

AS TURBO-ROTUNDAS, AVALIAÇÃO DO SEU POTENCIAL DE DESEMPENHO

Ana Bastos Silva

Silvia Santos

Universidade de Coimbra

Departamento de Engenharia Civil

António Luis Vasconcelos

Instituto Politécnico de Viseu

Departamento de Engenharia Civil

RESUMO

O conceito de turbo-rotunda surgiu no final dos anos 90 como uma solução alternativa às rotundas normais com múltiplas vias e com o objectivo de resolver os problemas de segurança relacionados com os entrecruzamentos no anel de circulação. Esses comportamentos têm-se traduzido em conflitos e, por vezes, em acidentes, embora geralmente de pequena gravidade. Tratando-se de um conceito recente, são poucos os estudos científicos que abordam esta matéria. Nesse contexto, este artigo procura, por um lado, apresentar o conceito e avaliar a sua adaptabilidade às condições de circulação nacionais e, por outro lado, contribuir para um melhor entendimento sobre as suas potencialidades comparativamente à rotunda normal, nomeadamente no que respeita à segurança e à capacidade. A análise comparativa de capacidades é baseada em modelos analíticos de base probabilística e em técnicas de microssimulação.

ABSTRACT

The turbo-roundabout concept emerged in the late 1990s in order to solve the problems related with the weaving maneuvers in the multiple lane roundabout circulatory carriageway. This behavior results in conflicts, and sometimes, in accidents, although mostly of low severity. The concept is recent and the scientific studies related to this issue are still very scarce. In this context, this paper will introduce the concept and evaluate its applicability to national traffic conditions thus contributing to a better understanding of its potential when compared to normal roundabouts, particularly concerning safety and capacity issues. This analysis is based on analytic capacity models based on the gap-acceptance theory and in microsimulation techniques.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

As intersecções rodoviárias representam os principais pontos críticos da rede viária, quer ao nível da fluidez e capacidade quer da sinistralidade. Nessa óptica, continua a justificar-se o desenvolvimento de investigação científica nesta matéria, seja na reformulação e optimização do funcionamento das soluções tradicionais seja na procura de novos conceitos que procurem minimizar ou resolver problemas de funcionamento.

As rotundas normais têm vindo a afirmar-se, ao longo das últimas décadas, como excelentes soluções em termos de custo-benefício, assegurando múltiplas funções: regulação do trânsito; acalmia de tráfego; requalificação urbana e paisagística, etc. A sua incorporação na rede rodoviária de diversos países traduziu-se, de forma geral, em benefícios evidentes, designadamente quando comparados com os cruzamentos prioritários (Bastos Silva, 2004; Brown, 1995; FHWA, 2000).

Caracterizam-se por contribuir eficazmente quer para a redução da velocidade na zona de negociação e atravessamento da rotunda, quer para a homogeneização da sua distribuição, contribuindo assim para um aumento acentuado dos níveis de segurança (TRB, 1998). Em consequência e quando comparadas com outro tipo de cruzamentos tradicionais de nível, esta solução associa-se habitualmente a menores níveis de sinistralidade bem como a uma redução significativa da sua gravidade (Stuwe, 1991 e Hall e Surl, 1981; Maycock e Hall, 1984). Mas a eliminação em mais de 95% do número de mortos (FHWA, 2000; Brown, 1995), foi

provavelmente o indicador que mais contribuiu para a sua disseminação em praticamente todo o mundo, durante a década de 70. Em Portugal, desde a década de 80 que as rotundas se têm expandido a todo o país, abrangendo actualmente quer o domínio urbano quer interurbano (Bastos Silva, 2004). As rotundas com duas vias de entrada e de circulação são as mais comuns em Portugal, sendo maioritariamente aplicadas em circulares urbanas e em espaços suburbanos.

Apesar dos seus excelentes níveis de desempenho geral, a experiência adquirida a nível internacional, ao longo das três últimas décadas, tem vindo a evidenciar alguns problemas de funcionamento ligados ao conceito e que o enquadramento legal nem sempre permite resolver de forma eficaz. Esses problemas são tanto mais comuns e graves à medida que aumenta o número de vias disponibilizadas pela rotunda. O conceito de turbo-rotunda surgiu assim recentemente na Holanda como forma de ultrapassar esses problemas, afirmando-se como uma solução alternativa extremamente eficiente. Apesar do seu enraizamento em alguns países do norte da Europa, a falta de trabalhos publicados sobre esta temática, agravada pela falta de experiência, em termos de aplicações práticas do conceito, leva a que a sua expansão a outros países, seja ainda encarada com muita precaução.

Nessa óptica, o presente trabalho centra-se na apresentação do conceito de turbo-rotunda e na análise comparativa do seu nível de desempenho relativamente às rotundas normais tradicionais com características gerais similares. Essa análise é particularmente centrada na avaliação do aumento dos níveis de segurança e de capacidade, suportada pela aplicação de modelos de estimação de capacidade de base probabilística e de técnicas de microsimulação.

1.2. Os principais problemas de funcionamento das rotundas normais

A aplicação de rotundas em diversos países tem vindo a identificar algumas debilidades e problemas de funcionamento, particularmente relacionados com a adopção de comportamentos erráticos nas zonas da entrada, anel e saída de rotundas com múltiplas vias.

O desenvolvimento de trabalhos de investigação (Bastos Silva, 1997; Bastos Silva, 2004) aplicado a rotundas com duas vias de entrada e de circulação, veio confirmar a prática corrente de comportamentos de risco, associados frequentemente ao traçado de trajectórias rectilíneas e de mínimo esforço (ver Figura 1) traduzindo-se na geração de conflitos entre correntes de tráfego e, por vezes, em acidentes. Essa investigação permitiu concluir que cerca de 40% dos condutores que circulam pela via da direita tendem a cortar directamente a via da esquerda na zona de atravessamento do anel com vista a obter trajectórias directas e confortáveis (Figura 1_a). Por sua vez, mais de 20% dos condutores que optam pela via da esquerda, nas imediações da entrada, decidem sair do anel através da via da direita, minimizando assim o seu incómodo de condução.

Também as deficiências ao nível da sinalização e, em particular, da pré-sinalização se traduzem numa maior dificuldade do condutor em optar atempadamente pela via mais adequada ao destino pretendido. Este tipo de conflitos, em alguns países, como é o caso de Portugal, é agravado pela falta de enquadramento legal que defina regras e procedimentos específicos a serem adoptados nas rotundas. Em consequência, é possível registar um número significativo de condutores que optam pela via exterior da rotunda para a execução de manobras de viragem à esquerda e de inversão de marcha (Figura 1_b).

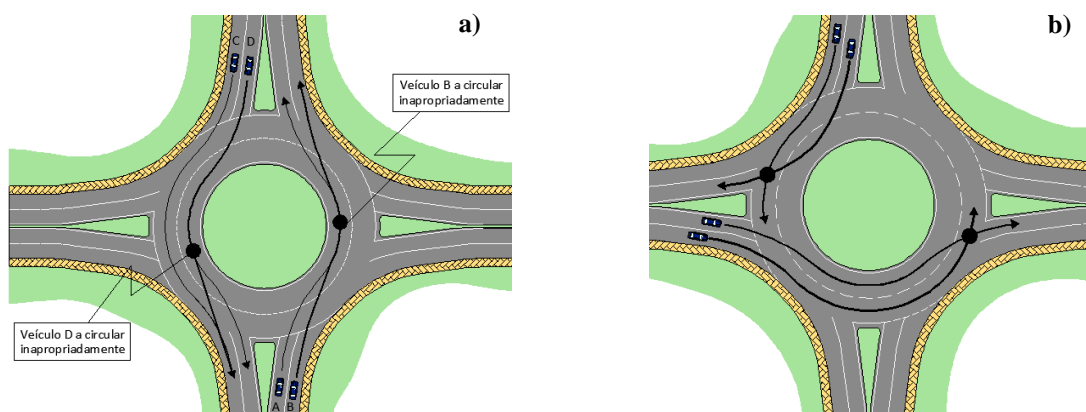


Figura 1: Comportamentos característicos do atravessamento de rotundas com múltiplas vias de circulação, fonte: (Bastos Silva, 2004)

Estes comportamentos traduzem-se em entrecruzamentos nas zonas de entrada e de atravessamento do anel, acompanhado de “invasões sistemáticas” das vias adjacentes, sendo esta situação agravada face a soluções que potenciem o atravessamento a velocidades elevadas e que disponibilizem múltiplas vias de circulação.

De facto, constata-se que a transformação de uma rotunda com uma só via de circulação numa rotunda com 2 vias se traduz na triplicação do número de pontos de conflito (de 8 para 24 - Figura 2_a), podendo mesmo quadruplicar se for considerada a prática de comportamentos erráticos dentro do anel (Figura 2_b). Importa ainda sublinhar que a adopção de múltiplas vias de circulação se traduz na necessidade de salvaguardar larguras consideráveis no anel de circulação, e portanto em dificuldades acrescidas para assegurar os níveis de deflexão adequados.

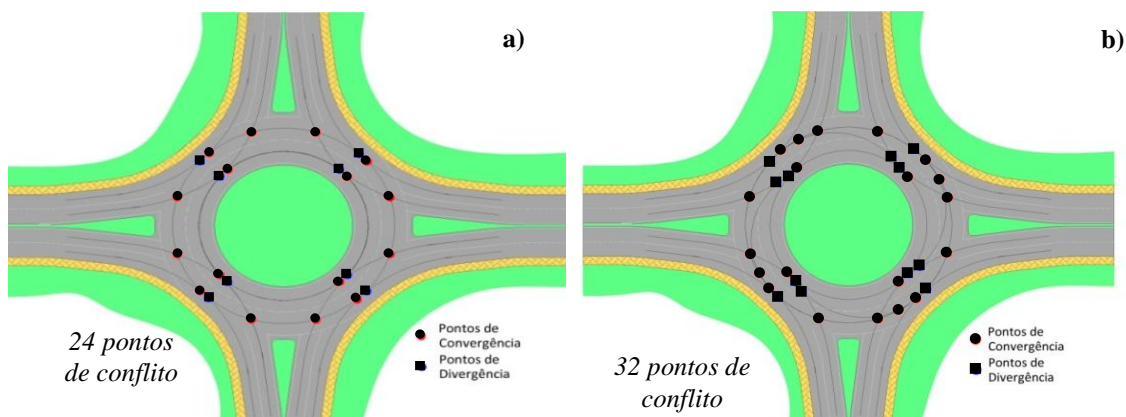


Figura 2: Pontos de conflito em rotundas com duas vias de circulação: a) comportamentos correctos; b) comportamentos erráticos

Estes problemas têm levado alguns países, como é o caso da França (Setra, 1984, 1998; Guichet, 1992), Alemanha (Brilon, 2005) e Suíça (Bovy et al., 1991), a condicionarem significativamente a aplicação de soluções com múltiplas vias de circulação, a situações excepcionais e devidamente justificadas. Por sua vez, a Inglaterra (DfT, 1993, 2007) e a Austrália (Austroads, 1993) têm 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 na rotunda. Apesar dessas tentativas devidamente complementadas por um enquadramento legal adequado, verifica-se que os acidentes por entrecruzamento em rotundas, embora pouco graves, continuam a ser os mais frequentes em diversos países, merecendo a preocupação da comunidade técnica e científica.

2. AS TURBO-ROTUNDAS

2.1. Conceito

Consiste numa intersecção com formato globalmente circular onde os condutores são canalizados para as vias mais adequadas às manobras pretendidas, através da criação de circuitos contínuos em espiral, delimitados fisicamente por lancis galgáveis no anel de circulação e zonas de entrada e saída (Mauro e Branco, 2010) – ver Figura 3.

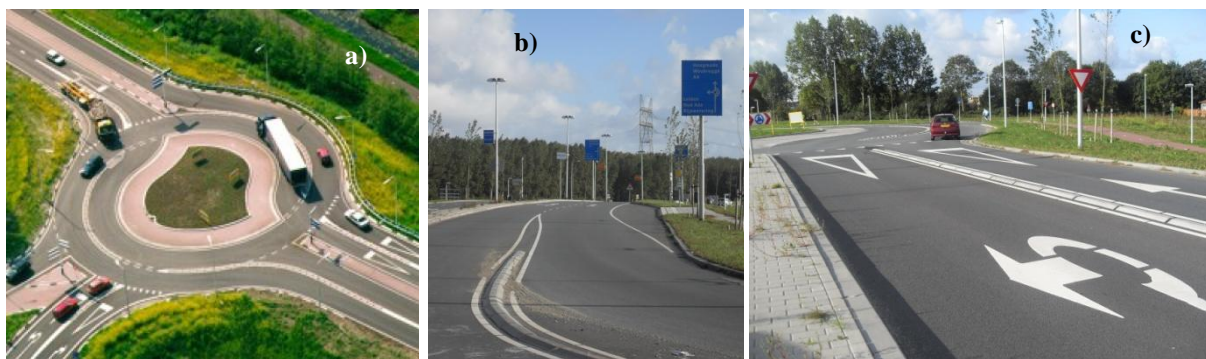


Figura 3: Turbo-rotunda: a) exemplo de uma turbo-rotunda (www.google.com); b) e c) pormenor da delimitação das vias na saída (Leiden, Holanda).

O conceito de turbo-rotunda surgiu em 1996, na Holanda, pelo investigador Lambertus Fortuijn, da Universidade de Delft. Assente na necessidade de condicionar fisicamente o comportamento do condutor, o conceito apresenta-se com duas potencialidades extremamente importantes: eliminação dos pontos de conflito relacionados com as manobras de entrecruzamento nas zonas conflituosas; e a redução da velocidade imposta pela presença de elementos de canalização física (Fortuijn, 2007).

Os elementos de canalização junto à entrada impõem níveis de deflexão adequados assegurando fisicamente a redução da velocidade para níveis seguros e compatíveis com o atravessamento da rotunda em condições de segurança. A solução responde ainda às exigências de operacionalidade dos veículos de maiores dimensões, já que os elementos de canalização são galgáveis (lancis rampeados com 7 cm de altura máxima) complementados por uma orla transponível que circunda a ilha central. Abandona-se assim o formato circular, tipicamente associado às rotundas tradicionais, podendo a ilha central assumir formatos relativamente diferenciados.

O conceito, que mereceu a sua primeira aplicação prática em 2000, na Holanda, foi posteriormente seguido pela Polónia, e mais recentemente pela Alemanha (Brilon, 2005) Finlândia, Noruega e Eslovénia. Desde então a Holanda conta com mais de 70 turbo-rotundas construídas, tendo já sido desenvolvidas disposições normativas (editadas em Abril de 2008) de apoio à sua concepção. Actualmente a administração central holandesa abandonou a construção de rotundas novas com múltiplas vias substituindo o conceito por turbo-rotundas (Fortuijn, 2009).

2.2. Condições privilegiadas de aplicação

As turbo-rotundas apresentam um domínio de aplicabilidade alargado e semelhante ao das rotundas normais com múltiplas vias. Assumem como domínio privilegiado de aplicação os locais sujeitos a níveis de procura de tráfego elevados, mas onde as preocupações de segurança prevaleçam em detrimento da capacidade. São particularmente recomendadas para transformação de rotundas com duas vias sujeitas a níveis de sinistralidade elevados relacionados com as manobras de entrecruzamento no anel, ou com problemas de decisão junto às saídas. Pode ser aplicada tanto em meios urbanos como interurbanos, adaptando-se ainda bem à marcação da transição de ambientes rodoviários.

O domínio de aplicação depende fortemente do *layout* adoptado (Fortuijn, 2007), sendo que a Figura 4 apresenta os três tipos de repartição de tráfego que melhor se ajustam ao funcionamento de uma turbo-rotunda. Essas repartições permitem verificar que o conceito é capaz de responder a intersecções entre vias hierarquicamente diferenciadas ou mesmo similares. Um problema comum a todos os *layouts* prende-se com as maiores dificuldades em responder aos movimentos de inversão de marcha, particularmente em relação à rotunda normal.

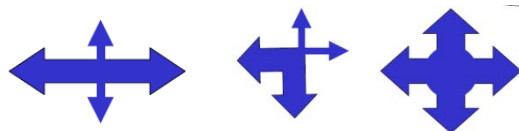


Figura 4: Condições de aplicação privilegiadas das turbo-rotundas (Fortuijn, 2007)

2.3 Tipo de *layouts* mais comuns

É possível recorrer a diferentes tipos de *layouts*, em função do tipo e repartição da procura de tráfego.

A Figura 5_a apresenta a solução geométrica mais adequada sempre que existe uma clara hierarquização entre as vias intersectadas. A solução permite responder a níveis de procura de tráfego francamente superiores na via principal comparativamente à via secundária. O *layout* é definido de modo a que a via principal conflitue com o menor número possível de vias no anel de circulação, resultando num nível de capacidade elevado. A via secundária poderá dispor de uma ou múltiplas vias de entrada, com ou sem afetação de vias.

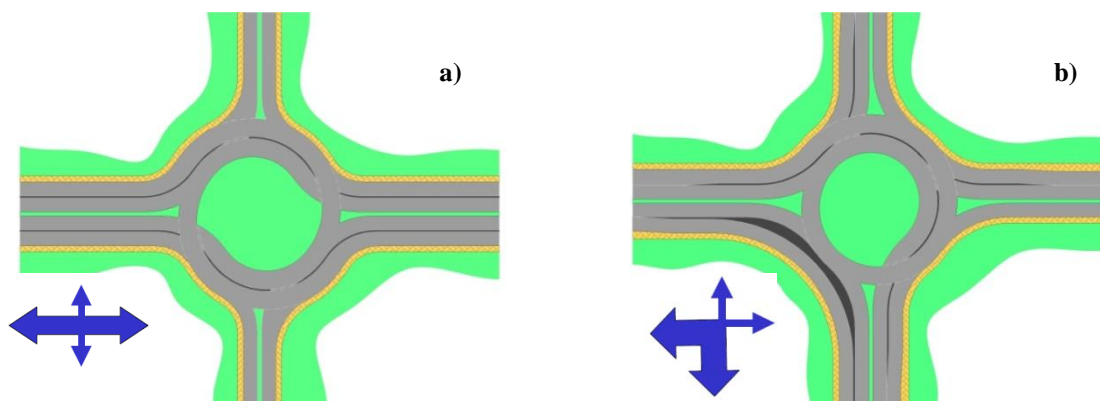


Figura 5: *Layouts* tipo: a) Fluxo dominante associado ao movimento de ida em frente; b) Fluxo dominante associado ao movimento de viragem à direita

Por sua vez, a Figura 5_b) representa uma solução particularmente adaptada para responder a níveis elevados de tráfego de viragem à direita, justificando inclusive a criação de uma via segregada de viragem. A Figura 6_a revela-se particularmente adequada sempre que o movimento dominante coincida com o movimento de ida em frente, associado simultaneamente a um volume significativo de procura de tráfego na via secundária. Por sua vez a solução esquematizada na Figura 6_b) afigura-se adequada para responder a níveis de procura relativamente equilibrados nos 4 ramos e nos diferentes movimentos direccionais (Mauro e Branco, 2010).

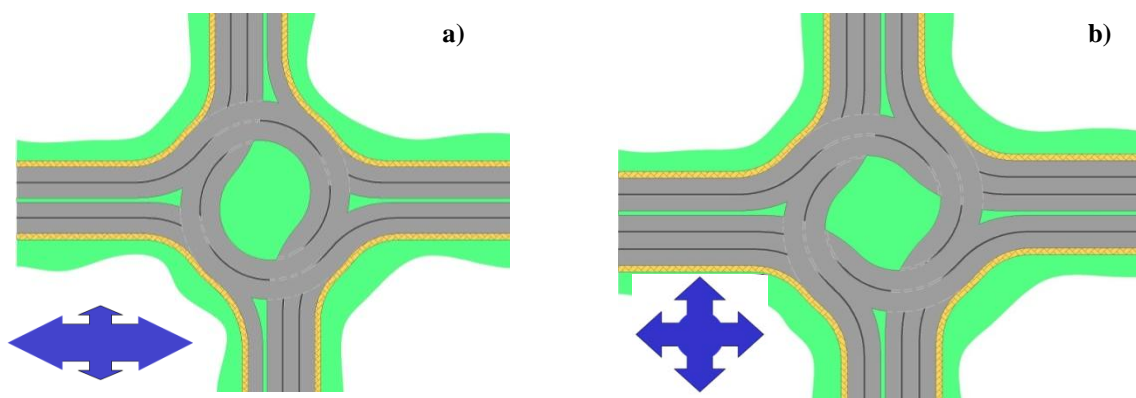


Figura 6: Layouts tipo: a) Fluxo dominante no movimento de ida em frente associada a volumes de tráfego significativos na via secundária; b) Movimentos equilibrados

3. AVALIAÇÃO AO NÍVEL DE DESEMPENHO DA TURBO-ROTUNDA

Optou-se por avaliar o nível de desempenho da turbo-rotunda a dois níveis fundamentais: segurança e capacidade. De modo a facilitar a análise, optou-se por assumir a variação do nível de desempenho da turbo-rotunda comparativamente a uma rotunda normal de duas vias de entrada e circulação, com dimensões globais semelhantes.

3.1. Segurança rodoviária

Segundo Fortuijn (2009) estudos de segurança levados a cabo na Holanda, apontam para uma redução do risco de acidentes em cerca de 80%. Também um estudo de Mauro e Cattani (2010) suportado por técnicas de análise de conflitos aplicadas a nove *layouts* sujeitos a diferentes cenários de procura, aponta de forma consistente, para a redução da frequência de acidentes, em percentagens que variam entre os 40 e os 50%.

De facto, é expectável que esse aumento de segurança se deva a dois aspectos fundamentais: (i) o condicionalismo imposto às trajectórias associadas às diferentes manobras traduz-se na eliminação de um número significativo de pontos de conflito, sendo possível reduzir os típicos 24 pontos de conflito de uma rotunda normal com duas vias, para 14 pontos de conflito numa turbo-rotunda (Figura 7); (ii) os elementos de canalização físicos introduzidos na entrada, anel e saída da turbo-rotunda, impõem níveis de deflexão mais acentuados, induzindo assim à redução da velocidade de entrada e de circulação no anel.

É como tal possível controlar os comportamentos de risco apresentados em 1.2, seja através dos condicionalismos físicos, seja actuando na redução da velocidade e, por sua vez, no aumento da predisposição do condutor para optar por comportamentos correctos. De facto, comprova-se facilmente que a turbo-rotunda impõe raios de curvatura mais reduzidos e, por consequência, velocidades de atravessamento inferiores.

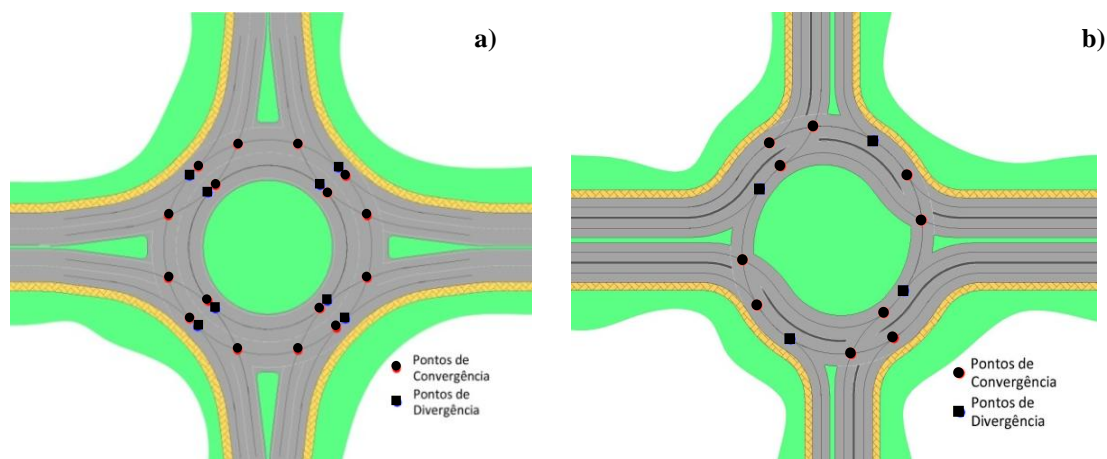


Figura 7: Pontos de conflito: a) numa rotunda normal de duas vias; b) turbo-rotunda

A título de exemplo e tendo por base técnicas de microsimulação aplicadas a uma turbo-rotunda e a uma rotunda normal de 2 vias com diâmetro do círculo inscrito próximo de 40 m, é expectável que os veículos que circulam na via exterior da turbo-rotunda, atinjam velocidades inferiores aos da rotunda normal (38 relativamente aos 48 km/h), assemelhando-se aos resultados associados a uma rotunda com uma só via. Resultados similares foram obtidos por Fortuijn (2007).

3.2. Avaliação da capacidade

3.2.1. Introdução

Os poucos estudos científicos existentes sobre esta temática (Mauro e Branco, 2010; Fortuijn, 2007; Horst, et al., 2008) apontam, de forma consensual, para um aumento não negligenciável da capacidade, comparativamente a rotundas normais. Contudo é expectável que esse aumento nem sempre seja alcançado, dependendo designadamente do *layout* adoptado e da repartição lateral do tráfego considerada.

A capacidade da entrada de uma rotunda pode ser estimada com base em modelos probabilísticos, estatísticos ou de simulação. Pelo facto de a turbo-rotunda ser um conceito bastante recente, desconhece-se a existência de modelos de base estatística devidamente calibrados ao seu modo de funcionamento. Nessa óptica, o presente trabalho é suportado pela análise dos resultados relativos à aplicação de modelo de base probabilística e de técnicas de microsimulação. Os trabalhos foram baseados na solução turbo-rotunda apresentada na Figura 7_a comparativamente à rotunda normal com duas vias, quando sujeitas a diferentes cenários de repartição da procura.

3.2.2. Modelo de base Probabilística

As análises baseiam-se na aplicação do modelo probabilístico desenvolvido por Brilon (2005) por se considerar que a formulação de base integra as variáveis que evidenciam as principais diferenças entre a rotunda normal e a turbo-rotunda:

$$G = 3600 \cdot \left(1 - \frac{t_{min} \cdot q_k}{3600 \cdot n_k}\right)^{n_k} \cdot \frac{n_e}{t_f} \cdot e^{-\frac{q_k}{3600} \left(t_c - \frac{t_f}{2} - t_{min}\right)} \quad (1)$$

Onde: G : capacidade da entrada [veíc./h];

t_{min} : intervalo de tempo mínimo entre veículos sucessivos no anel de circulação [s];

q_k : volume de tráfego no anel de circulação (fluxo conflituante) [veíc./h];

- n_k : número de vias no anel de circulação;
 n_z : número de vias na entrada;
 t_f : intervalo complementar [s];
 t_c : intervalo crítico [s].

Optou-se por determinar a capacidade associada a cada uma das vias de entrada (esquerda ou direita) atribuindo valores diferenciados aos diversos parâmetros t_{min} , t_f , t_c e n_k . É possível encontrar parâmetros t_c e t_f calibrados para diferentes países, com gamas de valores nem sempre consensuais. Optou-se por recorrer aos valores propostos por Brilon (2005) - Tabela 1 - por se aproximarem dos resultados preliminares obtidos em estudos nacionais levados a cabo recentemente na Universidade de Coimbra. Refira-se ainda que face aos objetivos gerais do trabalho (análise comparativa) os erros absolutos do valor da capacidade não assumem importância significativa, mas apenas os resultados comparativos.

Tabela 1: Valores de t_f e t_c adoptados por via de entrada [s] fonte: (Brilon, 2005).

ENTRADA	t_{min}	t_f	t_c
via direita	2,1	2,9	4,1
via esquerda	0	2,5	4,3

Face ao *layout* seleccionado, optou-se por definir cenários correspondentes a uma intersecção claramente hierarquizada (75 na via principal e 25% na secundária), onde os movimentos de ida em frente na via principal correspondem ao fluxo dominante (50% correspondente ao movimento de ida em frente e 25% nos movimentos de viragem quer à direita quer esquerda). Foram considerados quatro cenários de repartição dos fluxos de procura de tráfego na via secundária (ver Tabela 2), tendo-se optado por manter constante a repartição na via principal. A análise considerou a inexistência de qualquer movimento de inversão de marcha.

Os resultados obtidos para cada um dos cenários analisados encontram-se sintetizados na Tabela 2. Tal como seria expectável, o nível de desempenho da turbo-rotunda comparativamente à rotunda normal aumenta à medida que os movimentos de viragem à direita na via secundária assumem expressão. Pelo contrário, nas situações em que dominam os movimentos de viragem à esquerda ou de ida em frente, a rotunda normal revela-se mais adequada, revelando dispor de uma maior flexibilidade em relação à utilização partilhada das vias de entrada.

Estes resultados demonstram que o desempenho da solução depende não só da solução geométrica adoptada, como das repartições do tráfego assumidas. Apesar disso, verifica-se que, ao contrário do defendido por Engelsman e Uken (2007), Fortuijn (2007) e Yperman e Immers (2003), o desempenho da turbo-rotunda, em termos de capacidade, nem sempre é superior ao assegurado pela rotunda normal, justificando-se sempre uma análise detalhada de cada situação particular. Por outro lado, importa ter presente que os resultados são extremamente dependentes dos valores adoptados para os intervalos crítico e complementar (t_c e t_f) o que sublinha a importância de calibrar este tipo de parâmetros para este novo conceito geométrico. Contudo, a inexistência de turbo-rotundas construídas em Portugal, inviabiliza actualmente o desenvolvimento deste tipo de trabalhos.

Tabela 2: Cenários analisados (na via secundária) e variação diferencial da capacidade

CENÁRIOS	FLUXOS DOMINANTES NA VIA SECUNDÁRIA	REPARTIÇÃO DO TRÁFEGO		DIFERENÇA DE CAPACIDADE
CENÁRIO 1	Ida em frente	25% 50%	25% 50%	-28,2%
CENÁRIO 2	Viragem à esquerda	25% 50%	25% 25%	-22,9%
CENÁRIO 3	Viragem à direita	25% 25%	50% 50%	-1,9%
CENÁRIO 4	Viragem à direita muito elevada	50% 10% 20%	25% 70% 20%	17,5%
		70%	10%	

3.2.3. Aplicação do modelo de microssimulação






Os trabalhos de microssimulação basearam-se na aplicação *Aimsun* de origem espanhola. A preparação do modelo exigiu o desenvolvimento de trabalhos prévios de calibração do modelo de modo a procurar representar a realidade com elevado grau de realismo e fiabilidade. O *Aimsun* dispõe de um conjunto alargado de parâmetros passíveis de calibração. Pelo facto de não existirem turbo-rotundas em Portugal, os trabalhos de calibração centraram-se sobre a rotunda normal de duas vias, procurando ajustar os parâmetros de modo a que os valores de capacidade estimados pelo modelo se aproximassem dos reais observados. Embora seja possível intervir sobre diversos parâmetros, no âmbito do presente trabalho, optou-se por ajustar dois essenciais: tempo médio de reacção do condutor e aceleração média. Ambos os parâmetros assumem uma influência significativa sobre o valor da capacidade pelo que o processo de calibração se revelou simples.

A segunda fase dos trabalhos centrou-se na avaliação do desempenho da turbo-rotunda aplicado aos cenários apresentados no ponto anterior. Os resultados obtidos confirmaram, de forma geral, os resultados retirados da aplicação do modelo probabilístico (ponto 3.2.2), embora com diferenças não negligenciáveis em termos de valores absolutos de capacidade.

A terceira tarefa procurou testar um conjunto complementar de cenários de repartição da procura de tráfego, os quais assumem a variação da procura em todas as entradas. As matrizes de procura adoptadas estão representadas na Tabela 3 definidas tendo por base as matrizes de repartição propostas por Mauro e Branco (2010).

Os resultados globais estão, de forma resumida, representados na Figura 8, verificando-se que, de forma geral o nível de desempenho global da turbo-rotunda é inferior ao apresentado pela rotunda normal, embora para algumas das matrizes estudadas o nível de desempenho seja da mesma ordem de grandeza (M2, M4 e M5).

Tabela 3: Matrizes de repartição da procura em termos percentuais (baseado em Mauro e Branco, 2010)

$M1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ 	$M2 = \begin{pmatrix} 0 & 0.33 & 0.33 & 0.33 \\ 0.33 & 0 & 0.33 & 0.33 \\ 0.33 & 0.33 & 0 & 0.33 \\ 0.33 & 0.33 & 0.33 & 0 \end{pmatrix}$ 	$M3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$ 
$M4 = \begin{pmatrix} 0 & 0.65 & 0.05 & 0.30 \\ 0.05 & 0 & 0.05 & 0.90 \\ 0.05 & 0.30 & 0 & 0.65 \\ 0.05 & 0.90 & 0.05 & 0 \end{pmatrix}$ 	$M5 = \begin{pmatrix} 0 & 0.30 & 0.05 & 0.65 \\ 0.05 & 0 & 0.05 & 0.90 \\ 0.05 & 0.65 & 0 & 0.30 \\ 0.05 & 0.90 & 0.05 & 0 \end{pmatrix}$ 	

Nota: entradas 1 e 3 relativas à via secundária e entradas 2 e 4 à via principal

A análise das matrizes da procura evidencia que a turbo-rotunda se adapta particularmente bem e com níveis de desempenho similares às rotundas normais nas seguintes situações: (i) repartição equilibrada do tráfego (M2); sempre que o movimento de viragem à direita a partir da via secundária é importante (M4) – confirmando as conclusões retiradas no ponto 3.2.2; sempre que o movimento de ida em frente na via principal é importante (M5). Nesta última situação, o desempenho da turbo-rotunda revela-se mesmo superior ao da rotunda normal.

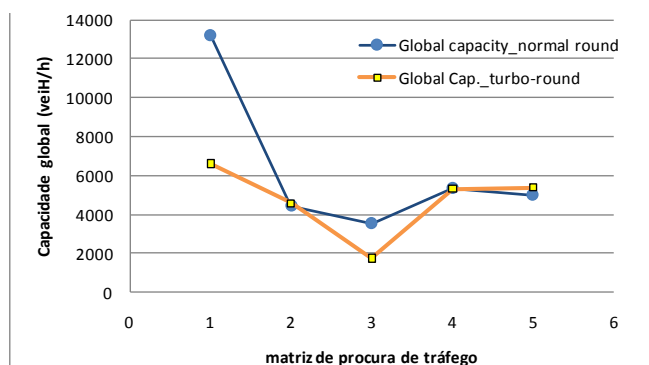


Figura 8: Comparação da capacidade global assegurada pela turbo-rotunda comparativamente à rotunda normal de duas vias

Estes resultados justificaram o desenvolvimento de análises detalhadas procurando perceber se o aumento/redução do desempenho geral da turbo-rotunda se deve à alteração do funcionamento das entradas da via principal ou da secundária. Os resultados obtidos são particularmente interessantes (Figura 9). Verifica-se que, no que respeita às vias secundárias, à excepção das matrizes M1 e M3 (movimentos únicos de viragem à direita e à esquerda), o desempenho da turbo-rotunda é superior ao da rotunda normal. O inverso é registado nas vias principais, onde a rotunda normal assume sempre níveis de desempenho superiores à turbo-rotunda. Estes resultados estão em conformidade com os resultados obtidos por Mauro e Branco (2010), comprovando que na maioria dos cenários estudados a rotunda normal oferece níveis de desempenho superiores à rotunda normal, embora o resultado dependa significativamente da repartição do tráfego e do *layout* considerado.

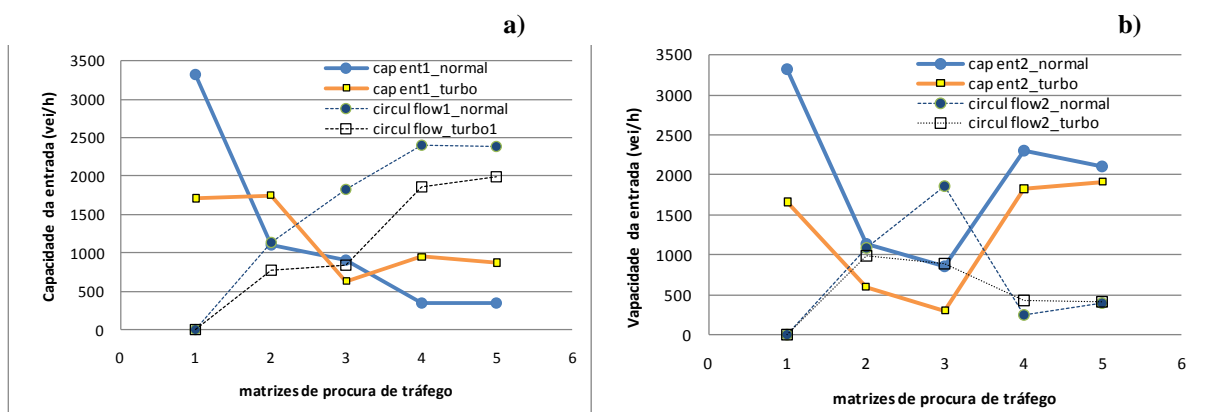


Figura 9: Comparação da capacidade por entrada assegurada pela turbo-rotunda comparativamente à rotunda normal de duas vias: a) via secundária; b) via prioritária

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A turbo-rotunda surgiu recentemente entre a comunidade técnica como solução alternativa às rotundas normais com múltiplas vias. Os poucos estudos existentes, embora sejam ainda extremamente escassos, têm vindo a apontar, maioritariamente, para um aumento do seu desempenho geral, salvaguardando maiores níveis de segurança e de capacidade comparativamente à rotunda normal. O presente estudo procurou validar essas conclusões, assumindo como base de referência a rotunda normal de duas vias e com dimensão global similar.

Parece ser inquestionável que os níveis de segurança tendem a aumentar, como resultado directo de dois aspectos fundamentais: (i) diminuição do número de pontos de conflitos, resultante do controlo dos movimentos de entrecruzamento; (ii) controlo das velocidades de atravessamento resultantes do aumento dos níveis de deflexão. Estes resultados estão em consonância com estudos desenvolvidos por Mauro e Cattani (2010) e de Fortuijn (2009).

Relativamente ao nível de capacidade, os resultados nem sempre são consensuais. As análises desenvolvidas com base na aplicação de modelos probabilísticos e de microsimulação, permitiram concluir que a capacidade da turbo-rotunda tende a ser ligeiramente inferior à da rotunda normal, embora os resultados dependam fortemente do *layout* seleccionado e da repartição do tráfego considerada. Estes resultados correspondem ao expectável, já que a turbo-rotunda impõe um modo de funcionamento mais rígido que a rotunda normal, inviabilizando o uso equilibrado das diferentes vias disponibilizadas à entrada. Concluiu-se ainda que, para o *layout* estudado, o desempenho da turbo-rotunda tende a aumentar sempre que: aumenta o volume de viragens à direita a partir da via secundária; aumenta o volume de ida em frente na via principal; repartição equilibrada do tráfego nos vários ramos e direcções.

O presente trabalho mostra que se continua a justificar o desenvolvimento de trabalho de investigação complementar nesta área e que permita generalizar os resultados. Os modelos estatísticos afiguram-se extremamente difíceis de calibrar, particularmente enquanto não se construir um conjunto significativo de turbo-rotundas. Os modelos probabilísticos carecem de trabalhos de calibração que sustentem a identificação dos valores de intervalos críticos e complementares devidamente ajustados a cada *layout*. Por sua vez, os modelos microscópicos apresentam-se como uma ferramenta com grande potencial, dependendo contudo a qualidade dos resultados dos trabalhos de calibração e de validação dos modelos microscópicos. A prossecução destes trabalhos é actualmente dificultada pela inexistência de qualquer turbo-

rotunda construída em Portugal, o que impossibilita a recolha de dados reais para calibração e validação dos modelos. Apesar disso, e particularmente em relação aos modelos probabilísticos, considera-se que os trabalhos podem prosseguir através da calibração dos valores dos intervalos críticos e complementares, medidos em rotundas nacionais com características físicas das entradas similares às turbo-rotundas (diferentes combinações do número de vias de entrada e de circulação no anel).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Austroroads (1993). Guide to Traffic Engineering Practice; Part 6 - Roundabouts – Austroroads National Office Editor, Sidney-Australia
- Bastos Silva, A.M.C. (1997). Aplicação e Concepção de Intersecções Giratórias nas Redes Viárias Urbana e Rural Portuguesas- Tese de dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana, Edição FCTUC, Maio, Coimbra-Portugal
- Bastos Silva, A. M. (2004). Definição de uma Metodologia de Concepção de Cruzamentos Giratórios, volume 1. Coimbra. Tese de Doutoramento. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Bovy, H.; Dietrich K.; Harmann A. (1991). Guide Suisse des Giratoires, mandat de recherche 9/98, VSS/FSR/EPFL, ISBN 2 – 8298-0065-6, Février, Lausanne-Suisse
- Brilon, W. (2005). Roundabouts : A State of the Art in Germany. National Roundabout Conference, May 22 – 25. Vail, Colorado.
- Brown, M. (1995). The design of Roundabouts – state of the art review. Transport Research Laboratory .
- DfT (1993). Geometric Design of Roundabouts (TD 16/93)- Department for Transport. Design Manual for Roads and Bridges , Volume 6, Section 2, Part 3.
- DfT (2007). Geometric Design of Roundabouts (TD16/07) - Department for Transport. Design Manual for Roads and Bridges (DMRB), Volume 6, Section 2, Part 3.
- Engelsman, J., e Uken, M. (2007). Turbo Roundabouts as an alternative to two lane Roundabouts. SATC .
- FHWA (2000). Roundabouts: An Informational Guide – U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration – Publication nº RD-00-067, Virginia, USA, June 2000
- Fortuijn, L. G. H. (2007). Turbo-Kreisverkehre Entwicklungen and Erfahrungen. Aktuelle Theme der Strassenplanung . Donnerstag.
- Fortuijn, L. G. H. (2009). “Turbo roundabouts: Design principles and safety performance.” Proc., TRB 88th Annual Meeting _CD-ROM_.
- Guichet B., 1992 – Typologie des Accidents dans les Giratoires Urbains – Centre d’Etudes Techniques de L’équipement de l’Ouest- Actes du Séminaire International “Giratoire 92”, pg. 145-152, Edition SETRA/CETUR, Octobre, Nantes-France
- Hall, R. D., e Surl, A. J. (1981). Accidents at four-arm roundabouts and dual-carriageway junctions – some preliminary findings (Vols. pp. 339-344). Traffic Engineering & Control.
- Horst, R. V., Martens, M., & Kik, J. (2008). Evaluation of signalised high-volume Multi-lane turbo roundabouts: road scene analysis, road user survey and video-based analysis of road user behaviour. Proceedings of the 21st ICTCT workshop, Riga.
- Yperman I. e Immers L. H. (2003). Capacity of a turbo-roundabout determined by micro-simulation. In proceedings of the 10th World Congress on ITS, Madrid, Spain, November
- Maycock, G; Hall, R.D, 1984 - Accidents at 4-arm roundabouts - TRRL Report, LR 1120
- Mauro, R., e Branco, F. (2010). Comparative Analysis of Compact Multilane Roundabouts and Turboroundabouts. Journal of Transportation Engineering .
- Mauro, R., e Cattani, M. (2010). Potencial accident rate of turbo-roundabouts. 4th International Symposium on Highway Geometric Design, June 2-5, 2010, in Valencia, Spain
- SETRA, 1984 - Carrefours Giratoires – Les Carrefour Plans sur Routes Interurbaines- Guide Technique, Service d’Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Septembre, Bagneux, France
- SETRA (1998). Aménagement des Carrefours Interurbains sur les routes principales – Carrefours plans - Guide Technique, Service d’Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Bagneux, France, Decembre
- Stuwe, B. (1991). Capacity and Safety of Roundabouts in Germany. Intersections Without Traffic Signals. II, pp. pp. 1-12. Bochum-Germany: Springer-Verlag Editor.
- TRB (1998). Management Speed – Review of current practice of setting and enforcing speed limits. Special Report , 254.