

POTENCIAL DA MICROSSIMULAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO EM SEGURANÇA RODOVIÁRIA - O CASO DA TURBO-ROTUNDA

Ana Bastos Silva¹, Joana Dourado², Nuno Bernardo³

¹ Membro honorário da AFESP, Centro de Investigação do Território, Transportes e Ambiente (CITTA), Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, 3004-516, Coimbra, Portugal.

Tel: +351 239 797 103 Fax: +351 239 797 142; Email: abastos@dec.uc.pt

² Centro de Investigação do Território, Transportes e Ambiente (CITTA), Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, 3004-516, Coimbra, Portugal.

³ Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, 3004-516, Coimbra, Portugal

Sumário

O presente artigo tem como objetivo central avaliar o potencial de aplicação de técnicas de simulação a estudos de segurança rodoviária. São apresentados genericamente os modelos microscópicos em que assentam as bases teóricas dos modelos de microsimulação, procurando identificar as suas principais limitações. O trabalho assenta no desenvolvimento de um estudo de caso, onde se procura avaliar o desempenho de um corredor de turbo-rotundas comparativamente a um corredor de rotundas normais. O trabalho foi suportado pela aplicação do software AIMSUN, complementada pela aplicação do SSAM a um modelo de simulação construído, calibrado e validado, com base numa situação real.

Palavras-chave: Segurança rodoviária; Conflitos Rodoviários; Microsimulação; Aimsun; Turbo-rotunda

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Em domínio urbano, os acidentes rodoviários tendem a concentrar-se nas intersecções. É possível contar com diversas abordagens tradicionais para estimar e prever o risco de acidente de tráfego em intersecções, onde se destacam as técnicas de análise de conflitos e os modelos de estimativa de frequências de acidentes (MEFA). Contudo estas abordagens tradicionais estão associadas a inúmeras limitações relacionadas, por um lado, com a complexidade e diversidade dos fatores que afetam a segurança e a probabilidade de ocorrência de acidentes e, por outro lado, com a dificuldade de obtenção do histórico de acidentes e a deficiente qualidade dos dados.

Essas limitações têm justificado, particularmente na última década, a procura de metodologias alternativas, baseadas, designadamente, em técnicas de microsimulação. Estas técnicas, à semelhança das técnicas de análise de conflitos, assentam na estimação do “número de conflitos” como eventos que poderão resultar em acidentes. Esta metodologia afigura-se como uma técnica proactiva com potencial de aplicação a diferentes elementos infraestruturais, incluindo ao estudo de soluções rodoviárias complexas que envolvam diferentes alternativas modais, diferentes utilizadores e variabilidade de cenários de procura de tráfego. Revelam-se ainda extremamente promissoras na análise de soluções inovadoras, sem que para tal se tenha de recorrer à sua construção prévia.

Neste contexto, este artigo centra-se na avaliação do potencial de aplicação das técnicas de microsimulação para a avaliação do desempenho, em termos de segurança, de soluções rodoviárias inovadoras, como é o caso das turbo-rotundas recentemente concebidas na Holanda. Para o efeito foi selecionado um corredor de rotundas reais, constituído por 5 rotundas normais com 2 vias de circulação, o qual serviu de base à construção, calibração e validação do modelo de simulação. O trabalho assentou no desenvolvimento de análises comparativas procurando avaliar o potencial aumento de segurança associado à transformação das rotundas normais em turbo-rotundas. As análises foram suportadas pela aplicação do *software* AIMSUN (*Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks*) complementado pela aplicação do SSAM *Surrogate Safety Analysis Model*, tendo por base um conjunto alargado de cenários de procura do tráfego.

2 AS TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA RODOVIÁRIA

2.1 As técnicas tradicionais

Os MEFA são vulgarmente utilizados na avaliação da segurança da rede viária. Recorrendo a estes modelos estatísticos, procura-se explorar a relação entre os principais fatores que afetam a segurança rodoviária (volume de tráfego, hierarquização viária, condições climatéricas, etc.) e o número e a gravidade de acidentes [1]. Esta abordagem apresenta, no entanto, algumas limitações relacionadas com a complexidade dos fatores que influenciam a segurança e com a qualidade da base de dados de acidentes rodoviários [2]: (i) comparando com outros acontecimentos em meio rodoviário, os acidentes são eventos que resultam de uma cadeia de acontecimentos e ações pouco prováveis, sendo por isso eventos excecionais; (ii) a sua natureza aleatória e escassa requer períodos de recolha de dados suficientemente longos, para se conseguir garantir uma base de dados de acidentes representativa; (iii) nem todos os acidentes são reportados, apenas os que tenham sido registados pelas autoridades, o que corresponde a acidentes que tenham provocado feridos ou que tenham requerido a presença das autoridades; (iv) informação completa, raramente disponível, acerca dos acontecimentos que precederam os acidentes e do comportamento dos seus intervenientes, assim como a sua localização exata. Este último problema tem vindo a ser gradualmente ultrapassado, com recurso à georreferenciação. Adicionalmente, a capacidade de avaliar a segurança de um elemento infraestrutural recentemente construído ou ainda em fase de projeto, é também bastante limitada.

De modo a ultrapassar algumas destas dificuldades, os investigadores foram encorajados a desenvolver metodologias baseadas na análise de eventos representativos de acidentes, como as Técnicas de Análise de Conflitos (TAC). Os conflitos podem ser definidos como “situações observáveis, nas quais dois ou mais utilizadores se aproximam no tempo e no espaço, de tal forma que existe risco de colisão se os seus movimentos não se alterarem” [3]. Técnica de Análise de Conflitos consiste no registo, por observadores treinados para o efeito, de situações de conflito, em tempo real [4]. Dependendo da TAC utilizada, os observadores identificam os conflitos com base numa lista de movimentos e sinalizações (por exemplo, acionamento de luzes, buzinas, travagens bruscas, etc.) e ou deduções de medidas de tempo e espaço. Por essa razão a observação das trajetórias ao longo da interação dos condutores tem sido considerada primordial como meio de diagnóstico de segurança rodoviária. Embora o interesse na utilização desta técnica seja elevado, alguns investigadores continuam a levantar algumas questões relativas à consistência na definição de conflito, à validade da técnica e fiabilidade do método de recolha dos conflitos [4]. As técnicas automáticas de análise de vídeo, para deteção de trajetórias, têm contribuído para colmatar alguns destes problemas [5], no entanto, o desafio de prever as consequências para a segurança rodoviária de uma nova medida ou infraestrutura mantém-se [2].

2.2 As técnicas de simulação

Durante a última década tem-se verificado o desenvolvimento de modelos microscópicos de simulação do comportamento do condutor, com o intuito de melhorar a capacidade de replicação da interação entre os fatores que contribuem para o conflito [6, 7, 8]. Os modelos microscópicos de simulação consistem numa modelação dinâmica e estocástica de cada veículo, dentro de uma rede de transportes. Estes modelos simulam veículo a veículo, atualizando ao longo do tempo de simulação as suas posições, velocidades, acelerações e outras variáveis que definem o seu estado à medida que interagem com outros veículos e com o ambiente rodoviário (sinalização luminosa, geometria da via, etc.) [9]. Essa interação é modelada por algoritmos complexos (modelos microscópicos) que descrevem manobras, comportamentos e decisões. Os três principais micromodelos são: *car following*, que descreve a resposta de um veículo às mudanças de velocidade, aceleração e travagem do veículo líder que circula à sua frente, *gap acceptance* que determina quando um veículo aceita ou não um intervalo de tempo disponibilizado na corrente prioritária, para mudar de via ou entrar numa intersecção, e por fim o *lane changing* que modela as manobras associadas à mudança de via.

A abordagem baseada na microssimulação recorre a indicadores *proxy* para avaliar o nível de segurança da infraestrutura modelada. Estes indicadores podem ser definidos como “medidas de proximidade a um acidente, que refletem a proximidade de um conjunto de utilizadores a um ponto de colisão projetado, e que são calculadas com base em medidas de tempo e espaço” [10]. Usando medidas como a velocidade, distância e tempo, que são *outputs* da microssimulação, é possível calcular indicadores *proxy*, identificando assim a potencial existência de conflitos. A utilização destes indicadores aumenta a possibilidade de [11]: (i) avaliar de uma forma mais eficiente e rápida as condições de segurança rodoviária, pois os conflitos representados por estes indicadores são

mais frequentes de ocorrer do que os acidentes; (ii) relacionar as características geométricas prevalecentes do elemento infraestrutural em estudo e o risco de acidente associado; (iii) compreender a relação entre o comportamento do condutor e o risco; (iv) melhorar a compreensão dos processos que caracterizam as situações normais de trânsito e as situações críticas do ponto de vista da segurança. Estes indicadores permitem igualmente adotar uma atitude proactiva, visto que detetam situações de insegurança antes de estas resultarem efetivamente em acidentes [11]. Algumas Técnicas de Análise de Conflitos mais recentes usam indicadores *proxy* com componente mais objetiva para avaliar a gravidade dos conflitos observados [12]. No entanto, a validação de alguns destes indicadores é ainda necessária.

Existe um conjunto vasto de indicadores *proxy*, podendo estes ser agrupados em medidas discretas baseadas no tempo e na velocidade e indicadores contínuos. O indicador *Time-to-Collision* (TTC), um dos primeiros a ser propostos e dos mais utilizados, definido como o “tempo esperado para dois veículos colidirem, se as suas trajetórias e velocidades não se alterarem” [13], engloba-se no grupo de medidas baseadas no tempo. Este indicador é útil para o estudo dos conflitos de colisão transversal, frente-traseira e de convergência ou mudança de via. Estabelecendo um valor máximo de TTC, sempre que o TTC calculado for inferior a este, está-se na presença de um conflito. Dentro do grupo dos indicadores calculados com base na velocidade dos veículos, existe o indicador *DeltaS*, a variação diferencial máxima das velocidades dos veículos envolvidos no conflito. Este indicador é usado essencialmente para avaliar a gravidade de conflitos identificados. Quanto mais elevado o valor de *Delta*, maior a gravidade do conflito [9].

Nos atuais modelos de simulação, utilizados pelos *softwares* comerciais como o AIMSUN, VISSIM e PARAMICS, não é possível simular acidentes, pois os modelos são programados de modo a não haver colisões entre veículos. No entanto estes veículos podem chegar a uma proximidade tal que permita simular um conflito. Com um auxílio de um pós-processador de dados, como o *Surrogate Safety Assessment Model* (SSAM) [5], é possível calcular indicadores *proxy* com base nos valores de tempo e distância que saem como *outputs* da microssimulação, e assim identificar conflitos. O SSAM calcula os indicadores TTC, PET, DR, MaxD, MaxS e DeltaS [5]. O uso da microssimulação para estudo da segurança rodoviária aparece como uma ferramenta promissora, contudo importa ter presente que por se tratar de técnicas recentes é necessário manter um espírito crítico em relação aos resultados, em especial, à forma como os micromodelos simulam o comportamento do condutor [14]. Com o intuito de melhorar a capacidade dos modelos de simulação de representar o comportamento do condutor e a ocorrência de conflitos, muitos estudos têm sido desenvolvidos nesta área nos últimos anos [6]. Apesar das limitações, a microssimulação assume uma relevância crescente na avaliação do funcionamento de elementos infraestruturais complexos, e em particular de soluções inovadoras, à qual os modelos tradicionais não conseguem dar resposta.

3 A SEGURANÇA DAS TURBO-ROTUNDAS

A rotunda convencional com múltiplas vias é considerada pela comunidade técnica e científica como uma solução extremamente eficiente em termos de regulação do tráfego. O recurso a vias adicionais na entrada e no anel de circulação tem-se revelado indispensável à resolução de problemas de capacidade, o que, em paralelo, se tem traduzido num aumento dos problemas de segurança. Estes são maioritariamente relacionados com adoção de comportamentos erráticos nas zonas da entrada, anel e saída de rotundas, e as consequentes necessidades de se proceder a manobras de entrecruzamento (Fig.1 a e b). Apesar da recente alteração ao Código da Estrada, Portugal continua sem a definição de regras claras e intuitivas sobre os procedimentos específicos a serem adotados nas rotundas com múltiplas vias, pelo que se continua a registar um número significativo de condutores que optam por circular na via exterior do anel para a realização de manobras de viragem à esquerda e de inversão de marcha (Fig. 1_b). Estes problemas têm levado alguns países, como é o caso da França, Alemanha e Suíça, a condicionarem significativamente a aplicação de soluções com múltiplas vias de circulação, a situações excecionais e devidamente justificadas. Por sua vez, a Inglaterra e a Austrália têm recorrido a marcações em espiral, de forma a orientarem os condutores durante a sua tarefa de condução. Mais recentemente surge, na Holanda o conceito de turbo-rotunda como forma de controlar fisicamente este tipo de práticas [15].

Vários autores têm vindo a desenvolver trabalhos de segurança aplicados a esta solução inovadora e a defender consensualmente o aumento dos níveis de segurança, designadamente quando comparada com a rotunda tradicional de duas vias. Segundo Fortuijn [15] estudos do tipo *antes e depois* levados a cabo na Holanda, apontam para uma redução do risco de acidentes em cerca de 80%, defendendo que as turbo-rotundas asseguram níveis de segurança similares aos associados a rotundas de uma só via.

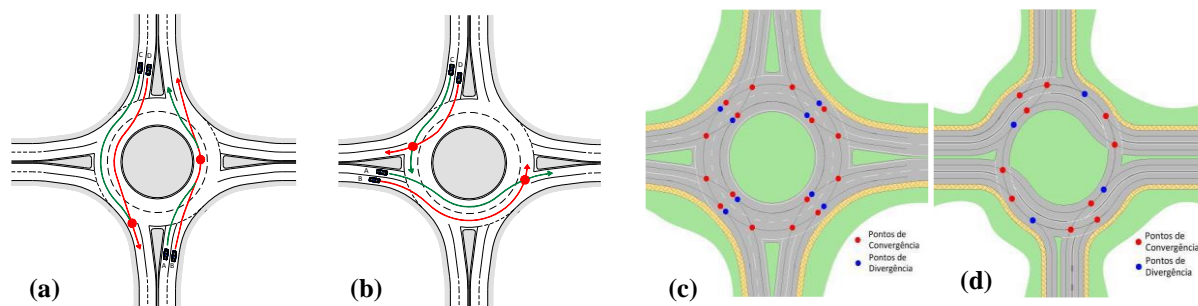


Fig. 1. Comportamentos erráticos (veículos B e D, assinalados a vermelho) na negociação de uma rotunda normal de 2 vias (a e b); número de pontos de conflito: (c) rotunda de 2 vias; (d) turbo-rotunda

Também um estudo de Mauro e Cattani [16] assente na aplicação de técnicas de análise de conflitos a nove *layouts* sujeitos a diferentes cenários de procura, aponta de forma consistente, para a redução 40 e os 50 na frequência de acidentes e de 25 a 30% nos acidentes com feridos. Num estudo desenvolvido por Vasconcelos *et al.* [2], fez-se a comparação de uma rotunda de uma via, existente em Coimbra, com uma solução convencional de duas vias e uma turbo-rotunda, recorrendo ao SSAM (*Surrogate Safety Assessment Model*), e a técnicas de microsimulação. Concluiu-se que a turbo-rotunda é a melhor das 3 soluções, registando menos conflitos que a rotunda de uma só via. Efetivamente, comparando a Fig. 1_c e a Fig. 1_d constata-se a redução do número de conflitos de 24 nas rotundas convencionais de 2 vias para 14 na turbo-rotunda, o que se tende a traduzir na redução da probabilidade de acidentes. Note-se contudo que, alguns desses conflitos podem estar associados a um nível de gravidade diferente, seja por envolverem ângulos de embate superior seja pelo facto do tráfego conflituante estar concentrado num só do anel. Face à inexistência de um histórico de acidentes em turbo-rotundas, o desenvolvimento de estudos detalhados, suportados por técnicas de microsimulação, revela-se indispensável à confirmação destes resultados.

Num estudo baseado na aplicação de modelos de microsimulação Fortuijn [15] concluiu que os condutores que circulam na via exterior da turbo-rotunda, adotam velocidades inferiores às adotadas em rotundas tradicionais de 2 vias, com reduções de 48 para 38 km/h. Estas velocidades são semelhantes às adotadas numa rotunda de uma só via com dimensão global similar. Conclusões similares foram deduzidas por Vasconcelos *et al.* [2].

4 AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE SEGURANÇA DE UM CORREDOR DE TURBO-ROTUNDAS

4.1 Construção, calibração e validação do modelo de simulação

O estudo de caso assentou na simulação de um caso real constituído por uma sucessão de três intersecções reais com potencial de transformação em turbo-rotunda. Optou-se por seleccionar um corredor de três rotundas consecutivas inseridas na Avenida Fernando Namora, integrada na Circular Externa de Coimbra. Foram construídos dois modelos de simulação: (i) situação atual, considerada como referência; (ii) solução alternativa correspondendo a turbo-rotundas com dimensões gerais similares (Fig. 2).

As rotundas seleccionadas apresentam características geométricas e dimensão similares entre si, dispondo todas de 4 ramos e de 2 vias de circulação (Fig. 2). O afastamento entre a rotunda A e B é de aproximadamente 400m e entre as rotundas B e C é de 470m. O corredor (via principal que interliga as 3 rotundas) é composto por duas faixas de rodagem com duas vias em cada sentido, com 3,5m de largura cada. No caso do corredor de turbo-rotundas, a seleção da tipologia das soluções baseou-se na importância dos movimentos direcionais, tendo-se optado por utilizar soluções *standard* nas intersecções A e B, enquanto na C se optou por uma solução do tipo *knee* (correspondendo à situação atual, rotunda com via segregada de viragem à direita).

A matriz O/D foi construída com base em dados recolhidos no período de ponta da manhã [7.30 - 9.30] de um dia normal de funcionamento da rede, tendo sido considerados dois tipos de veículos: ligeiros e pesados. Por se desconhecerem elementos de sinistralidade que permitam aferir da razoabilidade do uso da hora de ponta da manhã como o período para avaliar o nível de segurança, este período foi o seleccionado por acomodar o maior volume de tráfego e por consequência tender a gerar o maior número de conflitos. Foram assim consideradas 16

matrizes O/D correspondentes à procura de tráfego (ligeiros e pesados) em cada período de 15 minutos. O corredor é sujeito a um nível de procura moderado a elevado, tendo sido contabilizado um volume global de veículos próximo de 4400 veíc/h, correspondente ao período de ponta [8:15- 8:30].

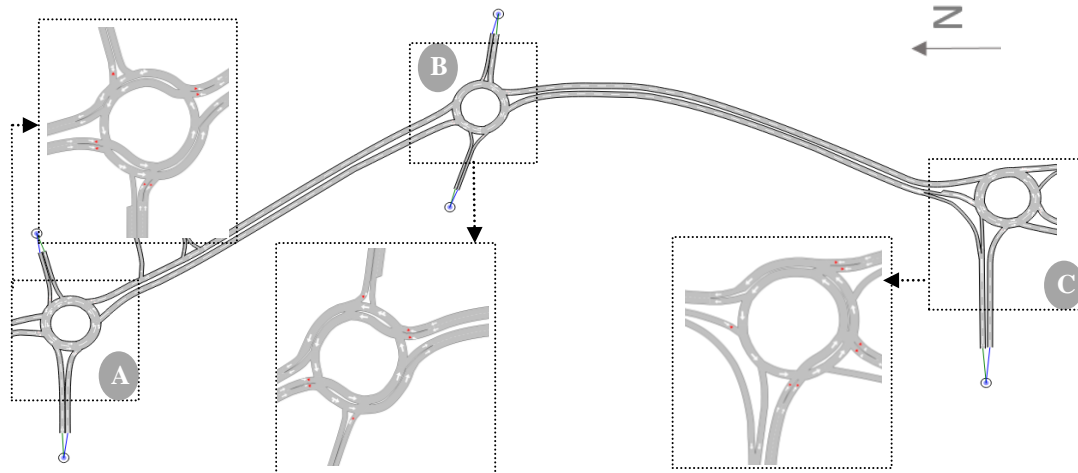


Fig. 2 – Circuito utilizado no estudo de caso: 3 rotundas consecutivas que foram posteriormente transformadas em turbo-rotundas

Para garantir o realismo do modelo é fundamental que este seja calibrado para representar de forma tão ajustada quanto possível as trajetórias dos utentes simulados. Contudo e por se tratar de uma análise comparativa entre cenários (partindo da mesma base), o processo de calibração foi simplificado e limitado ao ajuste de 2 parâmetros de calibração: *acceptance speed* (SA, parâmetro que avalia o grau de acatamento da velocidade máxima imposta no local) o qual foi ajustado tendo por base a distribuição de velocidades registadas em regime livre de circulação, recorrendo a um veículo instrumentado que percorreu o circuito em ambas as direções. Dessa análise resultaram os seguintes valores: $SA_{av}=0,98$; $SA_{min} = 0,78$; $SA_{max}=1,26$; $\sigma=0,09$. Paralelamente, os valores do tempo de reação foram ajustados até que os valores das filas de espera registadas nas várias entradas fossem devidamente representadas pelo modelo (considerou-se o valor de 0,8s sendo o valor *default* de 0,75 s). Por sua vez, e na impossibilidade de se proceder à recolha de variáveis relacionadas com a segurança, optou-se por recorrer a variáveis operacionais. A validação do modelo centrou-se assim na comparação do tempo médio de viagem entre diferentes pares O/D, para uma base de dados independente, resultante da recolha de matrículas de veículos que circulava em condições livres. Os valores simulados representam genericamente os observados, tendo-se registado o erro máximo de 12%, pelo que se assumiu o modelo como validado.

De modo a avaliar a taxa de saturação atualmente registada nas rotundas, durante o pico de procura da manhã, foi aplicado o método estatístico do TRL-UK, desenvolvido por Kimber [17], às entradas sujeitas aos maiores níveis de procura. Concluiu-se que apesar de algumas entradas manterem uma reserva considerável de capacidade, verifica-se que para o período de maior procura, algumas entradas se encontram a funcionar bastante próximas das condições de saturação. É o caso das entradas A-3 e B-3 (sentido Sul-Norte), que apresentam uma taxa de saturação de 90%. Atendendo a que a taxa de saturação de um sistema é determinado pelo elemento crítico, pode-se estimar que a rede em estudo se encontra a funcionar a um nível de saturação próximo dos 90%.

4.2 Definição dos cenários

Foram definidos dois conjuntos de cenários de forma a avaliar os seguintes efeitos: (i) variação do carregamento da rede (e por inerência diferentes níveis de saturação), mantendo a repartição direcional constante e, (ii) variação de repartições direcionais de forma sistemática e alternada, sem alterar a procura global nas entradas.

No primeiro grupo de análise, foram estudados os seguintes cenários para a procura de tráfego: situação de referência (procura real de tráfego observada - 100%); 3 cenários adicionais relativos a procuras reduzidas (70 a 90% da carga real) e 5 cenários representativos de procuras de tráfego elevadas (100 a 150%).

No segundo tipo de análises procurou-se avaliar o impacte em termos de funcionamento do corredor, das manobras de mudança de via, tendo-se considerado 12 combinações resultantes das seguintes repartições

direcionais: 60-20-20, 20-60-20, 20-20-60 (percentagens de viragens à direita, ida em frente e viragens à esquerda, respetivamente) – Quadro 1. Todos estes cenários foram testados para a procura atual (carga de 100%).

Quadro 1 – Combinações de repartições direcionais nas 3 rotundas em estudo (% de viragens à direita/ ida em frente / viragens à esquerda)

Combinação	Rotunda A	Rotunda B	Rotunda C	Combinação	Rotunda A	Rotunda B	Rotunda C
1	60/20/20	20/60/20	60/20/20	7	60/20/20	20/60/20	20/20/60
2	60/20/20	20/20/60	60/20/20	8	60/20/20	20/20/60	20/60/20
3	20/60/20	60/20/20	20/60/20	9	20/60/20	60/20/20	20/20/60
4	20/60/20	20/20/60	20/60/20	10	20/60/20	20/20/60	60/20/20
5	20/20/60	60/20/20	20/20/60	11	20/20/60	60/20/20	20/60/20
6	20/20/60	20/60/20	20/20/60	12	20/20/60	20/60/20	60/20/20

Cada cenário foi associado a um período de simulação de 2 horas, tendo-se rejeitado os resultados relativos aos primeiros e últimos 15 minutos por se considerar poder não existir um carregamento total da rede e por consequência, os resultados não serem representativos da realidade.

4.3 Definição dos indicadores de desempenho

Tal como visto em 2.2, o SSAM disponibiliza diversos indicadores de desempenho que poderão ser considerados representativos quer da frequência quer da gravidade dos potenciais conflitos. À semelhança de trabalhos anteriores [2] no âmbito do presente trabalho, optou-se pela utilização de apenas dois destes indicadores, o TTC (*time to collision*) como representativo da frequência dos conflitos (com o valor de fronteira de 1,5s o qual corresponde ao valor *default*) e o DeltaS como indicador representativo da gravidade do conflito.

4.4 Avaliação do efeito do carregamento da rede

O Quadro 2 apresenta a variação do número de conflitos em função do carregamento da rede, segregada por tipo de conflito e para as duas soluções em análise. Tal como seria expectável, o volume de tráfego apresenta-se como um fator de risco, sendo claro o aumento do número de conflitos com o aumento do carregamento do tráfego na rede. É ainda de salientar que o tipo de conflito mais predominante é o conflito do tipo frente-traseira (*Rear End*) o que poderá indiciar a importância associada aos entrecruzamentos no trecho de aproximação e às manobras de negociação da rotunda. Tal pode ser confirmado através da Fig. 3 (a e b) que apresenta a distribuição espacial dos conflitos na rotunda A para a carga dos 100%. Nelas se verifica uma tendencial concentração de conflitos junto às entradas das rotundas onde ocorrem as manobras de pára-arranca. É igualmente de constatar que esse tipo de conflito aumenta com o aumento da taxa de carregamento de rede (e, por inerência taxa de saturação) como consequência do aumento do comprimento das filas de espera (Fig 3 c e d e Quadro 2). Também o tipo de conflito atravessamento (*Crossing*) e mudança de via (*Lane Change*) evidenciam um ligeiro aumento com o carregamento da rede, embora se trate de um aumento pouco significativo, designadamente quando comparado com o conflito frente-traseira. De facto estes dois tipos de conflito apenas ocorrem no interior das rotundas onde se registam entrecruzamentos de veículos.

Quando comparadas as duas soluções alternativas verifica-se que o aumento do número de conflitos é significativamente superior para a solução do corredor com turbo-rotundas comparativamente à solução atual. Para a procura de tráfego atual (100%), o corredor de turbo-rotundas já apresenta um número de conflitos elevado, o que se poderá dever ao facto da rede estar a funcionar próxima do limiar de capacidade, podendo assim registar-se breves períodos de congestionamento. A partir dos 100% de carga regista-se um aumento muito significativo, o qual tende a amenizar para cargas superiores a 130%, muito provavelmente como resultado de situações de bloqueio geral da rede. Estes resultados estão em consonância com as conclusões apresentadas por Mariano [18], já que concluiu que, para taxas de saturação próximas dos 100%, as turbo-rotundas apresentam níveis de congestionamento superiores às rotundas convencionais de 2 vias.

À semelhança da rotunda normal, também na turbo-rotunda o conflito mais predominante é o frente-traseira (*Rear End*). Este tipo de conflito ocorre sobretudo nas zonas de aproximação da rotunda enquanto os tipos de conflitos mudança de via (*Lane Change*) e o atravessamento (*Crossing*) ocorrem maioritariamente já no seu interior. Tais resultados respondem ao expectável, já que no caso da turbo-rotunda, o processo de decisão

associado à seleção de via, é transferido para os ramos de aproximação, onde se gera um número adicional de manobras de entrecruzamento. Apesar disso importa realçar a diminuição significativa dos conflitos do tipo *crossing* (os mais graves) e *lane change*, particularmente em situações não saturadas. A análise dos indicadores *TTC* (aumento) e *DeltaS* (diminuição) mostram uma tendencial redução geral da gravidade dos conflitos.

Quadro 2 – Número e tipo de conflitos vs carga na rede: (a) Rotundas normais; (b) Turbo-rotundas

Carga	ROTUNDA CONVENCIONAL						TURBO-ROTUNDA					
	Atraves-samento	Frente-traseira	Mudança de via	total	TTC médio	DeltaS médio	Atraves-samento	Frente-traseira	Mudança de via	total	TTC Médio	DeltaS médio
70	2	389	59	450	0,86	5,33	0	691	58	749	1,26	4
80	3	669	102	774	0,91	5,14	1	1098	52	1151	1,29	3,64
90	6	960	159	1125	0,92	5,17	1	2350	78	2429	1,28	3,09
100	22	1461	209	1692	0,97	5,16	5	3386	106	3497	1,29	2,87
110	12	1689	240	1941	0,97	5,22	2	9198	178	9378	1,29	2,15
120	7	2365	318	2690	1	4,92	7	20999	381	21387	1,27	1,65
130	22	4416	417	4855	1,11	3,95	8	27660	472	28140	1,28	1,61
140	31	6367	599	6997	1,14	3,5	6	34800	566	35372	1,28	1,56
150	46	9487	680	10213	1,2	3,07	7	36514	558	37079	1,27	1,52

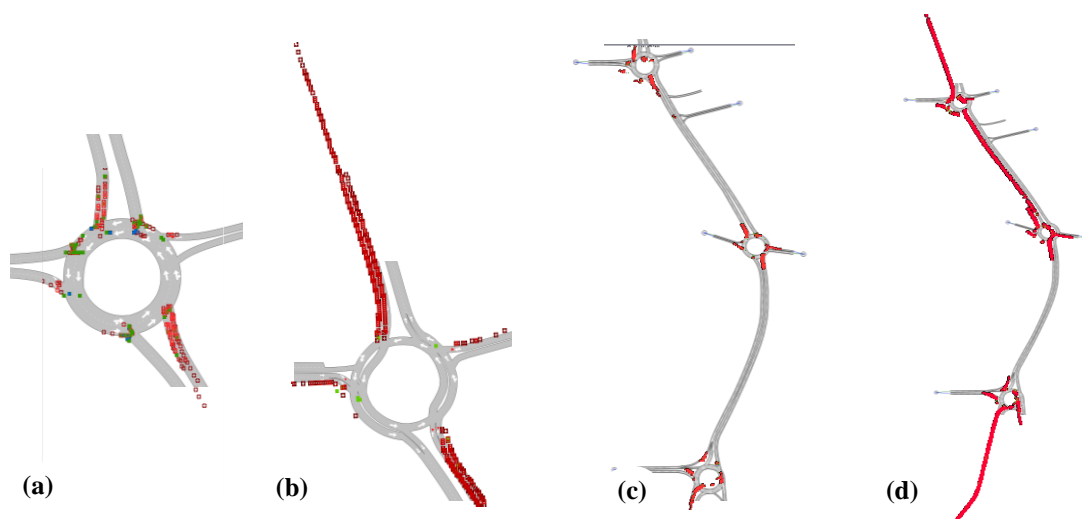


Fig. 3 – Número conflitos vs carga na rede (a) rotunda A (100%) (b) turbo-rotunda A (100%); (c) corredor de rotundas convencionais (100%); (d) corredor de turbo-rotundas (150%)

4.5 Avaliação do efeito associado à variação da repartição direcional

A análise do Quadro 3 permite concluir que, independentemente do cenário de repartição adotado, o número de conflitos do corredor de rotundas convencionais é significativamente inferior ao das turbo-rotundas. A combinação 4 é a que se traduz num maior número de conflitos. Essa combinação representa a situação em que 60% dos veículos das rotundas A e C seguem em frente e na rotunda intermédia (B) 60% do tráfego vira à esquerda. Estes resultados respondem ao expectável, já que para além de existir um nível elevado de procura de tráfego nos arcos de ligação entre rotundas, é ainda imposta a mudança de via na aproximação à rotunda intermédia. Por sua vez, a combinação 2 é a que gera melhores resultados. Neste cenário, a maioria do tráfego nas duas rotundas extremas (A e C) viram à direita, o que se traduz por um lado, na geração de manobras de baixo nível de gravidade e, por outro lado, na redução significativa dos volumes de tráfego afetados à rede.

Esta tendência é mantida no corredor de turbo-rotundas. Também as tendências registadas no ponto anterior são aqui mantidas. Regista-se um acréscimo significativo do número de conflitos no corredor de turbo-rotundas

comparativamente às rotundas normais, o que muito possivelmente se deve ao facto do corredor estar a funcionar próximo do limiar de saturação, pelo que a transformação das rotundas em turbo-rotundas se traduz numa redução da capacidade (mesmo que ligeira) que por sua vez se traduz num maior número de conflitos na gestão das filas de espera. A análise do Quadro 3 volta a evidenciar, que o conflito mais comum é o frente-traseira (*Rear End*) assumindo os restantes conflitos, valores francamente inferiores. Os conflitos *crossing* e *lane change* reduzem, contudo, o acréscimo acentuado do número de conflitos do tipo *Rear End* tende a “camuflar” este potencial benefício das turbo-rotundas.

Quadro 3 – Tipos de conflitos para as duas soluções para cada combinação

Comb	ROTUNDA CONVENCIONAL						TURBO-ROTUNDA					
	Atraves-samento	Frente-traseira	Mudança de via	total	TTC médio	DeltaS médio	crossing	Atraves-samento	Frente-traseira	Mudança de via	TTC médio	DeltaS médio
1	5	500	96	601	0,92	5,12	6	3240	53	3299	1,29	2,18
2	1	450	90	541	0,85	5,17	2	2942	49	2993	1,30	2,38
3	8	720	142	870	0,91	5,21	1	3645	70	3716	1,27	2,17
4	14	1104	168	1286	0,86	5,33	8	9979	114	10101	1,28	1,85
5	9	901	158	1068	0,92	5,23	7	3204	75	3286	1,29	2,61
6	13	1019	166	1198	0,91	5,43	4	5639	72	5715	1,29	2,30
7	5	769	131	905	0,85	5,39	5	2769	73	2847	1,29	2,81
8	7	666	122	795	0,85	5,22	2	4125	63	4190	1,29	2,36
9	3	922	154	1079	0,89	5,07	3	5836	89	5928	1,29	2,07
10	14	678	120	812	0,87	5,20	3	9734	127	9864	1,28	1,66
11	13	713	124	850	0,94	5,31	2	5691	86	5779	1,28	2,09
12	12	566	134	712	0,93	5,42	4	3891	69	3964	1,29	2,48

Genericamente verifica-se ainda que o TTC na solução de turbo-rotundas é superior ao das rotundas normais, o que indicia uma menor probabilidade destes conflitos resultarem em acidentes reais. Também o indicador de gravidade *DeltaS* indicia um maior nível de segurança nas turbo-rotundas, apresentando, independentemente do tipo de repartição direcional, um valor inferior nas turbo-rotundas.

4.6 Validação dos resultados do SSAM

Os processos de validação passam desejavelmente pela comparação de resultados simulados com os dados observados no sistema real. Dada a ausência do histórico de acidentes no corredor de rotundas selecionados, optou-se por recorrer à comparação dos resultados simulados pelo SSAM com o número de acidentes estimados pelo modelo de estimação de acidentes em rotundas de Maycock e Hall [19]. Contudo, importa desde já ter presente que os resultados dos dois métodos não são diretamente comparáveis, já que o modelo de Maycock estima o número de acidentes num determinado período de tempo e o SSAM aponta o número de potenciais conflitos, sendo certo que nem todos os conflitos resultam em acidentes. Por outro lado, o período temporal é igualmente distinto em ambos os métodos (Maycock apresenta um número de acidentes por ano e os resultados fornecidos pelo SSAM dizem apenas respeito às duas horas simuladas).

Os dois modelos foram aplicados à rotunda A (na sua forma atual), a qual está sujeita aos maiores volumes de tráfego e apresenta uma geometria considerada normal. Foram analisados dois cenários de procura: (1) cenário de procura atual; (2) combinação 12, correspondendo a um cenário com elevado volume de viragens à esquerda. Atendendo a que o método SSAM só estima conflitos entre pares de veículos (*crossing*, *rear end* e *lane change*), apenas foram considerados os acidentes do tipo 1 e 2 do modelo de Maycock. Assim foram estudados os conflitos do tipo *crossing* para a tipologia de acidente 1 e os conflitos do tipo *rear end* e *lane changing* para a tipologia de acidente 2. O Quadro 4 apresenta os resultados obtidos, segregados por entrada da rotunda.

No que respeita o conflito do tipo *crossing* ambos os modelos apontam para a inexistência de potenciais acidentes. Já os conflitos do tipo *rear end* e *lane change* tendem a assumir um peso relevante nos acidentes do tipo 2 (acidentes/conflitos na aproximação à rotunda). Também aqui se verifica uma similaridade nos resultados,

já que ambos apontam para tendenciais problemas nas entradas A-1 e A-3. É ainda interessante verificar que as análises apontam para uma possível relação entre o número de potenciais acidentes e de conflitos de 1:300. As mesmas conclusões podem ser retiradas dos resultados associados à combinação 12. Apesar dos valores não serem diretamente comparáveis, os resultados apresentados, apontam claramente para a existência de uma relação entre o potencial número de acidentes e o número de conflitos estimados pelo SSAM, pelo que esta ferramenta se revela como promissora no apoio a análises de segurança.

Quadro 4. Comparação entre acidentes/conflitos, por tipologia de acidente, aplicada à rotunda A

Entradas	CENÁRIO ATUAL				CENÁRIO 12			
	Acidente tipo 1		Acidente tipo 2		Acidente tipo 1		Acidente tipo 2	
	Maycock	SSAM	Maycock	SSAM	Maycock	SSAM	Maycock	SSAM
A1	0	20	1	350	0	0	1	310
A2	0	0	0	60	0	0	0	100
A3	0	0	3	690	0	0	0	130
A4	0	0	0	40	0	0	0	20

5 CONCLUSÕES

A microssimulação tem vindo a afirmar-se como uma técnica promissora na avaliação do desempenho de soluções rodoviárias, designadamente face a soluções inovadoras, onde não é possível contar com soluções construídas. Nessa linha de ação, este artigo centrou-se no desenvolvimento de uma plataforma de simulação aplicada à avaliação do desempenho de um corredor de turbo-rotundas face a um corredor de rotundas.

Em termos genéricos, os resultados apontaram consistentemente para um aumento significativo do número de conflitos na rede codificada quando o corredor de rotundas convencionais é transformado num corredor de turbo-rotundas. Esse aumento mostrou ser sensível ao nível de carregamento de tráfego na rede, crescendo significativamente para condições saturadas, o que corresponde a situações de tráfego em que os acidentes tenderão a ser menos graves. A análise da distribuição espacial dos conflitos permitiu ainda concluir que os conflitos ocorrem maioritariamente nos trechos de ligação entre turbo-rotundas, sendo maioritariamente do tipo *frente-traseira*. Por sua vez, os conflitos do tipo *atravessamento* e *mudança de via*, sofrem uma redução significativa. A avaliação dos indicadores de segurança (TTC e DeltaS) mostra que, apesar dos conflitos serem em grande número tendem a ser pouco graves, o que na prática não se traduzirão em acidentes reais.

Quando avaliado o efeito da repartição modal, verifica-se que os resultados obtidos foram igualmente consistentes, confirmando os resultados anteriores. O aumento do número de conflitos é notório em todas as combinações estudadas, assumindo o seu valor máximo nas combinações onde a maior percentagem de veículos segue em frente nas rotundas extremas (A e C) e vira à esquerda na rotunda intermédia (B). Por oposição, a solução que obteve melhor desempenho, corresponde àquela em que, tal como seria expectável, o fluxo dominante vira à direita em todas as rotundas. A análise dos indicadores de segurança mostrou consensualmente um aumento do TTC e uma diminuição do DeltaS, o que se traduz numa diminuição da gravidade dos conflitos.

Estes resultados estão, de uma forma geral, em concordância com trabalhos anteriores aplicados a turbo-rotundas isoladas já que o número de conflitos na entrada e no anel reduzem de forma significativa, independentemente da carga atribuída à rede ou da repartição direcional. Não se pode contudo generalizar estas conclusões. Ficou claro que o nível de desempenho depende consideravelmente da taxa de saturação do sistema, e que o aumento da taxa de saturação se traduz num aumento muito significativo do número de conflitos nos trechos de ligação entre intersecções. Ficou igualmente claro que esses conflitos são de pequena gravidade podendo por isso não resultar em acidentes efetivos. Apesar dessa correlação direta entre o número de conflitos e o nível de congestionamento, a redução obtida do número de conflitos do tipo *atravessamento* no anel, evidencia ainda, o potencial de aplicação das técnicas de microssimulação na avaliação dos níveis de segurança de intersecções inovadoras.

6 AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através do Programa MIT-Portugal.

7 REFERÊNCIAS

1. Ferreira, S.M.P., *A Segurança Rodoviária no Processo de Planeamento de Redes de Transporte em Meio Urbano*. Tese de doutoramento. Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia Departamento de Engenharia Civil, 2010.
2. Vasconcelos, L., Neto, L., Seco, A.M., Bastos Silva, A. M. C., Validation of the Surrogate Safety Assessment Model for Assessment of Intersection Safety. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2432(-1), pp.1-9, 2014.
3. Amundsen, F.H.E. and Hydén, C., *Proceeding of the First Workshop on Traffic Conflicts*. Institute of Transport Economics, Oslo / Lund Institute of Technology. Oslo, 1977.
4. Archer, J., *Traffic Conflict Technique: Historical to current State-of-the-Art*. Royal Institute of Technology. Stockholm, 2001.
5. Gettman, D., Pu, L., Sayed, T. and Shelby, S., *Surrogate Safety Assessment Model and Validation?: Final Report*. Publication No: FHWA-HRT-08-051. Federal Highway Administration. USA, 2008.
6. Young, W., Sobhani, A., Lenné, M.G. and Sarvi, M., Simulation of safety: A review of the state of the art in road safety simulation modelling. *Accident Analysis and Prevention*, 66, 89-103, 2014.
7. Lima Azevedo, C., Cardoso, J.L., Ben-Akiva, M. (2015a). Modeling crash probability in large traffic simulators. 5th International Symposium on Highway Geometric Design, Transportation Research Board, Vancouver, Canada.
8. Lima Azevedo, C., Ciuffo, B., Cardoso, J.L., Ben-Akiva, M.E. (2015b). Dealing with uncertainty in detailed calibration of traffic simulation models for safety assessment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 58, Part B, September 2015, Pages 395–412.
9. Gettman, D. and Head, L., *Surrogate Safety Measures from Traffic Simulation Models. Final Report*. Publication No: FHWA-RD-03-050. Federal Highway Administration. USA, 2003.
10. Archer, J., *Indicators for traffic safety assessment and prediction and their application in micro-simulation modelling: A study of urban and suburban intersections*. Doctoral Thesis. Royal Institute of Technology. Stockholm, 2005.
11. Laureshyn, A., Svensson, Å. and Hydén, C., Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioural data: Theoretical framework and first implementation. *Accident Analysis and Prevention*, 42, 1637-1646, 2010.
12. Sayed, T. and Zein, S., *Traffic Conflicts Standards for Intersections*. *Transportation Planning and Technology*, 22, 309-323, 1999.
13. Hayward, J.C., *Near misses as a measure of safety at urban intersections*. Doctoral Thesis, The Pennsylvania State University, Department of Civil Engineering, 1971.
14. Minderhoud, M.M. and Bovy, P.H.L., Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment. *Accident Analysis and Prevention*, 33(1), 89-97, 2001.
15. Fortuijn, L.G.H, *Turbo Roundabouts - Design Principles and Safety Performance*, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2096, pp. 16–24 December, 2009.
16. Mauro, R. e Cattani, M., *Potential Accident Rate of Turbo-Roundabouts*, *4th International Symposium on Highway Geometric Design*, Transportation Research Board, Valencia, Spain, 2010.
17. KIMBER, R.M., 1980 - *The Traffic Capacity of Roundabouts - Transport and Road Research Laboratory - TRRL Laboratory Report 942*, ISSN 0305-1293, Crowthorne-England
18. Mariano, P., *Avaliação do Desempenho de um Corredor de Turbo-Rotundas – Capacidade e Impactes Ambientais*, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Edição FCTUC, Janeiro, Coimbra, 2014.
19. Maycock, G., Hall, R., *Accidents at 4-arm roundabouts*, Highway appraisal and design - *PTRC Summer Annual Meeting*, Sussex, England, 1984.