

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE DESEMPENHO DE UM CORREDOR DE TURBO-ROTUNDAS

Ana Bastos Silva¹, Pedro Mariano² e João Pedro Silva³

¹ Membro honorário da AFESP, Centro de Investigação do Território, Transportes e Ambiente (CITTA) Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, 3004-516, Coimbra, Portugal.
Tel: +351 239 797 103 Fax: +351 239 797 142; Email: abastos@dec.uc.pt

² Câmara Municipal de Peniche, Portugal

³ Centro de Investigação do Território, Transportes e Ambiente (CITTA), Instituto Politécnico de Leiria, Departamento de Engenharia Civil, Portugal

Sumário

Este artigo centra-se na avaliação do desempenho da solução turbo-rotunda, quando aplicada em corredor, comparativamente a um corredor de rotundas normais de duas vias. A análise incidiu sobre duas componentes fundamentais: capacidade e emissões ambientais. O trabalho foi suportado pela aplicação de técnicas de microsimulação tendo por base um estudo de caso real calibrado e validado para o efeito.

Foi possível concluir que o desempenho das turbo-rotundas é fortemente condicionado pela carga de tráfego afetada à rede, perdendo desempenho de forma acentuada quando atingida a saturação. Concluiu-se ainda que os indicadores ambientais seguem de perto o andamento dos indicadores caracterizadores da capacidade.

Palavras-chave: Turbo-rotunda; Capacidade; Microsimulação, AIMSUN; Emissões poluentes.

1 INTRODUÇÃO

As rotundas normais são reconhecidas internacionalmente por assegurarem elevados níveis de fluidez, de capacidade e de segurança rodoviária, sendo-lhe ainda frequentemente atribuídas vantagens em termos de emissões ambientais. Contudo, a necessidade de adaptar esta solução para responder a elevados níveis de capacidade tem justificado o uso de múltiplas vias de circulação e com elas um conjunto de problemas que se traduzem num abaixamento do seu desempenho global. A prática de comportamentos erráticos traduzidos em manobras de entrecruzamento nas entradas e no anel, assim como numa tendencial invasão das vias adjacentes são alguns exemplos frequentemente apontados [1]. A agravar a falta de um enquadramento legal adequado, designadamente ao nível do código da estrada, tem justificado a geração de um número elevado de conflitos, resultando frequentemente em acidentes, embora de pequena gravidade.

Este tipo de problemas tem vindo a preocupar a comunidade técnica e científica, pelo que ao longo das duas últimas décadas diversas soluções alternativas têm vindo a ser testadas. A turbo-rotunda surge assim na Holanda, no final do século XX, enquanto solução alternativa às rotundas convencionais de múltiplas vias, introduzindo circuitos contínuos em espiral no anel de circulação, delimitados fisicamente por lancis galgáveis que impedem a prática de entrecruzamentos por mudança de via. A experiência Holandesa evidenciou vantagens significativas desta solução relativamente às rotundas tradicionais de duas vias, o que tem motivado o desenvolvimento de estudos incidentes sobre o desempenho real assegurado por este tipo de soluções.

Atualmente é consensualmente assumido pela comunidade científica que a transformação de uma rotunda convencional com múltiplas vias numa turbo-rotunda se traduz num aumento significativo dos níveis de segurança rodoviária. Contudo essa opinião deixa de ser consensual no que concerne o seu efeito em termos de capacidade, havendo mesmo alguns autores que demonstram a existência de uma pequena redução de capacidade, designadamente nos ramos prioritários. Por outro lado e atendendo a que o conceito de turbo-rotunda é extremamente recente, são ainda extremamente escassos os trabalhos sobre a sua aplicação sequencial ao longo de um corredor.

Nesse contexto, o presente centra-se na avaliação do desempenho da solução turbo-rotunda, quando aplicada em corredor, comparativamente a uma rotunda normal de duas vias. A análise incidiu sobre duas componentes fundamentais: capacidade e emissões ambientais. O trabalho foi suportado pela aplicação de técnicas de microssimulação do *software* AIMSUN, tendo por base um estudo de caso real calibrado e validado para o efeito.

2 O DESEMPENHO DAS TURBO-ROTUNDAS

A turbo-rotunda foi criada na Holanda, no final da década de 90 e apresenta-se como uma solução alternativa às rotundas tradicionais com múltiplas vias, sendo frequentemente associadas a uma melhoria generalizada do seu desempenho. São vários os autores [2 - 6] que comprovam que a transformação de uma rotunda de duas vias numa turbo-rotunda se traduz num aumento do desempenho em termos de segurança rodoviária. Tais benefícios são habitualmente associados à redução do número de pontos de conflito resultantes da colocação de elementos físicos que impedem fisicamente a mudança de via, nas entradas, anel e saída e que portanto eliminam os conflitos por entrecruzamento. Complementarmente a colocação desses elementos físicos impedem a prática de trajetórias diretas, impondo níveis de deflexão que impedem fisicamente a prática de velocidades elevadas.

Os benefícios em termos de segurança têm sido considerados consensuais, embora se admita que o tipo de conflito tenda a ser mais grave na turbo-rotunda relativamente à rotunda normal de duas vias. Segundo Fortuijn [3], tendo por base estudos do tipo “antes-depois”, a transformação de cruzamentos tradicionais de nível (cruzamentos prioritários e rotundas com múltiplas vias) em turbo-rotundas resulta numa redução de cerca de 70% na frequência de acidentes, atingindo níveis de segurança similares aos das rotundas com uma via única de circulação. Estes resultados estão em conformidade com os apresentados pelo SWOV [7]. Também a investigação nacional aponta nesse sentido. Recorrendo a técnicas de microssimulação e ao uso do software SSAM (Surrogate Safety Assessment Model), Vasconcelos *et al.* [8] desenvolveu análises comparativas do desempenho assegurado por rotundas com múltiplas vias, rotundas de uma via e turbo-rotundas. Os resultados mostram que, ao nível da segurança, a turbo-rotunda é melhor solução das três avaliadas, tendendo a gerar um número de conflitos menor do que a rotunda de uma só via, embora de maior gravidade.

Também ao nível da capacidade é possível contar com alguns estudos científicos, embora com resultados nem sempre consensuais. Yperman e Immers [9] recorrendo a técnicas de microssimulação, obtiveram aumentos de capacidade entre 12 e 20% com a transformação de uma rotunda com 3 vias de circulação numa turbo-rotunda de dimensão similar, tendo concluído que o seu desempenho depende significativamente na repartição do tráfego adotada. Também Engelsman e Uken [10] obtiveram ganhos de capacidade de cerca de 25-35% quando avaliada a transformação de uma rotunda convencional de duas vias numa turbo-rotunda. Também Fortuijn [11], recorrendo à fórmula de *Hagring* (modelo de base probabilística [12]) concluiu que a capacidade das turbo-rotundas é geralmente superior à das rotundas tradicionais. Mauro e Branco [13] tendo por base a teoria “*gap acceptance*” e diferentes cenários de repartição de tráfego concluíram que, para repartições de tráfego equilibradas, as turbo-rotundas tendem a assegurar uma capacidade global superior às rotundas tradicionais, tanto em condições saturadas como não saturadas. Apesar disso, defendem que, nas entradas principais, a capacidade da turbo-rotunda é sempre inferior à da rotunda convencional.

Contudo importa ter presente que o modo de funcionamento da turbo-rotunda difere do funcionamento da rotunda normal pelo que os modelos de predição de capacidades em rotundas não são diretamente aplicáveis a esta nova solução defendendo-se uma análise diferenciada por via de circulação [5].

Contrariamente ao defendido por Yperman e Immers [8], Engelsman e Uken [10] e Fortuijn [14], é de esperar que a capacidade de uma turbo-rotunda nem sempre seja superior à assegurada por uma rotunda convencional, sendo espectável que o desempenho desta nova solução dependa do *layout* adotado, dos volumes de tráfego envolvido e da correspondente repartição. Estudos recentes levados a cabo por Vasconcelos *et al.* [8, 15], sublinham-se as principais diferenças que afetam as estimativas de capacidade e tendo por base o método de *Hagring*, concluíram: (i) A capacidade das entradas principais das turbo-rotundas são sempre inferiores à das rotundas convencionais porque o tráfego conflituante está concentrado numa só via do anel; (ii) O desempenho relativo das turbo-rotundas decresce com o aumento da procura de tráfego na direção principal, podendo atingir perdas de capacidade na ordem dos 40%; (iii) Nas entradas secundárias, as turbo-rotundas asseguram melhor desempenho, mas apenas para cenários específicos de procura, especialmente quando a proporção de viragens à direita é muito elevada (superior a 60%). Estes resultados evidenciam a importância associada à abordagem

teórica de análise, sendo previsível que o desempenho da turbo-rotunda dependa quer do volume de tráfego quer da repartição do tráfego adotada.

Em termos de emissões ambientais os estudos encontrados são ainda em número extremamente raro, sendo os resultados muito dependentes do desempenho da rotunda em termos de fluidez e capacidade e portanto pouco consensuais. Vasconcelos *et al.* [8] é um dos poucos estudos encontrados, tendo por base um estudo de caso real a funcionar abaixo do limiar de saturação. Os poluentes (CO₂, CO, NO_x e HC) foram estimados recorrendo ao modelo VSP (*Vehicle Specific Power*), o qual estima, de uma forma dinâmica, as emissões, tendo por base as séries temporais da velocidade e da aceleração dos veículos assim como o declive do terreno, sendo estes dados exportados do software de microssimulação AIMSUN. Os resultados obtidos mostraram que as emissões de CO₂ e NO_x são superiores nas turbo-rotundas comparativamente às rotundas convencionais de duas vias. Pelo contrário, relativamente às emissões de CO e HC a turbo-rotunda apresenta-se como a melhor solução.

3 OBJECTIVOS E METODOLOGIA GERAL DE ABORDAGEM

A revisão do estado da arte mostra que a avaliação do desempenho de turbo-rotundas ainda não está consolidada, particularmente no campo da capacidade e de emissões ambientais, dependendo os resultados da metodologia de abordagem adotada assim como dos níveis/repartição de procura de tráfego considerados. Por outro lado, os trabalhos encontrados incidem maioritariamente na avaliação do desempenho de soluções isoladas, não sendo comum encontrar referência a estudos que incidam sobre aplicações em corredor ou em rede. O trabalho desenvolvido pela Iowa State University [16] é um dos poucos trabalhos conhecidos e que incide sobre um corredor de rotundas, integrando preocupações de uso do solo, gestão dos acessos locais e outras considerações gerais do planeamento do território. Os resultados demonstram que os benefícios associados a corredor nem sempre coincidem com os associados à solução rotunda aplicada de forma isolada. Contudo este trabalho apenas se baseou no estudo de dois corredores com intersecções semaforizadas, sendo relevante alargar o estudo a outras soluções e combinações de soluções de regulação.

Nesse contexto, o objetivo geral deste trabalho centrou-se na avaliação do desempenho de um corredor de turbo-rotundas, integrando duas componentes fundamentais: (i) capacidade; (iii) impactes ambientais. O estudo foi baseado num exemplo real constituído pela sucessão de 3 intersecções inseridas numa via estruturante da cidade de Coimbra, com potencial para transformação em soluções do tipo turbo-rotunda. O desenvolvimento do trabalho assentou numa análise comparativa do desempenho de soluções correspondentes a dois cenários possíveis: (1) a solução atual, composta por rotundas convencionais com duas vias no anel de circulação e; (2) solução alternativa constituída pela transformação das rotundas em turbo-rotundas de dimensão geral similar.

Os métodos utilizados mais recorrentemente na avaliação do desempenho de soluções alternativas são do tipo “antes-depois”. Contudo esses métodos exigem a avaliação do desempenho da solução por observação direta o que inviabiliza o desenvolvimento de trabalhos em países onde ainda não existam turbo-rotundas constituídas. Por se tratar de uma análise comparativa, optou-se assim por recorrer a uma plataforma de microssimulação, tendo-se selecionado o *software* AIMSUN (*Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks*) de origem espanhola.

À semelhança de trabalhos anteriores [8] selecionou-se um conjunto limitado de indicadores de desempenho capaz de caracterizar o funcionamento do corredor. Em termos de capacidade selecionaram-se as Demoras (s/km/veíc) e as Filas de espera (número de veículos). Em termos ambientais foram selecionados indicadores globais disponibilizados pelo AIMSUN, representativos da produção de gases com efeito de estufa (CO₂), de poluentes locais (HC, CO e NO_x), eficiência energética (Consumo combustível) e indicadores representativos do impacto nocivo na saúde da população (PM - Partículas). Em termos metodológicos, foram considerados seguintes indicadores: (i) Total de emissões na rede de CO, HC e NO_x, em kg, resultantes do modelo QUARTET e, (ii) Emissões de CO₂ e PM, por veículo em g/km percorrido, resultantes da aplicação do modelo de Panis *et al.* (TSS [17]).

4 CONSTRUÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

A construção do modelo de simulação integrou 3 fases fundamentais: (1) construção; (2) calibração e (3) validação do modelo.

A matriz O/D foi construída com base em sessões alargadas de recolha de fluxos de tráfego que abrangeram as secções determinantes da rede. Essas sessões consistiram na recolha de fluxos direcionais em todas as entradas das 3 rotundas, complementadas por um conjunto de contagens adicionais para controlo. Essas contagens caracterizaram o período de ponta da manhã [7h30 e as 9h30] de um dia normal de funcionamento da rede local. As contagens foram segregadas por períodos de 15 minutos e por tipo de veículo, o que permitiu inserir na plataforma de simulação a variação temporal da procura, por tipo de veículo, ao longo do período de simulação. O pico máximo foi obtido entre as 8h15 e as 8h30, com cerca de 4400 veíc./h a entrar no sistema.

Foram construídos dois modelos de simulação: (i) solução atual considerada como solução de referência; (ii) solução alternativa constituída por turbo-rotundas com dimensão geral similar. A rede atual é constituída por 3 rotundas de grandes dimensões, com duas vias no anel de circulação e um diâmetro exterior que varia entre os 55m e 60m. O afastamento entre as rotundas é de aproximadamente 400 e de 470m entre as rotundas A e B e B e C, respetivamente. A via principal é composta por 2 faixas de rodagem, com 2 vias em cada sentido, com 3,5m de largura cada (Fig. 1). As vias secundárias têm maioritariamente uma via de entrada. O estudo abrangeu, para além dos trechos entre as três rotundas, os trechos de ligação a outras duas rotundas do corredor da circular, perfazendo um comprimento global de cerca de 1760m.

No modelo de turbo-rotundas o tipo de *layouts* foi selecionado em função da importância dos movimentos direcionais envolvidos. O layout “*standart*” foi atribuído às intersecções A e B enquanto que a rotunda C foi transformada numa turbo-rotunda do tipo “*knee*”, com segregação do movimento de viragem à direita de C1 para C2.

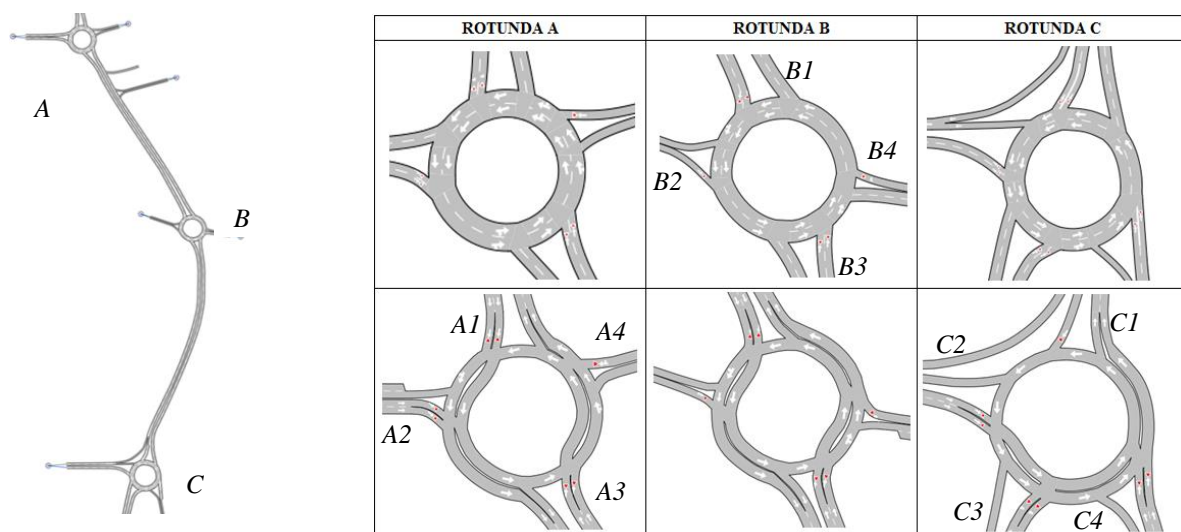


Fig. 1. Codificação da rede: (em cima) solução atual; (em baixo) modelo de turbo-rotundas

Dado que o objetivo deste estudo é uma análise comparativa de cenários, o processo de calibração não assumiu uma importância relevante, tendo-se optado por limitar o ajuste aos parâmetros de calibração *speed acceptance* e ao *tempo de reação*. O *speed acceptance* (SA) foi ajustado tendo por base os perfis de velocidade registados em veículo instrumentado, nos dois sentidos do circuito, tendo-se adotado a seguinte distribuição de valores ($SAm=0,98$; $SAmín=0,78$; $SAmáx=1,26$; $\sigma=0,09$). Paralelamente, o valor do tempo de reação médio foi sendo ajustado, até se obter comprimentos de filas de espera nas várias entradas das rotundas similares às observadas localmente, tendo-se optado pelo valor de 0,8s (sendo que o valor *default* de 0,75s).

Por sua vez, a validação do modelo centrou-se na comparação dos tempos médios de percurso entre os diferentes pares O/D, tendo por base os valores médios reais recolhidos no terreno, em condições livres de circulação, recorrendo à leitura de matrículas. Os valores simulados excederam genericamente, nos diferentes pares O/D, cerca de 12% aos medidos no local. A aplicação do teste de *t student* confirma a existência de diferenças significativas entre os valores, contudo e face aos objetivos do estudo, decidiu-se assumir o modelo como validado.

5 DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS DE ESTUDO

À semelhança de estudos anteriores [8] foram definidos dois tipos de cenários: (1) aumento da procura global de tráfego na rede e, (2) variação da repartição direcional do tráfego nas entradas das rotundas. Na primeira análise, foi avaliado o desempenho das soluções quando sujeitas a incrementos de 10% na procura global de tráfego, mantendo a repartição direcional observada. A situação de base (100%) correspondente à procura registada na rede, à qual se aplicou fatores multiplicativos compreendidos entre 0,6 e 1,3, compreendendo cenários acima e abaixo da saturação. Tendo por base a fórmula de *Hagring* [12] a qual permite descrever as interações complexas entre as correntes de tráfego nas diferentes vias da rotunda e o uso de parâmetros calibrados para as condições de circulação portuguesas [18] foi possível concluir que a rede se encontra a funcionar próxima do limiar de saturação, atingindo em uma das entradas da rotunda A e B níveis de saturação de 90%.

A segunda análise consistiu na criação de cenários onde se fez variar a repartição direcional das entradas, impondo incrementos de 25%, mantendo constante o fluxo de entrada. Foram consideradas duas situações distintas, num global de 7 combinações: (i) imposição da mesma variação da repartição direcional nas 3 rotundas e nas várias entradas, (ii) imposição de uma repartição direcional na rotunda central (B) oposta às rotundas extremas (exemplo: quando aumenta a percentagem de viragens à direita nas rotundas A e C, aumenta a percentagem de viragens à esquerda na rotunda B).

Atendendo a que os resultados tendem a diferir entre replicações sucessivas resultantes designadamente dos fenómenos estocásticos do tráfego, optou-se por considerar como resultado de cada cenário, a média de 10 replicações de modo a esbater esse efeito e garantir resultados suficientemente robustos.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Avaliação do efeito da carga do tráfego

A Fig. 2 evidencia que independentemente do indicador, verifica-se que o desempenho do corredor de rotundas convencionais tende a ser superior ao das turbo-rotundas. É ainda evidente um agravamento significativo do desempenho, para condições de funcionamento acima da saturação. É previsível que, para os níveis de procura de tráfego atual (90%), a construção do corredor de turbo-rotundas resultasse em condições saturadas de circulação, apesar das rotundas convencionais manterem uma reserva ligeira de capacidade.

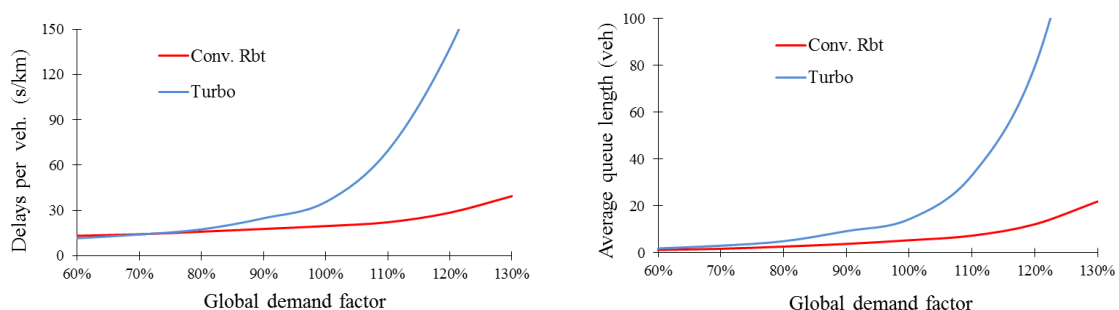


Fig. 2. Indicadores operacionais em função do nível de carregamento da rede: (a) demoras; (b) filas de espera médias

Apenas em condições não saturadas (carga inferior a 70%), se verifica que o corredor de turbo-rotundas atinge um nível de desempenho similar ou mesmo ligeiramente superior ao associado ao corredor de rotundas

convencionais. Em termos de filas de espera, as rotundas tradicionais apresentam sempre ligeiras melhorias face ao corredor das turbo-rotundas, à semelhança das conclusões retiradas por Vasconcelos *et al.* [8].

Em termos de consumo de combustível (Fig. 3_a), o andamento das curvas é similar às das demoras, sendo que para níveis de carregamento superiores a 100%, o aumento do consumo nas turbo-rotundas é substancialmente superior ao das rotundas tradicionais, refletindo o deficiente funcionamento da rede. Para um nível de carregamento de 130%, o acréscimo de consumo atinge os 45%, atingindo-se níveis equiparáveis de desempenho para níveis de carregamento da rede próximo dos 90%.

As mesmas conclusões podem ser retiradas relativamente às emissões de CO, HC e NOx (Fig. 3_b). A perda de desempenho é particularmente significativa em termos de emissões de CO, atingindo-se para carregamentos de 130%, um aumento de 91% relativamente ao corredor de rotundas tradicionais. Também os poluentes HC e NOx seguem esta tendência, com aumentos de 54% e de 44%, respetivamente. Contudo essa diferenciação é esbatida para níveis de carregamento inferior aos 100%, onde se atinge um equilíbrio entre o desempenho das duas soluções. Para níveis de carregamento inferiores a 80%, é mesmo evidente uma melhoria do desempenho em termos de emissões de CO nas turbo-rotundas, face às rotundas convencionais.

Também em termos de emissões globais de CO₂ e de PM (Fig. 3_c and d), os resultados apontam consistentemente para um melhor desempenho do corredor de rotundas, sendo a perda de desempenho da solução alternativa crescente com o aumento da carga na rede. Apesar disso para cenários de baixa procura de tráfego (60 e 70%), as turbo-rotundas revelam-se ligeiramente mais eficientes, embora sofram uma redução acentuada do desempenho a partir de cargas superiores a 80%.

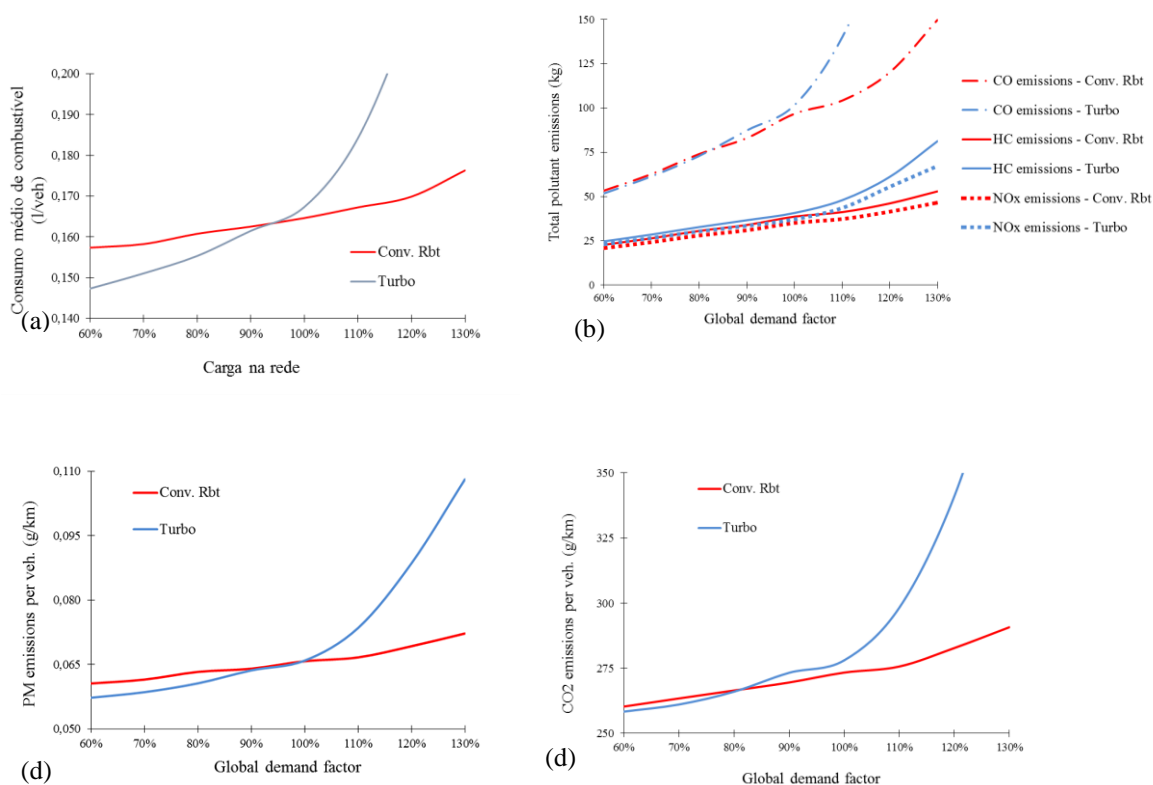


Fig. 3. Indicadores de emissões ambientais em função do nível de carregamento da rede

6.2. Avaliação do efeito da repartição direcional

Numa primeira fase foi avaliado o efeito da repartição direcional dos movimentos quando é mantido constante o padrão de variação nas três rotundas consecutivas (no total de 15 cenários distintos), tendo por base o nível de

procura de tráfego atual. Os resultados evidenciam que as rotundas convencionais apresentam de forma quase generalizada um melhor desempenho que as turbo-rotundas (Fig. 4). A única exceção corresponde ao cenário de 100% de viragens à direita, onde se regista uma ligeira redução das demoras (cerca de 3%) a favor do corredor das turbo-rotundas. Pode assim concluir-se que, os benefícios associados às turbo-rotundas tendem a ser mais evidentes com o aumento da proporção das viragens à direita, designadamente para pesos superiores a 50%. Por oposição, sempre que a proporção de viragens à esquerda aumenta, o desempenho das duas soluções é afetado de forma significativa, embora com um agravamento mais acentuado nas turbo-rotundas.

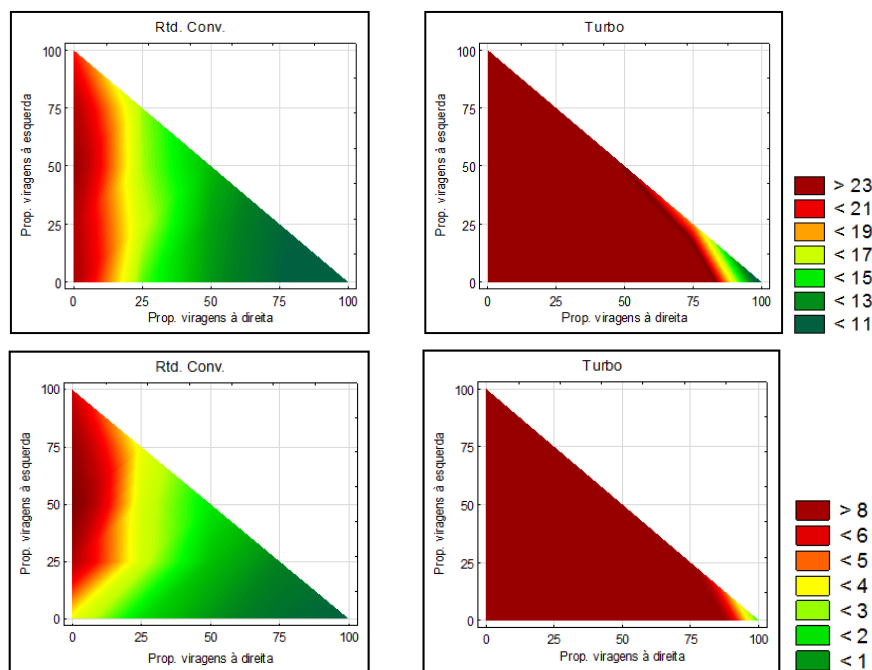


Fig. 4. Efeito da variação da repartição direcional no desempenho operacional das rotundas e turbo-rotundas: (em cima) Demoras obtidas (s/km/veic.); (em baixo) Comprimento das filas de espera (veic.)

A análise dos resultados associados aos cenários com grande percentagem de movimentos de ida em frente permitem concluir que, apesar dos *layouts* adotados para as turbo-rotundas A e B favorecerem os movimentos de circulação no corredor principal, as rotundas convencionais asseguram um nível de desempenho superior ao das turbo-rotundas. A visualização detalhada da simulação, permitiu concluir que a diferença de desempenho registada entre as duas soluções alternativas se deveu maioritariamente ao desempenho da rotunda C, cujo *layout* de turbo-rotunda selecionado “*knee*” embora favoreça os movimentos de viragem à direita se revela claramente menos eficaz na resposta aos movimentos de ida em frente.

Numa segunda fase, foi avaliado o efeito da repartição direcional quando imposto um padrão de variação de repartição direcional diferenciado na rotunda B. Curiosamente os resultados obtidos seguem a mesma tendência dos resultados das análises anteriores. Em todos os cenários estudados, o corredor de rotundas convencionais apresenta um desempenho superior ao das turbo-rotundas. É contudo evidente que, quanto maior for a percentagem de viragens à direita, melhor tende a ser o desempenho das turbo-rotundas. O cenário correspondente a 100% de viragens à direita nas rotundas A e C e 100% viragens à esquerda na rotunda B é o que apresenta melhores resultados para as turbo-rotundas, obtendo níveis de desempenho similares ao corredor de rotundas tradicionais.

A Fig. 5 mostra, a título de exemplo, a variação do indicador das demoras para as duas soluções alternativas, sendo que o outro indicador de desempenho segue o mesmo tipo de andamento. A sua análise evidencia uma tendência de aumento das demoras à medida que aumenta a importância dos movimentos de ida em frente. É ainda visível um tendencial aumento das demoras com a proporção de viragens à esquerda. É ainda de realçar que o cenário, correspondente a 100% de viragens à esquerda nas rotundas A e C e 100% viragens à direita em B (C19) é o que apresenta pior desempenho para as turbo-rotundas.

Justifica-se ainda realçar que a análise da relação entre os tempos de percurso nos dois conjuntos de cenário (ver Quadro associado à Fig.5) permite concluir que o corredor de turbo-rotundas se releva mais sensível à variação da repartição direcional (variações de 0,4 a 1,3) comparativamente ao corredor de rotundas tradicionais, o qual absorve mais facilmente essa variação (0,9 a 1,1). É de realçar, a título de exemplo, que os resultados associados aos cenários 9 e 23 (rotundas A e B com 75% de viragens à esquerda), onde a troca dos 75% de viragens à esquerda para 75% de viragens à direita na rotunda C, permitiu reduzir em 60% os tempos de viagem no corredor de turbo-rotundas, enquanto que a mesma troca no corredor de rotundas tradicionais se traduziu na redução de 10%.

Cenário (Ci e Cii)	Rtd. A e C (e Rtd. B para cenários C1 a C15)			Rtd. B (cenários C16 to C27)			Rácio tempo de percurso (relação entre Ci/Cii)	
	←	↑	→	←	↑	→	Rtd.	Turbo
C16/C1	0	0	100	100	0	0	1.1	1.2
C17/C2	25	0	75	75	0	25	1.0	1.0
C18/C4	75	0	25	25	0	75	1.0	0.7
C19/C5	100	0	0	0	0	100	1.0	0.6
C20/C6	0	25	75	75	25	0	1.1	1.1
C21/C7	25	25	50	50	25	25	1.0	1.1
C22/C8	50	25	25	25	25	50	1.0	0.8
C23/C9	75	25	0	0	25	75	0.9	0.4
C24/C10	0	50	50	50	50	0	1.1	1.3
C25/C12	50	50	0	0	50	50	0.9	0.5
C26/C13	0	75	25	25	75	0	1.0	1.0
C27/C14	25	75	0	0	75	25	1.0	0.8
C3	50	0	50	---	---	---	---	---
C11	25	50	25	---	---	---	---	---
C15	0	100	0	---	---	---	---	---

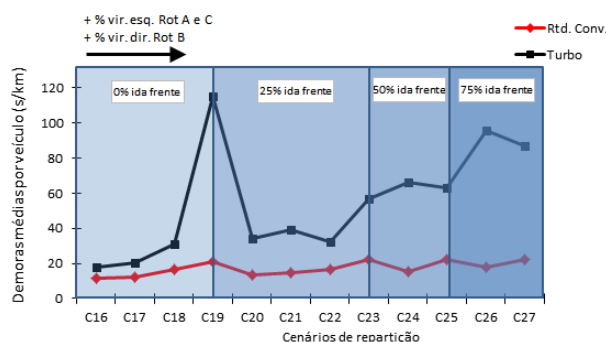


Fig. 5. Efeito da variação da repartição direcional nas demoras das rotundas e turbo-rotundas

Quando avaliados indicadores ligados às emissões ambientais, as conclusões são similares. Os níveis de desempenho das duas alternativas em análise, em termos de níveis de consumo (Fig. 6), tendem a aproximar-se nos cenários correspondentes a elevadas percentagens de viragens à direita (igual ou superior a 50%). Contudo, para os restantes cenários, o corredor de rotundas convencionais tende a assegurar um nível de desempenho superior. Nos cenários com maior percentagem de viragens à esquerda, o nível de consumo na solução de turbo-rotundas tende a exceder significativamente (em cerca de 90%) o associado à solução de rotundas convencionais.

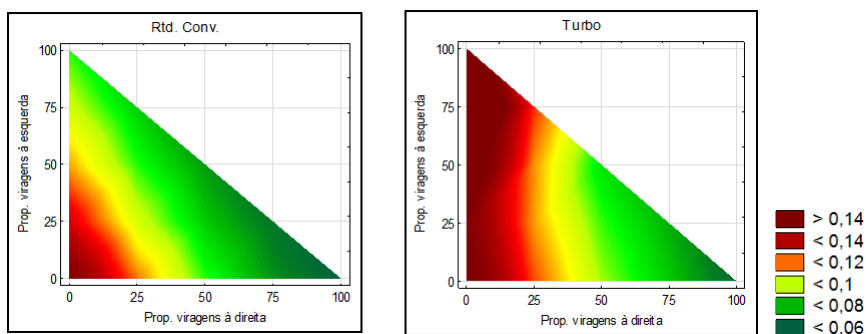


Fig. 6. Efeito da variação da repartição direcional no consumo de combustível na solução de rotundas/ turbo-rotundas

A avaliação dos mesmos cenários em termos de emissões poluentes do tipo CO, HC e NOx e dos poluentes CO2 e PM, aponta igualmente para um melhor desempenho do corredor de rotundas convencionais para a generalidade dos cenários. Também para os poluentes CO, HC e NOx, a solução de rotundas convencionais sobressai como favorável. Contudo, os resultados evidenciam um maior equilíbrio entre o desempenho das duas soluções quando a percentagem de viragens à direita é significativa (igual ou superior a 50%), sendo que nestas condições, o aumento de emissões nas turbo-rotundas face às rotundas convencionais é inferior a 30% para o CO

e inferior a 20% para o HC e o NOx. Por sua vez, para os poluentes CO₂ e PM, o desempenho das duas soluções alternativas é mais aproximado, embora se continuem a evidenciar vantagens associadas ao corredor de rotundas. São atingidos aumentos médios de emissões de cerca de 15% com a transformação em turbo-rotundas, embora para os cenários associados a uma percentagem elevada de viragens à esquerda, os aumentos de emissões foram muito significativos.

7 CONCLUSÕES

O presente artigo teve como objetivo principal avaliar o funcionamento de um corredor de turbo-rotundas em termos de capacidade e de eficiência energético-ambiental.

Os resultados obtidos apontaram para uma tendencial perda do nível de desempenho quando o corredor de rotundas é transformado em corredor de turbo-rotundas, designadamente face a condições saturadas de circulação. O corredor de turbo-rotundas atingiu o limiar de saturação para cargas próximas dos 90% enquanto que o corredor de rotundas convencionais, respondeu a níveis de carregamento próximos dos 110/120%. Os resultados obtidos mostram que as turbo-rotundas tendem a degradar o seu modo de funcionamento de forma mais acentuada que as rotundas convencionais, depois de atingido o limiar de saturação.

Apesar disso verificou-se que esta tendência se inverte face a níveis de procura de tráfego baixos. Para níveis de carga inferiores a 70% as turbo-rotundas mostraram-se capazes de garantir níveis de capacidade superiores aos associados ao corredor de rotundas convencionais. Para cargas de 80%, as duas soluções apresentaram níveis de desempenho semelhantes (com a exceção do consumo de combustível que se manteve inferior nas turbo-rotundas), sendo que para cargas superiores a 90%, esta tendência se inverte, apresentando-se o corredor de rotundas convencionais como a solução mais eficaz.

Quando analisado o efeito da repartição direcional verifica-se que apenas nos cenários com elevada percentagem de viragens à direita (superior a 50%) se registou uma aproximação dos níveis de desempenho associados às duas soluções alternativas. A imposição de diferentes combinações de repartição direcional consolidou estes resultados gerais.

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

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

Apesar das análises apontarem maioritariamente para uma vantagem do corredor de rotundas convencionais comparativamente ao de turbo-rotundas, importa ter presente que as análises relativas à repartição direcional se basearam na matriz atual e portanto numa solução a funcionar no limiar da saturação. É assim espetável que os resultados tendam a ser diferentes se adotados níveis de procura inferiores. Por outro lado importa igualmente ter em atenção que a análise desenvolvida não incluiu as análises de segurança rodoviária. Considera-se assim que a seleção da solução a adotar, deverá ser baseada numa análise global que não poderá descurar esta análise fundamental, onde tendencialmente a turbo-rotunda se revela favorável.

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

8 Referências

1. Bastos Silva, A.M.C. (2004). Definição de una Metodologia de Concepção de Cruzamentos Giratórios, volume 1 – Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Edição FCTUC, abril, Coimbra, Portugal.
2. Bastos Silva, A.M.C., Vasconcelos A.L.P. e Santos, S. (2011). As Turbo-rotundas, avaliação do seu potencial de desempenho, XXV ANPET – Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes, Belo Horizonte, Brasil.
3. Fortuijn, L.G.H. (2003). “Pedestrian and Bicycle-Friendly Roundabouts; Dilemma of Comfort and Safety”, Delft University of Technology, The Netherlands.
4. Fortuijn, L.G.H. (2009). Turbo Roundabouts – Design Principles and Safety Performance. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2096, pp. 16–24.
5. Giuffrè, O., Guerrieri, M. e Granà, A. (2009). Turbo-Roundabouts General Design Criteria and Functional Principles. Case Studies from Real World, 4th International Symposium on Highway Geometric Design, Valencia, Transportation Research Board, Spain.
6. Corriere, F., Guerrieri, M. (2012). “Performance Analysis of Basic Turbo-Roundabouts in Urban Context”, In SIVV – 5th International Congress – Sustainability of Road Infrastructures, Procedia – Social and Behavioral Sciences. Volume 53, 622–632.
7. SWOV (2007). “Fact Sheet: Roundabouts”, Institute for Road Safety Research, August, Leidschendam, The Netherlands.
8. Vasconcelos, L., Silva, A.B., Seco, A.M., Fernandes, P., Coelho, M.C. (2014). Turboroundabouts: Multicriterion Assessment of Intersection Capacity, Safety, and Emissions, Journal of Transportation Research Record, Vol. 2402, pp. 28-37. (DOI: <http://dx.doi.org/10.3141/2402-04>).
9. Yperman, I. e Immers, L.H. (2003). “Capacity of a Turbo-Roundabout Determined by Micro-simulation”, in proceedings 10th World Congress on ITS. Department of Civil Engineering – Transportation Planning and Highway Engineering, Leuven, Bélgica.
10. Engelsman, J., e Uken, M. (2007). “Turbo Roundabouts as an alternative to two lane Roundabouts”, proceedings of 26th Annual Southern African Transport Conference (SATC), Pietermaritzburg, KwaZulu-Natal, South Africa.
11. Fortuijn, L.G.H. (2011). Roundabouts in the Netherlands: Development and experiences, International Roundabout Design and Capacity in connection with TRB 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, July, Stockholm, Finland
12. Hagrind, O. (1998) A further generalization of Tanner's formula, Transportation Research Part B: Methodological, Volume 32, No. 6, pp. 423-429.
13. Mauro, R. e Branco, F. (2010). “Comparative Analysis of Compact Multilane Roundabouts and Turboroundabouts”, Journal of Transportation Engineering 135(4): 316-322.
14. Fortuijn, L.G.H. (2007). Turbo-Kreisverkehre Entwicklungen und Erfahrungen”, Seminar Aktuelle Theme der Strassenplanung, January, Bergisch Gladbach, Germany.
15. Vasconcelos, A. L. P., Bastos Silva, A. B. & Seco, Á. J. M. (2012_b). Capacity of normal and turbo-roundabouts – comparative analysis. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport. DOI: 10.1680/tran.12.0000
16. Isebrands, H., et al., (2008) Toolbox to Evaluate the Impacts of Roundabouts on a Corridor or Roadway Network. , Minnesota Department of Transportation.
17. TSS (2012). “Aimsun Dynamic Simulators User’s Manual” v7, Transport Simulation Systems, October.
18. Vasconcelos, L., Silva, A.B., Seco, Á., Rouxinol, G., (2012_a). Estimation of critical headways at unsignalized intersections - a microscopic approach. Advances in Transportation Studies (29), p. 59-72, DOI: 10.4399/97888548567146.