação de vias dissociados 69
Figura 4.44 - Setas de seleção (adaptado de MVW, 2009) 70
Figura 4.45 - Setas de seleção em aproximação a turbo-rotunda 70
Figura 4.46 - Utilização incorreta de setas de seleção 71
Figura 4.47 - Atravessamento de nível para peões e ciclistas 72
Figura 4.48 - Atravessamentos de nível desfasado 72
Figura 4.49 - Atravessamento desnivelado misto 73
Figura 4.50 - Sinalização específica para motociclos - (a) Aproximação / (b) Ilha central 74
Figura 5.1 - Localização da Praça Baden-Powell (adaptado de *Google Earth*, 2012) 75
Figura 5.2 - (a) Levantamento topográfico e (b) Fotografia aérea (*Google Earth*, 2012) 76
Figura 5.3 - Aspetos dos ramos (a) Norte / (b) Sul / (c) Este / (d) Oeste 78
Figura 5.4 - (a) Contagens de tráfego e (b) Distribuição percentual do tráfego por ramo 80

Figura 5.5 – Fluxos atuais de tráfego horário 81
Figura 5.6 - Análise comparativa da capacidade por entrada na rotunda existente..... 85
Figura 5.7 - Análise comparativa do grau de saturação potencial por entrada na rotunda existente 86
Figura 5.8 - Posicionamento do eixo de translação – Primeira iteração 87
Figura 5.9 - Posicionamento do eixo de translação – Iteração final 88
Figura 5.10 - Raios de entrada e saída..... 88
Figura 5.11 - Planta de pormenor da solução proposta..... 89
Figura 5.12 - Planta geral da solução proposta 90
Figura 5.13 - Análise comparativa da capacidade por entrada 92
Figura 5.14 - Análise comparativa do grau de saturação potencial por entrada 93

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Aplicabilidade das rotundas em função das vias intersectadas em zona urbana (adaptado de InIR, 2012a) 6
Quadro 2.2 – Substituição de intersecções prioritárias por rotundas tradicionais com uma via no anel (adaptado de FHWA, 2000) 10
Quadro 2.3 – Substituição de intersecções prioritárias por rotundas tradicionais com duas vias no anel (adaptado de FHWA, 2000) 10
Quadro 2.4 - Comparação da variação na ocorrência de acidentes em intersecções prioritárias / rotundas tradicionais, por país (adaptado de FHWA, 2000) 10
Quadro 3.1 - Capacidade máxima em rotundas tradicionais e turbo-rotundas com 4 ramos afluentes (CROW, 2008) 21
Quadro 3.2 - Substituição de intersecções prioritárias por rotundas tradicionais com uma via no anel (MVW, 2009) 26
Quadro 3.3 - Substituição de intersecções prioritárias por turbo-rotundas (MVW, 2009) 26
Quadro 4.1 - Características dos turbo-blocos 41
Quadro 4.2 - Dimensionamento das vias - Tipologias Standard, Oval e Joelho (MVW, 2009) 46
Quadro 4.3 - Dimensionamento das guias - Tipologias Standard, Oval e Joelho (MVW, 2009) 48
Quadro 4.4 - Dimensões gerais das tipologias Standard, Oval e Joelho (adaptado de CROW, 2008) 51
Quadro 4.5 - Dimensionamento das vias - Tipologia Espiral (MVW, 2009) 52
Quadro 4.6 - Dimensionamento das guias - Tipologia Espiral (MVW, 2009) 53
Quadro 4.7 - Dimensões gerais da tipologia Espiral (adaptado de CROW, 2008) 54
Quadro 4.8 - Áreas de ocupação 57
Quadro 5.1 - Parâmetros geométricos dos ramos 79
Quadro 5.2 - Fatores de conversão (HCM, 1994) 80
Quadro 5.3 – Potencial erro associado às contagens de tráfego 81
Quadro 5.4 - Modelo do TRL. Capacidade da solução existente 83
Quadro 5.5 - Modelo de Brilon. Parâmetros calibrados (Adaptado de Bastos Silva et al., 2011) 84
Quadro 5.6 - Modelo de Brilon. Fluxo de entrada e tráfego conflituante 84
Quadro 5.7 - Modelo de Brilon. Capacidade da solução existente 85
Quadro 5.8 - Parâmetros geométricos específicos da solução 89
Quadro 5.9 - Fluxo de entrada e tráfego conflituante 91
Quadro 5.10 - Capacidade da solução proposta 91

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANSR – Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária - Portugal

CCDRN – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte - Portugal

CERTU - Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les Constructions Publiques – França

DfT – Department for Transport – Reino Unido

FHWA – Federal Highway Administration – Estados Unidos da América

InIR – Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias - Portugal

MVW - Ministerie van Verkeer en Waterstaat – Países Baixos

QDMR - Queensland Department of Main Roads – Estados Unidos da América

RST – Regulamento de Sinalização de Trânsito

SETRA - Sevice d'Études Techniques des Routes et Autoroutes - França

TRB - Transportation Research Board - Estados Unidos da América

TRL - Transportation Research Laboratory – Reino Unido

GLOSSÁRIO

Anel de circulação - Faixa de rodagem em torno da ilha central, na qual é estabelecido um sentido único de circulação.

Canais espiroides - Vias de circulação características das turbo-rotundas, que se desenvolvem em forma de espirais em torno da ilha central.

Capacidade de uma entrada (Qe) - Valor do débito da corrente secundária que de uma forma continuada, consegue inserir-se numa determinada corrente principal, ao longo de um determinado período de tempo, durante o qual é garantida a formação de uma fila de espera contínua na aproximação a essa entrada.

Capacidade global - Representa a soma do conjunto máximo de veículos que entram em cada uma das entradas em situação de fila estável.

Centro geométrico da intersecção (CG) - Ponto singular localizado na intersecção das diretrizes associadas a cada um dos ramos que confluem no cruzamento.

Diâmetro do círculo inscrito (DCI) - Diâmetro do maior círculo que é possível inscrever na delimitação exterior da rotunda e que passe tangente à linha de cedência de passagem de uma determinada entrada.

Eixo de translação - Segmento de reta que contém os pontos dos centros dos vários arcos de circunferência que constituem o turbo-bloco e sobre o qual se obtêm os pontos de tangência que permitem a construção de espirais contínuas.

Fluxo de entrada (V_i) - Volume de tráfego que acede à entrada de um determinado ramo afluente, durante um determinado período de tempo.

Fluxo dominante - Fluxo de tráfego associado ao sentido de circulação ou direção predominante (sujeito a maior nível de procura) numa determinada interseção.

Fluxo secundário - Por oposição ao fluxo dominante.

Grau de saturação potencial (FRC) - Relação entre o fluxo de entrada (V_i) durante um determinado período de tempo perante determinado débito e tipo de tráfego prioritário, e a capacidade da entrada (Qe), perante os mesmos débitos prioritários, ao longo do mesmo período de tempo.

Intervalo de translação (Δ) - Distância percorrida sobre eixo de translação pelo centro dos diversos arcos de circunferência de forma a se obterem pontos de tangência para a formação de espirais contínuas.

Largura da via na aproximação (v) - Largura da via, para um único sentido de circulação, no troço de aproximação (antes do início da formação do leque).

Largura efetiva da entrada (e) - Largura do ramo na entrada do anel de circulação, medida na perpendicular à concordância junto à linha de cedência de passagem.

Largura efetiva do leque (l´) - Largura da área constituída pelo conjunto das vias de entrada, delimitada pela linha de cedência de passagem e a secção transversal onde se inicia o aumento da largura e número das vias de entrada.

Rotunda tradicional - Intersecção caracterizada por diversos ramos de circulação que convergem numa ilha central, geralmente de forma circular, em torno da qual é estabelecido um sentido único de circulação em vias concêntricas e paralelas entre si.

Tráfego conflituante (Qc) – Volume de veículos da corrente prioritária que conflituam com os veículos que se pretendem inserir no interior da rotunda, durante um determinado período de tempo.

Tráfego médio diário (TMD) - Média anual dos volumes de tráfego medidos num determinado local durante 365 dias.

Turbo-bloco - Construção geométrica que reúne todos os arcos de circunferência e o eixo de translação que materializa determinada tipologia geométrica de uma turbo-rotunda.

Turbo-rotunda - Solução variante da rotunda tradicional, na qual os fluxos de tráfego se processam em circuitos espirais, separados entre si por elementos delimitadores preferencialmente físicos, definindo circuitos contínuos desde os ramos de entrada até à saída pretendida.

Unidade de veículos ligeiros equivalentes (uve) - Medida utilizada no dimensionamento da infraestrutura rodoviária e que envolve a conversão dos diferentes tipos de veículos em veículos ligeiros, em função das características de ocupação do espaço.

1. INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA

A evolução das sociedades modernas como polos aglutinadores e dinamizadores de estruturas económicas e sociais convergiu num agravamento das necessidades de deslocação dos cidadãos e da sua exigência cada vez mais premente por capacidade de mobilidade. Do ponto de vista da mobilidade rodoviária, os polos urbanos com a multiplicidade de atividades humanas que lhes são intrínsecas, atuam como um imenso gerador de movimentos sejam eles deslocações pendulares diárias ou de acesso a bens e serviços, que em conjunto com o aumento do parque automóvel, resultam num incremento do número de viagens realizadas, e por inerência da densidade de tráfego a circular na rede viária. As formas de mitigar esta situação, poderão ser abordadas genericamente de duas perspetivas. Por um lado, podem ser adotadas medidas ao nível do indivíduo e dos seus hábitos, com o incentivo a uma maior utilização dos transportes coletivos, em detrimento do transporte individual. Esta via é tendencialmente de difícil execução, por implicar mudanças nas rotinas pessoais do sujeito. A outra face da solução prende-se com a introdução de alterações na infraestrutura rodoviária, provendo-a de características que aumentem a sua capacidade e desempenho global. Numa intervenção desta natureza, um dos elementos de traçado que requer particular atenção são as intersecções de nível, por se revelarem habitualmente como pontos críticos da malha rodoviária, quer pela limitação de capacidade de escoamento de tráfego que tendem a impor, quer pela tendencial concentração do número de acidentes.

Nos primeiros anos do Século XX é introduzido o conceito de “circulação giratória” em torno de uma ilha central. Nesta época as regras adotadas decretavam que a prioridade de passagem fosse concedida aos veículos que entravam na rotunda, em prejuízo daqueles que circulavam no anel, o que resultou no aumento da sinistralidade rodoviária, devido às velocidades elevadas praticadas pelos veículos com prioridade nas entradas, e por outro lado, no frequente congestionamento do anel de circulação. A alteração da regra de regulação introduzida na década de 50 do século passado, veio dar prioridade aos veículos que circulam no anel, e desta forma justificar a alteração da filosofia de conceção deste tipo de intersecções. Esta regulamentação, institucionalizada pela primeira vez em 1967 na Inglaterra, veio a traduzir-se num aumento acentuado dos níveis de fluidez e na diminuição do número de acidentes, principalmente da sua gravidade, ao induzir a prática de menores velocidades de entrada e de atravessamento. Estes resultados traduziram-se numa disseminação da solução em diversos países, designadamente em Portugal, onde o seu domínio de aplicação abrange desde zonas urbanas a rurais, com níveis de procura de tráfego de moderados a elevados. A eficiência da solução assenta cumulativamente na sua simplicidade de utilização e na flexibilidade de adaptação a diferentes contextos e condicionantes.

Em termos geométricos, as rotundas caracterizam-se genericamente por apresentarem vários ramos afluentes que convergem numa ilha central, em torno da qual é estabelecido um sentido único de circulação (Bastos Silva, 2004). O modo de funcionamento é simples, traduzido numa condução lenta e harmoniosa mesmo para condutores não habituais. Apesar do seu nível de eficiência ser bastante elevado, a experiência retirada da sua utilização em diversos países, vem realçar a existência de alguns problemas de funcionamento, particularmente nas rotundas com múltiplas vias de circulação, onde a dificuldade de definição de regras claras que orientem devidamente os condutores na seleção da via de aproximação e entrada, traduzem-se muitas vezes na prática de manobras de entrecruzamento dentro do anel e, por vezes, na geração de situações conflituosas e/ou acidentes ao nível da saída.

O conceito da turbo-rotunda surgiu nos Países Baixos na década de 90 com o intuito de resolver este tipo de problemas, apresentando-se como uma alternativa competitiva em relação às rotundas tradicionais com duas vias de entrada e de circulação e caracterizando-se por introduzir elementos físicos de canalização nas entradas, anel de circulação e saídas de modo a encaminhar de forma contínua o condutor desde a entrada até ao destino pretendido, sem que para isso tenha de recorrer a manobras de entrecruzamento. A circulação dentro do anel deixa de corresponder a círculos completos, para integrar circuitos baseados em espirais potenciando um incremento ao nível da segurança rodoviária, já que resulta numa diminuição substancial do número de pontos de conflito. A experiência holandesa tem vindo a comprovar os elevados níveis de eficiência associados à aplicação da solução, contudo os manuais técnicos de apoio à sua conceção e os estudos científicos que comprovem esses níveis de eficiência continuam a ser em número extremamente reduzido.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O conceito das turbo-rotundas tem vindo a despertar o interesse de diversos países, no entanto são ainda extremamente escassos os trabalhos técnico-científicos sobre esta matéria. Em grande parte essa constatação deve-se ao facto de se tratar de um conceito recente e em constante desenvolvimento. Os poucos estudos existentes centram-se em análises comparativas de capacidades de turbo-rotundas face a rotundas tradicionais, que alcançando conclusões nem sempre consensuais, são unânimes quanto à influência da distribuição do tráfego e da tipologia geométrica no desempenho geral da solução. Nesse sentido importa definir essas possíveis tipologias em função da distribuição do tráfego, assim como as regras gerais de base que assistem a sua conceção geométrica, confrontando-as com a legislação e práticas de projeto nacionais. Nesse contexto, pretende-se com o presente trabalho aprofundar os conhecimentos sobre o conceito da turbo-rotunda, procurando perceber os benefícios e limitações desta nova solução, comparativamente às soluções tradicionais, a diferentes níveis. Tendo por base os poucos manuais de conceção geométrica existentes no estrangeiro, procura-se apresentar um conjunto de

recomendações gerais e de regras específicas de apoio à conceção geométrica, devidamente adaptadas ao contexto nacional. Essas regras de conceção são posteriormente testadas relativamente à sua facilidade de aplicação mediante o desenvolvimento de um estudo de caso aplicado a um exemplo real, estudando a transformação de uma rotunda tradicional numa turbo-rotunda.

1.3 METODOLOGIA ADOTADA

A elaboração do presente trabalho foi dividida em quatro fases essenciais e complementares entre si:

Numa primeira fase procurou-se desenvolver um enquadramento geral do tema, baseado numa recolha alargada e detalhada de bibliografia e referências da especialidade, estrangeiras e nacionais.

Numa segunda fase, a pesquisa incidiu fundamentalmente na procura e estudo de manuais técnicos e de soluções construídas que pudessem servir como referência à elaboração de regras e recomendações. A escassez de documentos técnicos editados em língua inglesa dificultou consideravelmente esta fase, a qual se baseou fundamentalmente em documentos dos Países Baixos e da Eslovénia.

A análise cuidada desses estudos potenciou, numa terceira fase, o desenvolvimento de recomendações e regras específicas de conceção geométrica, devidamente compatibilizadas com as disposições técnicas atualmente disponíveis em Portugal. Essa análise incidiu de forma individualizada nos diferentes elementos constituintes da turbo-rotunda, assim como na especificação de regras gerais de avaliação da solução global.

A aplicabilidade das regras foi finalmente testada através do desenvolvimento de um estudo de caso, aplicado à rotunda localizada na Praça Baden-Powell, no Município de Lisboa. O trabalho de transformação dessa rotunda tradicional numa turbo-rotunda subdividiu-se em três fases fundamentais: (i) caracterização do funcionamento da rotunda atual e dos níveis de procura de tráfego; (ii) desenvolvimento da solução geométrica final assente numa base cartográfica e por recurso a instrumentos de CAD; (iii) avaliação da qualidade da solução final.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação foi dividida em cinco capítulos principais, sendo o conteúdo e os principais objetivos de cada um descritos de seguida.

O Capítulo 1 – Introdução, aborda a importância do tema através de um enquadramento geral, definindo os principais objetivos do trabalho e a metodologia utilizada para os alcançar.

O Capítulo 2 – As Potencialidades e Debilidades das Rotundas Tradicionais, partindo de uma análise bibliográfica aprofundada, define o domínio de aplicação e as principais características de funcionamento das rotundas tradicionais, com base nas quais se revelam as suas principais vantagens e debilidades enquanto ponto de intersecção numa rede viária. É dado particular ênfase aos problemas mais comuns de modo a enquadrar a necessidade de procurar soluções alternativas e inovadoras.

Recorrendo a uma análise da mesma natureza do capítulo anterior, fundamentada sobretudo em bibliografia internacional, o Capítulo 3 – As Turbo-rotundas como Forma de Intersecção, parte de um enquadramento histórico da turbo-rotunda para a descrição do seu funcionamento, características distintivas e desempenho nos domínios da segurança e capacidade, face às congéneres tradicionais. Por fim descrevem-se as condições privilegiadas de utilização desta solução.

O Capítulo 4 – Definição de Regras Gerais de Conceção, baseia-se sobretudo na avaliação do estado da arte, designadamente da documentação normativa em vigor nos países que dispõem deste tipo de solução giratória, para daí aprofundar os princípios e as práticas subjacentes à sua conceção geométrica, elementos construtivos específicos e esquemas de sinalização, e de que forma esses princípios se adequam à legislação, normas e disposições técnicas nacionais.

No Capítulo 5 – Estudo de Caso – Rotunda na Praça Baden-Powell, é abordado o estudo de caso selecionado que inclui o enquadramento geral do local e a caracterização da infraestrutura existente, complementada por contagens de tráfego, que fundamentam a escolha da tipologia geométrica, analisando de forma crítica as adaptações necessárias à viabilidade da solução proposta.

Por fim, o Capítulo 6 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros, traça uma síntese das atividades realizadas, enunciando as principais conclusões do trabalho desenvolvido, identificam-se os aspetos mais importantes da dissertação e aqueles que necessitam de um estudo mais aprofundado, sugerindo finalmente as perspetivas de desenvolvimento futuro.

2. AS POTENCIALIDADES E DEBILIDADES DAS ROTUNDAS TRADICIONAIS

2.1 CONCEITO E DOMÍNIO DE APLICAÇÃO

Entende-se por rotunda, uma intersecção giratória caracterizada pela convergência de diversos ramos de sentido único ou duplo, numa praça central geralmente circular e intransponível, em torno da qual é estabelecido um sentido anti-horário e único de circulação, determinado como prioritário face aos fluxos de entrada (InIR, 2012a). De acordo com a Alínea p) do Artigo 1º do Código da Estrada, entende-se por rotunda uma "*praça formada por cruzamento ou entroncamento, onde o trânsito se processa em sentido giratório e sinalizada como tal*". As considerações patentes nesta dissertação aplicam-se a rotundas de nível onde a prioridade de passagem é concedida aos movimentos de circulação em torno da ilha central em detrimento dos movimentos de chegada nos ramos de entrada, pressupostos esses legalmente regulamentados pela lei vigente, e consubstanciados pela alínea c) do ponto 1 do Art.º 31.º do Código da Estrada (DL n.º 114/94 de 3 de Maio, alterado pelos DL n.º 265-A/2001, de 28 de Setembro e DL n.º 44/2005, de 23 de Setembro), excluindo-se assim as rotundas "furadas" ou semaforizadas.

Essencialmente são também estas normas de trânsito que caracterizam as rotundas, que as distinguem das demais intersecções de nível. A atribuição da prioridade de passagem aos veículos que contornam a ilha central sobre aqueles que afluem através das entradas, resulta numa homogeneização e redução das velocidades praticadas nas aproximações, e paralelamente induzem a boas práticas de condução que se refletem em menores índices de sinistralidade, e sobretudo numa redução significativa da gravidade dos acidentes registados. As rotundas caracterizam-se por oferecerem um domínio de aplicação bastante vasto, revelando-se eficazes como instrumento de acalmia e regulação do tráfego em intersecções entre vias que assegurem funções semelhantes. Nas aplicações desta natureza, destacam-se as seguintes (FHWA, 2000; Dft, 2007; InIR, 2012b):

- Como instrumento de controlo do comportamento dos condutores, em pontos onde se registem níveis elevados de sinistralidade relacionada com a prática de velocidade elevada ou inadequada às exigências locais;
- Na marcação da transição entre ambientes rodoviários, seja entre o puramente rodoviário e o meio urbano, seja na entrada de espaços residenciais, comerciais ou de espaços a preservar;
- Como forma de introduzir alterações ao traçado, designadamente alterações ao perfil transversal das vias envolvidas;

- No reordenamento de intersecções existentes que se apresentem geometricamente complexas e/ou irregulares. A geometria das rotundas permite acomodar até seis ramos de entrada, limite após o qual se poderá verificar a degradação dos níveis de segurança rodoviária.

Em ambiente urbano revelam-se adequadas na resposta às funções de distribuição e de acesso, no ordenamento e interligação da malha rodoviária, aliando o seu potencial de capacidade a bons índices de segurança. Nesta vertente destacam-se, entre outras, as seguintes aplicações (Taekratok, 1998; Bastos Silva e Seco, 2004):

- Como solução igualitária, na medida em que impõe perda do direito de passagem a todos os movimentos de entrada. Adaptam-se por isso bem ao reordenamento de intersecções entre vias que assegurem o mesmo tipo de função e que apresentem níveis de procura de tráfego da mesma ordem de grandeza;
- Em alternativa a intersecções do tipo prioritárias ou semaforizadas na resolução de problemas de segurança ou de capacidade relacionados com os movimentos de atravessamento, viragens à esquerda ou inversões de marcha;
- Em zonas com elevado fluxo de tráfego sazonal ou não habitual, já que permite a circulação giratória no seu interior, até o condutor perceber qual das saídas corresponde ao destino pretendido;
- Como instrumento de arquitetura ou de paisagismo, resultando em soluções visualmente notórias e atrativas, através do tratamento adequado da ilha central;
- Entre vias de diferentes classes funcionais, conforme preconizado no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Aplicabilidade das rotundas em função das vias intersectadas em zona urbana (adaptado de InIR, 2012a)

TIPOLOGIA	Via Coletora	Distribuidora Principal	Distribuidora Local	Acesso Local
Via Coletora	+	+	+	o
Distribuidora Principal		++	++	+
Distribuidora Local			++	+
Acesso Local				+

(o) A evitar
(+) Adequada em alguns casos
(++) Adequada na maioria dos casos

Já em zonas interurbanas, a adoção da solução rotunda é considerada adequada entre vias com classificação de Estrada Nacional, Regional e Municipal, onde as características destas propiciem a

prática de velocidades moderadas de circulação. Para troços em que a velocidade média praticada seja superior a 50 km/h dever-se-ão adotar medidas de mitigação, que passam sobretudo pela adequação dos traçados de aproximação e pelo respeito pelos sistemas de sinalização. Na sua forma desnivelada, o âmbito de aplicação poderá ser alargado quer aos Itinerários Complementares (IC), quer Principais (IP).

Apesar do seu vasto campo de aplicação, não é considerada adequada a utilização de rotundas em situações onde a solução geométrica adotada não garanta o cumprimento de todas as regras de boa conceção geométrica, seja por condicionantes de espaço, de orografia, ou ainda devido às características das vias onde se inserem. Entre outras condicionantes destacam-se as seguintes (Austroads, 1993; InIR, 2012a;):

- Quando inseridas em vias existentes com perfil transversal de 2x3 vias, geralmente associadas a fluxos de tráfego significativos. A implantação de uma rotunda numa via com esta tipologia, tenderia a resultar na prática de velocidades de aproximação elevadas nos ramos de entrada, com a consequente dificuldade em garantir os movimentos de deflexão no atravessamento;
- Em meio urbano de matriz consolidada, onde a carência de espaço disponível seja um fator condicionante ao desenvolvimento de uma solução geométrica adequada aos pressupostos do projeto;
- Em locais que pelas suas características não garantam os níveis mínimos de visibilidade, quer na aproximação às entradas quer no interior do anel de circulação;
- Em trainéis com inclinação acentuada, onde não seja tecnicamente viável criar um segmento de declive longitudinal suave para acomodar a implantação da ilha central e respetivo anel de circulação.

É igualmente uma solução inadequada, quando integrada em sistemas de gestão ativa de tráfego urbano, ou sempre que se pretenda beneficiar movimentos ou utilizadores. Entre outras situações, merecem destaque (Taekratok, 1998; Bastos Silva e Seco, 2004):

- Em intersecções onde se pretenda beneficiar um determinado movimento direcional, uma vez que por definição e princípio, todos os movimentos de entrada perdem o direito de passagem em relação ao tráfego que circula no anel;
- Numa malha rodoviária com gestão integrada através de instrumentos ativos de regulação de tráfego, por potencialmente se poder constituir num ponto de quebra e de imprevisibilidade no interior do sistema;
- A montante de intersecções, travessias pedonais, semáforos ou outros elementos que possam gerar filas de espera cuja dimensão possa pôr em causa o correto funcionamento da rotunda.

2.2 PRINCIPAIS VANTAGENS

Os benefícios associados às rotundas, quando comparados com outras intersecções tradicionais de nível, são referenciados a diversos níveis, entre os quais: segurança e acalmia de tráfego, capacidade e fluidez, defesa de utilizadores vulneráveis, qualidade paisagística, custos, etc.. Desde que devidamente concebidas e integradas num eixo viário, associam-se habitualmente a níveis elevados de desempenho, sendo inúmeros os documentos da especialidade (FHWA, 2000; DfT, 2007) que apontam as suas vantagens e potencialidades. Do ponto de vista da segurança importa perceber que a transformação de uma intersecção prioritária numa rotunda se traduz numa alteração quer do número, quer da natureza dos conflitos. A Figura 2.1 ilustra os diversos movimentos/conflitos passíveis de serem gerados numa intersecção de nível.

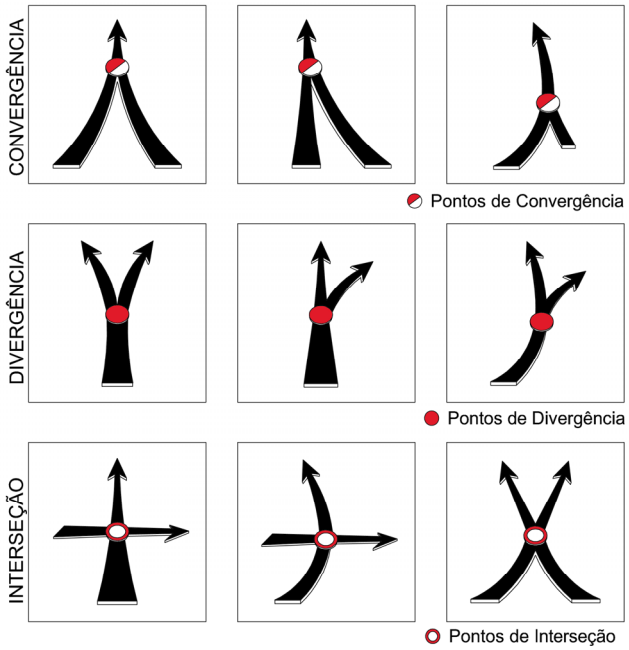


Figura 2.1 – Movimentos / conflitos em intersecções de nível

De uma forma geral, os movimentos são classificados em 3 grupos:

- Convergência, quando se verifica a fusão de duas correntes de tráfego numa única;
- Divergência, quando se verifica a subdivisão de uma corrente de tráfego;
- Intersecção, quando se verifica o cruzamento entre duas correntes de tráfego com movimentos secantes.

Genericamente a gravidade dos acidentes aumenta com o aumento do ângulo entre as correntes de tráfego intersectadas, pelo que, em intersecções, e excluindo a hipótese de embate frontal, os conflitos associados a ângulos próximos dos 90 graus (intersecções) são normalmente os de maior

gravidade. Com efeito, a transformação de uma intersecção prioritária numa rotunda com uma via de circulação do anel, traduz-se na redução significativa do número de pontos de conflito envolvidos (redução de 32 para 8 pontos de conflito) assumindo ainda particular importância a eliminação total dos pontos de conflito de intersecção, e portanto associados aos acidentes mais graves (ver Figura 2.2).

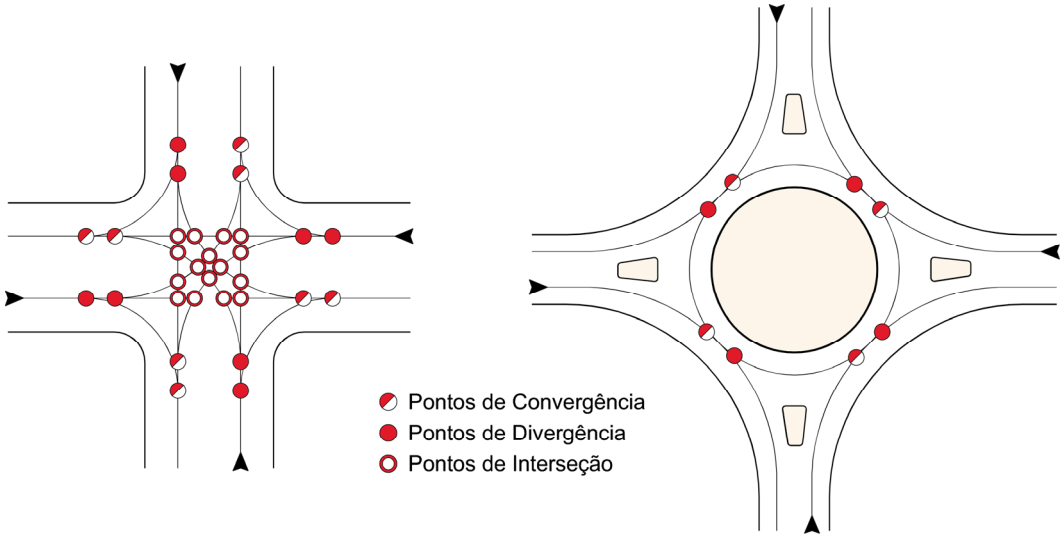


Figura 2.2 - Pontos de conflito em intersecções prioritárias / rotundas (adaptado de FHWA, 2000)

Também o processo de tomada de decisão pelo condutor atinge uma maior complexidade numa intersecção prioritária. Com efeito, numa intersecção com estas características, o condutor que pretenda efetuar uma viragem à esquerda para uma via de importância hierárquica superior, começa por se deter face à potencial presença de peões a atravessar a via. De seguida terá de avaliar simultaneamente as particularidades do fluxo dominante onde se pretende integrar (os intervalos livres entre veículos disponíveis em ambos os sentidos, assim como os movimentos de viragem à esquerda e direita), e daquele que se apresenta no sentido oposto ao seu (os movimentos de viragem e de atravessamentos da via principal). Ao invés, na entrada de uma rotunda o condutor depara-se com quatro decisões extremamente simples (adaptado de FHWA, 2000):

- Eventual paragem junto à passagem para peões no ramo de entrada, se esta existir;
- Escolha de um intervalo crítico aceitável para se integrar no anel de circulação;
- Escolha da saída correspondente ao destino pretendido;
- Eventual paragem junto à passagem para peões no ramo de saída, se esta existir.

Em consequência, e quando comparada com outro tipo de intersecções tradicionais de nível, esta solução associa-se habitualmente a menores níveis de sinistralidade bem como a uma redução

significativa da sua gravidade (Hall e Surl, 1981; Stuwe, 1991). No mesmo sentido, um estudo efetuado nos Estados Unidos da América relativo ao impacto provocado pela introdução de onze novas rotundas em substituição de intersecções prioritárias existentes, concluiu que o número de acidentes envolvendo veículos motorizados sofreu uma diminuição substancial, bem como o número de feridos associados (FHWA, 2000). Os resultados apresentam-se nos Quadros 2.2 e 2.3.

Quadro 2.2 – Substituição de intersecções prioritárias por rotundas tradicionais com uma via no anel (adaptado de FHWA, 2000)

TIPOLOGIA	Nº MÉDIO DE ACIDENTES / ANO	
	SEM FERIDOS	COM FERIDOS
Intersecção Prioritária	2,40	2,00
Rotunda Tradicional - 1 via no anel	1,60	0,50
Variação (%)	-33%	-75%

Quadro 2.3 – Substituição de intersecções prioritárias por rotundas tradicionais com duas vias no anel (adaptado de FHWA, 2000)

TIPOLOGIA	Nº MÉDIO DE ACIDENTES / ANO	
	SEM FERIDOS	COM FERIDOS
Intersecção Prioritária	15,70	5,80
Rotunda Tradicional - 2 vias no anel	11,30	4,00
Variação (%)	-28%	-31%

Esta tendência de diminuição dos sinistros rodoviários assim como das suas consequências é transversal a diversos estudos internacionais conforme se observa no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 - Comparação da variação na ocorrência de acidentes em intersecções prioritárias / rotundas tradicionais, por país (adaptado de FHWA, 2000)

PAÍS	DIMINUIÇÃO DO Nº MÉDIO DE ACIDENTES / ANO	
	TOTAL	COM FERIDOS
Austrália	41% a 61%	45% a 87%
Alemanha	36%	-
França	-	57% a 78%
Países Baixos	47%	-
Reino Unido	-	26% a 39%

Os níveis de segurança característicos das rotundas tradicionais têm sido largamente documentados em referências da especialidade, apontando-se frequentemente os seguintes fatores como as causas principais da diminuição dos acidentes e da sua gravidade (adaptado de Taekratok, 1998):

- Diminuição do número de pontos de conflito;
- Eliminação dos pontos de conflito próximos dos 90 graus (movimentos de ida em frente e de viragem à esquerda) responsáveis pela maioria dos acidentes graves em intersecções de nível;
- Simplificação do processo de tomada de decisão junto da entrada;
- Indução à prática de velocidades moderadas junto à entrada (área de conflito mais gravosa) e à sua homogeneização;
- Defesa dos utilizadores mais vulneráveis (materialização de ilhéus separadores).

O facto de, mesmo em condições de saturação, os veículos na entrada da rotunda se manterem em movimento lento leva a que os tempos de espera percecionados pelo condutor na aproximação à rotunda tendam a ser menores do que os sentidos na aproximação a uma intersecção semaforizada, para condições de tráfego rodoviário semelhantes (FHWA, 2000).

Na Figura 2.3 mostram-se os diferentes tempos de espera, para cenários em que 10% e 50% dos veículos pretendem efetuar uma viragem à esquerda na intersecção. É evidente a diminuição substancial dos tempos de espera sempre que se materializa a transformação de uma intersecção semaforizada em rotunda, independentemente da percentagem de viragens à esquerda.

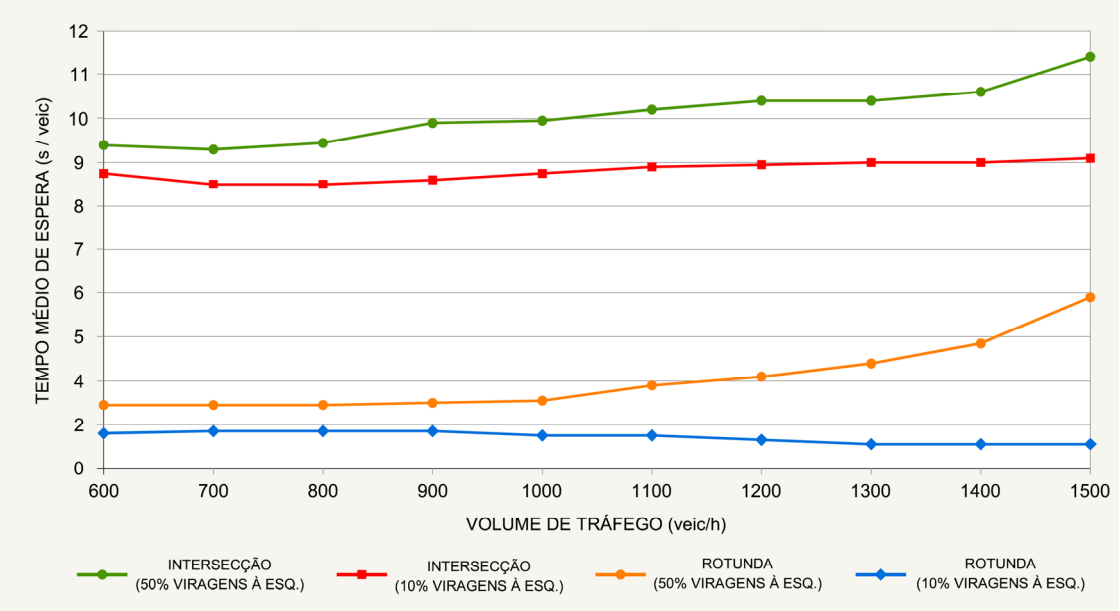


Figura 2.3 - Tempo de espera médio em intersecções semaforizadas e rotundas tradicionais (FHWA, 2000)

Por outro lado, com a redução e homogeneização das velocidades médias praticadas obtém-se, por parte dos condutores, uma aceitação de menores intervalos críticos para entrada no anel de circulação e, consequentemente, um aumento da capacidade geral da intersecção.

Assim, ao nível da gestão do tráfego, as vantagens associadas às rotundas são inúmeras (FHWA, 2000; Bastos Silva e Seco, 2004), destacando-se:

- Fluxo de tráfego quase contínuo, sem tempos de paragem ou de espera significativos;
- Redução genérica dos tempos de espera, quando comparada com uma intersecção semaforizada ou prioritária, com idêntico volume de procura de tráfego;
- Aumento genérico da capacidade da intersecção, relativamente a outras soluções tradicionais de nível;
- Facilidade de integração dos movimentos de viragem à esquerda e de inversão de marcha.

Revela-se ainda uma solução equilibrada do ponto de vista económico quer em termos de investimento inicial quer de manutenção e conservação, ao eliminar a necessidade de instalação e manutenção de sistemas semaforizados. Associa-se ainda a menores consumos de combustível face ao menor número de paragens, o que se traduz em benefícios ambientais. Também no âmbito da mobilidade pedonal e impacte ambiental associados se verificam vantagens, das quais se destacam (FHWA, 2000; DfT, 2007):

- Garantia de refúgio e menores distâncias de atravessamento pedonal com recurso a ilhéus separadores;
- Aumento dos níveis de segurança relativamente a peões e ciclistas, face às baixas velocidades praticadas;
- Menores emissões de gases poluentes para a atmosfera, com a diminuição do número de ciclos paragem/arranque;
- Mitigação do impacte visual através do arranjo paisagístico da ilha central.

Dependendo da natureza do tratamento adotado na ilha central, as rotundas revertem-se ainda em excelentes instrumentos da arquitetura paisagística. A este nível importa contudo evitar a aplicação de obstáculos rígidos particularmente no encaminhamento das entradas, de modo a evitar acrescer as consequências dos acidentes, no caso de despistes junto à entrada.

2.3 PRINCIPAIS PROBLEMAS DE FUNCIONAMENTO

As rotundas têm-se afirmado entre a comunidade técnica como soluções extremamente eficientes, no entanto, a sua aplicação em diversos países tem vindo a identificar algumas debilidades e problemas de funcionamento. Embora não seja possível dispor de dados nacionais, segundo alguns autores (Gambard, 1988; Guichet, 1992; Brown, 1995) é possível destacar seis tipologias de acidentes como sendo as mais comuns em rotundas, ilustradas na Figura 2.4.

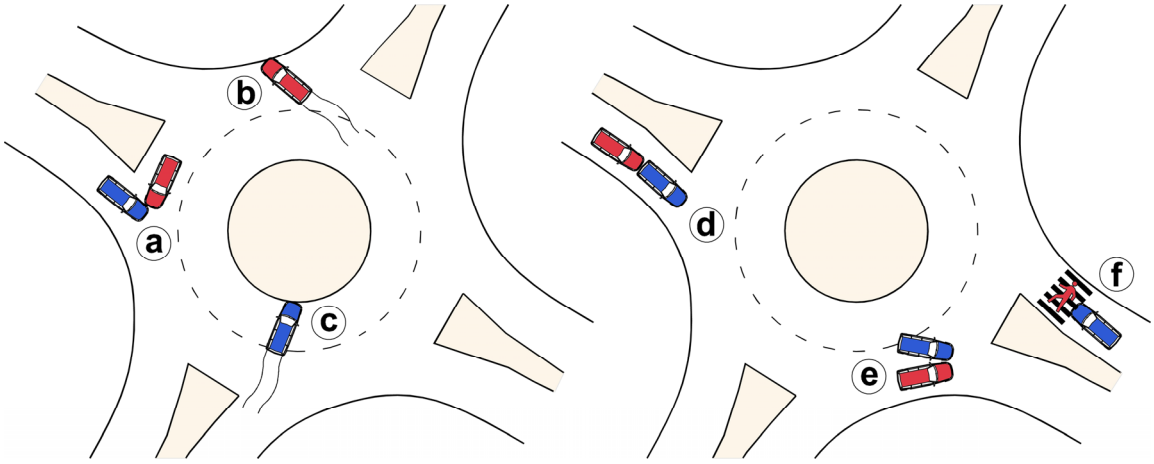


Figura 2.4 - Tipificação de acidentes em rotundas tradicionais (adaptado de Guichet, 1992)

a) Recusa de cedência de passagem junto à entrada, com consequente embate nos veículos que circulam no anel;

b) Perda de controlo por despiste no interior do anel de circulação;

c) Perda de controlo à entrada com invasão da ilha central;

d) Perda de controlo à entrada com embate frente/traseira;

e) Conflito entre veículos nas imediações das saídas, nomeadamente entre viaturas em circulação e as que pretendem abandonar o anel;

f) Atropelamento de peão em passadeira.

A partir da análise estatística de diversos estudos internacionais de segurança em rotundas tradicionais (FHWA, 2000; CERTU, 2009), conclui-se que as seis tipologias apresentadas correspondem a uma elevada parcela do total dos acidentes registados, e são resultado direto do comportamento dos condutores, nomeadamente da prática de velocidades inapropriadas ou de manobras inadequadas. É igualmente de registar que os sinistros tendem a ser tanto mais graves e frequentes quanto mais vias de entrada e de circulação forem disponibilizadas nas entradas e anel de circulação.

Importa no entanto destacar no âmbito deste trabalho a sinistralidade diretamente relacionada com a adoção de comportamentos erráticos por parte dos condutores em rotundas tradicionais com múltiplas vias. O recurso a essa configuração no anel de circulação e nos ramos de entrada e saída resulta num comprovado aumento da capacidade (Austroads, 1993; InIR, 2012a), no entanto esse incremento conduz a um aumento acentuado do número de potenciais conflitos, extremamente difícil de quantificar e localizar, já que tendem a ocorrer ao longo de todo o anel de circulação, devido ao uso inadequado das vias disponíveis, conforme se ilustra na Figura 2.5 para um exemplo de duas vias.

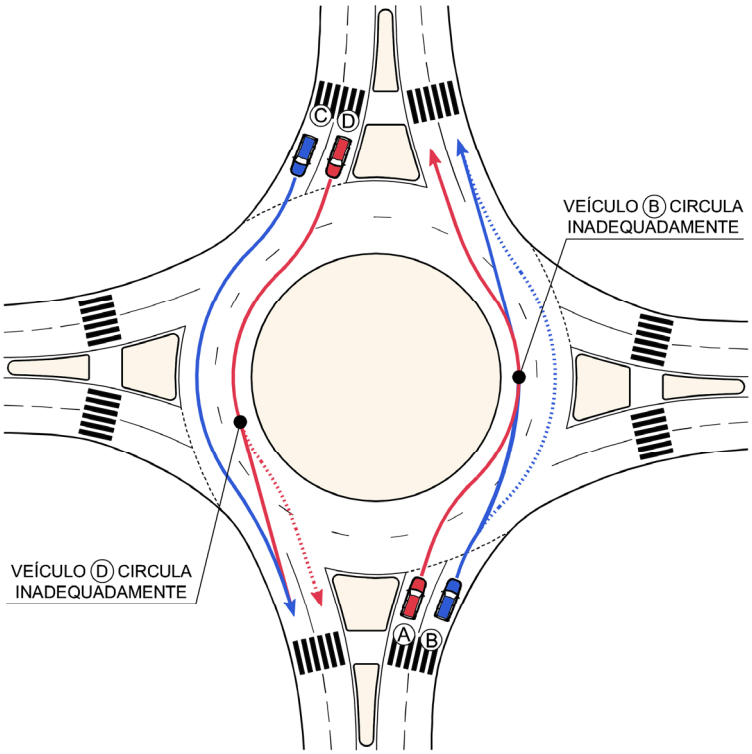


Figura 2.5 - Entrecruzamentos no anel em rotunda tradicional com duas vias de circulação (Bastos Silva e Seco, 2002)

Para além da prática de velocidades elevadas (resultantes da diminuição dos níveis de deflexão), esta afigura-se como a principal causa para o elevado número de acidentes registados nas rotundas tradicionais com múltiplas vias, face aquelas com uma única via (Tollazzi, 2010). A situação é particularmente agravada pelo facto de não estarem definidas com clareza regras de trânsito adequadas à condução em rotundas, e em particular, por não estarem pré-definidos locais onde seja recomendável e portanto expectável os condutores efetuarem as manobras de mudança de via.

Trabalhos de investigação nacionais (Bastos Silva, 2004) aplicados a rotundas com duas vias de entrada e de circulação, vieram confirmar a prática corrente de comportamentos de risco,

associados frequentemente à procura de trajetórias retilíneas e de mínimo esforço que se traduzem na geração de conflitos entre correntes de tráfego e, por vezes, em acidentes. Essa investigação concluiu que cerca de 40% dos condutores que circulam pela via da direita tendem a cortar diretamente a via da esquerda na zona de atravessamento do anel com vista à obtenção de trajetórias diretas e confortáveis, e que cerca de 20% dos condutores que optam pela via da esquerda nas imediações da entrada, decidem sair do anel através da via da direita, minimizando assim o seu incómodo de condução.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme exposto ao longo deste capítulo, as rotundas constituem um elemento de traçado rodoviário extremamente eficiente associado a um vasto domínio de aplicação. São notórios os seus benefícios, mas igualmente conhecidas as suas limitações, particularmente as associadas às rotundas tradicionais com múltiplas vias de entrada e de circulação. De facto, importa salientar que a transformação de uma rotunda com uma via numa de duas vias se traduz no aumento significativo do número de pontos de conflito, tanto mais efetivo quanto seja considerada a prática de comportamentos erráticos dentro do anel. Complementarmente, a adoção de múltiplas vias de circulação traduz-se na necessidade de salvaguardar larguras consideráveis no anel de circulação, o que, tendencialmente resulta numa dificuldade acrescida de salvaguardar níveis adequados de deflexão e, por sua vez controlar os níveis de velocidade junto da entrada.

Estes problemas têm levado alguns países, como é o caso da França (SETRA 1998), Alemanha e Suíça, a condicionarem significativamente a aplicação de soluções com múltiplas vias de circulação, a situações excecionais e devidamente justificadas. Por sua vez, no Reino Unido (DfT, 2007) e na Austrália (Austroads, 1993) tem-se procurado incorporar ilhéus complementares fisicamente materializados junto à entrada de modo a imporem níveis de deflexão acrescidos e, desta forma, condicionarem a velocidade de entrada. Apesar dessas tentativas devidamente complementadas por um enquadramento legal adequado, verifica-se que os acidentes por entrecruzamento em rotundas tradicionais com múltiplas vias, embora pouco graves, continuam a ser muito frequentes.

O conceito da turbo-rotunda surge assim como um ordenamento físico alternativo à rotunda com múltiplas vias, capaz de resolver, ou de pelo menos atenuar a maioria destes problemas.

3. AS TURBO-ROTUNDAS COMO FORMA DE INTERSECÇÃO

3.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO CONCEITO

Na segunda metade da década de 90, a província de Zuid-Holland (Holanda do Sul) nos Países Baixos, promoveu a construção de várias dezenas de rotundas tradicionais compactas com uma via no anel de circulação. Após a sua entrada em funcionamento verificou-se que em determinados pontos da rede viária, a capacidade associada a essa tipologia era insuficiente face à procura verificada. A solução comummente adotada até essa altura, passaria por dotar essas rotundas de uma segunda via de circulação, apesar do previsível aumento do número de acidentes resultantes do entrecruzamento de veículos no interior do anel, e junto às saídas. Como alternativa, procuraram-se soluções inovadoras que permitissem simultaneamente aumentar a capacidade face às rotundas existentes, e manter baixos os níveis de sinistralidade rodoviária. Para alcançar estes objetivos, o novo conceito geométrico deveria garantir, por um lado, a prática de velocidades de atravessamento baixas, e por outro lado, condicionar as manobras de entrecruzamento de veículos que circulam no anel de circulação. Foi nesse contexto que surgiu, pela primeira vez em 1997, o conceito de turbo-rotunda como alternativa direta às rotundas tradicionais com duas vias de entrada e de circulação (Fortuijn e Harte, 1997), e o subsequente desenvolvimento assente em estudos e trabalhos de Lambertus Fortuijn, professor da *Delft University of Technology* e membro do *Board of Economy and Transport* holandês.

O conceito que mereceu a sua primeira aplicação prática em 2000 na periferia da cidade de Roterdão, foi posteriormente seguido pela Eslovénia, e mais recentemente pela Alemanha e Roménia. A estes, juntam-se outros países que possuem soluções geométricas variantes do tipo Réplica (ver Subcapítulo 4.2), que não cumprindo a totalidade dos requisitos fundamentais associados à turbo-rotunda, designadamente na utilização de marcas rodoviárias em substituição do separador físico, são de carácter transitório para uma solução futura completa, como são exemplo a Hungria, a Polónia, a Lituânia, os Estados Unidos, a Bélgica e a Espanha. Se em Abril de 2008 os Países Baixos contavam com cerca de 70 turbo-rotundas construídas, quatro anos depois esse valor aumentou para 186, com os resultados obtidos a conduzirem ao desenvolvimento de disposições normativas (editadas em 2008 e revistas em 2009) e ao abandono do conceito de rotunda com múltiplas vias no projeto de novas soluções (CROW, 2008).

O interesse generalizado no conceito tem vindo a aumentar através da publicação de estudos académicos recentes sobre o tema em países como a Alemanha (Brilon, 2008), Hungria (Wijk, 2009), Itália (Mauro e Branco, 2010) e Portugal (Bastos Silva et al., 2011). Contudo a necessidade de enquadrar a solução em termos legislativos, tem vindo a impedir a sua aplicação prática em alguns países, mesmo em termos de experiência piloto.

3.2 DEFINIÇÃO E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO

Por definição, uma turbo-rotunda é uma variante das rotundas tradicionais de duas ou mais vias, na qual os fluxos de tráfego se processam em circuitos espirais, separados entre si por elementos delimitadores físicos, definindo circuitos contínuos desde os ramos de entrada até à respetiva saída. Esses elementos delimitadores apresentam um formato rebaixado que, por um lado desincentiva a mudança de via e por outro lado permitem ser transponíveis em situações excecionais, sendo ainda interrompidos nos pontos onde o acesso é permitido (Tollazzi, 2010; Mauro e Branco, 2010). Assente na necessidade de condicionar fisicamente o comportamento do condutor, o conceito apresenta duas potencialidades extremamente importantes: a eliminação das manobras de entrecruzamento, e a redução de velocidades impostas pela presença de elementos de canalização física (Fortuijn, 2007) resultando assim em soluções fluidas e seguras.

Esta solução, embora associada a múltiplas vias de circulação, canaliza os condutores através de trajetórias em espiral, de forma contínua entre a via de entrada, até à saída pretendida, eliminando assim possíveis embates laterais entre veículos, na sequência de manobras de entrecruzamento. A solução, que pode assumir diferentes *layouts* em função da importância pela procura de tráfego em cada ramo afluente, garante à semelhança das soluções tradicionais, a realização de todos os movimentos direcionais, remetendo no entanto a decisão de escolha do destino para o trecho de aproximação. Na Figura 3.1 caracterizam-se os principais movimentos praticáveis (viragem à esquerda, viragem à direita e ida em frente) aplicados a duas das entradas de uma turbo-rotunda do tipo Standard (ver tipologias geométricas no Capítulo 4).

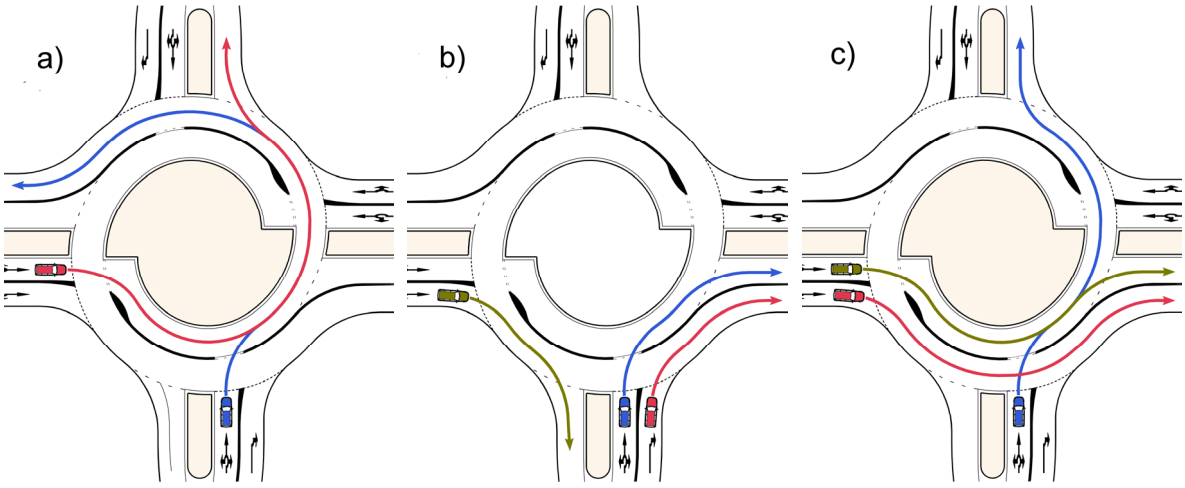


Figura 3.1 - Caracterização dos movimentos principais em turbo-rotunda: (a) Viragem à esquerda / (b) Viragem à direita / (c) Ida em frente

A solução global, ao contrário das rotundas tradicionais, permite hierarquizar os ramos afluentes, em função da importância dos níveis de procura de tráfego, adaptando-se a locais sujeitos a níveis de procura não equilibrados. Responde ainda às exigências de operacionalidade dos veículos de maiores dimensões, já que os elementos de canalização são galgáveis e complementados por uma orla transponível, que circunda a ilha central, abandonando-se o característico formato circular, tipicamente associado às rotundas tradicionais. Ilustram-se na Figura 3.2, as suas principais características de funcionamento (MVW, 2009; Giuffrè et al., 2009).

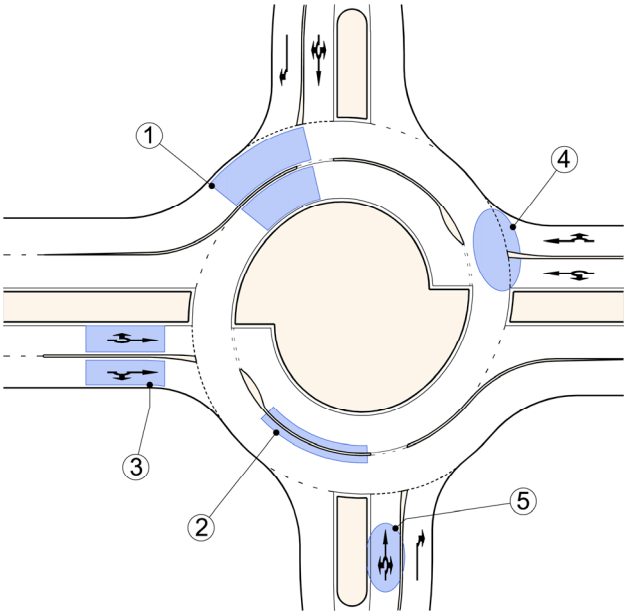


Figura 3.2 - Principais características de funcionamento (MVW, 2009)

1. Solução com múltiplas vias de circulação (normalmente limitada a um máximo de duas vias);
2. No interior do anel de circulação, são desincentivados os movimentos de entrecruzamento;
3. O processo de decisão relativo à via a selecionar, é remetido para o trecho de aproximação à entrada. A saída do anel de circulação, apenas se pode efetuar pela via previamente selecionada;
4. Os movimentos em torno da ilha central são prioritários face aos movimentos de chegada nos ramos de entrada;
5. Todos os movimentos direcionais são possíveis, mesmo a manobra de inversão de marcha.

Relativamente a esta última, trata-se de uma questão que tem gerado alguma controvérsia, havendo autores que referem não ser possível tal manobra (Giuffrè et al., 2009). Contudo, apesar dos ângulos associados à ilha central, a dimensão da orla galgável e o separador rebaixado viabilizarem a manobra, esta tem associado algum desconforto acrescido.

3.3 ANÁLISE COMPARATIVA FACE ÀS ROTUNDAS TRADICIONAIS

3.3.1 CARACTERÍSTICAS DE CAPACIDADE

O HCM (2000) define a capacidade de uma infraestrutura rodoviária como sendo a taxa horária máxima na qual é razoavelmente expectável que pessoas ou veículos atravessem um determinado ponto ou secção uniforme de estrada, durante um determinado período de tempo, em condições reais de funcionamento. No entanto este conceito de capacidade global não pode ser aplicado a uma rotunda, por não existir uma relação inequívoca entre a geometria e a sua capacidade, já que esta depende do número de ramos afluentes e da distribuição do tráfego nas diferentes entradas e saídas. É assim habitual adotar-se o conceito de capacidade de uma entrada numa rotunda.

Os modelos de estimação de capacidades de entrada aplicados a rotundas convencionais podem seguir diferentes abordagens teóricas, designadamente os de base estatística, probabilística ou recorrendo à simulação da interação entre utilizadores. Muitos desses modelos apontam a largura efetiva da entrada, ou o número de vias como uma das variáveis explicativas mais relevantes na estimação da capacidade, já que aumentam diretamente a oportunidade de entrada de múltiplos veículos no anel de circulação (FHWA, 2000; DfT, 2007). De facto, a experiência adquirida com a aplicação do conceito, mostra que embora as soluções com uma só via de entrada assegurem elevados níveis de segurança, o recurso a soluções com múltiplas vias se revela indispensável para responder às necessidades de fluidez e capacidade (ver Figura 3.3). O aumento de uma para duas vias na entrada (e por consequência no anel) pode justificar aumentos de capacidade próximos dos 100% (FHWA, 2000) e a criação de vias curtas igualmente valores significativos (Bastos Silva, 2004)

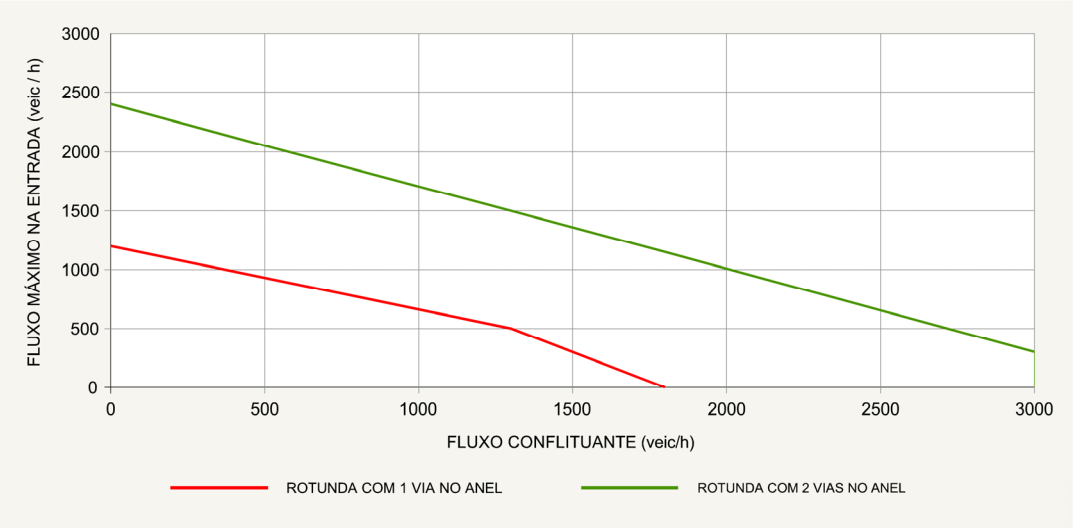


Figura 3.3 - Capacidade de entrada em rotundas tradicionais (adaptado de FHWA, 2000)

A análise do gráfico da figura anterior permite ainda perceber o efeito associado ao crescimento do tráfego conflituante. Verifica-se que as rotundas com uma via, para fluxos conflituantes elevados (superiores a 1500 veículos/hora) tendem rapidamente a ultrapassar o limiar de capacidade, e portanto a atingir a saturação. Esta figura permite ainda concluir que no caso de rotundas com duas vias no anel de circulação, a capacidade da entrada aumenta significativamente independentemente do volume de tráfego conflituante considerado. Neste tipo de soluções, a saturação tende a ser atingida para fluxos conflituantes superiores a 3000 veic./h. Da mesma figura pode ainda inferir-se que a capacidade geométrica (obtida para um fluxo conflituante nulo) numa entrada de rotunda com uma só via pode atingir os 1200 veic./h subindo para 2400 veic./h quando se disponibilizam duas vias. Estes valores confirmam assim o nível elevado de desempenho destas soluções tradicionais, mesmo para níveis elevados de tráfego conflituante.

Relativamente à turbo-rotunda, são ainda escassos os trabalhos que testam este nível de eficácia. O CROW (2008) é uma das poucas referencias que apresenta valores de capacidade de entrada estimados para diferentes tipos de rotundas tradicionais e turbo-rotundas (Quadro 3.1).

Quadro 3.1 - Capacidade máxima em rotundas tradicionais e turbo-rotundas com 4 ramos afluentes (CROW, 2008)

TIPOLOGIA	CAPACIDADE GLOBAL (uve/h)	TRÁFEGO NA ENTRADA (uve/h)
Rotunda Tradicional - 1 via no anel	2000	1100 - 1500
Rotunda Tradicional - 2 vias no anel (*)	2200	1500 - 1800
Rotunda Tradicional - 2 vias no anel (**)	3500	2100 - 2400
Turbo-rotunda Standard (***)	3500	1900 - 2100
Turbo-rotunda Espiral (***)	4000	2000 - 2300
Turbo-rotunda Rotor (***)	4500	2500 - 2800

(*) Ramos com uma via de entrada e uma via de saída

(**) Ramos com duas vias de entrada e duas vias de saída

(***) Ver tipologias geométricas no Capítulo 4

A Capacidade Global, segundo o documento original, representa a soma da capacidade relativa aos quatro ramos de entrada da intersecção, ou seja face à formação de fila de espera consolidada. A análise do quadro anterior evidencia que a duplicação de vias no anel de circulação resulta num aumento da capacidade total entre os 10% e os 75% dependendo do perfil transversal dos ramos de entrada e saída. Por sua vez, a transformação da rotunda com duas vias em turbo-rotunda poderá justificar aumentos de capacidade que podem atingir os 20%. Relativamente ao Tráfego na Entrada, este reporta-se à soma dos veículos que acede a determinada entrada da rotunda – Fluxo de Entrada, com aqueles que no fluxo giratório, com eles conflituam - Tráfego Conflituante (que

representam grandezas inversamente proporcionais entre si, como se pode observar na Figura 3.3). Também neste parâmetro a turbo-rotunda garante níveis de desempenho semelhantes ou superiores àqueles oferecidos pela rotunda tradicional de duas vias no anel, em resultado dos seguintes fatores (Tollazzi, 2010):

- A separação física dos sentidos traduz-se na geração de fluxos "quase contínuos";
- A utilização da via interior do anel torna-se mais atrativa para o condutor, uma vez que deixa de existir o sentimento de risco associado aos movimentos de entrecruzamento;
- O menor número de decisões exigidas ao condutor na zona da entrada reflete-se numa maior fluidez das correntes de tráfego.

No entanto, as conclusões inferidas a partir dos dados reproduzidos no Quadro 3.1, não são consensuais. Se por um lado se identificam outros estudos que defendem, como este, que tal transformação se traduz num aumento generalizado e significativo de capacidade (Yperman e Immers, 2003; Fortuijn, 2009; Tollazzi, 2010), outros apontam para resultados menos ambiciosos (Mauro e Branco, 2010; Bastos Silva et al., 2011). De facto, segundo com as conclusões apresentadas por Bastos Silva (et al., 2011), a capacidade de uma turbo-rotunda tende a ser ligeiramente inferior à da rotunda tradicional (com duas vias no anel), com os resultados a dependerem fortemente do *layout* geométrico adotado e da repartição de tráfego considerada. Os mesmos estudos defendem ainda que o nível de desempenho depende do ramo em análise, obtendo-se aumentos de capacidade nos ramos secundários e reduções nos ramos principais.

3.3.2 CARACTERÍSTICAS DE SEGURANÇA

O conceito de segurança sustentável adotado transversalmente a partir da última década do Século XX, advoga uma abordagem a qualquer infraestrutura rodoviária assente em três princípios fundamentais (SWOV, 2007; CCDRN, 2008):

- Hierarquização da rede viária e utilização da mesma de acordo com a estrutura que lhe foi conferida – Princípio da Funcionalidade;
- Homogeneidade do traçado, prevenindo grandes diferenças nas velocidades, direções e massas dos veículos - Princípio da Homogeneidade;
- Mitigação de situações anómalas que contrariem as expectativas e/ou o comportamento dos utilizadores ao longo do trajeto – Princípio da Previsibilidade.

Conforme referido no capítulo anterior, a segurança de uma intersecção rodoviária está inversamente relacionada com o número e gravidade associada aos seus pontos de conflito, sendo por isso, as rotundas tradicionais consideradas mais seguras comparativamente a outras soluções

tradicionais de nível. No entanto, dentro deste universo é possível distinguir diversas conceções geométricas, cada uma com qualidades e fragilidades intrínsecas. Numa rotunda com duas vias no anel de circulação e nas entradas/saídas dos ramos afluentes, identificam-se as principais áreas de potencial conflito (Figura 3.4):

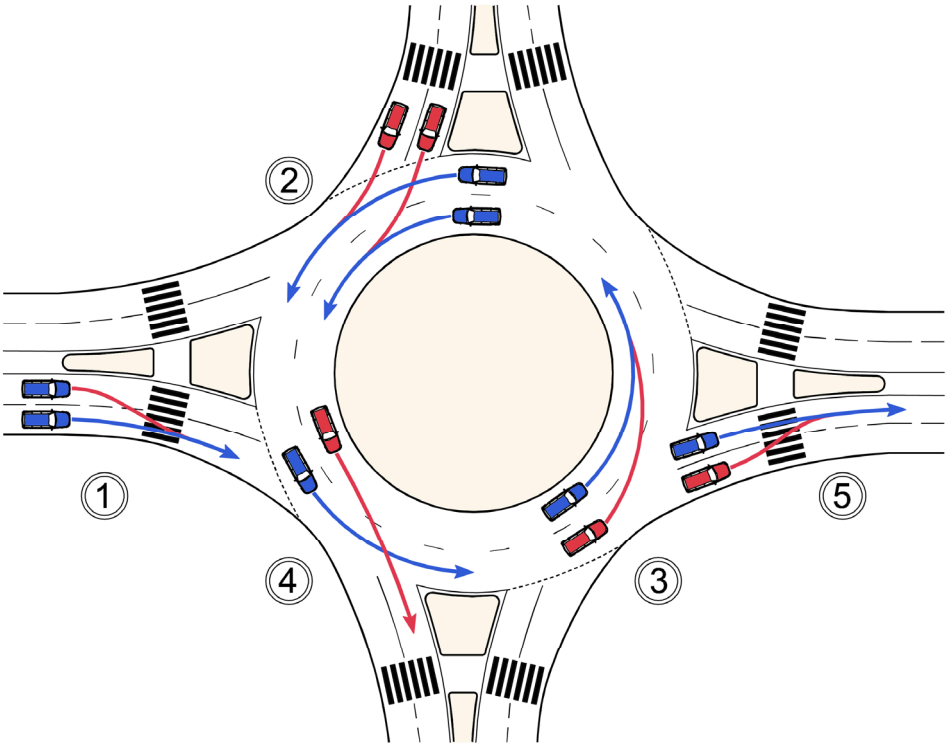


Figura 3.4 - Zonas de conflito em rotunda tradicional com duas vias de circulação e duas vias de entrada/saída (adaptado de Tollazzi, 2010)

1) Entrecruzamentos entre as diversas vias afluentes na zona de aproximação à rotunda;
2) Atravessamento das vias prioritárias para inserção no anel e tendência de corte da via interior na procura de trajetórias diretas e confortáveis;
3) Entrecruzamento dentro do anel de circulação;
4) Entrecruzamento e invasão de via, na zona de saída do anel;
5) Mudança de via no ramo de saída.

Se no caso dos entrecruzamentos na aproximação e abandono da rotunda (1 e 5) existem medidas mitigadoras que passam pelo recurso a marcas longitudinais no pavimento (linhas contínuas) como forma de marcar a separação de vias de entrada e saída, já para as restantes situações, que se configuram como inerentes às características geométricas da própria rotunda, a forma mais eficaz para as anular (3 e 4) ou minimizar (2), passaria invariavelmente pela redução do número de vias no anel de circulação, com a consequente diminuição de capacidade já referida anteriormente.

As turbo-rotundas permitem resolver este tipo de problemas com elevado nível de eficiência. Os elementos físicos com início ainda nos ramos de entrada e que se prolongam pelo anel até aos ramos de saída, permitem eliminar os entrecruzamentos do tipo 1, 3 e 5 apresentados, garantindo através de trajetórias contínuas e intuitivas, a adoção de um comportamento previsível por parte dos utilizadores da infraestrutura (Princípio da Previsibilidade) assim como a homogeneização das velocidades praticadas (Princípio da Homogeneidade).

Passam ainda a estar definidos os locais onde a manobra de atravessamento para entrada e saída do anel de circulação (2 e 4) é passível de ser realizada, o que representa uma mais-valia em termos de segurança rodoviária e comodidade para o condutor. Consequentemente o número de pontos de conflito desce significativamente (de 24 numa rotunda com duas vias de circulação para 14 na turbo-rotunda) o que se traduz numa diminuição direta da probabilidade de ocorrência de acidente (Figura 3.5).

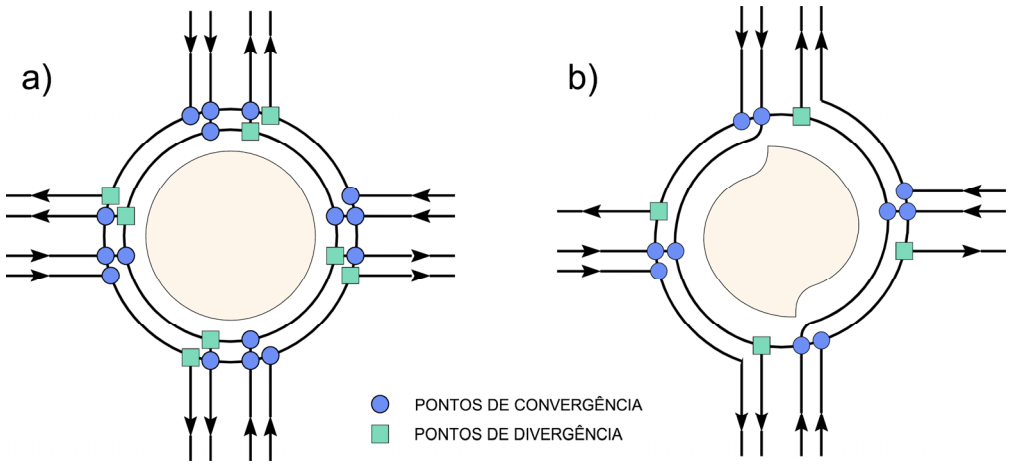


Figura 3.5 - Conflitos em a) rotunda tradicional com duas vias no anel de circulação e b) turbo-rotunda Standard (adaptado de Fortuijn, 2011)

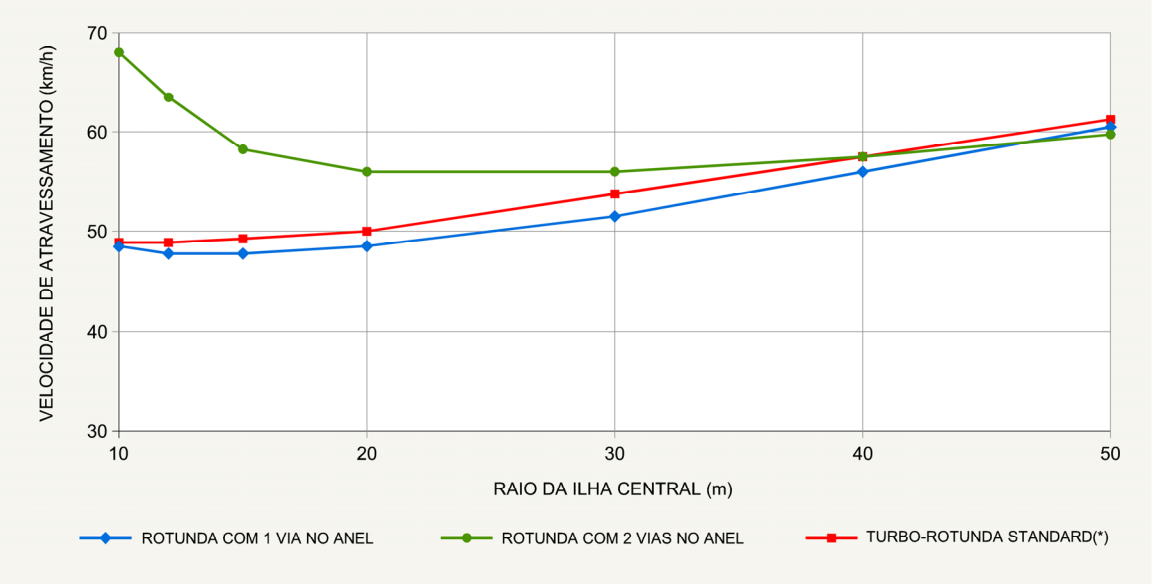
Verifica-se a redução do número de atravessamentos de via no acesso ao anel, e sobretudo a abolição de todas as secções de entrecruzamento e de intersecção, sendo estas últimas de especial importância no âmbito da segurança rodoviária, pela gravidade das consequências que habitualmente lhe estão associadas. Os pontos de conflito numa turbo-rotunda concentram-se no local em que o condutor acede ao anel central e onde tem a possibilidade de imobilizar o veículo em segurança, adotando a decisão mais adequada ao contexto rodoviário existente, e onde a manobra mais complexa a realizar será o atravessamento de uma única via de tráfego. Por outro lado, as trajetórias dos fluxos de saída passam a ser previsíveis por não haver possibilidade de abandonar o canal circulatório de forma arbitrária.

Analogamente, ao nível da conceção são conhecidos os dois conceitos antagónicos que dizem respeito às características geométricas das entradas de rotundas com múltiplas vias de circulação

no anel. Segundo o QDMR (1998), diversos estudos têm vindo a demonstrar que ao aumento da curvatura da trajetória corresponde uma homogeneização das velocidades de entrada e de circulação, que resulta habitualmente numa diminuição de embates junto das entradas e saídas entre veículos que circulam no anel e aqueles que lhe acedem ou o abandonam. Ao submeter os veículos a uma sequência de manobras de viragem a baixa velocidade (preferencialmente abaixo dos 30 km/h), garante-se:

- Redução da gravidade dos acidentes;
- Intervalos maiores na corrente de tráfego circulante, que facilitam a inserção de outros veículos e oferecem maiores distâncias de segurança;
- Colisões menos frequentes e com menor gravidade;
- Margem de tempo para o utilizador detetar e corrigir os seus erros ou reagir a erros de terceiros.

No entanto, a maiores curvaturas está associado um aumento dos entrecruzamentos entre fluxos de tráfego paralelos no anel de circulação resultado da procura de trajetórias diretas e rápidas, e logo, um aumento potencial dos embates laterais. Estes dois conceitos constituem um dilema de difícil equilíbrio e resolução. A Figura 3.6 mostra de que forma o raio da ilha central e a velocidade de atravessamento se relacionam em observações levadas a cabo nos Países Baixos (Fortuijn, 2011).



(*) Ver tipologias geométricas no Capítulo 4

Figura 3.6 - Relação entre raio da ilha central e velocidade de atravessamento (adaptado de Fortuijn, 2011)

Verifica-se que para toda a gama de dimensões da ilha central, a configuração da turbo-rotunda garante velocidades médias de atravessamento reduzidas, semelhantes às verificadas numa rotunda tradicional com via única. A redução de velocidade média face às rotundas com via dupla, é tanto mais significativa quanto menor for a dimensão da ilha central. Estes dados são consentâneos com resultados da investigação nacional, já que a tendência de invasão e corte da via interior no anel por parte dos veículos que entram pela via da direita, na procura de trajetórias diretas e confortáveis, é tanto mais significativo quanto menor for a dimensão da rotunda (Bastos Silva, 2004).

Num outro estudo realizado nos Países Baixos, analisou-se durante um período de seis anos a variação do número de acidentes ocorridos após a transformação de diversas intersecções prioritárias em rotundas com uma via no anel de circulação (Quadro 3.2), e em turbo-rotundas (Quadro 3.3).

Quadro 3.2 - Substituição de intersecções prioritárias por rotundas tradicionais com uma via no anel (MVW, 2009)

TIPOLOGIA	Nº MÉDIO DE ACIDENTES / ANO	
	COM FERIDOS	TOTAIS
Intersecção Prioritária	1,24	4,63
Rotunda Tradicional - 1 via no anel	0,23	2,31
Variação (%)	81%	50%

Quadro 3.3 - Substituição de intersecções prioritárias por turbo-rotundas (MVW, 2009)

TIPOLOGIA	Nº MÉDIO DE ACIDENTES / ANO	
	COM FERIDOS	TOTAIS
Intersecção Prioritária	2,42	11,91
Turbo-Rotunda	0,44	6,06
Variação (%)	82%	49%

A variação do número de sinistros foi expressiva nos dois cenários analisados, com as turbo-rotundas a garantirem reduções semelhantes às alcançadas nas rotundas tradicionais, em ambas as tipologias de acidentes. Desta forma, reconhecendo os pontos de conflito e as velocidades de atravessamento como indicadores fidedignos das características de segurança de uma dada solução geométrica de intersecção de nível, e observando os resultados apresentados assim como outros estudos de referência neste âmbito (Mauro e Cattani, 2010), são inequívocos os benefícios associados às turbo-rotundas como alternativa às rotundas tradicionais com vias múltiplas no anel e

nos ramos afluentes, ao combinar níveis de capacidade semelhante com elevados índices de segurança.

3.4 CONDIÇÕES PRIVILEGIADAS DE APLICAÇÃO

As turbo-rotundas apresentam um domínio de aplicabilidade alargado e semelhante ao das rotundas tradicionais. Assumem como domínio privilegiado de aplicação os locais sujeitos a níveis de procura elevados, mas onde as preocupações de segurança prevaleçam em detrimento da capacidade. São exemplo locais onde exista uma rotunda tradicional, ou uma intersecção prioritária, sujeitos a níveis de sinistralidade relacionados com as manobras de entrecruzamento no anel, ou associados aos movimentos de ida em frente ou de viragem à esquerda. A turbo-rotunda revela-se uma solução adequada e competitiva em meio urbano e interurbano, nos seguintes cenários (Tollazzi, 2010):

- Em alternativa a uma rotunda tradicional com duas vias no anel de circulação, sempre que esta apresente níveis elevados de sinistralidade ligados a manobras de entrecruzamento no anel;
- Em alternativa a uma rotunda tradicional, intersecção de nível prioritária ou semaforizada, em que se registe um elevado número de acidentes;
- Em alternativa a uma rotunda tradicional, intersecção de nível prioritária ou semaforizada, quando se verifica a existência de uma corrente de tráfego predominante, com elevado valor de débito face às restantes.

À semelhança da rotunda tradicional, pode ser aplicada tanto em meios urbanos como interurbanos, adaptando-se particularmente bem à marcação da transição de ambientes rodoviários (por exemplo na entrada das povoações). Da observação das turbo-rotundas em funcionamento nos Países Baixos em 2008, resulta uma tendência (cerca de 76%) para a sua utilização em meios interurbanos ou de transição (CROW, 2008).

Nas suas diferentes formas, é possível otimizar o *layout* às condições prevalecentes da procura de tráfego (Figura 3.7).

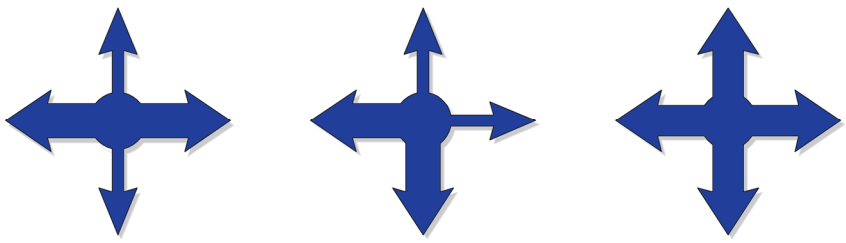


Figura 3.7 - Fluxos dominantes que condicionam o *layout* da turbo-rotunda (Fortuijn, 2007)

A figura anterior apresenta os três tipos de repartição de tráfego que melhor se adapta ao funcionamento de uma turbo-rotunda, onde o traço largo representa os fluxos dominantes. O primeiro caso representa a situação típica de uma intersecção entre duas vias hierarquicamente diferenciadas, sendo um exemplo característico a intersecção entre uma Estrada Nacional (EN) e um Caminho Municipal (CM). Em qualquer uma das situações referidas, é fundamental determinar a direção da corrente de tráfego predominante na intersecção, já que será este o critério de seleção para a escolha do *layout* geométrico mais adequado da turbo-rotunda.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste capítulo ficaram evidenciadas as vantagens e debilidades das turbo-rotundas relativamente às rotundas convencionais. A experiência internacional, assente no desenvolvimento de investigação científica, comprova benefícios evidentes ao nível da segurança rodoviária, com obtenção de níveis de segurança próximos dos associados a rotundas convencionais de uma só via. Já ao nível da capacidade as conclusões não são consensuais, registando-se mesmo resultados controversos. Os trabalhos mais recentes desenvolvidos com base em microssimulação parecem no entanto apontar para benefícios diferenciados consoante a tipologia geométrica e a matriz de tráfego adotadas. Estes resultados evidenciam a importância associada à seleção do *layout* mais adequado aos níveis de procura de tráfego registados.

4. DEFINIÇÃO DE REGRAS GERAIS DE CONCEÇÃO

4.1 REQUISITOS FUNDAMENTAIS E COMPLEMENTARES

Na conceção geométrica de uma intersecção giratória, identificam-se quatro requisitos considerados obrigatórios para que esta possa ser classificada como uma turbo-rotunda (CROW, 2008):

1) Em pelo menos dois ramos de entrada no anel (ou uma no caso de turbo-rotundas com três ramos), o veículo perder a prioridade face a duas vias de circulação do anel - exigência de capacidade;
2) As vias de circulação no anel, na confluência de cada ramo de entrada serem no máximo duas - exigência de segurança;
3) A impossibilidade física de se praticarem movimentos de entrecruzamento no interior do anel - exigência de segurança;
4) A espiral desenvolver-se do interior para o exterior de forma contínua - exigência de comodidade.

A estas exigências acrescem duas características complementares que não sendo de carácter obrigatório, estão presentes na generalidade das soluções de base:

5) Os ramos de saída associados ao fluxo dominante estarem dotados de duas vias de circulação - exigência de capacidade;
6) Em cada quadrante do anel, existir um ponto onde o condutor pode optar por sair ou prosseguir o movimento circulatório.

Estes requisitos admitem múltiplas variantes geométricas. A designação genérica “turbo-rotunda” surgiu como forma do autor do conceito identificar uma dessas variantes (Fortuijn, 2009). A massificação de utilização da solução levou à vulgarização da designação por parte dos *media* holandeses, e passou a encerrar em si todas as variantes que cumprem os requisitos referidos. Essa variante inicial é atualmente denominada de Standard.

4.2 TIPOLOGIAS BASE E DOMÍNIO PRIVILEGIADO DE APLICAÇÃO

A escolha da tipologia geométrica que melhor se adequa às características de uma determinada intersecção obedece a uma análise das especificidades da procura de tráfego, da sua repartição direcional (viragem à esquerda, viragem à direita e ida em frente) e em que medida essa

distribuição induz variações à configuração base, designadamente no número de vias com que cada um dos ramos deve ser dotado. Essa escolha é sustentada numa análise multicritério onde são avaliados os seguintes fatores (MVW, 2009):

- Grau de saturação - procurar garantir níveis de capacidade adequados para responder ao tráfego que procura a intersecção, e uma reserva de capacidade que permita acomodar o aumento do volume de tráfego ao longo da vida útil da infraestrutura. A norma holandesa (CROW, 2008) preconiza um grau de saturação de 80% para um horizonte de projeto de 15 anos;
- Tempo de espera médio - procurar minimizar o atraso resultante da intersecção associada aos veículos junto às entradas no anel. A mesma norma (CROW, 2008) prescreve intervalos entre os 5 e os 32 segundos para os ramos associados ao fluxo dominante e 50 segundos para os fluxos secundários;
- Condicionamento de espaço - na medida em que a diferentes dimensões do anel, estão associadas distintas áreas de implantação. Desta forma a área circundante poderá impor fortes condicionantes ao desenvolvimento da solução geométrica sobretudo se apresentar características de matriz urbana consolidada;
- Análise custo/benefício - na procura de um equilíbrio entre uma solução com dimensionamento adequado à procura de tráfego e o custo de construção que lhe está associada, onde se inclui a edificação da infraestrutura, eventuais expropriações de terrenos circundantes e reposição de serviços afetados.

A documentação de referência destaca os cinco *layouts* teóricos principais infra mencionados, onde se assinala para cada um a respetiva designação anglo-saxónica e original. As Figuras 4.1 a 4.5 ilustram essas configurações geométricas, assim como as características de tráfego que conduzem à sua escolha, designadamente:

- O fluxo dominante, representado pelo traço mais largo do diagrama, corresponde aos fluxos de tráfego predominantes na intersecção;
- A caracterização das entradas/saídas, em resultado do fluxo de tráfego dominante e da repartição do mesmo nas várias direções;
- A distribuição de tráfego, onde as setas azuis caracterizam a direção mais solicitada em cada um dos ramos de entrada.

4.2.1 STANDARD (*STANDARD / TURBOROTONDE*)

Esta tipologia caracteriza-se por dispor de dois ramos materializados por vias de entrada e de saída duplas alinhados com o fluxo dominante, e dois ramos com vias de entrada duplas e de saída simples, alinhados com o fluxo secundário. Adequa-se a uma intersecção entre duas correntes de tráfego hierarquicamente diferenciadas, onde o fluxo secundário tenha uma expressão ligeiramente inferior ao dominante (Fortuijn, 2011).

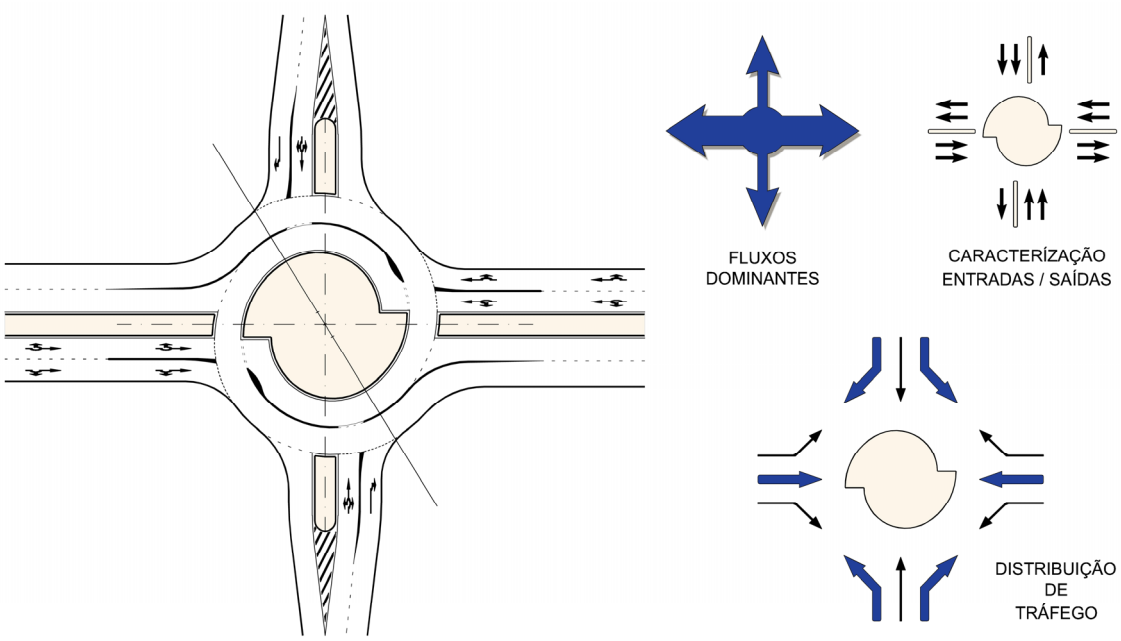


Figura 4.1 - Tipologia geométrica Standard

4.2.2 OVAL (*EGG / EIROTONDE*)

Esta tipologia caracteriza-se por dispor de dois ramos materializados por vias de entrada e de saída duplas alinhados com o fluxo dominante e dois ramos com vias de entrada e de saída simples, alinhados com o fluxo secundário. Adequa-se a uma intersecção entre duas correntes de tráfego hierarquicamente diferenciadas, onde o fluxo secundário tenha uma expressão muito reduzida face ao dominante (Fortuijn, 2011).

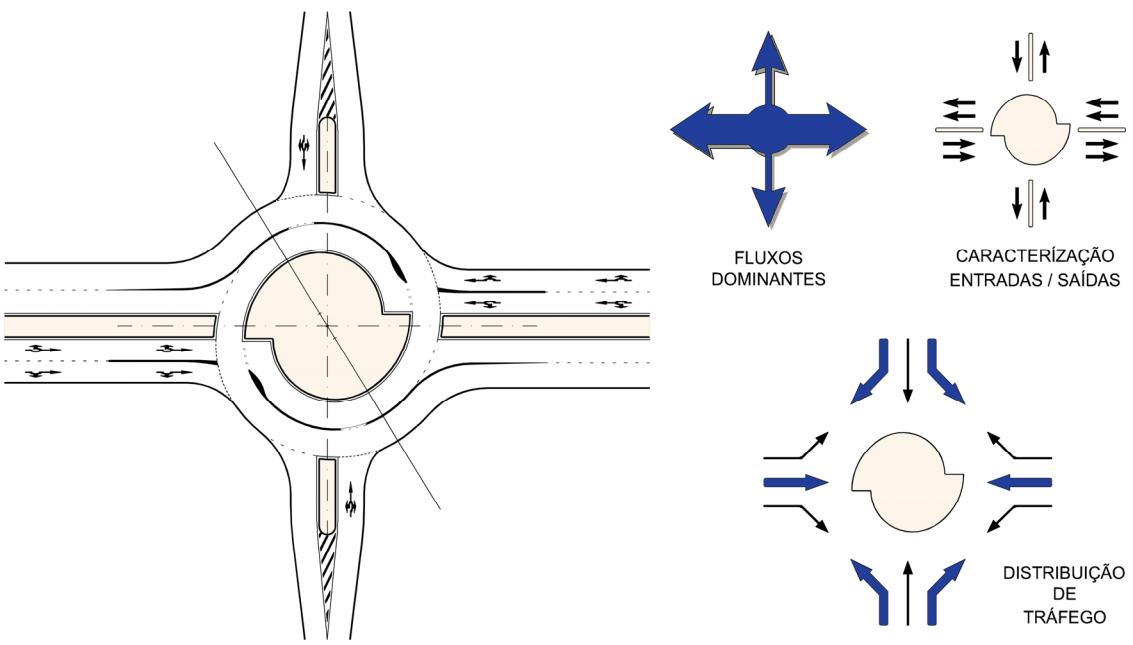


Figura 4.2 - Tipologia geométrica Oval

4.2.3 JOELHO (*KNEE / KNIEROTONDE*)

Esta tipologia caracteriza-se por dispor de uma via segregada de viragem à direita alinhada com o fluxo dominante, como forma de maximizar a capacidade da infraestrutura nessa direção, adequando-se assim a uma intersecção onde a maioria dos movimentos de atravessamento se caracteriza por viragens à direita e esquerda (Fortuijn, 2011).

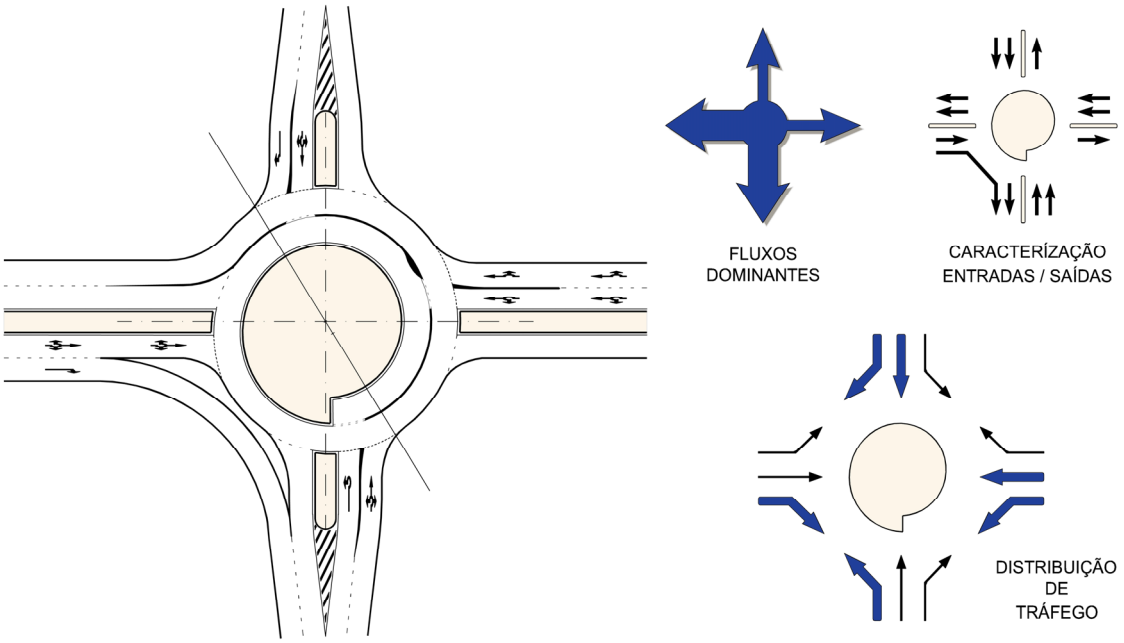


Figura 4.3 - Tipologia geométrica Joelho

4.2.4 ESPIRAL (*SPIRAL / SPIRAALROTONDE*)

Esta tipologia caracteriza-se por dispor de dois ramos materializados por vias de entrada e de saída duplas alinhados com o fluxo dominante, e dois ramos com vias de entrada triplas e de saída simples, alinhados com o fluxo secundário. Adequa-se a uma intersecção entre um fluxo de tráfego elevado a seguir em frente (fluxo dominante), e outro caracterizado sobretudo por movimentos de viragem à esquerda e à direita (fluxo secundário). Devido à tipologia das entradas e saídas é incompatível com movimentos pendulares (Fortuijn, 2011).

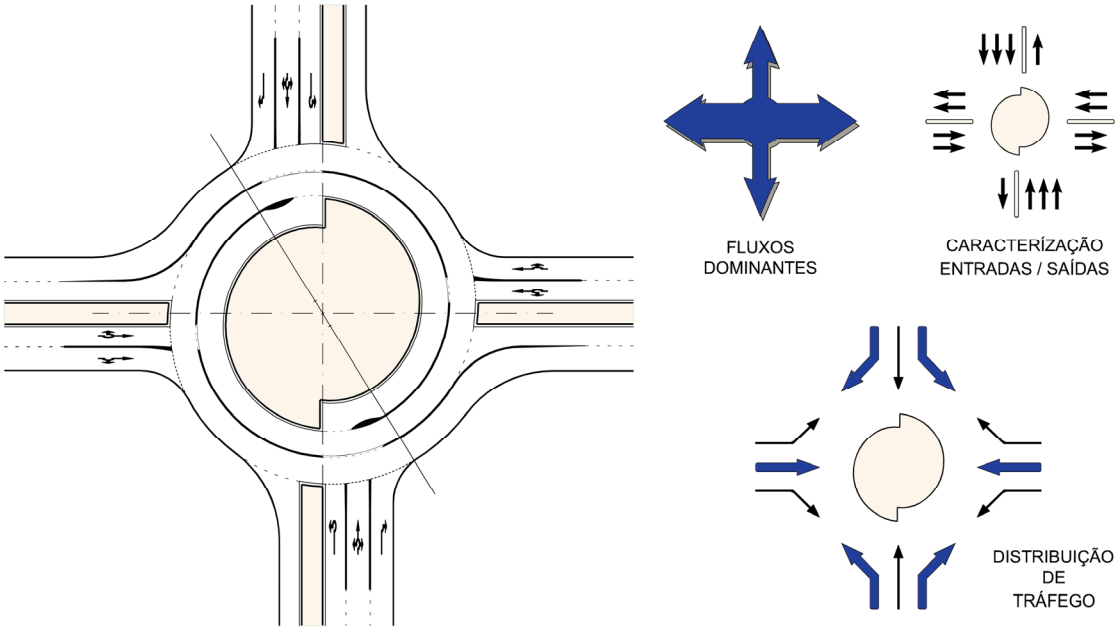


Figura 4.4 - Tipologia geométrica Espiral

4.2.5 ROTOR (*ROTOR / ROTORROTONDE*)

Esta tipologia caracteriza-se por todos os ramos disporem de vias de entrada triplas e de saída duplas, adequando-se assim a uma intersecção entre duas correntes de tráfego elevado e equivalente (Fortuijn, 2011).

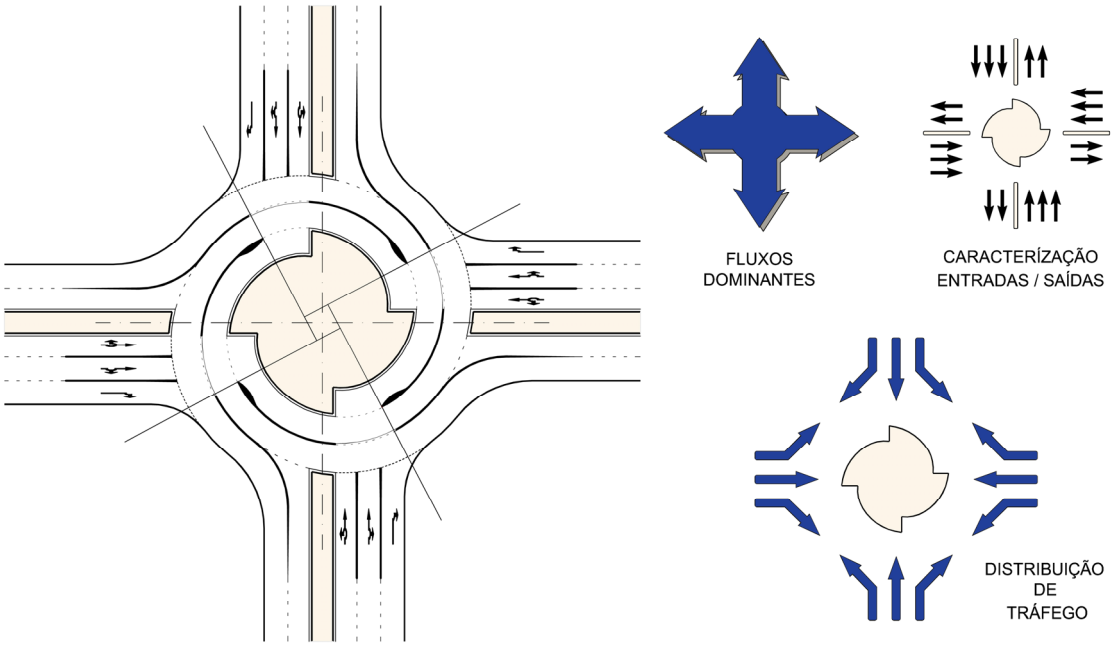


Figura 4.5 - Tipologia geométrica Rotor

4.2.6 OUTRAS SOLUÇÕES

Embora não abordadas nesta dissertação, identificam-se outras configurações de soluções mencionadas na documentação de referência (CROW, 2008):

- Turbo-rotunda Parcial (*Partiële turborotonde*), é uma turbo-rotunda de tipologia Standard ou Oval, em que todos os ramos têm uma via de saída única, não cumprindo assim o requisito complementar nº 5, conforme ilustrado na Figura 4.6_a.
- Turbo-rotunda Dupla (Turbokluifrotonde), constituída por duas turbo-rotundas simples conectadas entre si por uma via bidirecional, com finalidade semelhante à da rotunda dupla tradicional, conforme ilustrado na Figura 4.6_b.
- Turbo-rotunda Réplica (*Look-a-like*), de aspeto análogo a uma turbo-rotunda autêntica (ver Figura 4.6_c), mas sem atender a um ou mais requisitos fundamentais indicados anteriormente. O exemplo mais frequente prende-se com a utilização de marcas rodoviárias em substituição do separador físico no anel de circulação, não cumprindo assim o terceiro requisito fundamental.
- Turbo-rotunda de elevada capacidade (*Turboverkeersplein)*, baseada na tipologia Rotor, em que cada ramo de entrada apresenta até seis vias semaforizadas à entrada do anel, com capacidade estimada de 11000 a 12000 veículos por hora, e diâmetro exterior superior a 100 metros, conforme ilustrado na Figura 4.6_d.

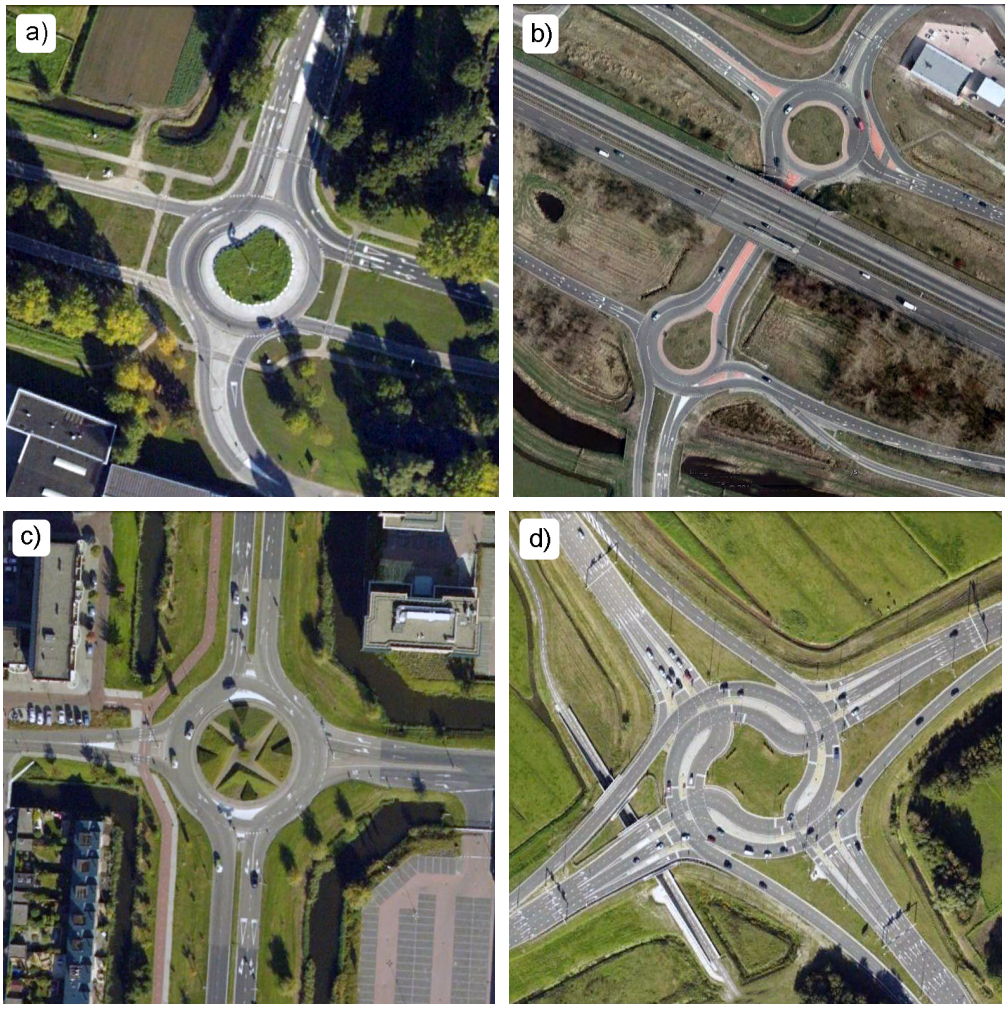


Figura 4.6 - Turbo-rotunda (a) Parcial / (b) Dupla / (c) Réplica / (d) Elevada Capacidade (*Google Earth*, 2012)

A tipologia Rotor, apesar de cumprir todos os requisitos fundamentais e complementares que a classifica como turbo-rotunda, é à data um conceito meramente teórico e académico, desconhecendo-se a sua aplicação prática. Assim, optou-se por limitar o objeto de estudo desta dissertação às configurações com aplicações práticas e cujo desempenho possa ser comprovado pela experiência e observação real, nomeadamente as tipologias Standard, Oval, Joelho e Espiral.

O gráfico da Figura 4.7 ilustra a evolução da aplicação de cada uma destas tipologias de configurações, na rede viária dos Países Baixos, entre o início do ano 2000 e Abril de 2012 (CROW, 2008). São contabilizadas para cada configuração geométrica, ambas as variantes de três e quatro ramos.

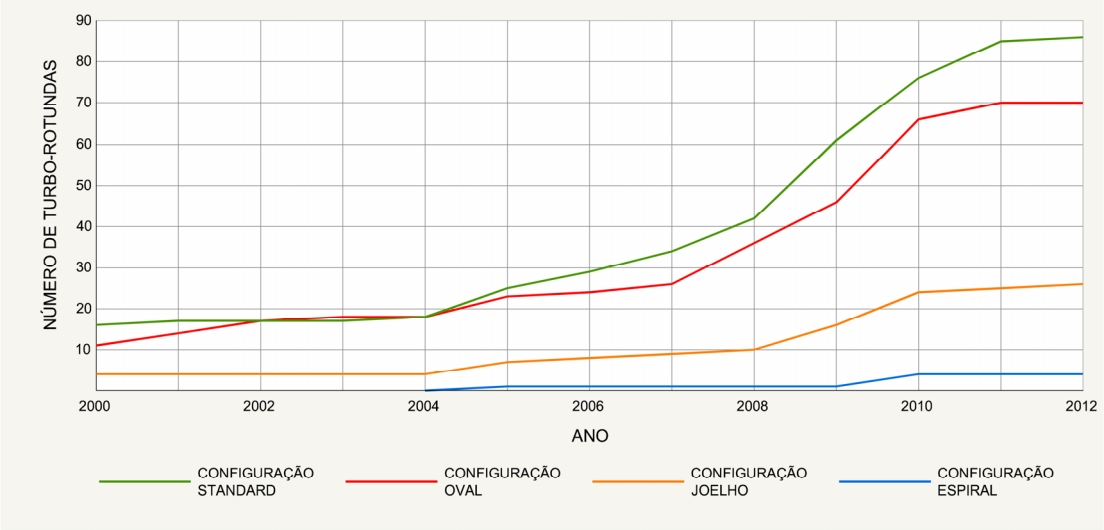


Figura 4.7 - Evolução temporal do uso da turbo-rotunda, segregada por tipologia geométrica nos Países Baixos

Da figura anterior conclui-se que existiu um crescimento acentuado na utilização desta solução giratória a partir de 2004, com destaque para as tipologias Standard e Oval, que representam atualmente cerca de 84% das turbo-rotundas em funcionamento na rede viária daquele país. A tipologia Espiral é a menos frequente, tendo a primeira unidade entrado em funcionamento no ano de 2005, na periferia da cidade de Eindhoven. Existem atualmente quatro turbo-rotundas com essa configuração.

4.3 CONCEÇÃO GEOMÉTRICA

O processo de conceção geométrica inicia-se com a escolha da configuração mais adequada às exigências da procura de tráfego (analisadas anteriormente), a partir da qual são definidas outras exigências de base que irão determinar a capacidade, a velocidade de atravessamento, o conforto de condução e a segurança rodoviária inerentes à solução. Importa ainda definir estas exigências de base (CROW, 2008):

- As características do veículo de projeto;
- O posicionamento do eixo de translação e do turbo-bloco;
- As características geométricas a atribuir às vias no anel de circulação e na sua ligação com os ramos de entrada/saída.

4.3.1 VEÍCULO DE PROJETO

Para o desenvolvimento da solução geométrica, importa definir previamente as características do veículo de projeto uma vez que este determina as exigências de operacionalidade e, em particular, a faixa de ocupação mínima nos movimentos de viragem. Para a definição das características geométricas das turbo-rotundas, o MVW (2009) preconiza que as vias que compõe a espiral do canal de circulação apresentem largura e raio de curvatura tais, que garantam a circunscrição do veículo de projeto, definido como um conjunto trator-semirreboque com 16,50 metros de comprimento quando efetua uma manobra crítica correspondente ao movimento de rotação de 270 graus em torno do anel. As características do veículo de projeto são consentâneas com o enquadramento legal português e europeu, que através da Portaria nº 960/2000 e da Diretiva Europeia 96/53/CE respetivamente, enquadram a dimensão máxima de veículos motorizados, limitando-a para "*conjuntos veículo trator-semirreboque de três ou mais eixos*" a 16,50 metros. A Figura 4.8 ilustra a manobra crítica de viragem numa turbo-rotunda pelo veículo de projeto.

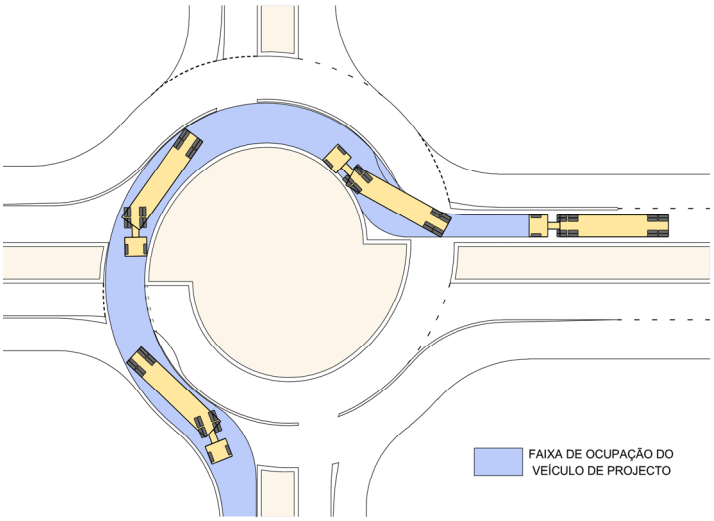


Figura 4.8 - Faixa de ocupação na manobra crítica

De forma a garantir as condições de operacionalidade da infraestrutura face a veículos cujas dimensões sejam superiores às definidas para o veículo de projeto, o anel de circulação pode ser provido de sobrelarguras materializadas por orlas revestidas de material irregular que torne suficientemente desincentivador a sua utilização por parte de veículos ligeiros - Orlas Galgáveis (ver Subcapítulo 4.4).

4.3.2 TURBO-BLOCO

A principal característica que distingue a turbo-rotunda da rotunda tradicional com múltiplas vias é a trajetória espiral assumida pelas vias no anel de circulação ao invés dos habituais circuitos concêntricos. O processo de construção geométrica dos canais de circulação é descrito por Fortuijn

(2009) como a geração de uma trajetória teórica de um veículo, através da mudança do centro das circunferências que representam sucessivos segmentos da via, ao longo de um eixo, constituindo-se o conjunto desses segmentos circulares como o canal de circulação espiroide. Assim, o anel de circulação de uma turbo-rotunda tem como base geométrica uma espiral aritmética (também designada "de Arquimedes") que se caracteriza por uma série de arcos de circunferência de diferentes centros e raios, concordantes nos pontos de tangência situados sobre uma reta – o eixo de translação. Ao aumento do raio corresponde uma translação do seu centro numa distância tal (ΔR), que permita a continuidade da curva (ver Figura 4.9).

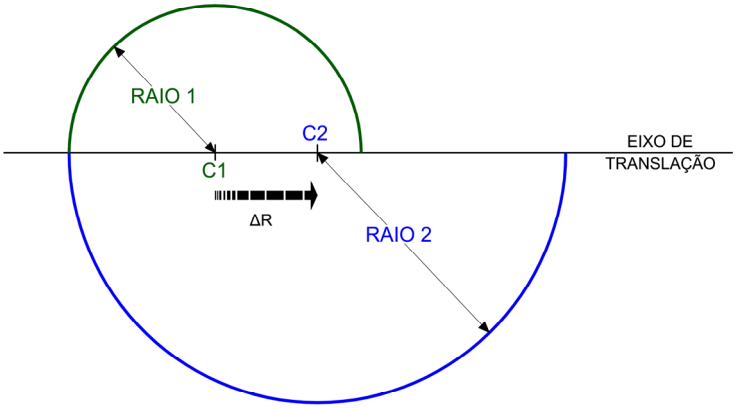


Figura 4.9 - Espiral aritmética (adaptado de Giuffrè et al., 2009)

A forma característica do canal de circulação é dada pelo desenvolvimento simultâneo de duas espirais aritméticas, cada uma com três arcos de circunferência situados acima e abaixo do eixo de translação com o seu centro (C1 e C2) respetivamente à esquerda e à direita do centro geométrico (CG) da intersecção (Figura 4.10).

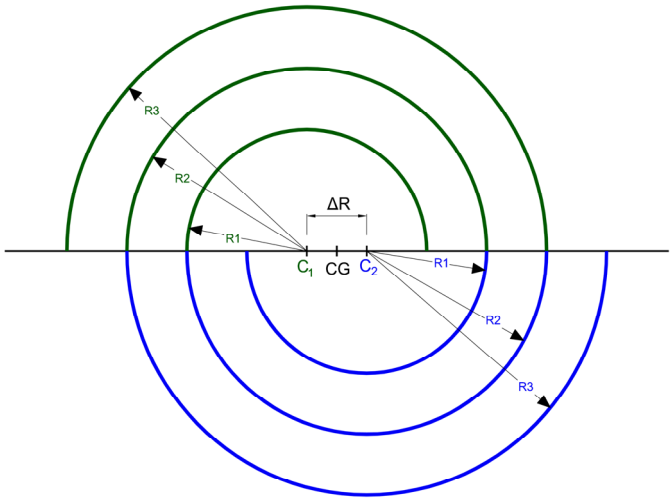


Figura 4.10 - Construção geométrica da espiral dupla (adaptado de Giuffrè et al., 2009)

De acordo com Giuffrè (et al., 2009), esta estrutura geométrica é obtida mediante o seguinte processo:

1. Seleção da distância entre os arcos (∆R), ou seja, a diferença entre o raio de curvatura de arcos consecutivos, cujo valor será adotado para o intervalo entre C_1 e C_2, correspondente à distância percorrida na translação do centro dos arcos (∆R);
2. Posicionamento simétrico dos pontos C_1 e C_2 relativamente ao centro geométrico (CG) do eixo de translação;
3. Atribuição de valor a R_1 correspondente ao menor arco de curvatura, com os restantes a serem determinados através da relação ($R_i = R_{i-1} + \Delta R$, ou seja $R_2 = R_1+\Delta R$; $R_3 = R_2+\Delta R$, …).

Uma vez que a largura das vias no canal de circulação está diretamente relacionada com a distância percorrida pelo centro dos arcos (∆R) entre os pontos (C1 e C2), importa definir de que forma essa distância de translação se vai refletir na construção geométrica da turbo-rotunda, e de que forma influencia as características dos fluxos de tráfego que a atravessam.

Se por um lado a adoção de raios de curvatura e larguras de via de pequena dimensão, limita as velocidades de atravessamento e conduz a uma acalmia generalizada do tráfego (FHWA, 2000), essa diminuição deverá ser prudente, sob pena da turbo-rotunda se tornar inoperacional para o veículo de projeto, cuja faixa de ocupação é tanto maior quanto menor for o raio de curvatura da via, e logo, quanto mais próximo da ilha central este circule. Estes dois conceitos são conciliáveis através de introdução de uma sobrelargura na via interior da espiral que diminui gradualmente até ser suprimida, à medida que esta se desenvolve para o exterior.

Essa sobrelargura é construída com base em dois intervalos de translação de amplitudes distintas (∆v e ∆u) equidistantes do centro geométrico da intersecção (CG), e de valor máximo igual à diferença aritmética entre esses intervalos (∆v - ∆u = Sobrelargura Máxima), garantindo uma variação fluida ao longo do circuito entre as diferentes larguras transversais.

O conjunto dos diversos segmentos circulares e respetivo eixo de translação reunidos e representados num diagrama que Fortuijn e Harte (1997) intitularam de “turbo-bloco”, configura-se como um instrumento fundamental na construção geométrica de uma turbo-rotunda (Figura 4.11).

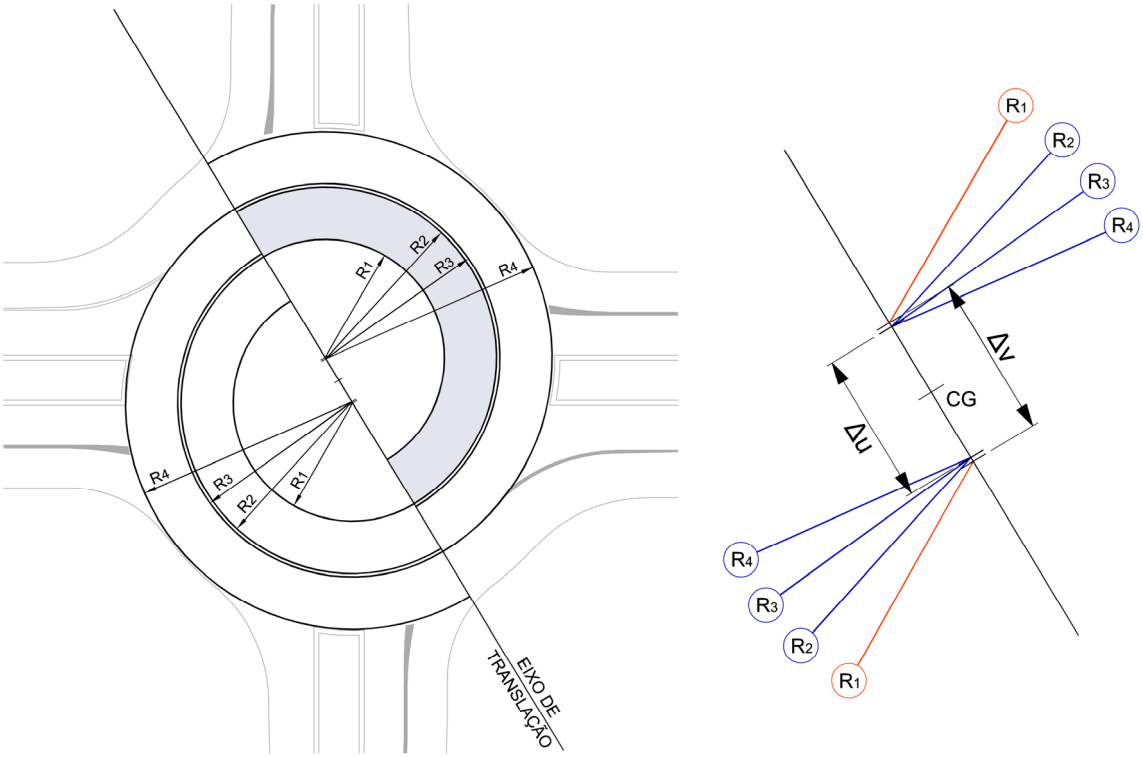


Figura 4.11 - Turbo-bloco das tipologias Standard, Oval e Espiral (adaptado de MVW, 2009)

O turbo-bloco da figura anterior caracteriza-se por incorporar um eixo de translação e quatro centros de rotação de onde resultam oito arcos de circunferência, e é a base geométrica de turbo-rotundas de tipologia Standard, Oval e Espiral. É igualmente ilustrado o pormenor da forma como os dois intervalos de translação contribuem para a geometria do turbo-bloco, com os arcos de circunferência cujo raio é igual a R_1 (representado no pormenor a cor vermelha) a serem criados a partir dos centros associados ao maior intervalo de translação (Δv), e os arcos cujos raios de curvaturas são iguais a R_2, R_3 e R_4 (representados no pormenor a cor azul) com o centro de rotação associado ao intervalo de menor amplitude (Δu).

Mediante o *layout* geométrico pretendido, este diagrama assumirá outras configurações na medida em que as características do seu desenvolvimento lhe são conferidas pelo número de eixos de translação e de centros de rotação. Fortuijn (2009) propõe a distinção dos vários turbo-blocos de acordo com a sua rotação elementar, ou seja, o ângulo de rotação necessário para que uma via de circulação realize um movimento de translação igual à sua própria largura, e assim surja uma nova via no canal de circulação. Esses ângulos, fundamentais no dimensionamento do canal de circulação, assim como as restantes características inerentes a cada tipologia, são apresentados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Características dos turbo-blocos

TIPOLOGIA	EIXOS DE TRANSLAÇÃO	CENTROS DE ROTAÇÃO	ROTAÇÃO ELEMENTAR
Standard	1	4	180º
Oval	1	4	180º
Joelho	1	3	360º
Espiral	1	4	180º

Do quadro anterior conclui-se que as tipologias Standard, Oval e Espiral partilham na sua génese o mesmo turbo-bloco já descrito, cuja característica distintiva é promover o aparecimento de uma nova via no anel a cada 180 graus de rotação. Essa rotação elementar é representada por uma banda azul na planta da Figura 4.11.

Já o turbo-bloco associado à tipologia Joelho caracteriza-se por incorporar um eixo de translação, dois intervalos de rotação e três centros de rotação. Aqui os dois intervalos apresentam dimensões distintas ($\Delta v/2$ e $\Delta u/2$) mas partilham o limite lateral que assenta sobre o centro geométrico da intersecção. Enquanto a obtenção dos segmentos curvos de raios R_1 a R_4 é feita da forma semelhante ao turbo-bloco anterior, os segmentos com raios R_5 a R_8 partilham o mesmo centro de rotação e a sua dimensão radial será a necessária para que fique garantida a continuidade da espiral sobre o eixo de translação. Daqui resultam três centros de rotação e oito arcos de circunferência que promovem o aparecimento de uma nova via no anel a cada 360 graus de rotação, conforme ilustrado na Figura 4.12.

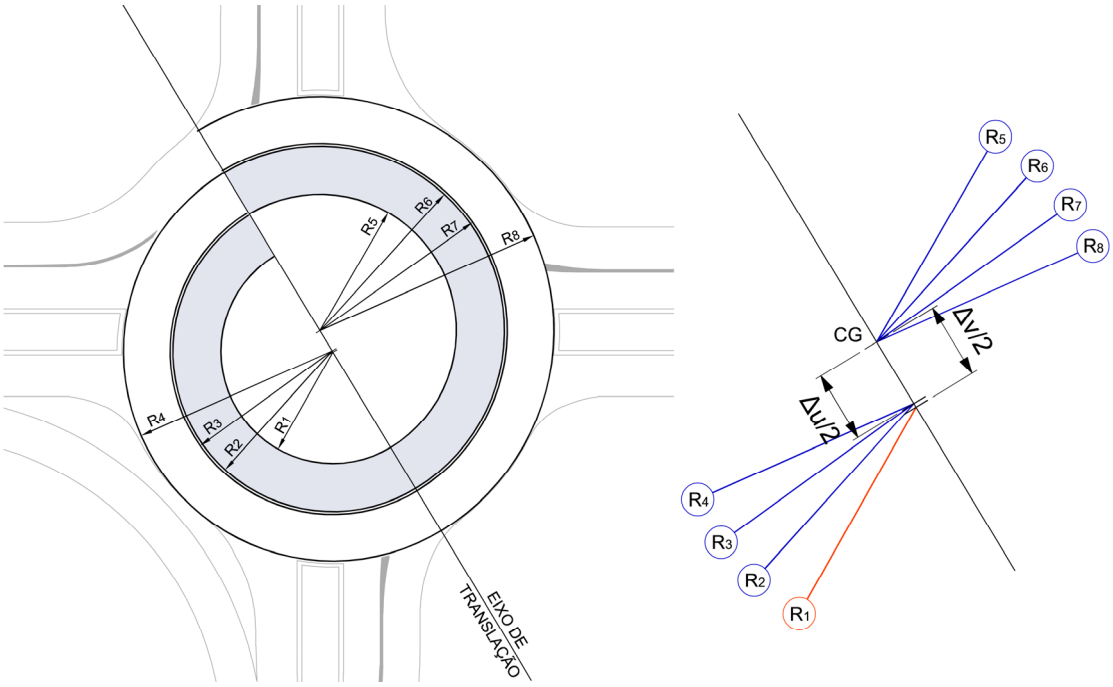


Figura 4.12 - Turbo-bloco da tipologia Joelho (adaptado do MVW, 2009)

4.3.3 POSICIONAMENTO DO EIXO DE TRANSLAÇÃO

A disposição do eixo de translação é fundamental e reflete-se tanto na velocidade de atravessamento dos veículos como na adoção de trajetórias com o mínimo de incómodo, na medida em que a sua disposição correta assegura que em todas as entradas do anel são impostas deflexões da trajetória equivalentes, garantindo simultaneamente velocidades de entrada no canal de circulação reduzidas e uniformes entre si. De acordo com o MVW (2009) da adoção de um ângulo de rotação diferente do ideal resulta que um dos fluxos de tráfego (dominante ou secundário) irá dispor de trajetórias de entrada e saída do anel com menor deflexão que irão induzir à prática de maiores velocidades de atravessamento.

Este procedimento empírico inicia-se com a colocação do eixo de translação sobre o centro geométrico da intersecção (CG), coincidente com os eixos associados ao fluxo dominante da turbo-rotunda. Posteriormente traçam-se num quadrante duas linhas auxiliares (horizontal e vertical) coincidentes com a berma exterior das vias de entrada e saída desse quadrante, cuja distância relativamente ao intradorso das vias exteriores da espiral (A e B) medida sobre as diretrizes dos ramos afluentes, representa a diferença de deflexões associada a cada um dos movimentos de entrada, e traduz a premência de se proceder a ajustamentos na rotação que garantam que essa desigualdade é minimizada ou no limite anulada (quando A=B).

Na Figura 4.13 exemplifica-se o procedimento para uma turbo-rotunda de tipologia Standard, com fluxo dominante na direção Este-Oeste.

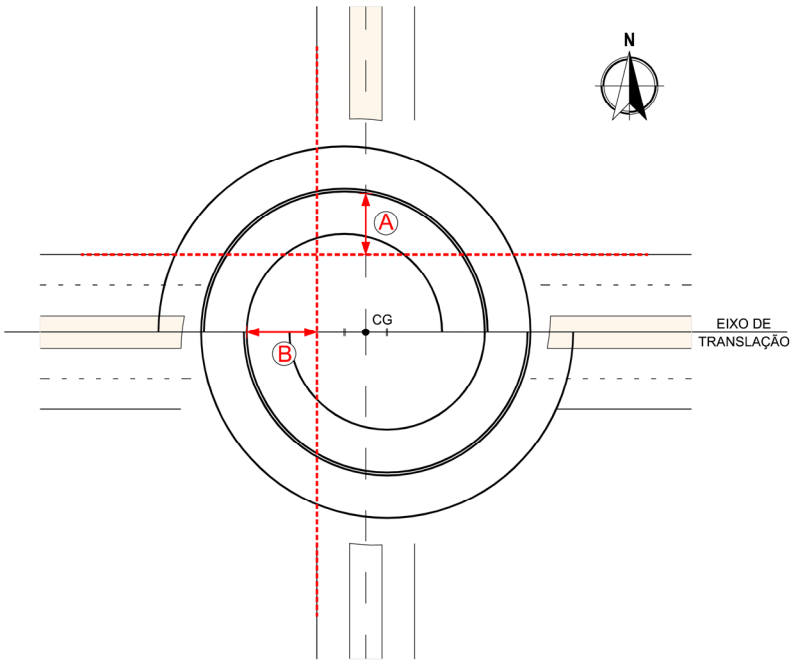


Figura 4.13 - Posicionamento do eixo de translação - Primeira iteração (adaptado de Fortuijn, 2007)

Nesta circunstância, fez-se a primeira aproximação com o turbo-bloco sem qualquer rotação, de onde resulta uma solução onde a distância A é inferior à distância B em cerca de 1 metro, e cujo efeito prático seria a obtenção de canais de entrada com maior raio de deflexão da direção Norte-Sul, e velocidades médias superiores nas entradas e saídas dos ramos Este e Oeste.

A solução otimizada deverá passar por um processo iterativo de procura do valor adequado de rotação que minimize ou mesmo anule o diferencial entre A e B. De acordo com CROW (2008), múltiplos estudos relativos a turbo-rotundas mostraram que a otimização do *layout* ocorre perto dos 45 graus de rotação no sentido horário (ou no sentido anti-horário caso se trate de uma turbo-rotunda com três ramos). A Figura 4.14 mostra o posicionamento ideal do eixo de translação.

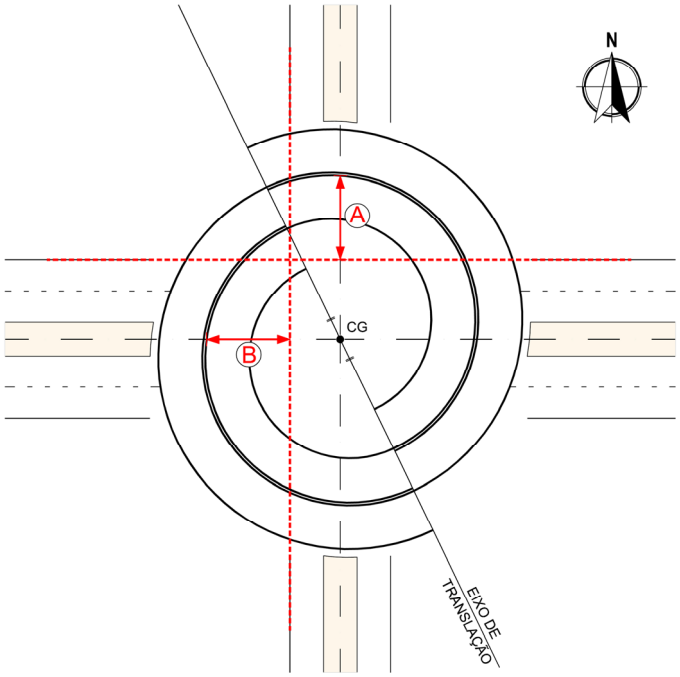


Figura 4.14 - Posicionamento do eixo de translação - Iteração final (adaptado de Fortuijn, 2007)

4.3.4 RAIOS DE ENTRADA E SAÍDA

Tal como nas rotundas tradicionais, o raio de entrada assume um peso significativo na segurança rodoviária, no conforto de condução e na capacidade da intersecção, na medida em que condiciona a velocidade de negociação e atravessamento da infraestrutura. Raios de valor elevado podem induzir a prática de velocidades inapropriadas e aqueles com valor reduzido condicionar a operacionalidade dos veículos pesados (Bastos Silva e Seco, 2005). No domínio das turbo-rotundas, para além das questões referidas, as concordâncias entre os ramos afluentes e o canal de circulação, validam a rotação introduzida anteriormente do turbo-bloco, ao garantir que os pontos de tangência se localizam sobre o eixo de translação ou para além deste, conforme

exemplificado a vermelho na Figura 4.15 para a tipologia Standard. Se tal não ocorrer torna-se necessário proceder a novo ajuste na rotação do turbo-bloco.

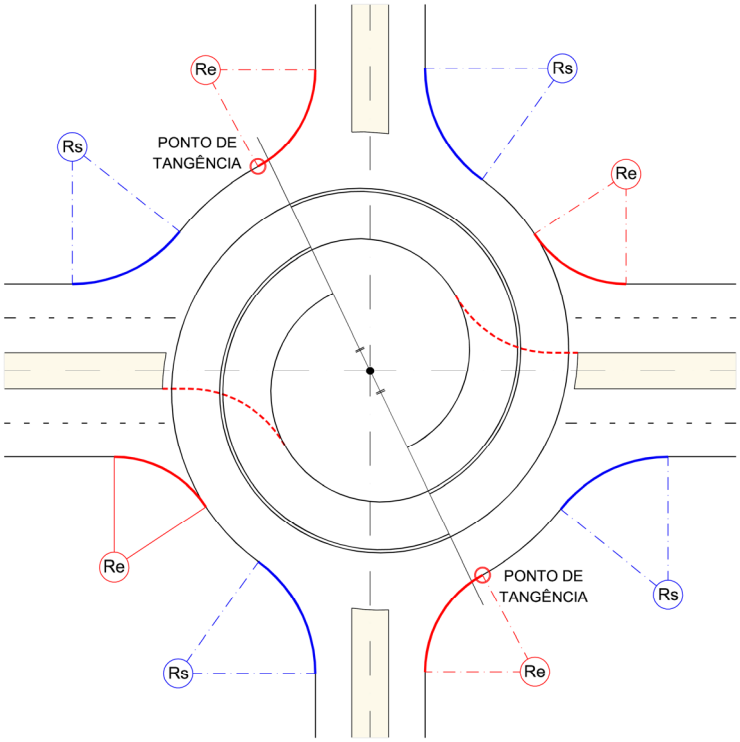


Figura 4.15 - Raios de entrada e saída (adaptado de CROW, 2008)

A definição da gama de variação a atribuir ao raio de entrada (Re), depende da faixa de ocupação do veículo de projeto, nunca devendo ser inferior a 12 metros (CROW, 2008). Este valor pode ser aumentado em função do volume de tráfego pesado na intersecção, sem contudo ultrapassar o raio de saída (Rs). Estes últimos, representados a azul na Figura 4.15, segundo o mesmo documento devem assumir valores superiores a 15 metros e inferiores ao maior dos arcos que constituem o turbo-bloco (R_4), ou seja 30 metros (ou de 35 na tipologia Espiral).

Neste âmbito, as disposições normativas portuguesas (InIR, 2012a) recomendam para rotundas tradicionais com uma via no anel, raios de entrada superiores a 15 metros (idealmente compreendidos entre os 20 e os 30 metros), e raios de saída superiores aos de entrada. Estes valores são de uma forma geral superiores aos preconizados na norma holandesa.

4.3.5 DIMENSIONAMENTO DOS CANAIS DE CIRCULAÇÃO

O desempenho funcional do canal de circulação da turbo-rotunda, cujo perfil transversal tipo é apresentado na Figura 4.16, está diretamente relacionado com as características geométricas que lhe são conferidas através dos múltiplos raios de curvatura e das larguras transversais atribuídas às

vias em espiral, procurando-se obter um equilíbrio entre velocidades de atravessamento e condições de operacionalidade.

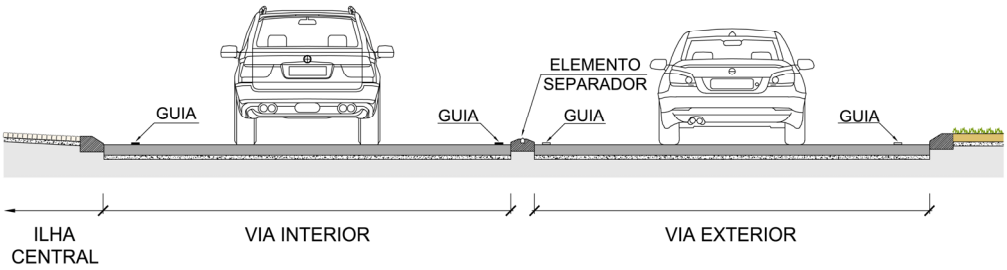


Figura 4.16 - Perfil transversal do anel de circulação (adaptado de MVW, 2009)

Como forma de balizar as dimensões e consequentemente as características das vias de circulação, Tollazzi (2010) propõe as seguintes premissas de base:

- Garantir velocidades de atravessamento inferiores a 40 km/h;
- Assegurar a operacionalidade da turbo-rotunda quando transposta pelo veículo de projeto considerado.

A garantia destas premissas passa por salvaguardar a seleção adequada dos raios de curvatura e da largura das vias, e da forma como essas duas grandezas se relacionam entre si e como se refletem na construção geométrica do canal de circulação da turbo-rotunda. Na Figura 4.17 identificam-se num perfil transversal tipo, as principais dimensões que o definem:

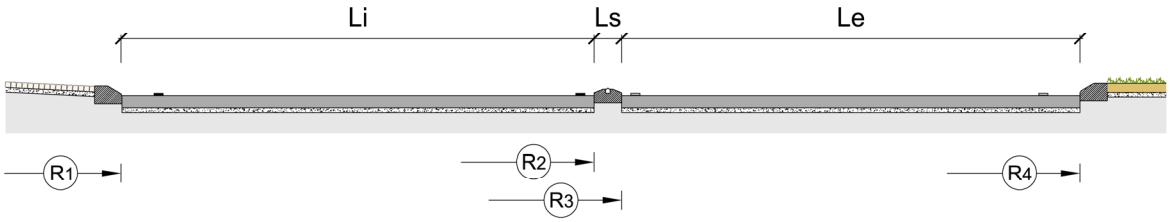


Figura 4.17 - Dimensões do anel de circulação (adaptado de MVW, 2009)

Onde:
Li – Largura da via de circulação interior da espiral;
Ls – Largura do separador;
Le – Largura da via de circulação exterior da espiral;
R_1 – Raio de curvatura do intradorso da via interior;
R_2 – Raio de curvatura do extradorso da via interior;
R_3 – Raio de curvatura do intradorso da via exterior;
R_4 – Raio de curvatura do extradorso da via exterior.

O processo de construção geométrica inicia-se com a definição das dimensões dos elementos básicos, designadamente o raio do intradorso da via interior ou da ilha central (R_1), a largura das vias de circulação interior e exterior (Li e Le), do separador (Ls) (ver Figura 4.18).

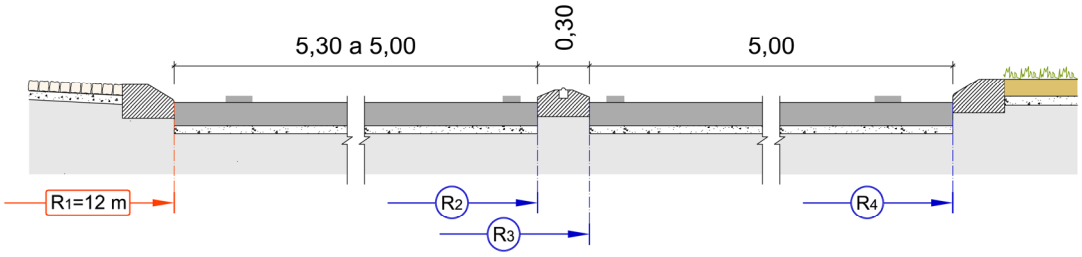


Figura 4.18 - Larguras características dos elementos infraestruturais do anel de circulação

No exemplo apresentado com R_1 = 12 metros, valor para o qual a velocidade de atravessamento é mínima (MVW, 2009), e um separador com 0,30 metros da largura, a via exterior apresenta uma dimensão transversal de 5,00 metros, e a via interior a mesma dimensão acrescida de uma sobrelargura de 0,30 metros. Devido à especificidade do canal das turbo-rotundas face às rotundas tradicionais, a sobrelargura introduzida na via interior do anel é necessariamente variável entre 5,30 metros na origem junto ao eixo de translação, e 5,00 metros no ponto onde, ao ter completado um movimento de translação igual à sua própria largura, assume a dimensão da via exterior (ver Quadro 4.1). Daqui resulta uma via interior com largura média de 5,15 metros.

No Quadro 4.2 apresenta-se o processo de cálculo necessário à obtenção das restantes dimensões radiais. Destaca-se que estes cálculos contabilizam a via interior na medida da sua largura média.

Quadro 4.2 - Dimensionamento das vias - Tipologias Standard, Oval e Joelho (MVW, 2009)

DESIGNAÇÃO	DIMENSÃO (m)	OBSERVAÇÕES
Raio da Ilha Central (R_1)	12,00	
Largura da Via Interior (Li)	5,30 a 5,00	
Largura do Separador (Ls)	0,30	
Largura da Via Exterior (Le)	5,00	
R_1	12,00	
R_2	12,00 + 5,15 = 17,15	$R_2 = R_1$ + Li (média)
R_3	17,15 + 0,30 = 17,45	$R_3 = R_2$ + Ls
R_4	17,45 + 5,00 = 22,45	$R_4 = R_3$ + Le

Esta metodologia de cálculo é válida e aplicável a quaisquer outros pressupostos dimensionais que se pretenda adotar no *design* geométrico.

Igualmente importantes na definição geométrica dos canais de circulação, são os elementos de marcação horizontal (guias) associados ao canal de circulação, que vão demarcar a separação entra vias circuláveis e bermas adjacentes, definindo a trajetória dos veículos do interior para o exterior da espiral de forma fluida. Assim é necessário assegurar arcos de curvatura cujo raio e amplitude de translação do centro, garantam a existência de guias contínuas e fluidas, desde o interior até ao exterior da espiral.

A amplitude dos intervalos a aplicar sobre o eixo de translação (Δv e Δu), podem ser calculados recorrendo de um perfil transversal como o apresentado na Figura 4.19, quaisquer que sejam as características dimensionais das marcas rodoviárias em estudo. Para este exemplo que partilha as dimensões construtivas do anterior, adotaram-se os espaçamentos preconizados pela norma holandesa de marcas rodoviárias seguida pelo MVW (2009), designadamente bermas com 0,45 metros materializadas por guias de 0,15 metros nos limites interior e exterior da rotunda, e de 0,20 metros materializadas por guias de 0,10 metros junto ao separador. Neste domínio a normativa portuguesa (InIR, 2012c), prescreve que as guias no anel de circulação devem respeitar a dimensão utilizada no ramo de escalão de velocidade mais elevado, variando entre os 0,12 e os 0,15 metros, de onde se conclui que as guias habitualmente utilizadas junto ao separador da turbo-rotunda estão subdimensionadas face à prática portuguesa.

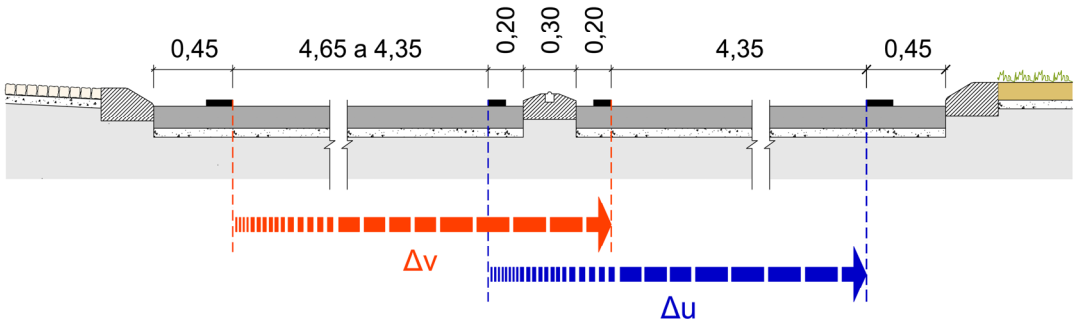


Figura 4.19 - Intervalos de translação - Tipologias Standard, Oval e Joelho

Este perfil permite observar a amplitude dos movimentos de translação das guias ao realizarem uma rotação espiroide de 180 graus, que equivale à rotação elementar associada às tipologias Standard, Oval e Espiral. Verifica-se assim que a guia de intradorso realiza no ponto de sobrelargura máxima, uma transição de 5,35 metros entre a via interior e exterior correspondente à soma da largura útil máxima da via interior (4,65 m) com o separador (0,30 m) e respetivas bermas adjacentes (2 x 0,20 m). A guia de extradorso sofre uma transição de 5,05 metros correspondente à soma do separador e respetivas bermas adjacentes (0,30 m + 0,20 m + 0,20 m) com a largura útil da via exterior (4,35 m). Estes valores correspondem respetivamente ao maior (Δv) e menor (Δu) intervalo de translação.

Por fim, determinam-se as características geométricas das guias através dos seus raios de curvatura, conforme ilustrado na Figura 4.20.

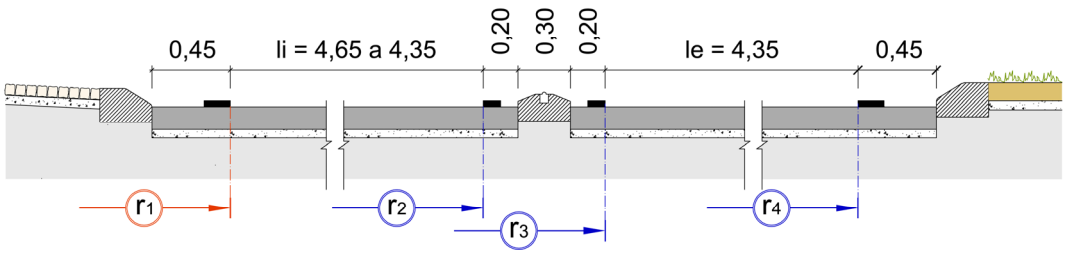


Figura 4.20 - Dimensionamento das guias - Tipologias Standard, Oval e Joelho

Onde:

r_1 – Raio de curvatura da guia de intradorso da via interior;

r_2 – Raio de curvatura da guia de extradorso da via interior;

r_3 – Raio de curvatura da guia de intradorso da via exterior;

r_4 – Raio de curvatura da guia de extradorso da via exterior.

À semelhança do procedimento que determina as dimensões a atribuir aos canais de circulação, as guias cujo raio é igual a r_1 (a vermelho na figura anterior), têm o seu centro associado ao maior intervalo de translação (Δv), e os arcos cujos raios de curvaturas são iguais a r_2, r_3 e r_4 (representados a azul na figura anterior) com o centro de rotação associado ao intervalo de menor amplitude (Δu). No Quadro 4.3 apresenta-se o processo de cálculo que determina essa dimensão radial das diferentes guias.

Quadro 4.3 - Dimensionamento das guias - Tipologias Standard, Oval e Joelho (MVW, 2009)

DESIGNAÇÃO	DIMENSÃO (m)	OBSERVAÇÕES
Raio da Ilha Central (R_1)	12,00	
Largura Útil da Via Interior (li)	4,65 a 4,35	
Largura do Separador (Ls)	0,30	
Largura Útil da Via Exterior (le)	4,35	
r_1	12,00 + 0,45 = 12,45	$r_1 = R_1 + 0,45$
r_2	12,45 + 4,50 = 16,95	$r_2 = r_1 + li$ (média)
r_3	16,95 + 0,70 = 17,65	$r_3 = r_2 + 0,2 + Ls + 0,2$
r_4	17,65 + 4,35 = 22,00	$r_4 = r_3 + le$

Dos valores obtidos nas várias fases do processo de cálculo, resulta o turbo-bloco que agrega os raios de curvatura necessários à definição geométrica do anel de circulação da turbo-rotunda (Figura 4.21).

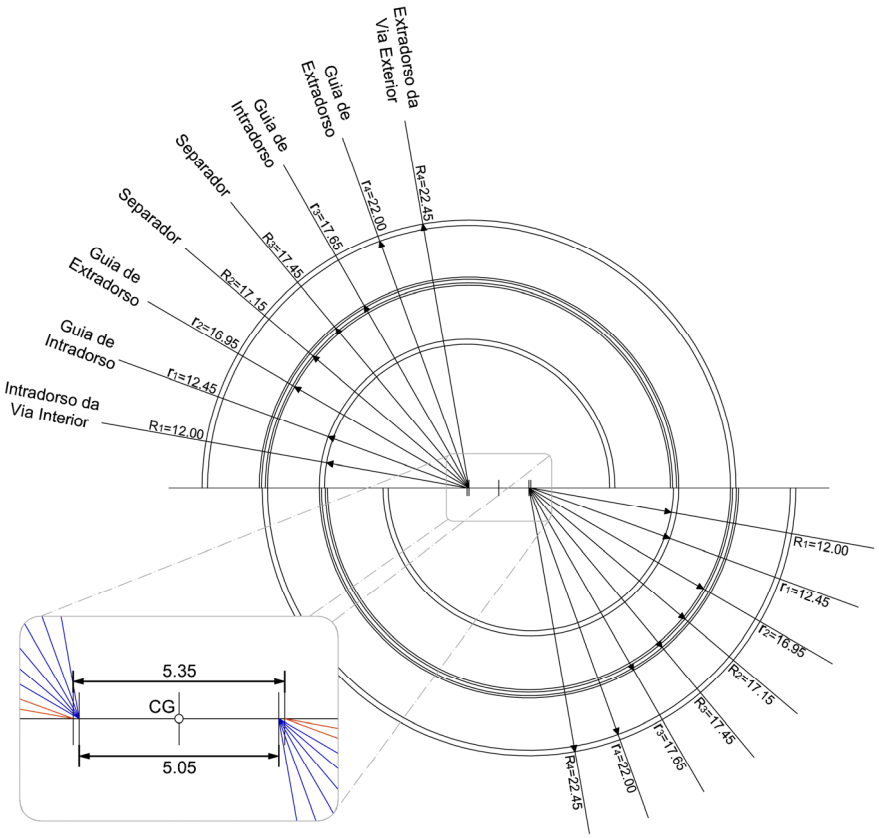


Figura 4.21 - Turbo-bloco - Tipologias Standard e Oval

Quanto ao processo de conceção do turbo-bloco associado à tipologia Joelho, é em tudo idêntico ao anterior mas aplicado apenas a um dos lados do eixo de translação. A restante metade da espiral é obtida com a inserção de arcos concêntricos relativamente ao centro geométrico da intersecção, cujos raios de curvatura (R_5 a R_8 e r_5 a r_8) são os necessários para garantir a continuidade da espiral sobre o eixo de translação (MVW, 2009). A esta tipologia encontra-se ainda associada uma via segregada que maximiza a capacidade da turbo-rotunda na direção dos fluxos dominantes.

A Figura 4.22 ilustra a adaptação do turbo-bloco anterior às características da tipologia Joelho.

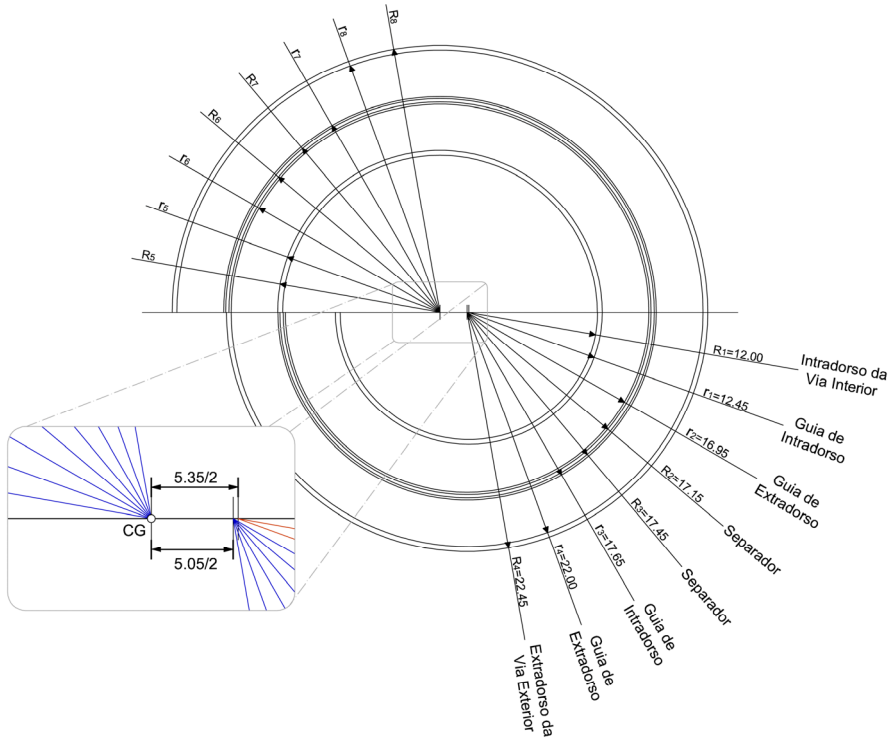


Figura 4.22 - Turbo-bloco - Tipologia Joelho

No domínio da conceção geométrica de turbo-rotundas os documentos de referência são unânimes ao preconizarem uma divisão por classes a que correspondem dimensões exatas, ao invés de adotarem o conceito transversalmente aceite em Portugal para as rotundas tradicionais, que passa pela prescrição de intervalos dimensionais dentro dos quais as soluções podem assumir múltiplas variantes. Assim, as classes dimensionais caracterizadas através do raio da ilha central (R_1) são:

- R_1 = 10,50 metros;
- R_1 = 12 metros;
- R_1 = 15 metros;
- R_1 = 20 metros.

Segundo CROW (2008) qualquer estudo deve iniciar-se pela classe que minimiza a velocidade de atravessamento (R_1=12m), partindo para as classes superiores caso as características e frequência de veículos pesados o imponha. A classe associada a R_1=10,50 metros só deve ser usada excecionalmente em contextos onde os condicionamentos de espaço não permitam a implantação de outra solução.

O Quadro 4.4 sintetiza as dimensões associadas a cada classe dimensional, obtidas mediante procedimento de cálculo análogo ao descrito.

Quadro 4.4 - Dimensões gerais das tipologias Standard, Oval e Joelho (adaptado de CROW, 2008)

PARÂMETRO			DIMENSÕES (m)			
Via Interior	Raio Intradorso	**R1**	**10,50**	**12,00**	**15,00**	**20,00**
	Raio Extradorso	R2	15,85	17,15	20,00	24,90
Via Exterior	Raio Intradorso	R3	16,15	17,45	20,30	25,20
	Raio Extradorso	R4	21,15	22,45	25,20	29,90
Largura Via Interior	Inicial	Li	5,70	5,30	5,10	5,10
	Final	Li	5,00	5,00	4,90	4,70
	Média	Li	5,35	5,15	5,00	4,90
Largura Via Exterior		Le	5,00	5,00	4,90	4,70
Guias Via Interior	Raio Intradorso	r_1	10,95	12,45	15,45	20,45
	Raio Extradorso	r_2	15,65	16,95	19,80	24,70
Guias Via Exterior	Raio Intradorso	r_3	16,35	17,65	20,50	25,40
	Raio Extradorso	r_4	20,70	22,00	24,75	29,45
Largura Útil Via Interior	Inicial	li	5,05	4,65	4,45	4,45
	Final	li	4,35	4,35	4,25	4,05
	Média	li	4,70	4,50	4,35	4,25
Largura Útil Via Exterior		le	4,35	4,35	4,25	4,05
Largura Separador		Ls	0,30			
Maior Intervalo de Translação		Δv	5,75	5,35	5,15	5,15
Menor Intervalo de Translação		Δu	5,05	5,05	4,95	4,75
Velocidade Média de Atravessamento (km/h)			37-41	37-39	38-39	40

Da análise do quadro anterior salientam-se os seguintes aspetos (CROW, 2008):

- Ao aumento do valor de R_1, correspondem canais de circulação cada vez mais estreitos, o que se justifica pela menor deflexão exigida à trajetória do veículo de projeto;
- O raio máximo preconizado para a ilha central (R_1 = 20 m), corresponde à velocidade máxima considerada admissível (ver Figura 3.6 do Capítulo 3);
- A largura útil das vias é baseada na prática holandesa, que determina a adoção de bermas exteriores com 0,45 metros materializadas por guias de 0,15 metros nos limites interior e exterior do anel de circulação, e de 0,20 metros materializadas por guias de 0,10 metros junto ao separador. Quaisquer outras larguras são possíveis, cabendo ajustar as dimensões decorrentes dessa alteração;

- O MVW (2009) associa a cada uma das classes as velocidades de atravessamento indicadas na última linha em forma de intervalo de valores.

No que diz respeito à tipologia Espiral, apesar do seu turbo-bloco manter as características fundamentais dos anteriores, distingue-se desses por dispor de uma terceira via no anel de circulação e pelo disfarce da sobrelargura se realizar ao longo da via central do anel. O Quadro 4.5 apresenta o processo de cálculo para a obtenção das dimensões radiais dos elementos construtivos, sendo a via central contabilizada na medida da sua largura média.

Quadro 4.5 - Dimensionamento das vias - Tipologia Espiral (MVW, 2009)

DESIGNAÇÃO	DIMENSÃO (m)	OBSERVAÇÕES
Raio da Ilha Central (R_1)	12,00	
Largura da Via Interior (Li)	5,30	
Largura do Separador (Ls)	0,30	
Largura da Via Central (Lc)	5,05 a 4,75	
Largura da Via Exterior (Le)	5,00	
R_1	12,00	
R_2	12,00 + 5,30 = 17,30	$R_2 = R_1 + Li$
R_3	17,30 + 0,30 = 17,60	$R_3 = R_2 + Ls$
R_4	17,60 + 4,90 = 22,50	$R_4 = R_3 + Lc$ (média)
R_5	22,50 + 0,30 = 22,80	$R_5 = R_4 + Ls$
R_6	22,80 + 5,00 = 27,80	$R_6 = R_5 + Le$

Nesta metodologia de cálculo, válida e aplicável a quaisquer outros pressupostos dimensionais que se pretenda adotar na conceção geométrica, verifica-se que não existe sequência entre as larguras máxima e mínima da via central com as vias interior e exterior respetivamente. Esta descontinuidade, resultante das características intrínsecas da espiral face à existência da terceira via, não constituirá um impedimento, uma vez que o turbo-bloco é um instrumento auxiliar de *design*, posteriormente adaptável à configuração real dos canais de circulação, sendo as guias que definem uma trajetória contínua ao longo da espiral.

O método de obtenção dos intervalos de translação (Δv e Δu) carece de ser ajustado às três vias existentes no anel, conforme o perfil transversal apresentado na Figura 4.23.

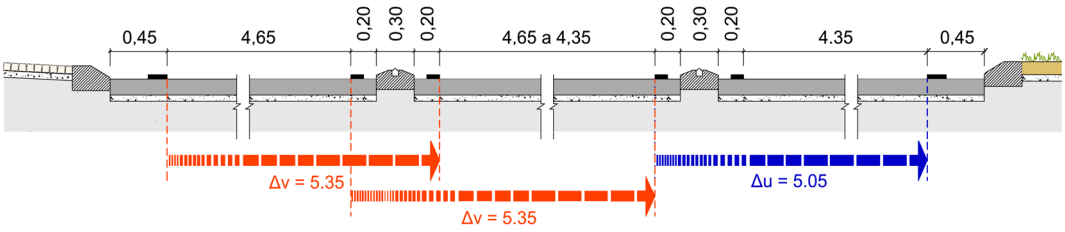


Figura 4.23 - Intervalos de translação - Tipologia Espiral

O maior intervalo (Δv) equivale às translações da guia de intradorso entre as vias interior e central, e o menor intervalo (Δu) corresponde à translação da guia de extradorso entre a via central e a via exterior. Para este exemplo, Δv seria igual à soma da largura útil máxima da via interior/central (4,65 m) com o separador (0,30 m) e respetivas bermas adjacentes (2 x 0,20 m) e Δu à soma do separador e respetivas bermas adjacentes (0,30 m + 0,20 m + 0,20 m) com a largura útil da via exterior (4,35 m). Devido ao disfarce da sobrelargura ser realizado ao longo da via central, os raios R_1 a R_3 são criados a partir dos centros associados ao intervalo Δv, e os arcos cujos raios de curvaturas são iguais a R_4 a R_6 têm o centro de rotação associado ao intervalo Δu. O mesmo se verifica para arcos de curvatura referentes às guias.

Por último, no Quadro 4.6, determinam-se as características geométricas das guias tendo por base os seus raios de curvatura. Adotaram-se para este exemplo bermas exteriores com 0,45 metros materializadas por guias de 0,15 metros nos limites interior e exterior do anel de circulação, e de 0,20 metros materializadas por guias de 0,10 metros junto ao separador, sendo o processo de cálculo igualmente válido para qualquer outra solução dimensional.

Quadro 4.6 - Dimensionamento das guias - Tipologia Espiral (MVW, 2009)

DESIGNAÇÃO	DIMENSÃO (m)	OBSERVAÇÕES
Raio da Ilha Central (R_1)	12,00	
Largura Útil da Via Interior (li)	4,65	
Largura do Separador (Ls)	0,30	
Largura Útil da Via Central (Lc)	4,65 a 4,35	
Largura Útil da Via Exterior (Le)	4,35	
r_1	12,00 + 0,45 = 12,45	$r_1 = R_1 + 0,45$
r_2	12,45 + 4,65 = 17,10	$r_2 = r_1 + li$
r_3	17,10 + 0,70 = 17,80	$r_3 = r_2 + 0,2 + Ls + 0,2$
r_4	17,80 + 4,50 = 22,30	$r_4 = r_3 + lc$ (média)
r_5	22,30 + 0,70 = 23,00	$r_5 = r_4 + 0,2 + Ls + 0,2$
r_6	23,00 + 4,35 = 27,35	$r_6 = r_5 + Le$

Dos valores obtidos nas várias fases do procedimento de cálculo, resulta o turbo-bloco que agrega os raios de curvatura necessários à definição geométrica do anel de circulação da turbo-rotunda (Figura 4.24).

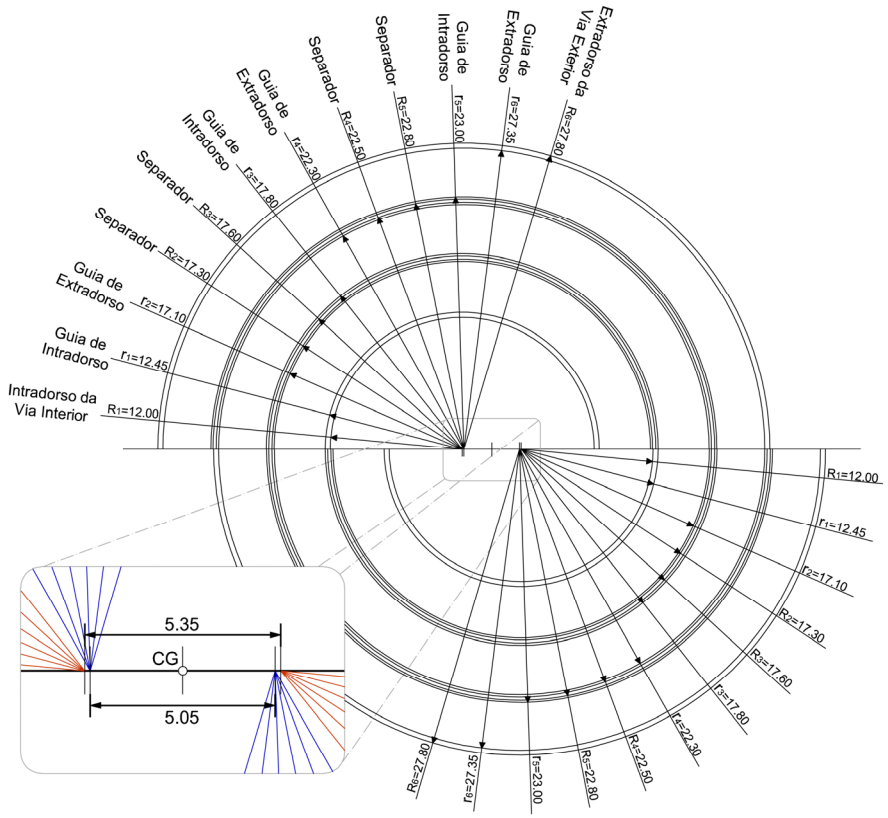


Figura 4.24 - Turbo-bloco - Tipologia Espiral

Para esta tipologia, o Quadro 4.7 sintetiza as dimensões associadas a cada classe dimensional, obtidas mediante procedimento de cálculo análogo ao descrito anteriormente. As considerações apresentadas anteriormente em relação ao Quadro 4.4, são igualmente válidas para este quadro.

Quadro 4.7 - Dimensões gerais da tipologia Espiral (adaptado de CROW, 2008)

PARÂMETRO			DIMENSÕES (m)			
Via Interior	Raio Intradorso	R1	**10,50**	**12,00**	**15,00**	**20,00**
	Raio Extradorso	R2	16,20	17,30	20,10	25,10
Via Central	Raio Intradorso	R3	16,50	17,60	20,40	25,40
	Raio Extradorso	R4	21,60	22,50	25,15	30,05
Via Exterior	Raio Intradorso	R5	21,90	22,80	25,45	30,35
	Raio Extradorso	R6	26,90	27,80	30,35	35,05

PARÂMETRO			DIMENSÕES (m)			
Largura Via Interior		Li	5,70	5,30	5,10	5,10
Largura Via Central	Inicial	Lc	5,45	5,05	4,85	4,85
	Final	Lc	4,75	4,75	4,65	4,45
	Média	Lc	5,10	4,90	4,75	4,65
Largura Via Exterior		Le	5,00	5,00	4,90	4,70
Guias Via Interior	Raio Intradorso	r1	10,95	12,45	15,45	20,45
	Raio Extradorso	r2	16,00	17,10	19,90	24,90
Guias Via Central	Raio Intradorso	r3	16,70	17,80	20,60	25,60
	Raio Extradorso	r4	21,40	22,30	24,95	29,85
Guias Via Exterior	Raio Intradorso	r5	22,10	23,00	25,65	30,55
	Raio Extradorso	r6	26,45	27,35	29,90	34,60
Largura Útil Via Interior		li	5,05	4,65	4,45	4,45
Largura Útil Via Central	Inicial	lc	5,05	4,65	4,45	4,45
	Final	lc	4,35	4,35	4,25	4,05
	Média	lc	4,70	4,50	4,35	4,25
Largura Útil Via Exterior		le	4,35	4,35	4,25	4,05
Largura Elemento Separador		Ls	0,30			
Maior Intervalo de Translação		Δv	5,75	5,35	5,15	5,15
Menor Intervalo de Translação		Δu	5,05	5,05	4,95	4,75
Velocidade Média de Atravessamento (km/h)			37-41	37-39	38-39	40

4.3.6 DISPOSIÇÃO DOS RAMOS AFLUENTES

Nas rotundas tradicionais, a disposição dos ramos afluentes e a sua influência no nível de desempenho e índices de segurança, tem sido objeto de múltiplos estudos de investigação. Segundo o manual francês (SETRA, 1998), é genericamente aceite que uma repartição equilibrada dos ramos (idealmente espaçados 90 graus em rotundas de 4 ramos, e de 72 graus em rotundas de 3 ramos) conduz aos ângulos de viragem mais adequados. Mas, tal como reconhecido pelo manual americano (FHWA, 2000), tendo por base os resultados obtidos por Maycock e Hall (1984) na determinação do modelo de previsão de acidentes Britânico, assegurar essa disposição nem sempre é possível face às características geométricas do traçado das vias intersectadas. Ainda que partilhando os conceitos normativos referidos, nos Países Baixos a sua interpretação é abordada de uma perspetiva menos flexível. Neste domínio o MVW (2009) refere que " *as entradas deverão ser*

ligadas de forma radial, criando um ângulo de aproximadamente 90 graus relativamente ao anel de circulação" relativamente aos princípios de conceção aplicados a todas as rotundas (tradicionais e turbo). De facto, uma análise à rede viária holandesa permite afirmar que a larga maioria das rotundas tradicionais em funcionamento cumpre as recomendações relativas à ortogonalidade, apresentando ramos afluentes cujas características geométricas na aproximação ao anel garantem disposições perfeitamente perpendiculares entre si na sua zona de influência. Outras soluções geométricas adaptadas existem em número proporcionalmente inferior.

Também nas turbo-rotundas é adotado este princípio de perpendicularidade considerado fundamental por Fortuijn (2009), que beneficia de certa forma da prática que já era habitual para as rotundas tradicionais. De facto, a não observância deste requisito compromete etapas fundamentais do processo de conceção geométrica, designadamente a obtenção de velocidades de atravessamento homogéneas para os diferentes movimentos direcionais através do posicionamento do turbo-bloco, que tem como condição essencial que os eixos dos ramos abordem o anel de circulação de forma igualmente repartida, e se entrecruzem no centro geométrico da intersecção.

Apesar de não se conhecerem estudos que documentem os efeitos da assimetria na segurança global destas infraestruturas, essa limitação afigura-se como uma potencial debilidade da solução, especialmente quando introduzida numa rede rodoviária existente, sendo expectável que, à semelhança das rotundas tradicionais, essa assimetria imponha sérias restrições em termos de operacionalidade, designadamente dos veículos longos.

4.3.7 ÁREA DE OCUPAÇÃO

Assumindo que a área do turbo-bloco corresponde aproximadamente à superfície necessária para implantar o anel de circulação da turbo-rotunda, a Figura 4.25 ilustra de que forma as diferentes classes dimensionais influenciam as áreas de ocupação em cada uma das tipologias geométricas.

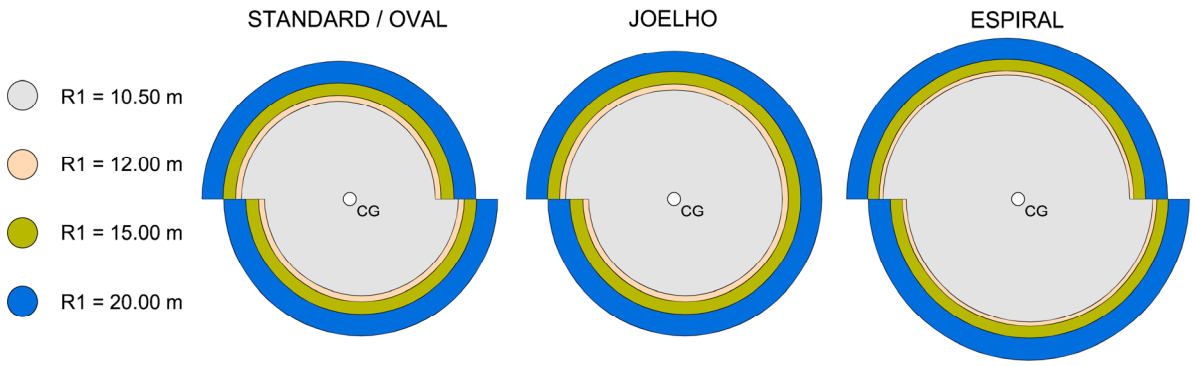


Figura 4.25 - Áreas de ocupação do turbo-bloco

Neste âmbito, a comparação com o anel de circulação das rotundas tradicionais não pode ser feita de forma direta, um vez que, face à inexistência de um centro de rotação único não é possível determinar o DCI associado a cada entrada da turbo-rotunda.

Assim, a partir dos DCI prescritos pelo InIR (2012a) para ilhas centrais cujo raio corresponde a cada uma das classes dimensionais prescritas, determinou-se a área circunferência correspondente. Esses resultados, assim como os obtidos da Figura 4.25, estão sintetizados no Quadro 4.8. Por não estarem previstas ilhas centrais com 10,50, 12 e 20 metros no referido documento, foi necessário proceder às interpolações assinaladas.

Quadro 4.8 - Áreas de ocupação

TIPOLOGIA	ÁREA DE OCUPAÇÃO (m^2)			
	R_1 = 10,50 m	R_1 = 12 m	R_1 = 15 m	R_1 = 20 m
Turbo-rotunda Standard / Oval	1405	1583	1995	2809
Turbo-rotunda Joelho	1583	1771	2201	3041
Turbo-Rotunda Espiral	2273	2428	2894	3859
Rotunda Tradicional - 2 vias no anel	1555 (*)	1728 (*)	2140	2951 (*)
Rotunda Tradicional - 3 vias no anel	2148 (*)	2350 (*)	2827	3750 (*)

(*) Valores interpolados

Relativamente aos resultados apresentados no quadro anterior, salientam-se os seguintes aspetos gerais:

- As tipologias Standard e Oval garantem, em toda a gama de dimensões, soluções mais compactas que as equivalentes rotundas tradicionais de duas vias no anel;
- A área de ocupação da tipologia Joelho é ligeiramente superior à rotunda tradicional com duas vias no anel;
- A tipologia Espiral exige maior área de implantação face à rotunda tradicional com três vias no anel, em todo o intervalo de dimensões considerado.

Em conclusão, apesar de genericamente não se verificarem diferenças expressivas, os *layout*s mais usuais (Standard e Oval) garantem melhor resposta em áreas onde o desenvolvimento da solução geométrica esteja fortemente condicionado, como matrizes urbanas condicionadas. Para as restantes configurações as rotundas tradicionais oferecem soluções ligeiramente mais competitivas.

4.4 ELEMENTOS CONSTRUTIVOS ESPECÍFICOS

A análise aos poucos manuais existentes de apoio ao projeto de turbo-rotundas e dos diversos artigos técnicos e académicos publicados sobre o tema, conclui-se que à exceção do processo de desenvolvimento geométrico descrito anteriormente, e de alguns elementos que constituem a ilha central e o anel de circulação, todos os restantes aspetos de projeto (métodos construtivos, materiais, princípios de dimensionamento e características geométricas) são remetidos para as disposições técnicas que servem de base de apoio à conceção de rotundas tradicionais, cujo âmbito os abrange.

Assim, serão objeto de estudo desta dissertação apenas aqueles elementos que pela sua especificidade, distinguem estas infraestruturas das rotundas tradicionais, designadamente:

- Ilha central;
- Separador;
- Orlas exteriores.

Ainda sustentado neste princípio, assume-se que também a nível nacional, as disposições técnicas aplicáveis às rotundas tradicionais, são igualmente válidas e aplicáveis às turbo-rotundas sem prejuízo das exceções referidas.

4.4.1 ILHA CENTRAL

A ilha central localiza-se no centro da intersecção, e é fisicamente materializada numa forma não necessariamente circular. Na sua forma base, é constituída por dois elementos complementares (Figura 4.26), caracterizados pelo seu potencial de serem ou não transpostos.

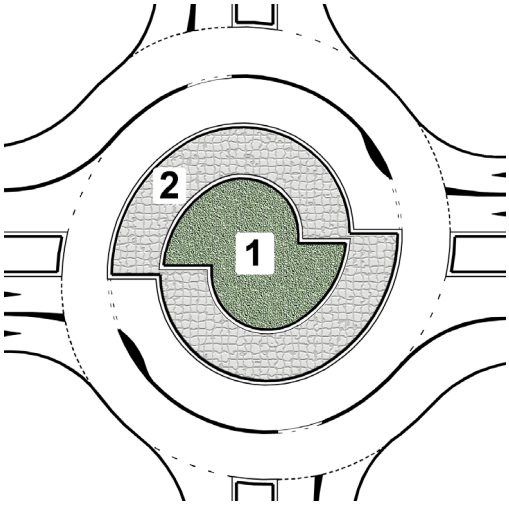


Figura 4.26 - Elementos constituintes da ilha central

A zona central intransponível (assinalada como zona 1 na figura 4.26) é desprovida de função rodoviária e a sua conceção obedece genericamente às mesmas recomendações de projeto preconizadas para as rotundas tradicionais (InIR, 2012a), nomeadamente no que diz respeito aos arranjos paisagísticos aplicáveis. Também nas turbo-rotundas deve ser evitada a aplicação de elementos que, pelas suas características físicas possam constituir obstáculos rígidos potenciadores da gravidade de um embate frontal, particularmente quando colocados em posição frontal à trajetória dos veículos que entram na rotunda.

O tratamento paisagístico recomendável apoia-se na execução de uma área central plana ou modelada em forma de cúpula, recoberta superficialmente por material granular, ou pela plantação de vegetação de pequeno porte como forma de prevenir o encadeamento noturno entre veículos que se aproximam da intersecção em sentidos opostos. Em relação a turbo-rotundas de maior dimensão, segundo Tollazzi (2010) torna-se aceitável a plantação de arbustos e de árvores de pequeno porte e de outros elementos ornamentais tais como pequenas fontes ou esculturas, desde que colocadas no espaço central sem que interfiram com os triângulos de visibilidade.

Por sua vez, a orla galgável que circunda exteriormente a ilha não transponível (assinalada como zona 2 na Figura 4.26) tem como objetivo principal aumentar a operacionalidade dos veículos longos, respondendo designadamente às necessidades dos veículos de dimensões excecionais ou dos operados por condutores de menor agilidade, sem prejuízo dos pequenos raios de deflexão impostos aos restantes veículos ligeiros. Adicionalmente Tollazzi (2010) identifica as seguintes funcionalidades:

- Garante uma margem de segurança em relação à ilha central, na eventualidade de perda de controlo com despiste do veículo, e consequente invasão desta;
- Salvaguarda a proteção ocasional dos veículos de serviço, para manutenção e acesso a elementos localizados na ilha central (arranjos paisagísticos, sistemas de rega, manutenção de sinalização vertical, etc.).

As características geométricas e funcionais da orla devem ser tais que inibam o seu atravessamento por parte de veículos ligeiros na procura de trajetórias diretas, e simultaneamente permitam que veículos longos a transponham de forma suficientemente confortável. Para isso Fortuijn (2011) baseado na prática holandesa, estabelece uma faixa cuja largura varia habitualmente entre os 2 metros e os 2,5 metros, materializada por um revestimento superficial em blocos de pedra, blocos de betão pré-fabricados, ou betonado *in-situ*, em cuja superfície é impressa uma textura equivalente às anteriores recorrendo a moldes.

A sua delimitação exterior é materializada por um lancil do tipo galgável, cujas características geométricas deverão garantir uma zona rampeada com inclinação de 7/10 (v/h). A Figura 4.27 apresenta alguns exemplos reais dos revestimentos e tipologias de lancil.



Figura 4.27 - Revestimentos da orla galgável

A drenagem de águas pluviais é garantida através da adoção de uma inclinação transversal de cerca de 1% voltada para o extradorso. Segundo o CROW (2008) a adoção de inclinações superiores a 1% é desnecessária e até indesejável, por sujeitar o veículo a um aumento da força centrífuga, e por consequência aumentar a probabilidade de ocorrência de capotamentos.

A separação entre as duas zonas da ilha central é habitualmente materializada por um lancil, por vezes provido de elementos retrorrefletores (Figura 4.28) que em locais sujeitos a níveis de baixa visibilidade, contribuem para evidenciar a zona de descontinuidade.



Figura 4.28 - Lancil de separação

A Figura 4.29 apresenta um corte transversal da orla galgável da ilha central, com as dimensões habitualmente utilizadas em soluções desta natureza. Assim tem-se um lancil galgável com secção

de 0,40m x 0,40m que garante um desnível de 7 centímetros relativamente à superfície do pavimento, e uma inclinação transversal de 1%.

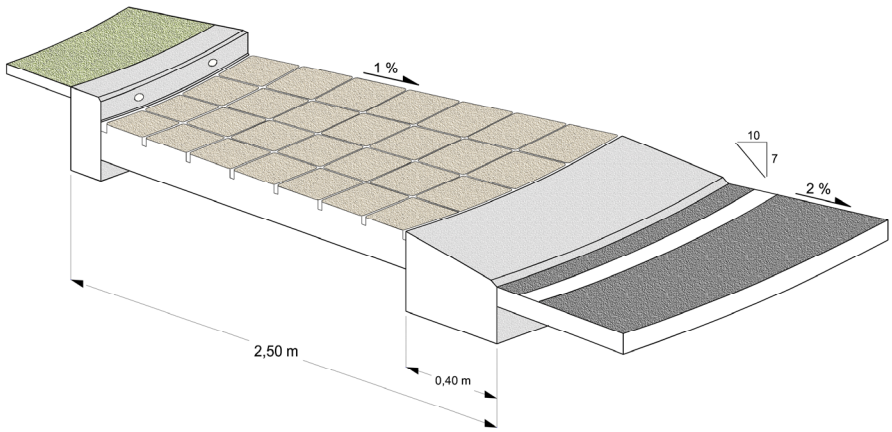


Figura 4.29 - Orla galgável - Corte transversal

A inclinação transversal a atribuir ao anel de circulação varia, à semelhança das rotundas convencionais, entre 1,5% e 3% (MVW, 2009) para pavimentos em betão betuminoso, adaptável às características do traçado e da drenagem superficial. Este valor vai ao encontro das disposições normativas portuguesas (InIR, 2012a) que estabelecem inclinações transversais do anel nas rotundas tradicionais na ordem dos 1,5% a 2,5%.

Relativamente à orientação, a documentação de referência é unânime em preconizar a sua orientação para o extradorso, já que face à prática de velocidades de atravessamento moderadas, o desconforto provocado nos condutores pelas forças centrífugas é menosprezado em detrimento de uma boa perceção da descontinuidade rodoviária.

Quanto à forma da ilha central, esta deixa de ser circular, dependendo a sua configuração do número de ramos afluentes e do formato das vias interiores da espiral. Inicialmente o traçado adotado privilegiava uma transição fluida, coincidente com a trajetória dos veículos que lhe acediam através da via esquerda do respetivo ramo de entrada, conforme ilustrado na Figura 4.30. Contudo, estudos à forma como os condutores abordam o anel de circulação e aos registos de sinistralidade (MVW, 2009), permitiram concluir que esta configuração fomenta nos condutores que acedem ao anel de circulação pela via da direita (Veículo A) uma perceção errada das trajetórias permitidas aos veículos na via exterior da espiral (Veículo B). Ou seja, o condutor do Veículo A, tenderá a interpretar o surgimento de uma nova via interior como uma multiplicação de vias no anel, criando assim uma expectativa errónea quanto ao comportamento do outro condutor.

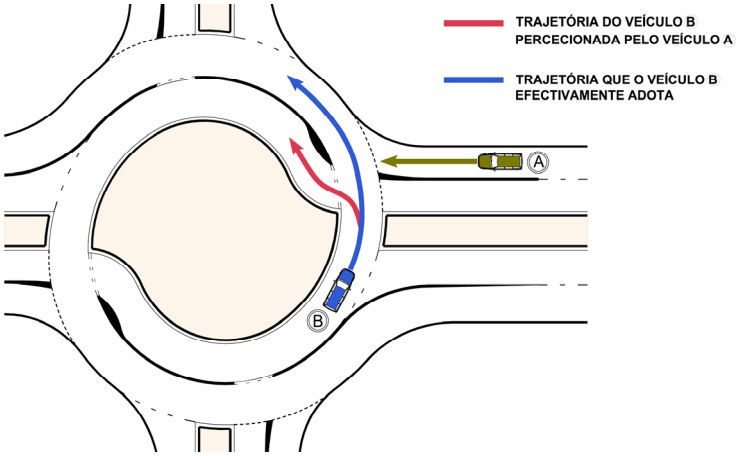


Figura 4.30 - Início da via interior - Solução clássica (adaptado de MVW, 2009)

De modo a ultrapassar este problema, essa configuração foi abandonada a favor de um início de via em forma ortogonal à ilha central (Figura 4.31). O manual holandês (CROW, 2008) recomenda a adoção desta geometria em todas as novas turbo-rotundas

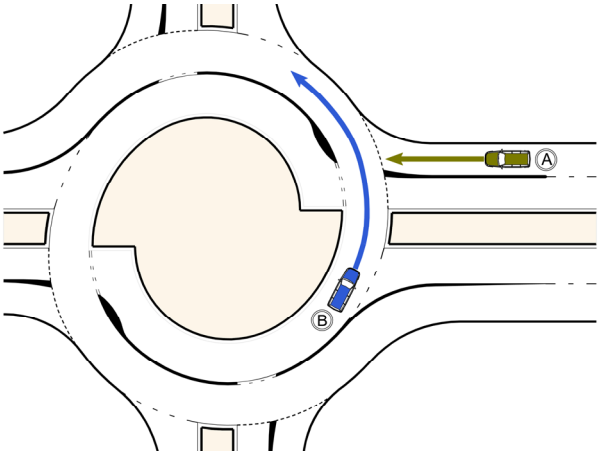


Figura 4.31 - Início da via interior - Solução atual (adaptado de MVW, 2009)

4.4.2 SEPARADOR

Como referido anteriormente, os fluxos de tráfego no anel de circulação de uma turbo-rotunda são segregados entre si por elementos físicos que têm o seu início nos ramos de entrada, prolongando-se pelo anel até aos ramos de saída, como forma de garantir (Fortuijn, 2011):

- Supressão de conflitos de entrecruzamento e de intersecção no anel de circulação;
- Deflexão adequada da trajetória de atravessamento;
- Velocidades de atravessamento reduzidas;
- Previsibilidade no comportamento dos condutores.

Como tal, o separador é materializado por esses elementos destacados do pavimento (Figura 4.32), cujas características geométricas garantem que a sua transposição por parte de um veículo ligeiro constitui uma manobra fisicamente possível, mas pouco atrativa e sobretudo desconfortável, sem contudo constituir obstáculo à operacionalidade dos veículos de maiores dimensões.



Figura 4.32 - Separador no anel de circulação

Os benefícios associados à utilização dos separadores são reconhecidos em trabalhos nacionais (Bastos Silva et al., 2011) que sublinham o seu efeito na redução de velocidade de entrada e de atravessamento do anel, ao imporem níveis acentuados de deflexão. Em alternativa é possível recorrer a simples marcações no pavimento, como forma de reduzir os custos de construção ou, em contextos rodoviários onde o conceito seja desconhecido da generalidade dos utilizadores, como solução transitória. Esta alternativa ainda que aplicável, apresenta resultados menos favoráveis em termos de segurança, pois à semelhança das rotundas tradicionais o condutor terá tendência a procurar trajetórias diretas e confortáveis, com corte da via interior, aumentando a velocidade de atravessamento.

Este facto é confirmado pelo CROW (2008), segundo o qual a utilização de marcas rodoviárias em substituição do separador físico, resulta em aumentos de velocidade média na ordem dos 15 a 20 km/h, sendo por isso expectável que a utilização de marcas rodoviárias em substituição de um separador físico, tende a aumentar a frequência e a gravidade dos acidentes. Ainda segundo o mesmo documento, as características geométricas e construtivas do separador devem garantir que:

- A sua presença no anel de circulação não deve surpreender o condutor na abordagem à turbo-rotunda;
- Os veículos longos podem transpor o separador a baixa velocidade e de forma confortável, sem que dessa manobra resultem danos no veículo (Figura 4.33);
- A sua transposição pelos veículos ligeiros deve ser desencorajada, face ao desconforto associado.



Figura 4.33 - Transposição do separador

Como forma de acentuar a sua presença, poderão ser utilizados marcadores, espaçados de 1 m, ao longo do separador físico, aumentando assim a sua notoriedade (MVW, 2009). Estes podem apresentar características retrorrefletoras (ver Figura 4.34) ou de emissão de luz contínua.

Relativamente aos últimos, importa referir que de acordo com as disposições normativas portuguesas (InIR, 2012d) a sua utilização *"viola o princípio da uniformidade, e como tal a expectativa do condutor que não o identifica, podendo ser contraproducente pelo efeito de surpresa que pode causar"*, e conclui que *"este tipo de dispositivos não é assim admissível, nomeadamente na Rede Rodoviária Nacional"*.



Figura 4.34 - Marcadores retrorrefletores

Os restantes requisitos são cumpridos recorrendo sobretudo às características geométricas do separador. Uma série de testes levados a cabo nos Países Baixos em 1999 e descritos no CROW (2008) pretenderam otimizar e homogeneizar a geometria destas secções, cumprindo simultaneamente os pressupostos referidos. O resultado foi aquele que se apresenta no corte transversal da Figura 4.35, e que corresponde à solução atualmente adotada nesse país.

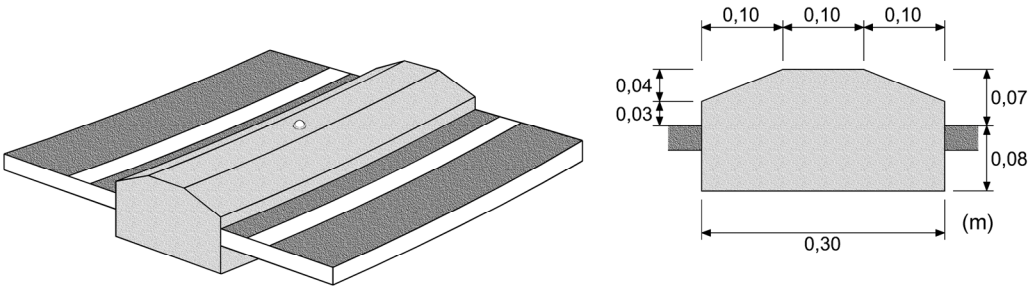


Figura 4.35 - Corte transversal do separador

A secção transversal do separador atinge uma largura total de 30 centímetros, garantindo um desnível máximo de 7 centímetros relativamente à superfície do pavimento, obtido em duas fases. Longitudinalmente, o separador é materializado por uma sucessão de peças em betão armado, pré-fabricadas ou betonadas *in-situ*, com 0,50 metros de comprimento, espaçadas entre si cerca de 5 cm.

Estes intervalos associados à inclinação transversal do pavimento favorecem a drenagem das águas superficiais no sentido do extradorso do anel evitando que o separador se comporte como uma barreira física à escorrência dessas águas. Na Figura 4.36 ilustram-se alguns dos aspetos referidos.



Figura 4.36 - Drenagem superficial do anel

O manual holandês (CROW, 2008) prevê a possibilidade de se utilizarem peças em betão simplesmente coladas no pavimento. Esta solução, ainda que envolvendo custos inferiores e maior celeridade de execução, apresenta pouca resistência estrutural às forças de torção impostas pelos rodados dos veículos pesados, atingindo a rutura com alguma facilidade, conforme ilustrado na Figura 4.37.

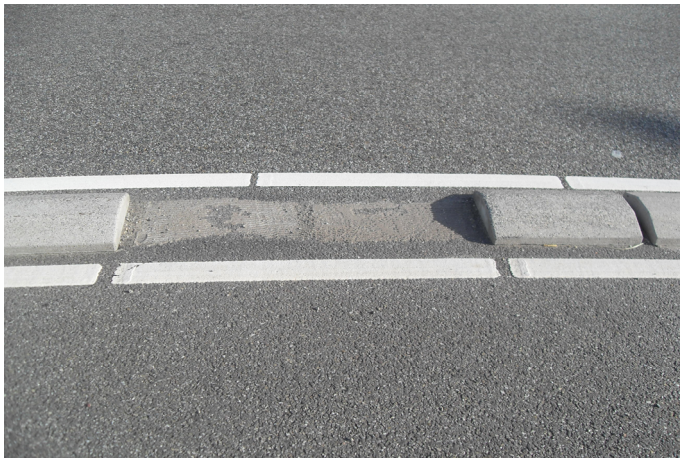


Figura 4.37 – Rutura de separador com elementos colados

Em resultado das características espiroides dos canais de circulação, alguns trechos do separador têm o seu início já no interior do anel de circulação, na continuidade dos ramos de entrada. Nestes locais são adotadas superfícies diferenciadas do restante pavimento, que simultaneamente antecipam a sua presença, garantindo a operacionalidade dos veículos longos na abordagem às vias interiores, conforme ilustrado na Figura 4.38. Esta área é revestida superficialmente pelo mesmo material utilizado na orla galgável da ilha central, designadamente blocos de pedra, blocos de betão pré-fabricado ou superfície de betão moldada *in-situ* (Fortuijn, 2007).



Figura 4.38 - Início do separador no anel de circulação

4.4.3 ORLAS EXTERIORES

A manobra de viragem à direita para abandono do anel de circulação está associada frequentemente à transposição do seu limite exterior. A adoção de sobrelargura nas vias exteriores teria como contrapartida um aumento generalizado da velocidade dos ligeiros, face às trajetórias mais diretas que a solução lhes permitiria adotar. Assim, a solução usada passa por dotar o extradorso do anel de circulação com uma sobrelargura revestida por um pavimento diferenciado do adotado no anel de circulação (identificada a azul no esquema da Figura 4.39).

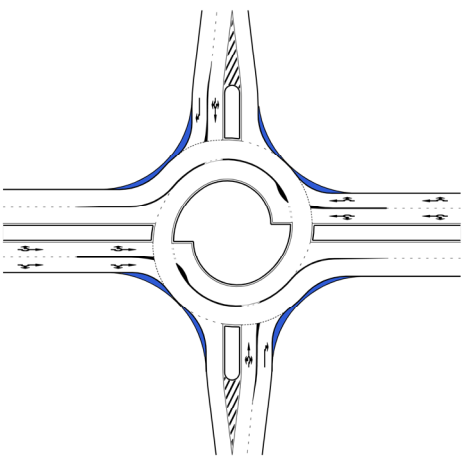



Figura 4.39 - Orlas exteriores

Este bordo associado aos arcos que interligam os ramos, apresenta características construtivas e funcionais análogas às da orla galgável da ilha central, particularmente no que diz respeito à sua aptidão de ser transposto de forma suficientemente cómoda por veículos longos a baixa velocidade (Figura 4.40). A utilização desta orla não é essencial, já que depende exclusivamente da trajetória do veículo de projeto e do tráfego de veículos longos expectável na intersecção.




Figura 4.40 - Transposição da orla exterior

4.5 ESQUEMAS DE SINALIZAÇÃO

Não cabendo no âmbito desta dissertação uma análise exaustiva à sinalização vertical e horizontal adotada nas turbo-rotundas, por esta ser de uma forma genérica semelhante à preconizada para as rotundas tradicionais (MVW, 2009), importa especificar alguns aspetos relevantes relativos à sinalização de orientação. Sustentado neste princípio, assume-se que também a nível nacional, a documentação técnica estabelecida para as rotundas tradicionais, seria válida para as turbo-rotundas sem prejuízo das exceções referidas.

O funcionamento da turbo-rotunda pressupõe a transferência da decisão sobre a via a adotar no anel e saída, para a zona de aproximação à entrada. Nessa ótica assume aqui particular relevância dotar a solução de um sistema de sinalização eficaz, designadamente em termos de pré-sinalização, de modo a disponibilizar ao condutor informação inequívoca e atempada das diferentes opções de destino, bem como a forma exata de negociar a aproximação à rotunda de acordo com o itinerário pretendido. Esta informação é extremamente importante já que nas turbo-rotundas os circuitos no anel de circulação não são completos o que dificulta a prática de determinadas trajetórias. Desta forma, a sinalização de seleção e afetação de vias nos ramos de entrada assume especial importância.

A informação apresentada nos pontos seguintes, apoia-se na documentação da especialidade estrangeira, sendo que em determinados aspetos identificados, viola a legislação nacional em vigor, designadamente o RST. Apesar disso, considera-se que a entrada ao serviço de uma turbo-rotunda em Portugal, deverá envolver necessariamente a revisão do enquadramento legislativo nacional.

4.5.1 SINALIZAÇÃO VERTICAL DE ORIENTAÇÃO

No âmbito da sinalização vertical de orientação destacam-se os painéis de pré-aviso gráfico e de seleção de vias, onde se recorre a simbologia com características gráficas específicas, que traduz o *layout* geométrico da solução e os destinos servidos por esta.

Ao nível dos pré-avisos gráficos, Tollazzi (2010) prevê uma solução análoga à utilizada nas rotundas tradicionais, e nesse âmbito descrita no Artigo 36.º do RST como um diagrama esquemático da intersecção colocado lateralmente à faixa de rodagem e que deve conter os destinos referentes a cada uma das direções, bem como a identificação das estradas que lhes estão associadas. A Figura 4.41 ilustra um painel de pré-aviso gráfico associado a uma turbo-rotunda em funcionamento nos Países Baixos



Figura 4.41 - Painel de pré-aviso gráfico

Numa secção mais próxima do anel, o manual holandês (CROW, 2008) estabelece os princípios para a utilização de painéis de seleção de vias. Este tipo de sinalização de orientação, apesar de não conhecer aplicação prática nas rotundas tradicionais em Portugal, é referida em alguma documentação da especialidade (Bastos Silva e Seco, 2004), que a classifica como vantajosa ao processo de decisão, na medida em que a sua simbologia reflete a via de entrada a adotar em função do destino pretendido, tendo por referência a localização da ilha central (Figura 4.42).



Figura 4.42 - Painel de seleção de vias simples

Essa informação é habitualmente apresentada num painel único colocado do lado direito da via, conforme ilustrado na figura anterior, ou subdividida em dois painéis individuais, recorrendo ao ilhéu separador para implantar o painel que contem a informação referente à via da esquerda (Figura 4.43). Na realidade qualquer uma destas soluções viola o atual RST.



Figura 4.43 - Painéis de afetação de vias dissociados

Quando o espaço é condicionado, é possível recorrer em alternativa à adoção de pórticos associados a painéis de afetação de vias na aproximação. Em Portugal esta última solução é

passível de aplicação, sem violar o RST. Contudo importa ter presente que a colocação de painéis laterais à faixa de rodagem constitui uma solução mais económica pelo que este campo em especial, deverá merecer uma reflexão e revisão por parte das autoridades competentes de modo a enquadrar a aplicação deste tipo de soluções inovadoras em Portugal sem violação da lei vigente.

4.5.2 MARCAÇÃO RODOVIÁRIA

Também a marcação no pavimento constitui um contributo fundamental e indispensável à afetação de vias. Neste âmbito Fortuijn (2011) considera fundamental que paralelamente à sinalização de orientação, sejam utilizadas setas de seleção no apoio ao processo de decisão do condutor para escolha da via de entrada mais adequada ao destino pretendido. Apresentam-se na Figura 4.44 as várias configurações gráficas possíveis de setas de seleção especificamente concebidas para este efeito, vulgarmente designadas por “tipo anzol” (Bastos Silva e Seco, 2004).

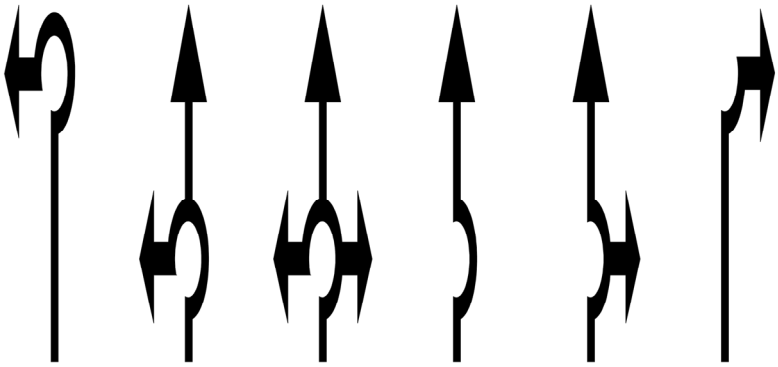


Figura 4.44 - Setas de seleção (adaptado de MVW, 2009)

A Figura 4.45 apresenta alguns exemplos da sua aplicação.



Figura 4.45 - Setas de seleção em aproximação a turbo-rotunda

De acordo com o manual de sinalização rodoviária holandês (CROW, 2005) a dimensão destas marcas rodoviárias deverá ser compatível com uma velocidade de circulação de 50 km/h, e dispostas longitudinalmente em grupos mínimos de quatro unidades consecutivas nos ramos de entrada. A sua utilização no interior do anel de circulação é desaconselhada por se afigurarem redundantes quando inseridas em circuitos delimitados fisicamente. A Figura 4.46 mostra dois exemplos de utilização incorreta de setas de seleção no anel de circulação.



Figura 4.46 - Utilização incorreta de setas de seleção

Tal como na sinalização vertical, também esta solução colide com o RST uma vez que esta configuração não está contemplada naquele documento. Apesar das dificuldades de enquadramento legal da solução a nível nacional, o seu desempenho global é extremamente dependente da capacidade do esquema de circulação informar atempadamente e de forma legível o condutor sobre a via a adotar na aproximação. Esse nível de eficácia depende da sinalização vertical e horizontal, sendo normalmente o recurso a setas de seleção considerado indispensável.

4.6 INTEGRAÇÃO DE GRUPOS ESPECÍFICOS DE UTILIZADORES

Não cabendo no âmbito desta dissertação uma análise detalhada aos princípios de integração de grupos específicos de utilizadores que já se encontram estabelecidos para as rotundas tradicionais e cuja aplicação é igualmente prescrita para as turbo-rotundas (MVW, 2009), importa desenvolver alguns aspetos específicos aplicados a estas infraestruturas. Sustentado neste princípio, assume-se que também a nível nacional, a documentação técnica estabelecida para as rotundas tradicionais, é aplicável de forma direta às turbo-rotundas sem prejuízo das exceções a seguir referidas.

4.6.1 PEÕES E VELOCÍPEDES

Face à importância que a bicicleta assume como modo de transporte individual por excelência nos Países Baixos, a sua integração assume especial importância nos manuais da especialidade desse país, e como tal é estudada conjuntamente com o ordenamento dos fluxos pedonais, por se considerar que as soluções adotadas salvaguardam ambos os utilizadores. Neste domínio as turbo-rotundas, cujos ramos apresentam geralmente um perfil 2x2, partilham de forma genérica as recomendações propostas para as homólogas rotundas tradicionais cujos ramos apresentem características semelhantes, e que apontam para a adoção de circuitos mistos (peão/ciclista) dedicados e segregados da restante infraestrutura, onde o atravessamento pontual das vias, é feito em plataformas preferencialmente sobrelevadas, devidamente sinalizadas, e que associadas ao ilhéu separador possibilitem o atravessamento em duas fases (Figura 4.47).



Figura 4.47 - Atravessamento de nível para peões e ciclistas

Alguns desses atravessamentos são complementados com um circuito do tipo *chicane* (atravessamentos desfasados) no ilhéu separador, que força os velocípedes a reduzir a velocidade, reforçando a sua perda de prioridade face aos veículos motorizados (Figura 4.48).



Figura 4.48 - Atravessamentos de nível desfasado

Os atravessamentos de nível são utilizados quando o volume de peões e de velocípedes é baixo ou moderado, não impondo uma perturbação significativa ao fluxo normal de veículos motorizados. Sempre que tal não se verificar, Fortuijn e Carton (2005) defendem a utilização de passagens desniveladas. A Figura 4.49 mostra uma passagem mista (peões/velocípedes) desnivelada inferiormente ao ramo da turbo-rotunda.



Figura 4.49 - Atravessamento desnivelado misto

4.6.2 MOTOCICLOS

A interação motociclo/turbo-rotunda foi desde sempre objeto de alguma controvérsia e considerada uma das fragilidades desta solução, na medida em que a presença de um elemento físico saliente no anel de circulação, constitui um potencial risco de queda, quando não é atempadamente percecionado pelo motociclista (Fortuijn, 2011). Para minimizar esses riscos, antecipando a presença do separador, foi prevista a adoção de um esquema de sinalização vertical específico das turbo-rotundas, constituído por:

- Sinal de perigo (correspondente ao Sinal A29 – "Outros Perigos" do RST), complementado por um painel adicional com simbologia representativa do motociclo e a indicação "*verhoogde rijbaanscheiding*" – "*Separador de Via Elevado*", colocados lateralmente nos ramos de entrada, no trecho de aproximação ao anel de circulação. (Figura 4.50_a);
- Sinalização complementar à anterior, colocada na ilha central em posição frontal à trajetória dos veículos que acedem ao canal de circulação, que resulta da união entre uma baia

direcional múltipla (correspondente ao Sinal 06b do RST) e um sinal de obrigação (correspondente ao Sinal D4 – "Rotunda" do RST) complementados pela indicação "*verhoogde rijbaanscheiding*" – "*Separador de Via Elevado*" (Figura 4.50_b).

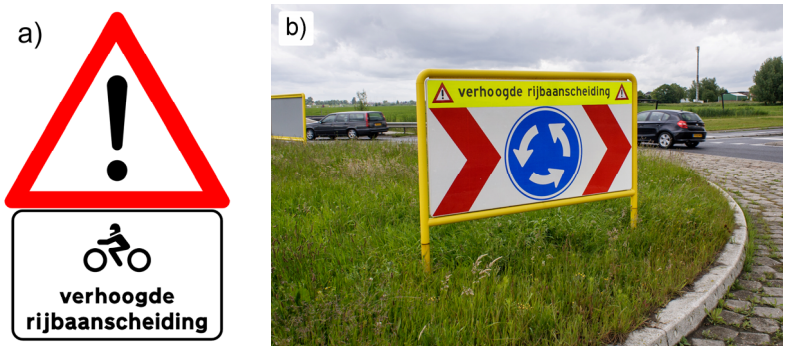


Figura 4.50 - Sinalização específica para motociclos - (a) Aproximação / (b) Ilha central

Em Portugal esta sinalização não está prevista no RST, nomeadamente o Sinal D4 – Rotunda, cujo critério de colocação é igualmente contrário às recomendações do InIR (2012e), que preconiza a sua colocação na entrada da rotunda e nunca na ilha central. Assim, este campo deverá igualmente merecer uma reflexão e revisão por parte das autoridades competentes de modo a permitir enquadrar a aplicação destas ou de outras soluções equivalentes que mitiguem uma das debilidades reconhecidas das turbo-rotundas. Este enquadramento é tanto mais importante quanto a experiência holandesa descrita no CROW (2008) mostrou que a generalidade dos motociclistas preferem esta solução à rotunda tradicional com vias múltiplas no anel, por considerarem que o risco de acidente associado ao separador é compensado pelos benefícios que resultam da separação física dos canais de circulação, e consequentemente da supressão dos embates laterais, especialmente graves em veículos desta natureza.

5. ESTUDO DE CASO – ROTUNDA NA PRAÇA BADEN-POWELL

5.1 ENQUADRAMENTO GERAL

Após a apresentação das regras gerais de conceção de uma turbo-rotunda, este capítulo centra-se no desenvolvimento de um estudo de caso capaz de avaliar a facilidade de aplicação dos conceitos e das recomendações apresentadas no capítulo anterior. Para o efeito optou-se por selecionar a Praça Baden-Powell, em Lisboa, por se tratar de uma rotunda com duas vias de circulação no anel e com características geométricas e de procura de tráfego compatíveis com a sua transformação em turbo-rotunda.

A Praça Baden-Powell situa-se na Freguesia de Santa Maria dos Olivais, na região Oriental de Lisboa, na confluência da Avenida de Berlim, Avenida Cidade de Luanda e Rua Contra Almirante Armando Ferraz, assumindo-se como um ponto de intersecção entre duas vias distribuidoras principais, que asseguram a ligação à rede viária local, de matriz marcadamente urbana. O eixo viário Norte-Sul materializado pelas Avenidas Cidade de Luanda e Rua Contra Almirante Armando Ferraz desenvolve-se entre os polos urbanos de Moscavide e Cabo Ruivo/Chelas. Por sua vez o eixo Oeste-Este materializado pela Avenida de Berlim constitui a principal ligação rodoviária entre o Aeroporto de Lisboa e um dos principais terminais intermodais de transporte da cidade, a GIL - Gare Intermodal de Lisboa (Gare do Oriente), assumindo esta praça uma importância significativa na estruturação da rede viária local, conforme ilustrado na Figura 5.1.

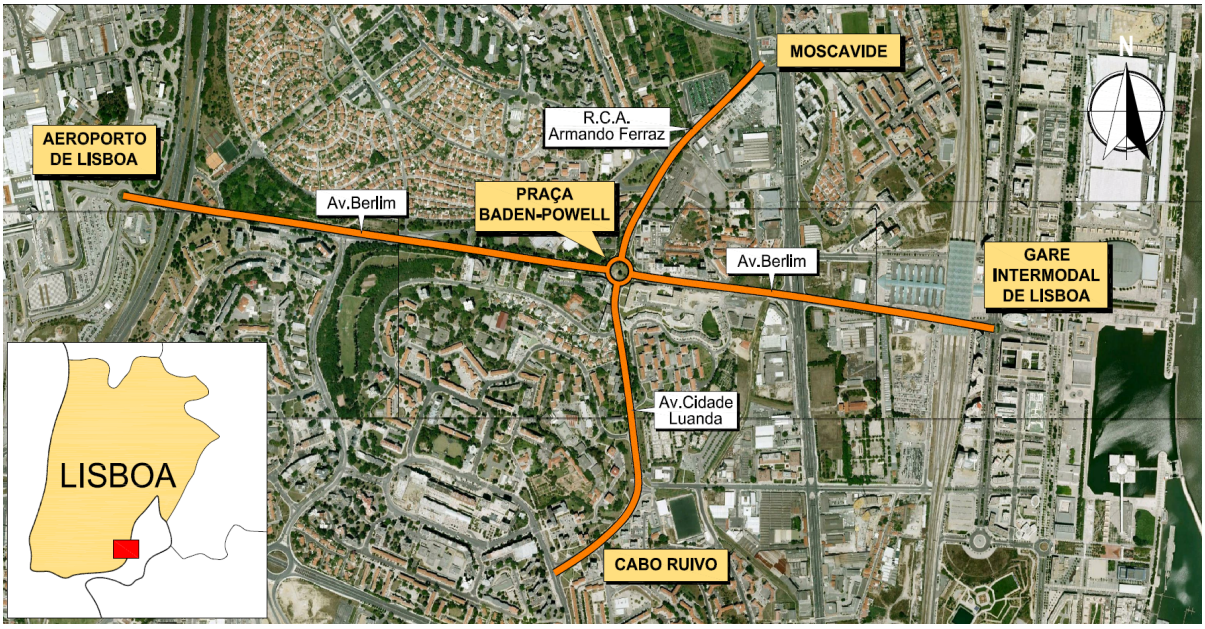


Figura 5.1 - Localização da Praça Baden-Powell (adaptado de *Google Earth*, 2012)

Na década de 60 foi construída nesta praça uma rotunda tradicional de quatro ramos e duas vias no anel de circulação, cuja geometria atual é evidenciada no levantamento topográfico (Figura 5.2_a), na fotografia aérea da zona (Figura 5.2_b) e descrita de forma pormenorizada ao longo deste capítulo.

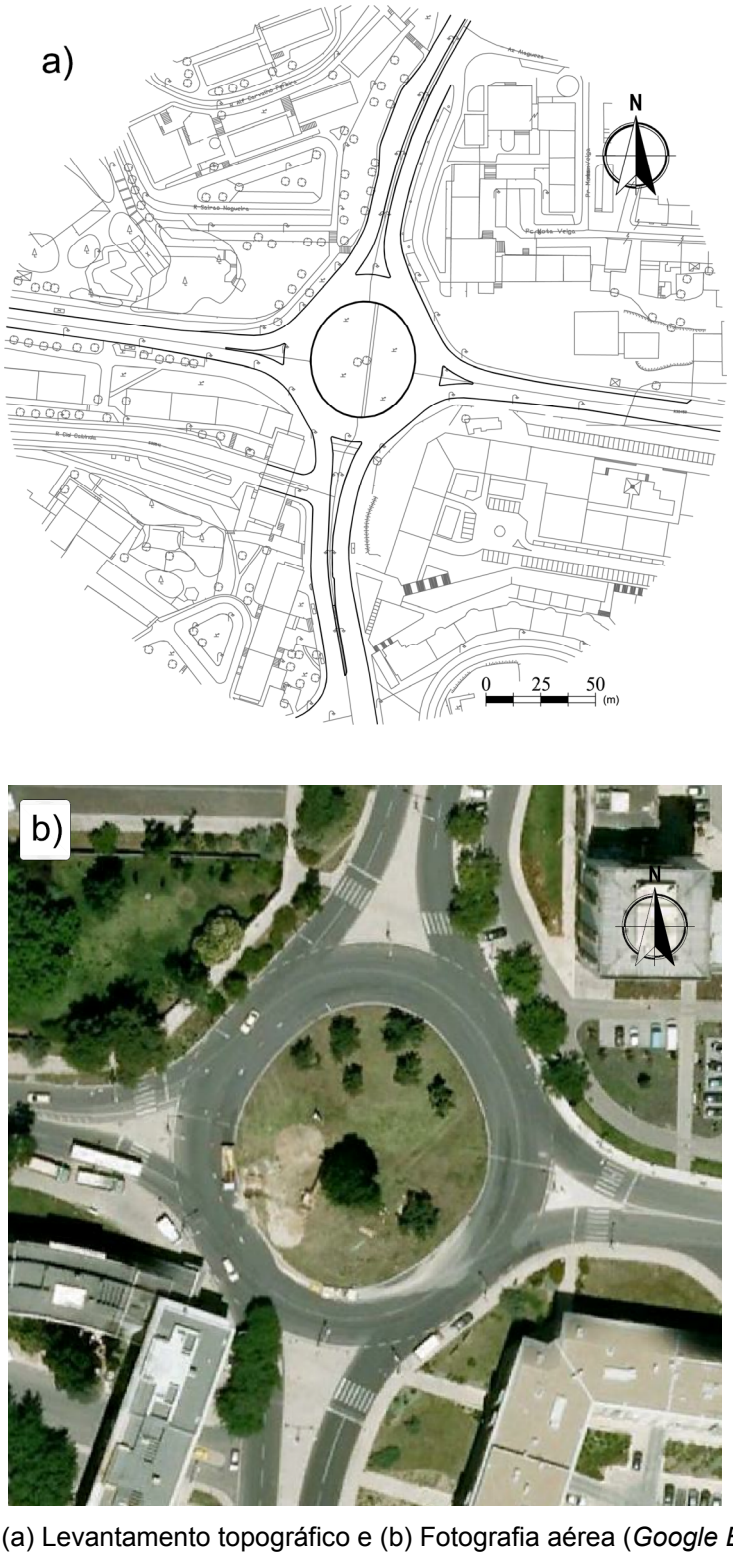


Figura 5.2 - (a) Levantamento topográfico e (b) Fotografia aérea (*Google Earth,* 2012)

5.2 CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO EXISTENTE

No âmbito da caracterização da situação existente, procedeu-se à avaliação da solução geométrica complementada pelo levantamento da procura de tráfego e do histórico de acidentes. Apesar de terem sido requeridos à ANSR os dados correspondentes aos acidentes registados nesta intersecção, designadamente a sua tipologia e localização, não foi possível ter acesso a um levantamento georeferenciado que potenciasse o desenvolvimento de uma análise de causa-efeito. Devido aos arruamentos em causa serem desprovidos de quilometragem e de uma forma geral as ocorrências não terem associadas as coordenadas GPS, não foi possível aquela entidade discriminar as ocorrências verificadas nesta interseção em particular. Dessa forma, os dados de sinistralidade não foram tidos em consideração no trabalho desenvolvido.

5.2.1 SOLUÇÃO GEOMÉTRICA

A rotunda tradicional existente na Praça Baden-Powell é caracterizada fundamentalmente pela heterogeneidade geométrica dos diversos elementos que a constituem, designadamente os ramos de acesso e o anel de circulação, cujos perfis transversais apresentam dimensões e parâmetros bastante distintos entre si. Em grande parte, deve-se ao facto de ter sido construída à imagem do conceito clássico das grandes praças circulares, não obedecendo a quaisquer normativas ou bibliografia de referência neste domínio, aliás inexistente em Portugal à época da sua construção. Importa assim referir que as dimensões indicadas ao longo deste capítulo no que diz respeito à caracterização da solução atual, foram medidas diretamente no levantamento topográfico à escala 1:1000 disponibilizado pelos serviços da Câmara Municipal de Lisboa.

A ilha central com formato elipsoidal de excentricidade reduzida apresenta um raio de curvatura que varia, de acordo com a orientação da elipse, entre os 24 e os 27 metros, e é delimitada por um anel com duas vias de circulação materializadas numa secção transversal com cerca de 12 metros de largura. O diâmetro do círculo inscrito (DCI) é variável, apresentando um valor médio de 66 metros, o que caracteriza uma solução de grandes dimensões. De facto, e de acordo com as disposições normativas portuguesas (InIR, 2012a) reportando-se à forma tradicional circular com duas vias, recomenda-se a adoção de DCI's na ordem dos 40 a 50 metros e raios de ilha central inferiores a 20 metros (Bastos Silva e Seco, 2004).

Conclui-se que a dimensão global da rotunda é superior aos valores de referência para infraestruturas desta natureza, sem que daí advenham benefícios significativos ao seu desempenho, designadamente em termos de fluidez e capacidade, tal como sustentado por Bastos Silva e Seco (2004), que baseados em estudos levados a cabo pelo TRL, referem que "*a dimensão*

global da rotunda não apresenta um peso muito significativo no valor da capacidade da entrada, evidenciando pelo contrário um aumento da probabilidade de ocorrência de acidentes".

Os eixos associados aos ramos de acesso abordam o anel de circulação de forma aproximadamente ortogonal entre si, permitindo definir um ponto singular de cruzamento – o centro geométrico da intersecção. Conforme descrito no Subcapítulo 4.3.7, esta é uma característica fundamental para a conversão da rotunda tradicional existente numa turbo-rotunda.

A Figura 5.3 ilustra os diversos ramos da rotunda existente.

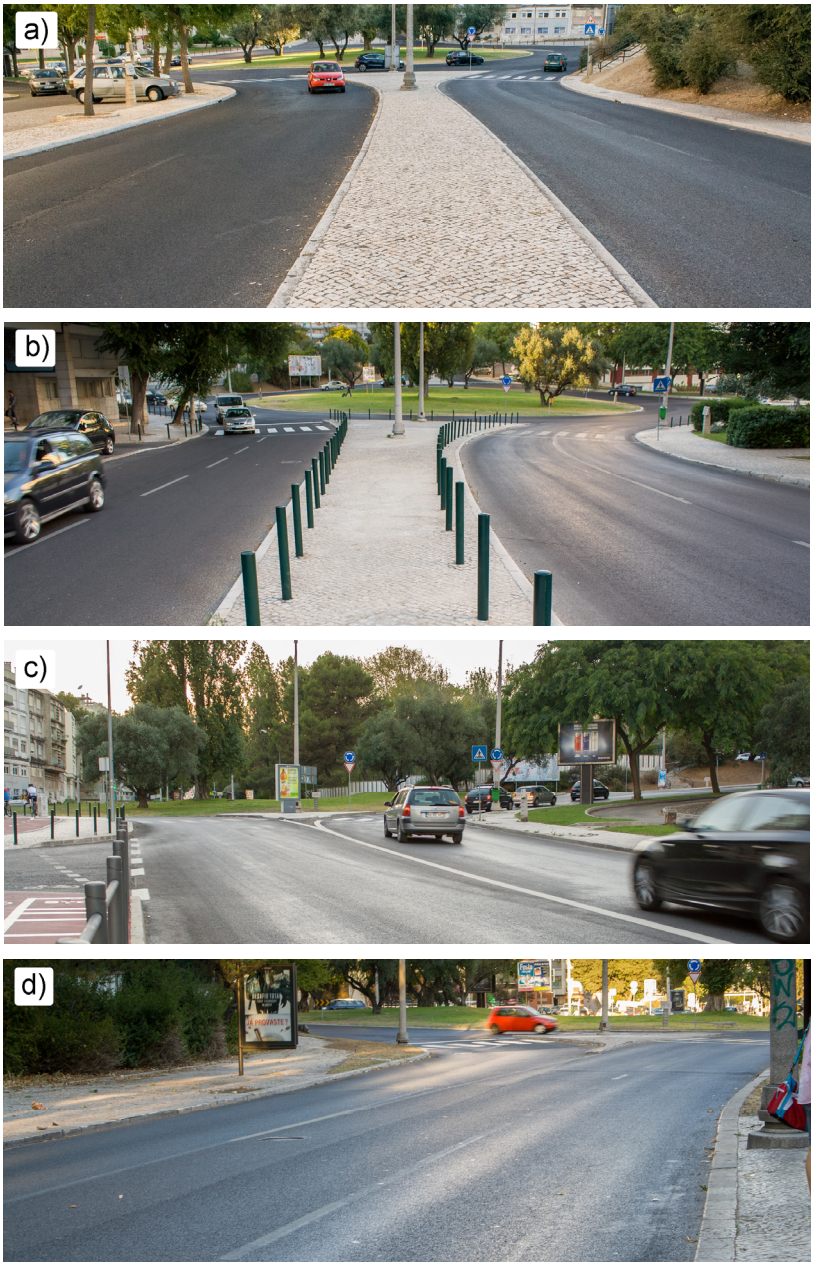


Figura 5.3 - Aspetos dos ramos (a) Norte / (b) Sul / (c) Este / (d) Oeste

Para cada um dos ramos, o Quadro 5.1 indica a largura das respetivas vias de entrada e saída na aproximação à rotunda (v), bem como o diâmetro do círculo inscrito (DCI), a largura efetiva da entrada junto à linha de cedência de prioridade e na perpendicular ao lancil (e), o comprimento médio efetivo do leque (l‘), o raio de entrada no ponto de menor curvatura (r) e o ângulo de entrada (Φ). As dimensões apresentam-se em metros, exceto quando indicado.

Quadro 5.1 - Parâmetros geométricos dos ramos

RAMO	SAÍDA		ENTRADA (v)		PARAMETROS				
	Via Esq.	Via Dta.	Via Esq.	Via Dta.	DCI	e	l '	r	Φ (º)
Norte	3,35	3,35	3,35	3,35	64,00	7,50	15,40	27,70	17
Sul	3,75	3,75	3,75	3,75	66,00	7,60	5,10	34,00	22
Este	5,00		5,00		66,00	5,30	2,40	27,00	30
Oeste	3,20		3,00	3,00	68,00	6,95	6,60	28,30	39

Estes valores permitem confirmar a elevada heterogeneidade geométrica dos ramos da rotunda tradicional existente. Verifica-se ainda que apresenta uma área de ocupação desproporcionada, ocupando espaço que de outra forma poderia ser atribuído a outros utilizadores ou outras funções não rodoviárias. No domínio do anel de circulação, esse sobredimensionamento materializado numa secção com 12 metros de largura que acomoda duas vias, propicia a prática de velocidade elevadas em face da menor deflexão das trajetórias, possibilitando a realização de manobras de ultrapassagem nas vias circulares.

5.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS NÍVEIS DE PROCURA DE TRÁFEGO

A caracterização da procura de tráfego assentou na realização de contagens, recorrendo à recolha de imagens em vídeo e posterior tratamento dos dados observados. Procedeu-se a duas sessões de contagens de tráfego nos dias 10 e 11 de Janeiro de 2012 (Terça e Quarta-Feira), que contemplaram o período de ponta da manhã, tendo-se identificado que a hora de ponta ocorre entre as 8h00 e as 9h00.

Optou-se por adotar um método da contagem simplista, de modo a proporcionar uma análise de sensibilidade sem recurso a gastos económicos avultados. O método adotado consistiu em registar o número global classificado de veículos que entraram e saíram da rotunda em cada ramo afluente, durante um período de 15 minutos por ramo, adotando a sequência Sul-Este-Oeste-Norte, num total de 60 minutos. A classificação foi dividida em 4 categorias de veículos: Ligeiros, Motociclos, Pesados e BUS. Em simultâneo procedeu-se ao acompanhamento aleatório de uma amostra de um conjunto limitado de veículos de modo a avaliar a repartição direcional do tráfego através do método do seguimento.

O mesmo processo foi repetido no segundo dia, alterando a sequência dos ramos para Oeste-Norte-Sul-Este, como forma de uniformizar as contagens e mitigar alguma tendência aleatória. Os valores foram posteriormente convertidos em uve/h (unidades de veículos equivalentes/hora) de acordo com os fatores de conversão propostos no HCM (1994) e apresentados no Quadro 5.2, considerando a inclinação longitudinal nula (0%).

Quadro 5.2 - Fatores de conversão (HCM, 1994)

CLASSE DO VEÍCULO	U.V.E.
Motociclos	0,5
Ligeiros	1,0
Pesados	2,0
BUS	0,0

Na figura seguinte apresentam-se os valores médios por ramo no conjunto dos dois dias (Figura 5.4_a), bem como a distribuição percentual obtida a partir dos seguimentos aleatórios (Figura 5.4_b).

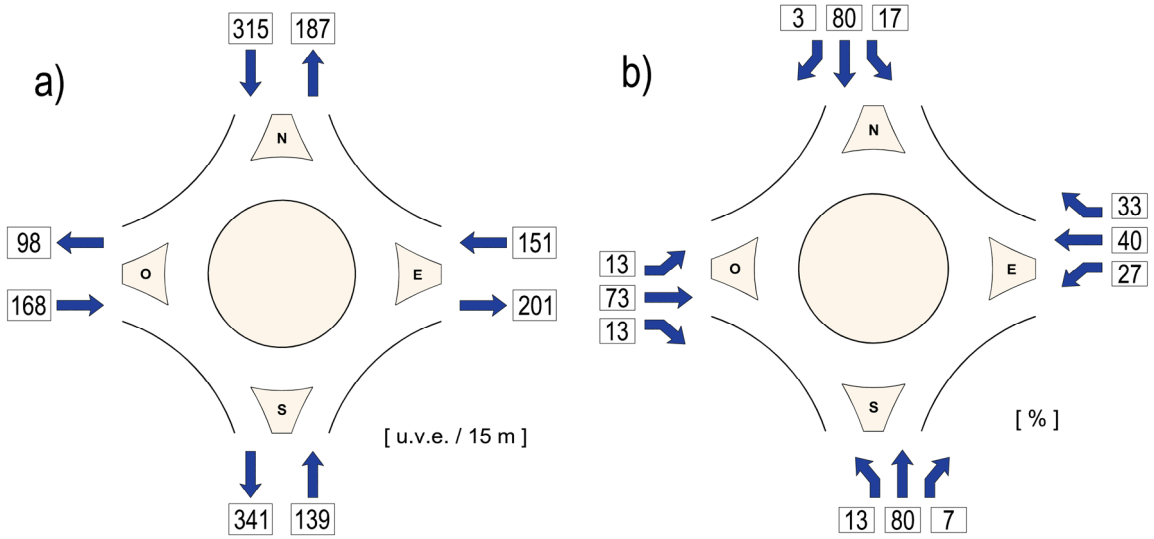


Figura 5.4 - (a) Contagens de tráfego e (b) Distribuição percentual do tráfego por ramo

Afetou-se o valor médio de veículos contabilizados em cada entrada com os coeficientes de distribuição (figura anterior), extrapolando os resultados para o período total de 1 hora (4 x 15 minutos). A distribuição de tráfego é apresentada no diagrama da Figura 5.5.

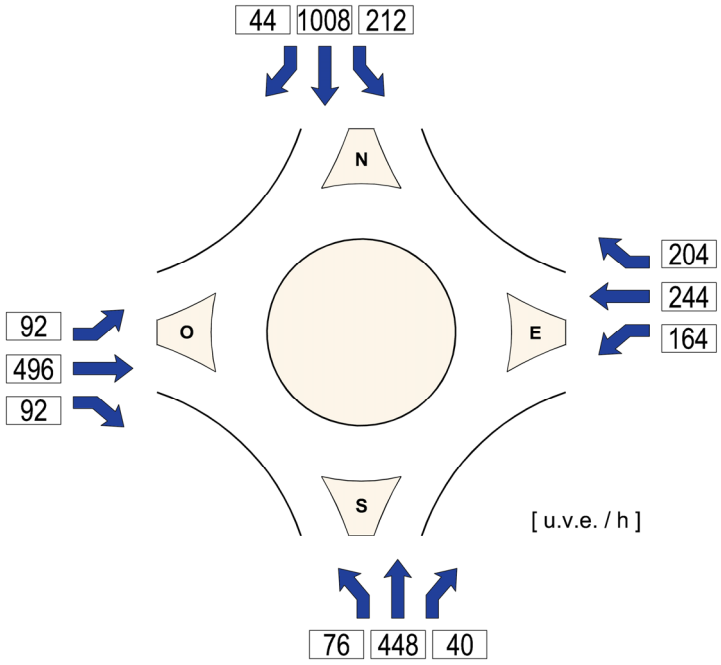


Figura 5.5 – Fluxos atuais de tráfego horário

Como forma de aferir o erro associado a esta distribuição, comparou-se o número de veículos contabilizados inicialmente por observação direta em cada uma das saídas da rotunda (observados), com aqueles obtidos através dos fatores de distribuição lateral (inferidos através do método do seguimento). Conforme apresentado no Quadro 5.3, o erro associado a cada um dos ramos é inferior a 10%, e como tal os resultados obtidos consideram-se válidos.

Quadro 5.3 – Potencial erro associado às contagens de tráfego

RAMO	OBSERVADOS	INFERIDOS	ERRO
Norte	748	744	0,5%
Sul	1364	1264	7,9%
Este	804	748	7,5%
Oeste	392	364	7,7%

Dos valores apresentados no diagrama da Figura 5.5 conclui-se que o fluxo dominante na hora de ponta da manhã se verifica na direção Norte-Sul com 1456 uve/h, secundado pela direção Este-Oeste, cujo fluxo é cerca de metade do anterior (740 uve/h). O movimento de viragem Norte-Este e Este-Norte destaca-se ligeiramente dos restantes não se sobrepondo ao fluxo dominante referido. Tem-se assim um volume de tráfego total na ordem dos 3120 uve/h a entrar na rotunda na hora de ponta da manhã. Assumindo que estes valores correspondem maioritariamente a movimentos pendulares, os resultados na hora de ponta da tarde serão equivalentes, com matriz transposta. Admitindo que os 3120 uve/h correspondem a cerca de 10% do TMD, estima-se que o volume diário que aflui a esta rotunda se aproxime dos 31200 uve/dia.

5.2.3 AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE SERVIÇO DA SOLUÇÃO ORIGINAL

Embora a rotunda se inclua na rede estruturante da cidade de Lisboa e assuma funções de distribuição relevantes, optou-se por caracterizar o funcionamento da solução rotunda, para os níveis de tráfego atual, menosprezando o efeito associado ao eventual crescimento natural do tráfego ou a efeitos da sua redistribuição na rede. Considera-se ainda que tal opção não afeta os resultados, designadamente face aos objetivos finais subjacentes ao presente trabalho (comparação do desempenho de duas soluções).

Assim e tendo por base os níveis de procura de tráfego atuais (Figura 5.5), os níveis de serviço associados a cada uma das entradas da rotunda foram avaliados recorrendo a dois métodos distintos: (i) o modelo do TRL (Kimber, 1980) e (ii) o modelo de Brilon (2005).

- **Modelo do TRL**

O modelo do TRL (*Transport Research Laboratory)* é de base estatística e foi desenvolvido no Reino Unido nos anos 80 (Kimber, 1980). Resultou da aplicação de técnicas de regressão múltipla não linear a uma base de dados real resultante de extensas recolhas de campo que abrangeram uma vasta gama de variabilidade de parâmetros geométricos e mais de 80000 minutos de observações, em situação de saturação consolidada. A formulação geral resultou numa função linear que relaciona a capacidade da entrada (Qe) com o volume de tráfego conflituante (Qc) e a geometria prevalecente da intersecção, em que a capacidade de uma entrada da rotunda (Qe) é formulada a partir das seguintes expressões (EP, 2005):

$$Q_e = K\,(F - f_c \times Q_c) \quad \text{se} \quad f_c \times Q_c < F \tag{5.1}$$

$$Q_e = 0 \quad \text{se} \quad f_c \times Q_c > F \tag{5.2}$$

Os parâmetros K, F e fc dependem das características geométricas da entrada e da rotunda, tal que:

$$K = 1 - 0{,}00347 \times (\Phi - 30) - 0{,}978 \times [(1 / r) - 0{,}05] \tag{5.3}$$

$$F = 303 \times X_2 \tag{5.4}$$

$$F_c = 0{,}21 \times t_p \times (1 + 0{,}2 \times X_2) \tag{5.5}$$

$$t_p = 1 + [0{,}5 / (1 + M)] \tag{5.6}$$

$$M = e \text{ ^ } [(DCI - 60) / 10] \quad (5.7)$$

$$X_2 = v + [(e - v) / (1 + 2S)] \quad (5.8)$$

$$S = 1{,}6 \times [(e - v) / l'] \quad (5.9)$$

Partindo dos parâmetros geométricos de cada ramo indicados anteriormente (Quadro 5.1), do tráfego conflituante (Qc) e do fluxo de entrada (V_i), a capacidade de cada uma das entradas da rotunda (Qe) e o respetivo grau de saturação potencial (FRC) são apresentados no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 - Modelo do TRL. Capacidade da solução existente

RAMO	V_i (uve/h)	Qc (uve/h)	Qe (uve/h)	FRC FRC = Vi / Qe
Norte	1264	484	2049	62%
Sul	564	800	1889	30%
Este	612	616	1285	48%
Oeste	680	1384	1212	56%

Estes resultados mostram que a rotunda assegura, na situação atual, um modo de funcionamento bastante aceitável, sem registar níveis de saturação evidentes em nenhuma das entradas. É ainda de destacar o elevado nível de reserva de capacidade associado às entradas Sul e Este.

- **Modelo de Brilon**

Ao contrário das rotundas tradicionais, onde a capacidade de cada entrada pode ser estimada com base em modelos probabilísticos, estatísticos ou de simulação, nas turbo-rotundas desconhece-se a existência de modelos de base estatística devidamente calibrados às suas características específicas de funcionamento (Bastos Silva et al., 2011). Assim, e em alternativa, optou-se por aplicar à rotunda existente um modelo de base probabilística desenvolvido por Brilon (2005), cuja formulação de base, ao suprimir as variáveis relativas às características geométricas dos ramos, permite a sua aplicação quer a rotundas tradicionais, quer a turbo-rotundas:

$$Q_e = 3600 \times \left(1 - \frac{t_{min} \times Q_c}{n_k \times 3600}\right)^{n_k} \times \frac{n_z}{t_f} \times e^{\frac{-Q_c}{3600} \times \left(t_c - \frac{t_f}{2} - t_{min}\right)} \quad (5.10)$$

Onde:

Qe – Capacidade da entrada (uve/h);

Qc – Tráfego conflituante (uve/h);
n_k – Número de vias no anel de circulação;
n_z – Número de vias na entrada;
t_c – Intervalo crítico (s);
t_f – Intervalo complementar (s);
$t_{mín}$ – Intervalo mínimo entre veículos sucessivos no anel (s).

Na determinação da capacidade associada a cada uma das vias de entrada, atribuíram-se valores distintos aos parâmetros t_c, t_f, $t_{mín}$ e n_k, conforme preconizado por Bastos Silva (et al., 2011), uma vez que esta distinção reflete de forma mais verosímil o comportamento dos condutores nacionais à entrada do anel de circulação (Quadro 5.5).

Quadro 5.5 - Modelo de Brilon. Parâmetros calibrados (Adaptado de Bastos Silva et al., 2011)

ENTRADA	tmim (s)	tf (s)	tc (s)	nk	nz
Via Esquerda	0,0	2,5	4,3	2	1
Via Direita	2,1	2,9	4,1	1	1

Relativamente aos fluxos de entrada (V_i), assumiu-se que os veículos que realizam movimentos de viragem à esquerda e à direita, utilizam respetivamente as vias esquerda e direita, enquanto aqueles que seguem em frente distribuem-se de forma repartida entre as duas vias disponíveis, de forma a assegurar um equilíbrio das cargas iniciais. O tráfego conflituante (Qc) associado a cada uma das vias de circulação será distinto, na medida em que a via esquerda interage com as duas vias do anel, e a via direita apenas com a via de extradorso. O Quadro 5.6 identifica os valores considerados para cada uma das vias.

Quadro 5.6 - Modelo de Brilon. Fluxo de entrada e tráfego conflituante

RAMO	VIA	V_i (uve/h)	Qc (uve/h)
Norte	Esquerda	632	484
	Direita	632	102
Sul	Esquerda	282	800
	Direita	282	248
Este	Via Única	612	242
Oeste	Esquerda	340	1384
	Direita	340	588

O Quadro 5.7 apresenta a capacidade total de cada uma das entradas da rotunda existente (Qe) e o respetivo grau de saturação potencial (FRC).

Quadro 5.7 - Modelo de Brilon. Capacidade da solução existente

RAMO	Qe (uve/h)	FRC FRC = Vi / Qe
Norte	2105	60%
Sul	1753	32%
Este	1173	52%
Oeste	1191	57%

O gráfico da Figura 5.6 mostra uma análise comparativa da capacidade das entradas da rotunda tradicional existente, de acordo com os resultados obtidos em cada um dos modelos.

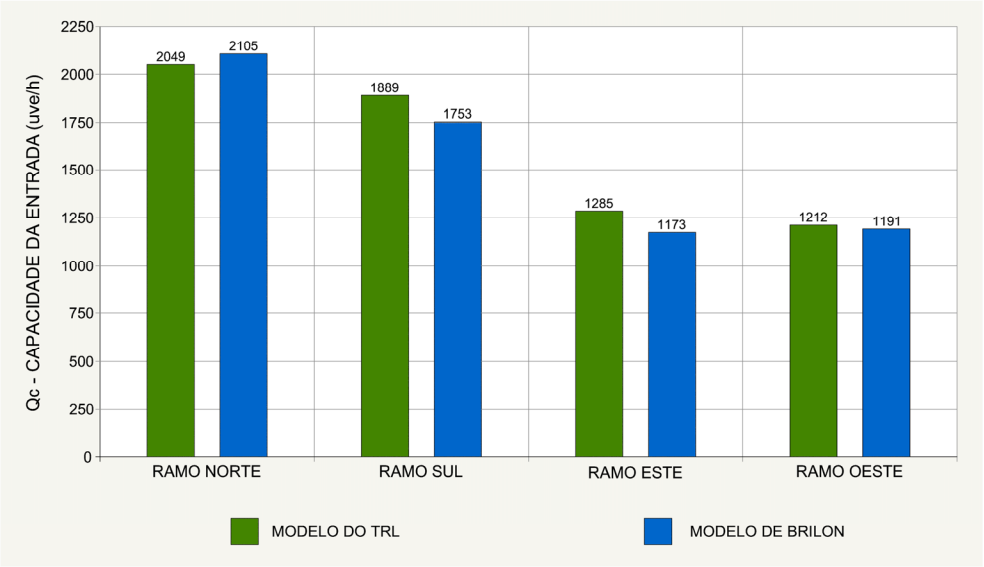


Figura 5.6 - Análise comparativa da capacidade por entrada na rotunda existente

A leitura dos resultados evidencia que as entradas Norte e Sul apresentam a maior capacidade, o que é inerente ao facto de corresponderem à direção do fluxo dominante, e como tal o tráfego conflituante associado apresentar menor expressão. Pelo contrário a entrada Oeste sofre uma diminuição da capacidade por estar associada a um volume de tráfego conflituante acentuado (relativo ao fluxo dominante - direção Norte-Sul), enquanto que o ramo Este apenas dispõe de uma via de entrada no anel o que justifica a sua menor capacidade.

A figura mostra ainda que os resultados da aplicação dos dois modelos de estimação nos vários ramos, é semelhante, apesar da abordagem teórica de base associada aos modelos estatísticos e probabilísticos ser diferenciada.

O gráfico da Figura 5.7 mostra uma análise comparativa do grau de saturação potencial de cada entrada da rotunda tradicional existente, de acordo com os resultados obtidos em cada um dos modelos.

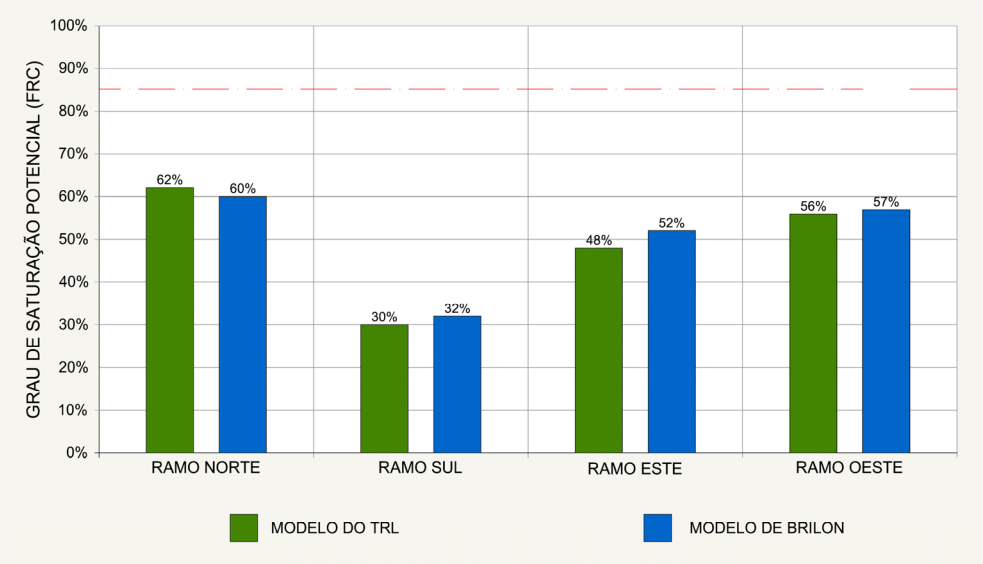


Figura 5.7 - Análise comparativa do grau de saturação potencial por entrada na rotunda existente

A análise dos resultados obtidos permite concluir que o grau de saturação potencial é diretamente proporcional aos fluxos de entrada e que todas as entradas se encontram muito abaixo do valor de referência de 85% da sua capacidade, permitindo acomodar um potencial crescimento do tráfego. Desta forma, a análise comparativa apresentada nos gráficos das figuras anteriores, permite validar os resultados obtidos através do modelo de Brilon face ao modelo do TRL, e desta forma assegurar que da sua aplicação à turbo-rotunda proposta, resultarão indicadores passíveis de ser comparados aos atuais.

5.3 CONVERSÃO DA ROTUNDA ATUAL NUMA TURBO-ROTUNDA

5.3.1 SELEÇÃO DO TIPO DE SOLUÇÃO

O estudo de caso proposto pretende analisar o processo de conversão da rotunda tradicional existente na Praça Baden-Powell numa solução do tipo turbo-rotunda, com base nas características geométricas existente e nas contagens de tráfego efetuadas no local, incidindo fundamentalmente na escolha da tipologia geométrica mais adequada às características dos fluxos rodoviários e na compatibilização da nova solução com a rede viária existente.

As contagens de tráfego levadas a cabo demonstram que a rotunda existente cumpre um dos requisitos associados às condições de aplicação privilegiada de uma turbo-rotunda, ao assumir-se

como uma alternativa competitiva a uma intersecção em que se verifique a existência de uma corrente de tráfego predominante, com elevado valor de débito face às restantes, neste caso na direção Norte-Sul. A repartição dos fluxos e o valor de tráfego diário registados, de acordo com os pressupostos determinados por Fortuijn (2007), adequam-se a uma turbo-rotunda de tipologia Standard. Conforme referido no Capítulo 2, essa tipologia é caracterizada por dois ramos com vias duplas de entrada e saída, alinhados com o fluxo dominante, na direção Norte-Sul. Os outros dois ramos (direção Este-Oeste) são materializados por vias de entrada duplas e de saída simples.

5.3.2 DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO GEOMÉTRICA

A nova solução foi desenvolvida de acordo com o procedimento descrito no Subcapítulo 4.3, tendo-se optado pela configuração com R_1 = 12 m, por ser aquela que segundo CROW (2008), garante a prática de velocidades de atravessamento mais adequadas, na ordem dos 37-39 km/h. Com base no centro geométrico da intersecção, a nova solução foi desenvolvida de acordo com o procedimento descrito no Subcapítulo 4.3, iniciando-se com a colocação do eixo de translação sobre o centro geométrico da intersecção (CG) e alinhado com o eixo associado ao fluxo dominante (Norte-Sul), conforme ilustrado na Figura 5.8.

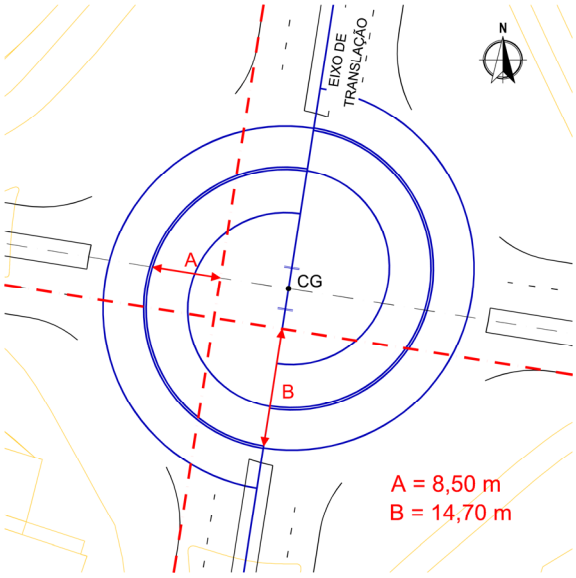


Figura 5.8 - Posicionamento do eixo de translação – Primeira iteração

Através da revolução iterativa do turbo-bloco (representado a azul nas figuras) obteve-se a minimização do diferencial entre as distâncias A e B, num valor de cerca de 10,80 metros. Essa solução foi alcançada através da introdução de uma rotação de 61 graus no sentido horário (Figura 5.9).

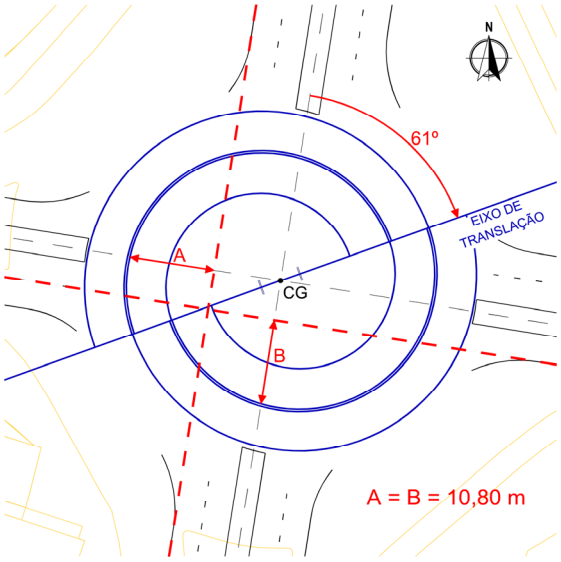


Figura 5.9 - Posicionamento do eixo de translação – Iteração final

Em complemento às dimensões gerais do canal espiroide já definidas no Quadro 4.4 do capítulo anterior, para a correspondente classe dimensional (R_1 = 12m), adotaram-se nos ramos, vias com 3,50 m de secção constante na aproximação, de acordo com o preconizado pela normativa portuguesa (InIR, 2012f) para vias duplas inseridas em estradas com dupla faixa de rodagem de velocidade base inferior a 100 km/h. Neste âmbito importa referir que ao contrário das rotundas tradicionais, a documentação de referência nas turbo-rotundas é omissa quanto a uma abordagem diferenciada para vias de entrada ou saída no que à sua largura diz respeito. Da mesma forma, a sobrelargura das vias junto ao anel de circulação é somente a que decorre da introdução dos raios de concordância (Re e Rs). Para esses, foram adotadas as dimensões preconizadas pelo MVW (2009), ou seja, Re=12 m (a vermelho na Figura 5.10) e Rs=15 m (a azul na Figura 5.10).

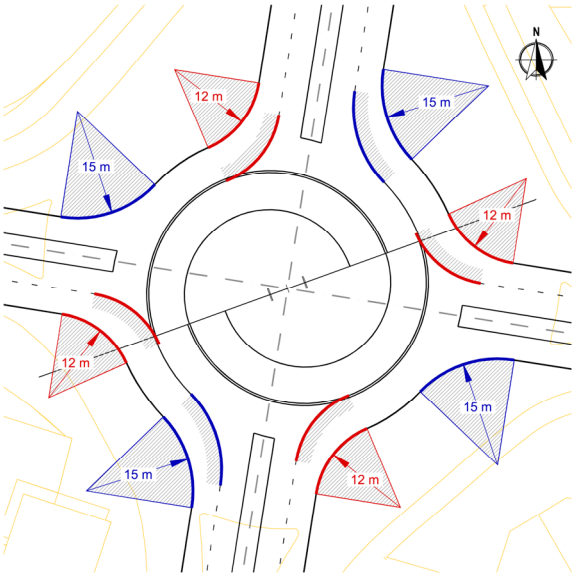


Figura 5.10 - Raios de entrada e saída

Os parâmetros adotados para a solução proposta resumidos no Quadro 5.8, são assinalados na planta de pormenor da Figura 5.11.

Quadro 5.8 - Parâmetros geométricos específicos da solução

PARÂMETRO	DIMENSÕES
Raios de Entrada (Re)	12 m
Raios de Saída (Rs)	15 m
Rotação do Turbo-bloco	61° (sentido horário)
Largura das Vias de Entrada / Saída	3,50 m
Largura dos Ilhéus Separadores	3,00 m
Largura da Orla Galgável	2,50 m

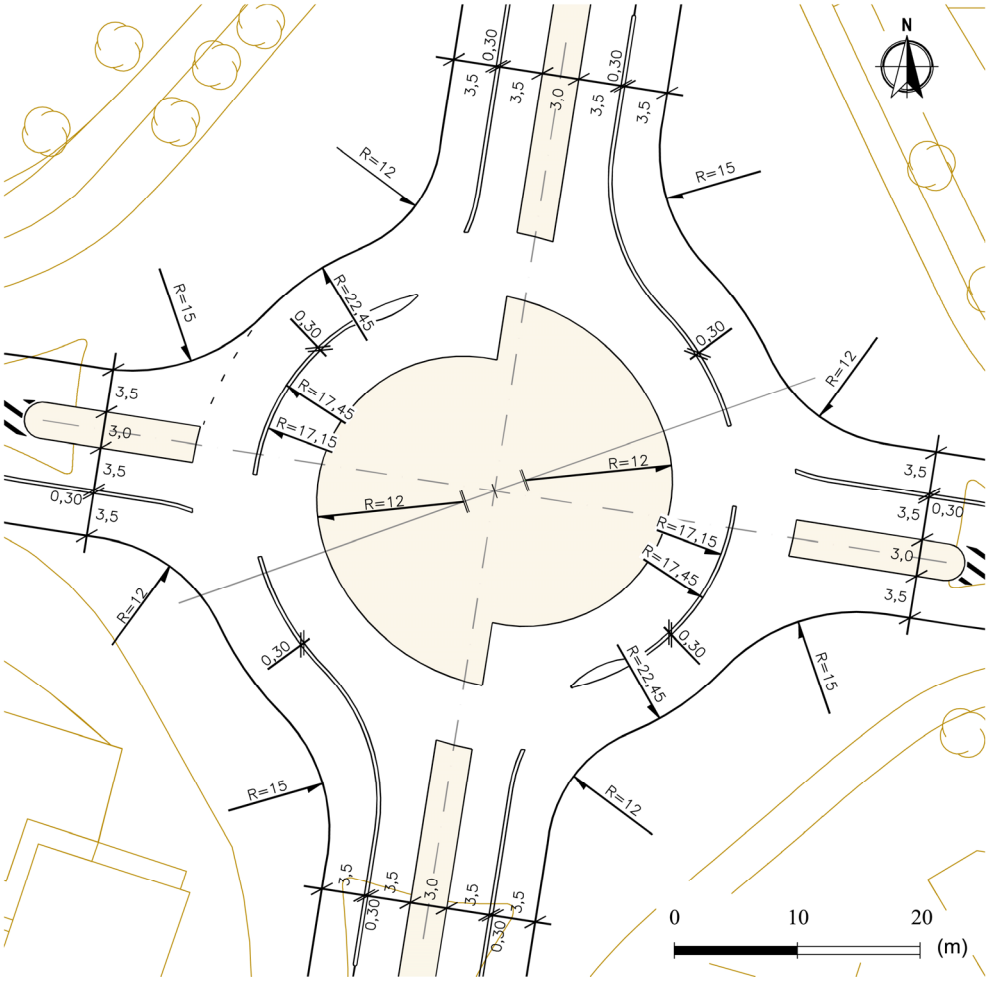


Figura 5.11 - Planta de pormenor da solução proposta

A Figura 5.12 apresenta uma planta com a solução final da turbo-rotunda proposta, inserida na rede viária existente.

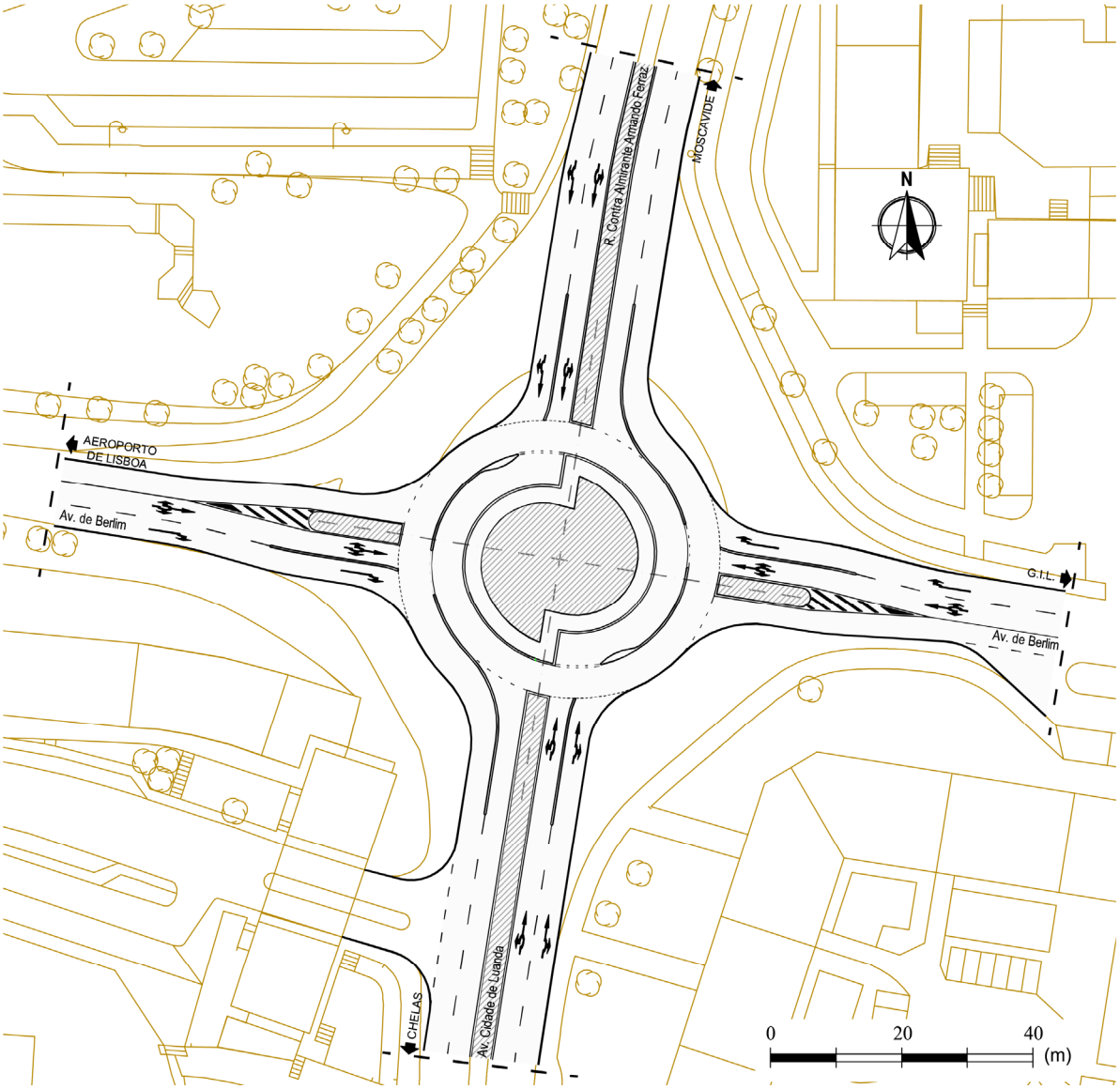


Figura 5.12 - Planta geral da solução proposta

Na figura anterior é possível observar o processo de compatibilização dos ramos da turbo-rotunda com as secções existentes, incluindo o restabelecimento de dois acessos locais, nos ramos Este e Sul. Como referido anteriormente, a turbo-rotunda garante de uma forma geral soluções mais compactas que as suas equivalentes tradicionais, tanto mais neste caso, onde a rotunda original apresenta grandes dimensões, sendo este um dos aspetos que mais se destaca nesta conversão. A análise da nova configuração geométrica permite identificar uma área atualmente ocupada pela rotunda, que seria libertada de função rodoviária, contabilizada em cerca de 2500 m².

5.3.3 AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE SERVIÇO DA SOLUÇÃO PROPOSTA

De forma a avaliar o nível de serviço da turbo-rotunda de tipologia Standard proposta, aplicou-se o modelo probabilístico de Brilon (2005), já descrito anteriormente, assim como os valores indicados no Quadro 5.5. Relativamente aos fluxos de entrada (V_i), assumiu-se que os veículos que realizam movimentos de viragem à esquerda e à direita, utilizam respetivamente as vias esquerda e direita, enquanto aqueles que seguem em frente, quando possível, repartem-se entre as duas vias disponíveis, de forma a assegurar um equilíbrio das cargas iniciais. O tráfego conflituante (Qc) associado a cada uma das vias de circulação será distinto, na medida em que a via esquerda interage com as duas vias de circulação do anel, e a via direita apenas com a via de extradorso. O Quadro 5.6 identifica os valores considerado para cada uma das vias.

Quadro 5.9 - Fluxo de entrada e tráfego conflituante

RAMO	VIA	V_i (uve/h)	Qc (uve/h)
Norte	Esquerda	632	484
	Direita	632	484
Sul	Esquerda	282	800
	Direita	282	800
Este	Esquerda	612	616
	Direita		316
Oeste	Esquerda	340	1384
	Direita	340	668

O Quadro 5.10 apresenta a capacidade total de cada uma das entradas da rotunda existente (Qe) e o respetivo grau de saturação potencial (FRC).

Quadro 5.10 - Capacidade da solução proposta

RAMO	Qe (uve/h)	FRC FRC = Vi / Qe
Norte	1783	71%
Sul	1317	43%
Este	1819	34%
Oeste	1130	60%

O gráfico da Figura 5.13 mostra uma análise comparativa entre a capacidade das entradas da solução existente e da solução proposta, de acordo com os resultados obtidos através do modelo de Brilon.

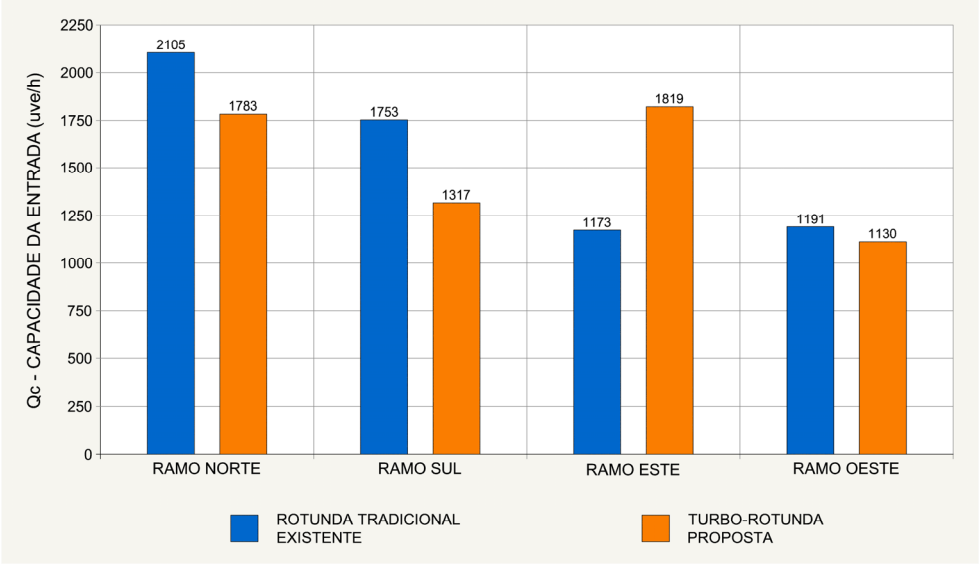


Figura 5.13 - Análise comparativa da capacidade por entrada

Da leitura dos resultados, verifica-se que de uma forma geral a solução proposta garante níveis de capacidade proporcionais, mas ligeiramente inferiores aos atuais. Esta diminuição generalizada é justificada pela existência de uma única via de circulação no anel, que concentra todo o tráfego conflituante na confluência das entradas associadas ao fluxo dominante, reduzindo o intervalo crítico. Por outro lado, os ramos associados ao fluxo secundário, ao concentrarem na mesma via (via da esquerda) os movimentos de ida em frente e viragem à esquerda, impedem o efeito de equilíbrio de cargas típico das rotundas tradicionais onde o condutor que pretende seguir em frente, tendencialmente escolhe a via com menor fila. Assim, a capacidade das vias secundárias depende fortemente da importância dos movimentos de viragem à esquerda. Estes resultados estão de acordo com as posições defendidas mais recentemente por autores que avaliaram o desempenho de turbo-rotundas por recurso a modelos convencionais (Mauro e Branco,2010) ou através da aplicação de técnicas de microssimulação (Bastos Silva et al., 2011). A única exceção verifica-se no ramo Este, onde a capacidade estimada praticamente duplicou, em resultado da nova geometria prever a duplicação do número de vias de entrada.

Em termos globais, o nível de desempenho é similar. De acordo com o modelo de Brilon, a capacidade global estimada da intersecção passou de 6222 uve/h na rotunda tradicional existente para 6050 uve/h na turbo-rotunda proposta, o que representa um decréscimo de aproximadamente 3%, ou seja inferior ao erro habitualmente associado à normal estimação de capacidades. Estes resultados confirmam ainda a escolha acertada da tipologia geométrica Standard, na medida em que à direção do fluxo dominante, estão associados os ramos com maior capacidade.

O gráfico da Figura 5.13 mostra uma análise comparativa entre o grau de saturação potencial de cada entrada na solução existente e na solução proposta, de acordo com os resultados obtidos através do modelo de Brilon.

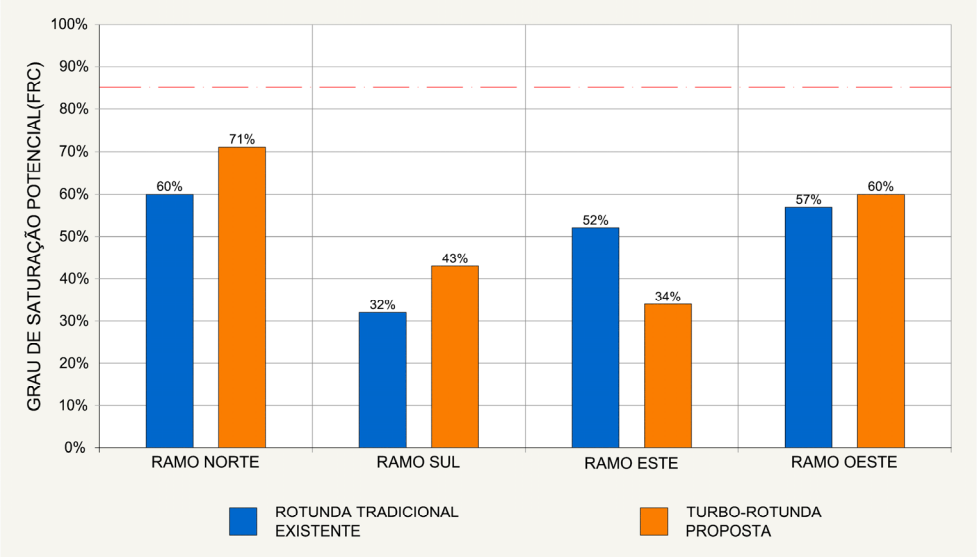


Figura 5.14 - Análise comparativa do grau de saturação potencial por entrada

A análise dos resultados obtidos permite concluir que na entrada Norte, ainda que tenha existido um acréscimo de 11%, o seu grau de saturação potencial continua abaixo do valor de referência relativo ao limiar de saturação. Na entrada Sul, apesar do acréscimo de 12%, o grau de saturação potencial continua a ser cerca de metade do valor de referência, permitindo um potencial crescimento de tráfego. O ramo Este, em virtude da duplicação das vias de entrada, reduz significativamente (18%) o grau de saturação potencial, aumentando assim a reserva de capacidade. Finalmente no ramo Oeste o grau de saturação potencial sofre um acréscimo de 3%, mas continua a situar-se abaixo do valor de referência.

Assim, com base na avaliação realizada com recurso ao modelo de Brilon, conclui-se que da transformação da rotunda existente numa turbo-rotunda de tipologia Standard, ainda que resulte numa pequena diminuição da capacidade global da intersecção comparativamente à solução atual, é contrabalançada por um aumento significativo dos níveis de segurança e pela libertação de espaço público com potencial de aplicação ao apoio ao modo pedonal e/ou ciclável.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A conversão de uma rotunda tradicional numa solução do tipo turbo-rotunda, apresenta um grau de imprevisibilidade assinalável, em face do desconhecimento e da novidade que estas estruturas representam para o condutor comum, que iria inevitavelmente obrigar a um período de adaptação e a uma monitorização constante dos resultados. No âmbito desta dissertação, este estudo de caso

pretendeu analisar o contexto geométrico dessa conversão, e estudar a exequibilidade da mesma tendo por base a matriz de procura de tráfego atual.

Concluiu-se que a transformação para além de viável, sem prejuízo das indispensáveis adaptações no traçado rodoviário descritas ao longo deste capítulo, seria benéfica, na medida em que iria garantir:

- Regularização da secção dos ramos de acesso;
- Regularização do canal de circulação;
- Eliminação da manobras de entrecruzamento;
- Adequação dos parâmetros geométricos à prática atual de conceção de rotundas;
- Redução da área de ocupação;
- Reestruturação do espaço público adjacente às vias rodoviárias em face das novas áreas libertadas;
- Manutenção dos níveis de serviço, dentro de condições de funcionamento aceitáveis.

No que diz respeito aos níveis de capacidade da solução proposta, os resultados obtidos através da aplicação do modelo probabilístico desenvolvido por Brilon (2005), mostram que a transformação proposta diminuiria ligeiramente a capacidade global da intersecção, garantindo simultaneamente uma manutenção genérica do grau de saturação potencial das várias entradas, abaixo do valor de referência (85%). Importa aqui referir que a capacidade global estimada para a solução proposta (6050 uve/h) é muito superior aos valores de referência indicados pela bibliografia de referência (CROW, 2008), que para esta tipologia geométrica aponta valores de capacidade global na ordem dos 3500 a 3800 uve/h. Esta disparidade poderá dever-se quer aos modelos de estimação usados, quer à repartição de tráfego considerada, que nesse documento foi numa proporção em que o fluxo secundário equivale a 40% do fluxo principal, enquanto neste estudo de caso essa percentagem sobe para 55%, sendo esta última determinante nos resultados obtidos. Este aspeto foi estudado por Bastos Silva (et al., 2011) que num estudo comparativo com diversos cenários de repartição de tráfego, apurou diferenciais de capacidade variáveis entre -28% e +17.5%, apenas com a alteração da distribuição de tráfego na via secundária.

Assim, considera-se que a turbo-rotunda proposta de tipologia Standard se adequa convenientemente às características geométricas e de tráfego atuais, resultando numa solução eficaz face ao modelo probabilístico que esteve na base da estimação da sua capacidade potencial.

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

Com este trabalho pretendeu-se contribuir para melhorar os conhecimentos sobre o conceito das turbo-rotundas enquanto alternativa competitiva às rotundas tradicionais com duas vias de circulação. O trabalho desenvolvido assentou essencialmente na análise detalhada e crítica da bibliografia existente e na experiência adquirida em países que já dispõem de exemplos construídos. Essa fonte de informação que se revelou fundamental ao desenvolvimento da investigação foi igualmente o principal obstáculo à persecução dos objetivos propostos, na medida em que o número de países que conta com a aplicação do conceito continua a ser em número escasso, sendo igualmente em número reduzido os trabalhos científicos publicados sobre esta matéria. Neste domínio apenas a Holanda e a Eslovénia contam com manuais de apoio à conceção, e no primeiro caso unicamente disponível na língua materna.

Tendo por base a literatura de referência, o objetivo central desta dissertação focou-se no desenvolvimento de regras gerais e específicas de conceção de turbo-rotundas, as quais se procuraram adaptar não só ao enquadramento legal em vigor, mas também às disposições técnicas nacionais para conceção de rotundas tradicionais.

Para a prossecução deste objetivo básico revelou-se central identificar as potencialidades e debilidades do novo conceito, como forma de abordagem prévia à definição das regras geométricas de conceção. Esse trabalho incidiu sobretudo numa análise comparativa das potencialidades em termos de segurança rodoviária e capacidade globais da turbo-rotunda face às congéneres tradicionais com duas ou mais vias no anel de circulação. Em termos de segurança global verificou-se que os resultados obtidos nos diversos países são unânimes ao identificarem uma diminuição inequívoca da sinistralidade, em consequência da diminuição do número e gravidade dos pontos de conflito e da acalmia generalizada do tráfego decorrente da imposição física de trajetórias com maior deflexão. Ao nível da capacidade global da solução verifica-se que os resultados nem sempre são consensuais havendo autores que apontam para um aumento generalizado e incondicional da capacidade, enquanto que outros defendem que o aumento potencial é fortemente dependente da tipologia geométrica escolhida e das características prévias de repartição de tráfego na intersecção.

Os trabalhos prosseguiram mediante a definição de recomendações e regras de apoio à conceção geométrica de turbo-rotundas.

A turbo-rotunda, na qual os movimentos do tráfego se processam em circuitos espirais em torno da ilha central, assenta num procedimento construtivo diferente da abordagem clássica para materialização do anel de circulação. Partindo das exigências associadas ao veículo de projeto, devidamente enquadrado pela legislação e disposições técnicas nacionais, o processo geométrico rígido, assenta na definição de espirais bicêntricas que permitem a sua adaptação às características do tráfego, mediante a introdução de variantes no processo de geração e disposição do turbo-bloco associado à escolha do número de vias que cada um dos ramos disponibiliza. É assim possível recorrer a um conjunto de *layouts* pré-estabelecidos que garantem uma solução eficaz e adaptada a diferentes matrizes de procura de tráfego.

Na conceção geométrica de cada um desses *layouts*, ao invés do conceito corrente das rotundas tradicionais que estabelece gamas de variação dimensional para cada um dos parâmetros geométricos prevalecentes, é transversal à bibliografia de referência, a definição de classes dimensionais a que correspondem dimensões pré-definidas. Assim, para cada uma das tipologias fundamentais de turbo rotundas, cujo estudo nesta tese se limitou às tipologias que dispõe de aplicação prática comprovada (Standard, Oval, Joelho e Espiral), estão estabelecidas quatro soluções padronizadas, referenciadas pelo valor do raio de curvatura do bordo exterior da ilha central, e com os restantes parâmetros geométricos pré-definidos com base neste valor de referência.

Esta abordagem é prática e interessante, na medida em que ao uniformizar e limitar normativamente os valores dos parâmetros geométricos, os decisores garantem que qualquer infraestrutura desta natureza introduzida na rede rodoviária, cumpre na íntegra os requisitos que lhe serviram de pressuposto, e que o seu desempenho global, quer ao nível dos índices de segurança, de capacidade, velocidades de atravessamento, etc., tende a ser previsível e em conformidade com os exemplos estudados a montante e que estiveram na origem da elaboração das respetivas normas. Esta abordagem introduzida inicialmente nos Países Baixos, difundiu-se a todos os países que desde aí desenvolveram soluções desta natureza, que por se basearem na prática holandesa, adotaram os mesmo princípios construtivos.

Esta segmentação geométrica apresenta todavia uma característica que lhe proporciona alguma flexibilidade, na medida em que se tratando de um processo geométrico com alguma complexidade, mas baseado em equações matemáticas elementares e perfeitamente definidas, admite a utilização de múltiplos pressupostos dimensionais (largura das vias, sobrelarguras, raios de curvatura, dimensão dos elementos construtivos) diferentes daqueles que a documentação de referência prescreve. Essas adaptações, ainda que garantindo o cumprimento dos requisitos fundamentais subjacentes às turbo-rotundas, têm inerente um maior grau de imprevisibilidade, em resultado de não estarem testadas a partir de observação direta do funcionamento da infraestrutura inserida no meio. Sem prejuízo dessa adaptabilidade, importa neste âmbito referir que os parâmetros

geométricos associados a cada classe dimensional, preconizados originalmente pelas normas holandesas, são compatíveis com as disposições técnicas portuguesas, e como tal, qualquer alteração nos valores base estabelecidos seria possível, mas não necessária numa potencial adoção desta solução no contexto nacional.

Quanto às dimensões da infraestrutura, a análise comparativa entre a área ocupada pelo anel de circulação das diferentes tipologias geométricas, comparativamente à rotunda tradicional com duas vias não permitiu apontar uma vantagem inequívoca. É no entanto de notar que em condições dimensionais equivalentes, os layouts mais usuais, Standard e Oval, resultam em soluções mais compactas o que lhe confere vantagens adicionais quando inseridas em locais onde o desenvolvimento da solução geométrica esteja espacialmente condicionado.

Apesar destas inúmeras vantagens potenciais, foi igualmente possível identificar debilidades que podem condicionar o uso das turbo-rotundas, designadamente:

- A condição de ortogonalidade entre os ramos na aproximação ao anel, com os respetivos eixos a cruzar um ponto comum e singular. Esta limitação condiciona fortemente o seu uso em espaços urbanos consolidados;
- A dificuldade do veículo descrever circuitos completos em torno do anel, como forma de corrigir a escolha da entrada, ou realizar inversão de marcha. São portanto de evitar em locais onde exista uma percentagem elevada de condutores não habituais;
- O processo de decisão sobre a via a adotar na estrada, ser remetido para o trecho de aproximação. Em consequência a solução tende a não funcionar quando desprovida de pré-sinalização adequada.

Se a primeira característica sendo intrínseca ao processo de conceção da turbo-rotunda, pode ser amenizada através de uma cuidada adaptação e adequação do traçado dos ramos, as restantes afiguram-se como potenciais pontos de ambiguidade, face à incerteza que podem provocar ao condutor no atravessamento da intersecção, e na forma como esse comportamento gera insegurança nos restantes utilizadores. A medida de mitigação mais eficaz passa pela introdução de sinalização de orientação com características específicas para as turbo-rotundas.

Estas questões sublinham a importância a atribuir à pré-sinalização. De facto a sinalização de orientação associada a este tipo de soluções assume um papel fundamental no seu bom funcionamento, sendo indispensável recorrer quer a sinalização de seleção de vias (de colocação lateral ou em pórtico) quer à marcação de “setas de seleção de rotundas” no pavimento das vias de entrada, orientando o condutor em relação ao destino pretendido. Todavia alguns destes dispositivos, violam nas condições atuais o RST, assumindo-se este aspeto como um dos

obstáculos legais à eventual introdução de uma turbo-rotunda na rede viária portuguesa, na medida em que esta sinalização específica é, de uma forma geral, considerada indispensável para o funcionamento eficaz da solução.

As recomendações técnicas no que diz respeito à seleção dos materiais e métodos construtivos, são de forma geral análogos à prática nacional neste domínio. Nesta linha de ação merece especial referência o separador físico entre vias no anel de circulação, elemento considerado fundamental ao funcionamento eficaz da solução. Embora não exista no mercado nacional um modelo de lancil com as características especificadas nos manuais holandês e esloveno, é possível encontrar dispositivos com características físicas similares e portanto capazes de responder com eficácia às exigências que lhe são atribuídas.

A praticabilidade, potencialidade e debilidades do conceito, foram posteriormente testadas numa aplicação prática aplicada à rotunda existente na Praça Baden-Powell em Lisboa. A seleção do *layout* recaiu sobre uma solução do tipo Standard*,* essencialmente por se tratar de uma intersecção que apresenta um evidente desequilíbrio em termos de fluxos de procura de tráfego. A aplicação escrupulosa das regras estabelecidas resultou numa solução interessante capaz de responder com elevado nível de desempenho às exigências locais, registando-se mesmo um ligeiro aumento da capacidade em uma das entradas. Apesar do estudo de caso ter recaído sobre uma rotunda tradicional significativamente sobredimensionada, a sua conversão em turbo-rotunda, permitiu libertar espaço com função rodoviária numa área bastante significativa, potenciando a sua reafectação aos sistemas pedonais, cicláveis ou de estacionamento.

A disseminação das turbo-rotundas em detrimento das rotundas tradicionais com duas ou mais vias no anel de circulação em países do norte da Europa com larga experiência no ordenamento do espaço público, assim como o aumento do interesse pelo conceito, comprovam a eficácia da solução aos diferentes níveis, o que abre perspetivas de aplicação do conceito a outros países, tais como Portugal. Nesse sentido, o presente documento procurou constituir uma primeira abordagem ao desenvolvimento de disposições técnicas capazes de apoiar a conceção geométrica de turbo-rotundas, prevenindo desde já o aparecimento de soluções empíricas e heterogéneas, indesejáveis em face da sua natureza geometricamente rigorosa.

6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Esta dissertação deve ser entendida como um ponto de partida para a realização de outros estudos mais aprofundados sobre alguns dos aspetos aqui expostos. Deste logo a adaptação do enquadramento legal, quer ao nível de determinados tipos de painéis verticais e marcas no pavimento, no Regulamento de Sinalização de Trânsito, quer ao nível da identificação dos procedimentos comportamentais a adotar na presença de uma rotunda/turbo-rotunda. No âmbito

das turbo-rotundas considera-se indispensável a aposta em campanhas de sensibilização e familiarização da população em geral com este conceito, mitigando potenciais problemas de índole comportamental.

Como ponto prévio neste trabalho, considerou-se que o desenvolvimento de estudos no âmbito da capacidade merece especial atenção, na medida em que se afiguram como fundamentais face à pouca investigação disponível sobre o tema que incide sobretudo na tipologia Standard. Tal como se conclui no estudo de caso, qualquer avaliação dessa natureza deve ser feita caso a caso, sob pena de se utilizarem soluções que no final, não se adequem às características intrínsecas da intersecção e/ou da repartição de tráfego existente. Assim, sugere-se o desenvolvimento de ensaios que englobem a totalidade das tipologias geométricas teóricas básicas aliando-as a múltiplos cenários de repartição de tráfego, tentando desta forma encontrar uma tendência, que possa resultar na definição de regras comprovadas teoricamente e aceites transversalmente.

Perante o facto desta dissertação assentar numa abordagem fundamentalmente bibliográfica do tema, que tem subjacente toda uma experiência adquirida noutros países, considera-se fundamental como ponto de partida para estudos mais profundados enquadrados no contexto nacional, a construção de uma turbo-rotunda em regime experimental, com o seu funcionamento sujeito a uma monitorização contínua e alargada no tempo. Só assim será possível avaliar a eficiência real da solução, face aos comportamentos e características intrínsecas dos condutores portugueses, assente no desenvolvimento de análises “antes e depois”. Uma solução deste tipo permitiria ainda comprovar os indicadores de capacidade aferidos através de modelos matemáticos e/ou de microssimulação.

Enquanto essa pretensão não for concretizada, considera-se pertinente complementar o estudo de caso apresentado com outras investigações globais da mesma natureza, mais exaustivas e alargadas a rotundas tradicionais de diferentes características e/ou integradas em diferentes contextos rodoviários, recorrendo a indicadores de sinistralidade e estudos de tráfego atualizados e rigorosos para analisar os impactos associados a uma possível conversão.

Finalmente seria relevante a integração da metodologia de conceção geométrica apresentada, num *software* de traçado rodoviário, o qual a partir da escolha da tipologia geométrica e dos pressupostos dimensionais, originasse a base da geometria final.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUSTROADS (1993) – *Guide to Traffic Engineering Practice; Part 6: Roundabouts*. 2nd ed. Sydney: Austroads National Office Editor. ISBN 0-85588-4252-8

BASTOS SILVA, A.M. (2004) – *Definição de uma Metodologia de Concepção de Cruzamentos Giratórios - Volume I*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra - Tese de Doutoramento, Abril

BASTOS SILVA, A.M.; SECO, A.J. (2002) – *Como se deve comportar o condutor no atravessamento de uma rotunda - Definição de procedimentos e regras*. 2º Congresso Rodoviário Português. Lisboa, Portugal, 21 a 23 de Novembro de 2002

BASTOS SILVA, A.M.; SECO, A.J. (2004) – *Dimensionamento de Rotundas – Caracterização Base e Projecto Geométrico*. Relatório actualizado no âmbito do acordo-programa celebrado entre a FCTUC e o IEP, intitulado "Desenvolvimento de uma Proposta de Norma para Projecto de Rotundas. Coimbra, Portugal. Maio

BASTOS SILVA, A.M.; SANTOS S.; VASCONCELOS A.L. (2011) - *As Turbo-rotundas, avaliação do seu potencial de desempenho*. XXV ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Belo Horizonte. Minas Gerais, Brasil. 7 a 11 de Novembro de 2011

BING MAPS (2012) – Site Oficial. [Consult. 31 Jul. de 2012]. Disponível em WWW: <URL: http:// http://www.bing.com/maps>.

BRILON, W. (2005) – *Roundabouts: A State of the Art in Germany.* National Roundabout Conference, May 22-25. Vail, Colorado

BRILON, W. (2008) - *Turbo-Roundabout - an Experience from Germany*. Institute for Transportation and Traffic Engineering. TRB National Roundabout Conference, May 18-21, Kansas City, U.S.A.

BROWN, M. (1995) – *The Design of Roundabouts. State of the Art Review*. Transport Research Laboratory. Department of Transport. London, United Kingdom. ISBN 0-11-551741-3

CCDRN (2008) – *Manual de Planeamento de Acessibilidades e Transportes. Volume 6 - Rotundas*. Comissão de Cooredenação e Desenvolvimento Regional do Norte. Dezembro

CERTU (2009) – *Les accidents dans les carrefours giratoires urbains. Étude statistique de 1993 à 2005.* Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les Constructions Publiques. Lyon, France. Avril. ISSN 1263-2570

CÓDIGO DA ESTRADA – DL nº 114/94 de 3 de Maio, alterado pelos DL nº 2/98, de 3 de Janeiro, DL nº 265-A/2001 de 28 de Setembro e DL nº 44/2005 de 23 de Setembro

CROW (2005) – *Richtlijnen voor Bebakening en Markering van Wegen. Publicatie 207*. Ede. CROW. Dutch Information and Technology Platform

CROW (2008) – *Turborotondes. Publicatie 257*. Ede. CROW. Dutch Information and Technology Platform, April. ISBN 978-90-6628-513-2

DfT (2007) - *Geometric Design of Roundabouts (TD 16/07)* - Department for Transport – Volume 6, Section 2, Part 3 of the Design Manual for Roads and Bridges. United Kingdom. August

EP (2005) – *Dimensionamento de Rotundas. Caracterização funcional, dimensionamento operacional e projeto geométrico*. Documento resumido. Portugal. Novembro

FHWA (2000) – *Roundabouts: An Informational Guide* – U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration – Publication nº RD-00-067, Virginia, USA. June

FORTUIJN, L.G.H. (2007) - *Turbo-Kreisverkehre: entwicklungen und erfahrungen.* (Turbo-rotundas: Desenvolvimentos e Experiências). Seminar Aktuelle Theme der Strassenplanung. The Federal Highway Research Institute (BASt). January 25. Bergisch Gladbach, Germany.

FORTUIJN, L.G.H. (2009) - *Turbo Roundabouts: Design Principles and Safety Performance*. Journal of the TRB 88th Annual Meeting, January 11-15, Washington D.C., U.S.A., pp 16-24

FORTUIJN, L.G.H. (2011) - *Roundabouts in the Netherlands: Development and experiences*. International Roundabout Design and Capacity Seminar, 1 July 2011, in connection with the TRB 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service

FORTUIJN, L.G.H; HARTE, V. F. (1997) - *Multilane Roundabouts: An Exploration of New Forms.* Traffic Engeneering Working Days 1997. CROW, Ede, The Netherlands

FORTUIJN, L.G.H.; CARTON, P.J. (2005) - *Turbo circuits: A well-tried concept in a new guise*. Board of Economy and Transport, Province of South Holland, The Netherlands.

GAMBARD, J.M. (1988) – *Safety and Design of Unsignalized Intersections in France. Intersections Without Traffic Signals. Proceedings of an International Workshop*, Werner Brilon (Ed.), pp 48-61, 16-18 March. Bochum, Germany.

GIUFFRÈ, O.; GUERRIERI, M.; GRANÀ, A. (2009) - *Turbo-roundabout general design criteria and functional principles: case studies from real world*. Università degli Studi di Palermo. Palermo, Italy. October

GOOGLE EARTH (2012) – Site Oficial. [Consult. 31 Jul. de 2012]. Disponível em WWW: <URL: http://www.google.com/earth/index.html>.

GUICHET, B. (1992) – *Typologie des Accidents dans les Giratoires Urbains.* Centre d'Etudes Techniques de Léquipement de l'Ouest - Actes du Séminaire International "Giratoire 92", pg. 145-152, Edition SETRA/CETUR. Nantes, France. Octobre

HALL, R. D.; SURL, A. J. (1981) – *Accidents at Four-arm Roundabouts and Dual-carriageway Junctions*. *Some Preliminary Findings.* Traffic Engineering and Control, pp. 339-344, June

HCM (2000) – *Highway Capacity Manual.* Transportation Research Board. National Research Council. Washington D.C., U.S.A. ISBN 0-309-06681-6.

InIR (2012a) – *Dimensionamento de rotundas: Documento síntese.* Disposições Normativas. Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias. Lisboa. [Consult. 31 Jul. de 2012]. Disponível em WWW: <URL:http://www.inir.pt/portal>

InIR (2012b) – *Medida de acalmia de tráfego. Volume 1. Medidas aplicadas em atravessamentos de localidade.* Disposições Normativas. Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias. Lisboa. [Consult. 31 Jul. de 2012]. Disponível em WWW: <URL:http://www.inir.pt/portal>

InIR (2012c) – *Marcas rodoviárias – Características dimensionais, critérios de utilização e colocação*. Disposições Normativas. Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias. Lisboa. [Consult. 31 Jul. de 2012]. Disponível em WWW: <URL:http://www.inir.pt/portal>

InIR (2012d) – *Marcas rodoviárias: Dispositivos retrorrefletores complementares*. Disposições Normativas. Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias. Lisboa. [Consult. 31 Jul. de 2012]. Disponível em WWW: <URL:http://www.inir.pt/portal>

InIR (2012e) – *Sinalização vertical: Critérios de colocação*. Disposições Normativas. Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias. Lisboa. [Consult. 31 Jul. de 2012]. Disponível em WWW: <URL:http://www.inir.pt/portal>

InIR (2012f) – *Norma de traçado - Revisão*. Disposições Normativas. Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias. Lisboa. [Consult. 31 Jul. de 2012]. Disponível em WWW: <URL:http://www.inir.pt/portal>

INMAN, V.W.; DAVIS, G.W. (2007) - *Synthesis of Literature Relevant to Roundabout Signalization to Provide Pedestrian Acces. Final Report*. Unites States Access Board. Virginia, U.S.A. January

KIMBER, R.M. (1980) - *The Traffic Capacity of Roundabouts*. Transport and Road Research Laboratory. Laboratory Report 942. ISSN 0305-1293. Crowthorne. England

MAURO, R.; BRANCO, F. (2010). *Comparative analysis of compact multilane roundabouts and turboroudabouts*. Journal of Transportation Engineering. April

MAURO, R.; CATTANI, M. (2010). *Potencial Accident Rate of Turbo-roundabouts*. 4th International Symposium on Highway Geometric Design, June 2-5, 2010. Valencia, Spain

MAYCOCK, G; HALL, R.D (1984) - *Accidents at 4-arm roundabouts.* Transportation Research Laboratory (TRL) Report LR 1120. Department of Transport, Crowthorne, United Kingdom

MVW (2009) – *Roundabouts Application and Design. A Pratical Manual*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Partners for Roads. June. The Netherlands

QDMR (1998) – *Relationship Between Roundabout Geometry and Accident Rates*. Queensland Department of Main Roads. Queennsland, Australia. April

SETRA (1998) - *Aménagement des Carrefours Interurbains sur les Routes Principales. Carrefours Plans. Guide Technique*. Sevice d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes. Centre de la Sécurité et des Techniques Routières. Bagneux, France. Decembre

STUWE, B. (1991) – *Capacity and Safety of Roundabouts in Germany.* Proceedings of an International Worshop "Intersections Without Traffic Signals II", Springer-Verlag Editor, July. Bochum, Germany, pp. 1-12

SWOV (2007) – *Factsheet Rotondes*. Foundation for Road Safety Research. Leidschendam, The Netherlands. August

TAEKRATOK, T. (1998) – *Modern Roundabouts for Oregon*. #98-SRS-522. Oregon Department of Transportation. Research Unit. Oregon, U.S.A. June

TOLLAZZZI, T. (2010) – *New Geometric Type of at-grade Intersections: Turbo and Flower Roundabouts.Slovenian Guidelines and Experiences*. SIIV/DIMS Summer School. Advanced Course in Highway and Traffic Engineering. Trento, Italy. September

WIJK, W. (2009) - *Turboroundabouts a safe solution for Hungary?*. Hungarian Road Society. Budapest, Hungary. October

YPERMAN, I.; IMMERS, B. (2003) - *Capacity of a turbo-roundabout determined by micro-simulation*, Katholieke Universiteit Leuven, Department of Civil Engineering - Transportation Planning and Highway Engineering. Leuven, Belgium