

NOVOS MODELOS DE ESTIMAÇÃO DE CAPACIDADES EM ROTUNDAS

Luís Vasconcelos¹, Sílvia Santos², Ana Bastos Silva² e Álvaro Seco²

¹Instituto Politécnico de Viseu, Departamento de Engenharia Civil, Campus de Repeses, 3504-510 Viseu, Portugal

email: vasconcelos@estv.ipv.pt <http://www.ipv.pt>

²Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Rua Luís Reis Santos - Pólo II da Universidade, 3030-788 Coimbra, Portugal

Sumário

Este artigo apresenta uma análise comparativa de modelos de capacidades aplicados a rotundas, suportada por uma base de dados real. O estudo demonstra que os modelos convencionais – TRL e Siegloch – são incapazes de produzir estimativas fiáveis em toda a gama de variação dos fluxos conflituantes. Por outro lado, o modelo de Haging, associado a um novo método de parametrização dos intervalos nas correntes prioritárias, permite diferenciar as condições de circulação nas diferentes vias de entrada e de circulação e revela-se capaz de estimar com fiabilidade a capacidade de soluções sujeitas a repartições desequilibradas do tráfego direcional.

Palavras-chave: Rotunda; Capacidade; Siegloch; Haging; *Gap-acceptance*

1 INTRODUÇÃO

As rotundas são habitualmente associadas a níveis de desempenho elevados, com contributos evidentes ao nível da capacidade, segurança e requalificação do espaço urbano. Apresentam um domínio alargado de aplicação, o que tem justificado a sua implementação quer em domínio urbano quer rural. A adoção de uma geometria adequada a cada local, suportada por estudos de estimação de capacidade, é necessária para que sejam asseguradas boas condições de operacionalidade e de segurança, com consequências diretas na fluidez e na mobilidade local.

A capacidade da entrada de uma rotunda pode ser estimada recorrendo a diferentes metodologias, sendo frequente o uso de duas tipologias de modelos teóricos: *i*) modelos empíricos, baseados em análises de regressão estatística, que correlacionam a capacidade com as características geométricas prevalentes e com o tráfego conflituante; *ii*) probabilísticos, baseados na teoria de *gap-acceptance*, que assentam na definição de leis de distribuição dos veículos nas diferentes correntes conflituantes.

É possível encontrar na bibliografia da especialidade referência a diversos modelos de estimação de capacidade adaptados a diferentes países e contextos de aplicação. A maioria desses modelos apresenta um domínio de aplicação alargado, abrangendo quer soluções com uma só via de circulação quer com múltiplas vias. Apesar disso, os resultados da sua aplicação apontam para valores extremamente díspares, dependendo consideravelmente dos valores dos parâmetros locais adotados. Este assunto continua a merecer a atenção da comunidade científica, procurando-se incorporar nos modelos especificidades capazes de aumentar a sua robustez e capacidade de representar a realidade.

Neste contexto, o presente artigo integra-se no projeto de investigação AROUND, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), e centra-se na apresentação das diferentes metodologias de cálculo de capacidades em rotundas e de alguns dos modelos mais conceituados a nível internacional. É apresentado um estudo comparativo de aplicação de diferentes modelos de estimação de capacidade procurando evidenciar as potencialidades e limitações associadas a cada um.

O trabalho é suportado pela criação de uma base de dados real, que inclui informação relativa às características geométricas prevalecentes da entrada e da rotunda, assim como à caracterização das correntes de tráfego envolvidas.

2 MODELOS DE CAPACIDADES

2.1 Introdução

A capacidade é uma medida definida como o “*máximo fluxo horário com que pessoas ou veículos conseguem atravessar uma secção de uma via ou estrada durante um determinado período de tempo sob as condições geométricas, de tráfego e de operação prevalecentes*” [1]. No contexto de uma rotunda, a capacidade pode ser calculada ao nível do ramo de entrada ou desagregada ao nível da via. A previsão da capacidade de uma rotunda, à semelhança de qualquer outro tipo de intersecção, pode ser efetuada recorrendo a modelos que se enquadram em três grandes grupos: empíricos, probabilísticos e de simulação. Os dois primeiros tipos são os mais utilizados pela comunidade técnica e são o objeto deste artigo. Por sua vez, os modelos de simulação têm vindo a ganhar nos últimos anos progressiva aceitação por parte da comunidade técnica e científica. Impõem, contudo, um processo não trivial de calibração e de validação pelo que o seu domínio de aplicação se cinge essencialmente a redes, a interseções complexas ou a problemas que envolvam a presença de diversos utilizadores ou modos de transporte.

2.2 Modelos empíricos

Os modelos empíricos baseiam-se na reconstituição da curva fluxo - capacidade por recurso a observações efetuadas em períodos de saturação de ramos de rotundas com características geométricas diferenciadas. A abordagem estatística consiste na medição de um conjunto de variáveis eventualmente explicativas e na análise das inter-relações entre elas e com a variável a explicar. Desde a década de 70 têm sido desenvolvidos vários modelos deste tipo, principalmente na Europa e na Austrália, apresentando genericamente a capacidade de uma entrada como função do tráfego conflituante e das principais características geométricas da rotunda.

Nesta categoria, destaca-se o modelo linear do Transportation Research Laboratory (TRL) [2]. Foi desenvolvido no Reino Unido, no fim dos anos 70, na sequência da identificação de um conjunto de limitações dos modelos alternativos, baseados na teoria de *gap-acceptance* (apresentados na próxima secção). Especificamente, criticava-se a falta de interação entre os parâmetros geométricos da rotunda e o comportamento do condutor. Nesse sentido foi solicitado ao Transport and Road Research Laboratory (TRRL, agora TRL) o desenvolvimento de um modelo estatístico baseado na geometria da rotunda e no tráfego conflituante. Para o efeito foi obtida uma base de dados com observações de campo (86 rotundas reais e 35 geometrias em circuito de testes, correspondendo a 11000 minutos de observações) a partir da qual foi possível identificar seis variáveis, relacionadas com a geometria, independentes e estatisticamente significativas: largura da entrada (e), largura da via na aproximação à rotunda (v), comprimento efetivo do leque (l), raio da entrada (r), ângulo de entrada (ϕ) e diâmetro do círculo inscrito (D).

A formulação para a previsão da capacidade é uma função linear dependente do fluxo total que atravessa a entrada e dos coeficientes K , F e f_c . A capacidade obtida para um fluxo conflituante nulo é designada por capacidade geométrica (por omissão são utilizadas as unidades fundamentais SI):

$$C = \max[K(F - f_c \cdot q_c); 0] \quad (1)$$

onde,

C = capacidade da entrada (UVE/h)

q_c = fluxo conflituante (UVE/h)

Tanto a capacidade, C , como o fluxo conflituante q_c são expressos em unidades de veículos equivalentes por hora (UVE/h). Os parâmetros K , F e f_c dependem da geometria da rotunda e são dados pelo seguinte conjunto de expressões:

$$S = 1.6(e - v) / l$$

$$K = 1 - 0.00347(\phi - 30) - 0.978(1/r - 0.05)$$

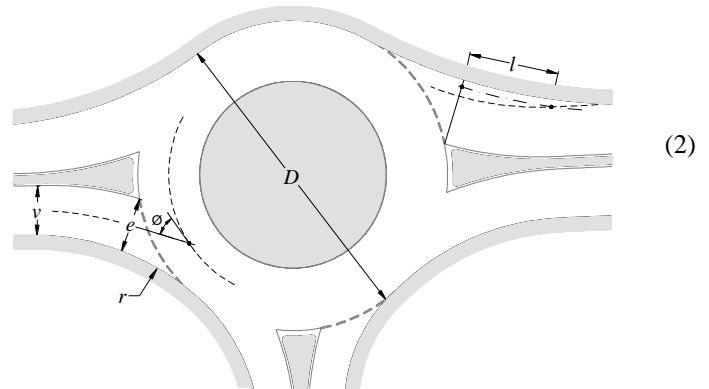
$$X_2 = v + (e - v) / (1 + 2S)$$

$$F = 303X_2$$

$$t_p = 1 + 0.5 / (1 + M)$$

$$M = \exp[(D - 60) / 10]$$

$$f_c = 0.21t_p(1 + 0.2X_2)$$



onde,

- e = largura efetiva da entrada
- v = largura da via de aproximação
- l = comprimento efetivo do leque
- r = raio da entrada no ponto de menor curvatura
- ϕ = ângulo da entrada (°)
- D = diâmetro do círculo inscrito

Os parâmetros com mais relevância na explicação da capacidade são a largura da via de aproximação, a largura da entrada e o comprimento efetivo do leque, pelo facto de indicarem, de forma indireta, o número de veículos que podem parar junto à linha de cedência de prioridade e entrar no anel de circulação quando surgir um intervalo aceitável na corrente prioritária. Os restantes parâmetros - raio de entrada, ângulo de entrada e diâmetro do círculo inscrito - têm uma contribuição relativamente modesta: o acréscimo no raio de entrada facilita essencialmente as viragens à direita; a diminuição no ângulo de entrada diminui a severidade de um eventual acidente devido à harmonização das velocidades (em grandeza e direção) entre os veículos que entram e os conflituantes; finalmente, o aumento no diâmetro da rotunda tem dois efeitos que resultam num saldo ligeiramente positivo: por um lado, as entradas são facilitadas já que aumenta o espaçamento entre veículos conflituantes; por outro lado, a velocidade destes aumenta diminuindo o intervalo de tempo entre veículos.

Este modelo é utilizado, entre outros países, no Reino Unido e em Portugal. Outros modelos de regressão - lineares ou exponenciais - são utilizados em França, Suíça e em Itália.

2.3 Modelos probabilísticos

O princípio de base de análise probabilística baseia-se num modelo de interação de veículos designado por modelo discreto de aceitação de intervalos entre veículos (*gap-acceptance*). Na sua forma mais elementar, são consideradas duas correntes de tráfego onde a secundária deve ceder prioridade à corrente principal. A modelação das interações entre estas correntes de tráfego assenta em dois blocos principais. O primeiro destes blocos descreve os intervalos entre veículos prioritários, o que passa pela parametrização de uma distribuição estatística. O segundo bloco descreve a forma como cada um dos intervalos entre veículos prioritários é utilizado pela corrente secundária. A conjugação dos dois blocos resulta numa expressão que relaciona a capacidade de uma entrada explicitamente com o correspondente tráfego conflituante e implicitamente com fatores comportamentais e operacionais.

2.3.1 Utilidade dos intervalos

O princípio de base deste bloco é o de considerar que nenhum veículo da corrente secundária transpõe a linha de cedência de prioridade se o intervalo de tempo disponível na corrente prioritária (entre pontos homólogos dos veículos) for inferior a um determinado valor t_c , designado de intervalo crítico. Avança um único veículo se o intervalo de tempo estiver compreendido entre t_c e $[t_c + t_f]$, onde t_f (intervalo mínimo) representa o tempo necessário para que o segundo veículo em fila atinja a linha de cedência de passagem após a entrada do primeiro veículo. Generalizando, pode referir-se que n veículos não prioritários atravessam a linha de cedência na presença de um intervalo de tempo na corrente prioritária compreendido entre $[t_c + (n - 1)t_f]$ e $[t_c + nt_f]$. Note-se que a capacidade teórica só é atingida se todos os intervalos utilizáveis forem efetivamente utilizados, o que pressupõe a presença contínua de veículos em fila na corrente secundária.

2.3.2 Distribuição dos intervalos

- **Distribuição exponencial**

Partindo de um conjunto de hipóteses simplificativas relativas aos veículos prioritários (velocidades semelhantes e independentes, inexistência de interações entre veículos, etc.) vários autores demonstraram que a distribuição de intervalos na corrente prioritária tende para uma distribuição exponencial negativa cuja função distribuição acumulada (FDA) é dada pela seguinte expressão:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (3)$$

onde,

- t = intervalo entre veículos prioritários consecutivos
- λ = parâmetro de escala da distribuição

O parâmetro λ pode ser determinado pelo método dos momentos, estabelecendo a igualdade entre a média dos intervalos observados e esperados. Resulta assim $\lambda = q$, em que q é o fluxo de tráfego registado durante um determinado período de observação.

São apontadas duas limitações relevantes ao modelo exponencial: o modelo prevê intervalos irrealisticamente pequenos e não descreve a existência de pelotões. A importância destas limitações aumenta com o volume de tráfego. Consequentemente, a distribuição exponencial pode ser considerada uma distribuição realista dos intervalos na corrente prioritária apenas em condições de tráfego muito moderado, aproximadamente $q < 150$ veíc./h [3].

A conjugação da distribuição exponencial de intervalos com a aproximação linear à função de utilidade de intervalos resulta num modelo de capacidade muito simples [4] e que, independentemente das suas limitações, tem ainda hoje grande aceitação, sendo nomeadamente adotado no Highway Capacity Manual [5]:

$$C = \frac{e^{-q_c \left(t_c - \frac{t_f}{2} \right)}}{t_f} \quad (4)$$

onde,

- C = capacidade da entrada
- q_c = fluxo conflituante
- t_c = intervalo crítico
- t_f = intervalo mínimo

De notar que, contrariamente ao que acontece no modelo de regressão do TRL, este modelo não requer a conversão dos veículos em unidades de veículos equivalentes ligeiros. Deste modo, será de esperar que os parâmetros t_c e t_f variem entre interseções de modo a refletirem o efeito de diferentes composições do tráfego e de comportamentos na capacidade.

A influência dos parâmetros na curva da capacidade é bastante clara: a capacidade aumenta quando o intervalo crítico e/ou o intervalo mínimo diminuem. O intervalo mínimo tem maior influência quando o tráfego conflituante é reduzido e são possíveis várias entradas para a rotunda no mesmo intervalo; à medida que o tráfego conflituante aumenta, os intervalos entre veículos são cada vez mais pequenos e tornam-se mais frequentes os casos em que apenas a primeira linha de veículos em fila pode aproveitar o intervalo, tendo portanto o intervalo crítico o papel decisivo na previsão da capacidade.

- **Distribuição Cowan M3**

Face às limitações da distribuição exponencial, Cowan [6] propôs uma família de distribuições em que explicitamente se admite a possibilidade de parte dos veículos integrarem pelotões. Considerando que os intervalos entre veículos nos pelotões (Δ) são constantes e mínimos e que os intervalos entre os restantes veículos (livres) seguem a distribuição exponencial, resulta a seguinte função distribuição acumulada:

$$F(t) = \begin{cases} 0, & \text{se } t < \Delta \\ 1 - \phi e^{-\lambda(t-\Delta)}, & \text{se } t \geq \Delta \end{cases} \quad (5)$$

onde

- t = intervalo entre veículos prioritários consecutivos
- λ = parâmetro de escala da distribuição
- Δ = intervalo entre veículos nos pelotões
- ϕ = proporção de veículos livres

Esta distribuição genérica é conhecida por Cowan M3 (três parâmetros). A distribuição exponencial (Cowan M1) constitui um caso particular desta quando se admite que todos os veículos circulam em condições livres ($\phi = 1$) e não são impostas restrições ao nível do intervalo mínimo entre veículos ($\Delta = 0$).

A vantagem de utilizar a distribuição Cowan M3 em vez da exponencial pode ser facilmente constatada. Na Fig.1 apresenta-se a FDA dos intervalos observados na corrente prioritária de uma rotunda (Rot. da Ponte Rainha Santa, Coimbra), bem como as funções teóricas das duas distribuições. Enquanto a distribuição exponencial apenas prevê corretamente a probabilidade de ocorrerem os maiores intervalos, a Cowan M3 ajusta-se bem na quase totalidade da gama de intervalos. É de notar que não adere à realidade para os intervalos muito pequenos (inferiores a Δ), no entanto esse aspeto é irrelevante em termos de capacidade, já que se assume que todos os intervalos inferiores ao intervalo crítico são rejeitados, independentemente do seu valor.

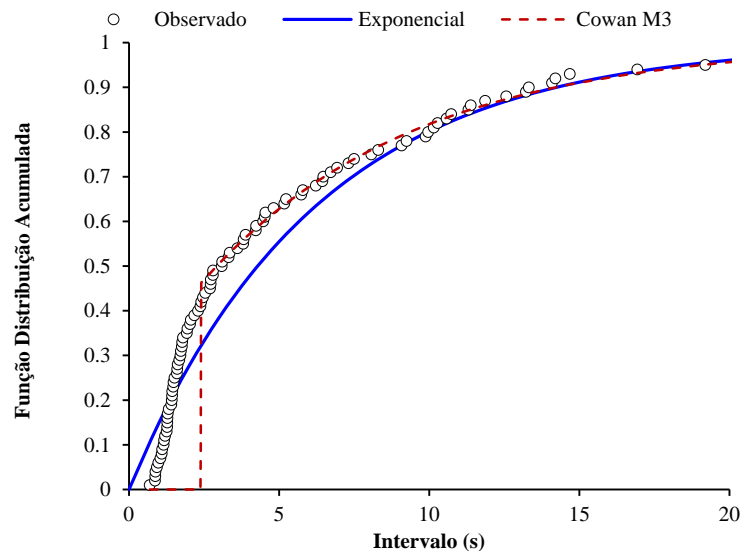


Fig.1. Comparação das funções distribuição acumuladas dos intervalos na corrente prioritária (Parâmetros ótimos: Exponencial – $\lambda = q_c = 0.162$ veíc.; Cowan M3 - $\Delta = 2.41$ s, $\phi = 0.54$, $\lambda = 0.14$)

A combinação da distribuição Cowan M3 com a função de utilidade dos intervalos resulta no seguinte modelo genérico:

$$C = \frac{q_c \phi e^{-\lambda(t_c - \Delta)}}{1 - e^{-\lambda t_f}} \quad (6)$$

Onde C e q_c representam, respetivamente, a capacidade e o fluxo conflituante e os restantes parâmetros (ϕ , Δ , λ , t_c e t_f) têm o significado indicado para as expressões (4) e (5).

A calibração desta expressão é naturalmente mais complexa comparativamente à exponencial. Normalmente fixa-se o valor do parâmetro Δ (1.8 – 2.0 s) tendo em consideração que $1/\Delta$ é o máximo tráfego conflituante em que se admite a entrada de veículos para a interseção. Para determinar os parâmetros ϕ e λ é necessário envolver duas expressões. A primeira resulta do método dos momentos, estabelecendo a igualdade entre a média dos intervalos observados e esperados:

$$\lambda = \frac{\phi q_c}{1 - \Delta q_c} \quad (7)$$

A segunda expressão relaciona a proporção de veículos livres com o volume de tráfego. Na literatura especializada é possível obter diversas expressões deste tipo, calibradas para aplicações específicas. Tendo em vista a aplicação às condições nacionais, os autores calibraram uma relação bilinear com base em observações em rotundas portuguesas [7]:

$$\phi = \begin{cases} 1 & \text{se } q_c < 0.178 \\ 1.553(1 - 2q_c) & \text{se } 0.178 < q_c \leq 0.5 \\ 0 & q_c > 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

• Generalização dos modelos de *gap-acceptance* para múltiplas vias

Os modelos anteriormente descritos pressupõem todo o tráfego conflituante concentrado numa única via de circulação. Para levar em conta o efeito da distribuição de tráfego conflituante pelas vias disponíveis, Troutbeck [8] obteve a expressão da capacidade de uma corrente de tráfego face a duas correntes prioritárias, em que cada uma segue uma distribuição Cowan M3 com o mesmo intervalo inter-veicular Δ . Posteriormente, Hagring obteve uma expressão de capacidade genérica para a distribuição Cowan M3 [9] a qual suporta parâmetros Δ variáveis por via conflituante, assim como parâmetros de *gap-acceptance* independentes (t_c e t_f). Por motivos de clareza, considerou-se neste artigo a formulação original para duas vias conflitantes:

$$C = \frac{\exp[-(\lambda_1 + \lambda_2)(t_c - \Delta)](\lambda_1 + \lambda_2)\phi_1\phi_2}{\langle 1 - \exp[-t_f(\lambda_1 + \lambda_2)] \rangle (\phi_1 + \lambda_1\Delta)(\phi_2 + \lambda_2\Delta)} \quad (9)$$

Os índices 1 e 2 indicam a via conflituante (1 – via exterior, mais próxima da entrada, 2 – via interior, mais afastada) e os parâmetros λ e ϕ devem ser calculados recorrendo às fórmulas (7) e (8). A expressão deve ser aplicada a cada via de entrada independentemente, admitindo-se assim a possibilidade de utilizar parâmetros t_c e t_f diferentes em cada via de entrada (esquerda/direita).

De acordo com este modelo, a capacidade de uma via de entrada é tanto maior quanto mais equilibrada for a distribuição de tráfego entre as vias de circulação conflitantes. Com efeito, uma distribuição equilibrada aumenta a probabilidade de dois veículos conflituantes circularem lado a lado ou com ligeira sobreposição, diminuindo assim o desperdício de oportunidades oferecidas aos veículos em espera.

Para ilustrar este método, considere-se um ramo com duas vias de entrada para uma rotunda igualmente com duas vias de circulação. Admita-se que se determinaram os intervalos críticos e complementares independentemente para as duas vias de entrada (esquerda, direita) tendo-se obtido para a via da esquerda $t_c = 3.5$ s e $t_f = 2.1$ s. Admita-se ainda que se observou no período de ponta um tráfego conflituante de 1000 veíc./h (0.278 veíc./s), com uma repartição notavelmente desequilibrada: 75% na via mais próxima da entrada e 25% na via mais próxima da ilha central. Assim, $q_{c1} = 0.208$ veíc./s e $q_{c2} = 0.069$ veíc./s. Substituindo na expressão (8) obtêm-se as proporções de veículos livres em cada uma das vias do anel: $\phi_1 = 0.906$ e $\phi_2 = 1$. Através da expressão (7) obtêm-se os respetivos parâmetros de escala: $\lambda_1 = 0.323$ e $\lambda_2 = 0.081$. Finalmente, substituindo na expressão (9) obtêm-se a capacidade da via da esquerda: 0.201 veíc./s (723 veíc./h). O processo deveria ser repetido para a via da direita, eventualmente com novos parâmetros t_c e t_f . A capacidade da entrada é dada pela soma das capacidades individuais.

2.3.3 Estimação do intervalo crítico e do intervalo mínimo

Há duas abordagens tradicionais para estimar o intervalo crítico e o intervalo mínimo de uma entrada: com base em observações diretas do comportamento dos condutores e com base em medições de capacidade. A primeira abordagem assenta em dados recolhidos no local, nomeadamente num número considerável de decisões de aceitação/rejeição de intervalos e eventuais variáveis explicativas (para além dos intervalos inter-veiculares) como o tempo de espera, velocidade média na corrente prioritária, idade do condutor e tipo de manobra [10] a partir das quais é possível medir o intervalo mínimo e aplicar técnicas como a de regressão logística e a de máxima verosimilhança para estimar o intervalo crítico. A medição no local dos intervalos é assim uma tarefa cara e morosa, sendo normalmente promovida por entidades nacionais ou regionais para a identificação de

parâmetros de referência, os quais são posteriormente utilizados em aplicações práticas sem mais ajustamentos [11,12]. Em Vasconcelos *et al.* [13] são apresentadas as principais técnicas aplicadas à estimação dos parâmetros de um conjunto limitado de rotundas portuguesas. A segunda abordagem é empírica. Consiste, genericamente, em identificar os parâmetros que minimizam as diferenças entre as capacidades observadas e as previstas pelo modelo. Este método é muito popular, por ser de fácil aplicação e não requerer recolhas de dados adicionais, contudo é pouco robusto já que as estimativas passam a depender das premissas e das simplificações assumidas no modelo de cálculo; por outro lado, na maior parte das rotundas as condições saturadas apenas ocorrem para uma gama muito estreita de fluxos conflituantes, o que dá poucas garantias de estimativas adequadas para os casos que caem fora desse domínio. Finalmente, os autores propuseram recentemente uma terceira abordagem para o problema da estimação dos intervalos críticos. Esse método descreve o processo de *gap-acceptance* a nível microscópico, com base nas características dos veículos/condutores e da geometria da manobra [14].

3 APLICAÇÃO A ROTUNDAS PORTUGUESAS

Para ilustrar as potencialidades dos diferentes métodos selecionou-se um conjunto de rotundas, com diferentes características geométricas e funcionais, localizadas na região centro/norte do país. Em cada rotunda identificou-se a entrada mais congestionada e fizeram-se medições do fluxo de entrada e do fluxo conflituante durante a hora de ponta, segregadas em períodos de um minuto. Em todas as entradas registaram-se os parâmetros geométricos necessários à aplicação do método do TRL e em algumas fizeram-se também observações que permitiram estimar os intervalos críticos e mínimos de cada uma das vias de entrada através de diversos métodos (Siegloch, Máxima Verosimilhança, *Logit* e *Wu*). Mais detalhes sobre o processo de recolha de dados podem ser encontrados em publicações anteriores [13,15]. No Quadro 1 seguinte apresentam-se os principais elementos dessas rotundas bem como os parâmetros de *gap-acceptance* resultantes do método de Siegloch.

Quadro 1: Principais elementos geométricos

Rotunda	Vias Ent/Conf.	Métodos de <i>gap-acceptance</i>				Método do TRL					
		Esquerda		Direita		<i>D</i> (m)	<i>r</i> (m)	<i>e</i> (m)	<i>v</i> (m)	<i>l</i> (m)	ϕ (°)
		t_{c1}	t_{f1}	t_{c2}	t_{f2}						
Rainha Santa E - Coimbra	1/1	3,4	2,2	--	--	95	30	4,5	3,7	12	30
Choupal N - Coimbra	1/1	3,8	2,2	--	--	58	40	4,5	3,5	20	30
Almeigue O - Coimbra ¹	2/2	3,2	2,2	2,7	2,4	77	40	7,5	7,0	30	30
Nelas O - Viseu	2/2	3,1	1,9	3,1	2,0	53	40	7,5	6,5	30	30
AEP N - Porto ²	2/2	3,0	1,9	3,0	1,9	76	30	9,0	8,5	10	34
Piscinas - Braga ³	2/2	3,3	2,1	3,3	2,1	51	125	9,5	8,0	10	45

¹ Apesar de a rotunda ter três vias de circulação, os condutores utilizam apenas as duas vias interiores;

^{2,3} Parâmetros t_c e t_f arbitrados (estimação empírica).

Na Fig.2 apresentam-se as capacidades observadas para o conjunto das entradas. Tal como seria expectável, os pontos formam duas grandes manchas, em função do número de vias de entrada e de circulação. É evidente o aumento significativo do nível de capacidade das rotundas com duas vias de circulação relativamente às rotundas de uma só via. Constata-se também uma variabilidade muito significativa das capacidades, mesmo ao nível da mesma entrada, o que reflete a variabilidade de comportamentos dos condutores como resposta às diferentes condições de circulação.

É ainda de constatar uma tendencial maior influência do tráfego conflituante nas rotundas com duas vias de circulação relativamente às rotundas com uma só via.

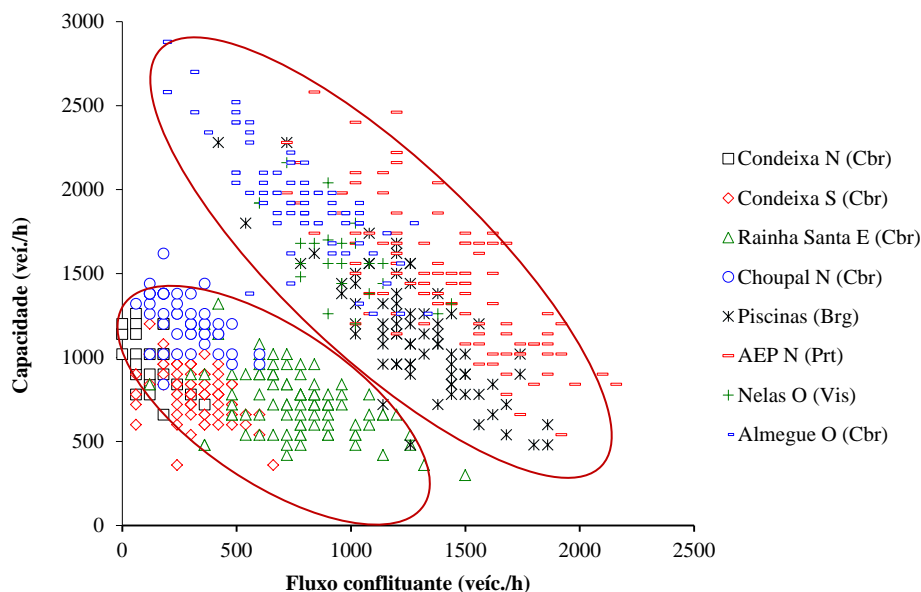


Fig.2. Capacidades observadas no conjunto das entradas

O passo seguinte consistiu em obter as curvas de capacidade pelos diferentes métodos. Os parâmetros geométricos requeridos para o método do TRL, Eq. (1), foram medidos a partir de cartografia e/ou de fotografia aérea (Quadro 1). No que respeita aos métodos baseados na teoria de *gap-acceptance*, as capacidades foram calculadas pela fórmula de Siegloch – Eq. (4) e pelo modelo genérico de Hagring baseado na distribuição Cowan M3, Eq. (6) e Eq. (9), nas rotundas com uma ou duas vias de circulação, respetivamente. Nas rotundas com duas vias de entrada, as capacidades foram calculadas independentemente para cada via de entrada e somadas para se obter a capacidade global da entrada. Os parâmetros t_c e t_f foram estimados a partir de observações do comportamento dos condutores (rotundas da Ponte Rainha Santa, Choupal e Almegue (em Coimbra) e rotunda de Nelas, em Viseu). Nas restantes foram adotados os parâmetros que melhor se ajustavam à fórmula de Hagring (distribuição Cowan M3).

Na Fig.3 comparam-se as capacidades observadas com as estimativas geradas pelos diferentes métodos para o conjunto das rotundas analisadas. Destaca-se, desde logo e independentemente da entrada analisada, uma dispersão acentuada dos valores observados, o que indicia uma grande variabilidade de comportamentos dos condutores. Essa variabilidade reflete diferentes formas de reação às diferentes condições de circulação, aspetos impossíveis de serem integrados em modelos de estimação tradicionais e que apenas são passíveis de poderem ser integrados em modelos sofisticados de microssimulação.

A maioria das entradas estudadas apresenta condições de saturação associadas a uma gama restrita de valores de tráfego conflituante o que dificulta a avaliação da qualidade do ajuste de cada modelo. Apesar disso, verifica-se que os modelos de base probabilística, quando associados a parâmetros devidamente ajustados à entrada em estudo, tendem a refletir de forma mais adequada, a dispersão dos valores observados.

De facto, verifica-se que o modelo do TRL tem normalmente o seu melhor desempenho para tráfegos conflituantes baixos a moderados, tendendo a subestimar a capacidade geométrica e a sobrestimar a capacidade quando os fluxos conflituantes são intensos. Este efeito é assim particularmente agravado no caso das rotundas com múltiplas vias, onde os valores de tráfego conflituante tendem a assumir valores mais elevados. Este resultado é coerente com as conclusões de um estudo anterior, no qual se concluiu que os condutores portugueses se revelam mais sensíveis à presença do tráfego conflituante elevado, defendendo-se a necessidade de calibrar o modelo do TRL essencialmente para ter em conta o efeito acrescido do tráfego conflituante [15]. Também o modelo de Siegloch se revela desajustado em relação aos valores observados, evidenciando uma tendência para sobrestimar as capacidades, particularmente para os fluxos conflituantes mais intensos.

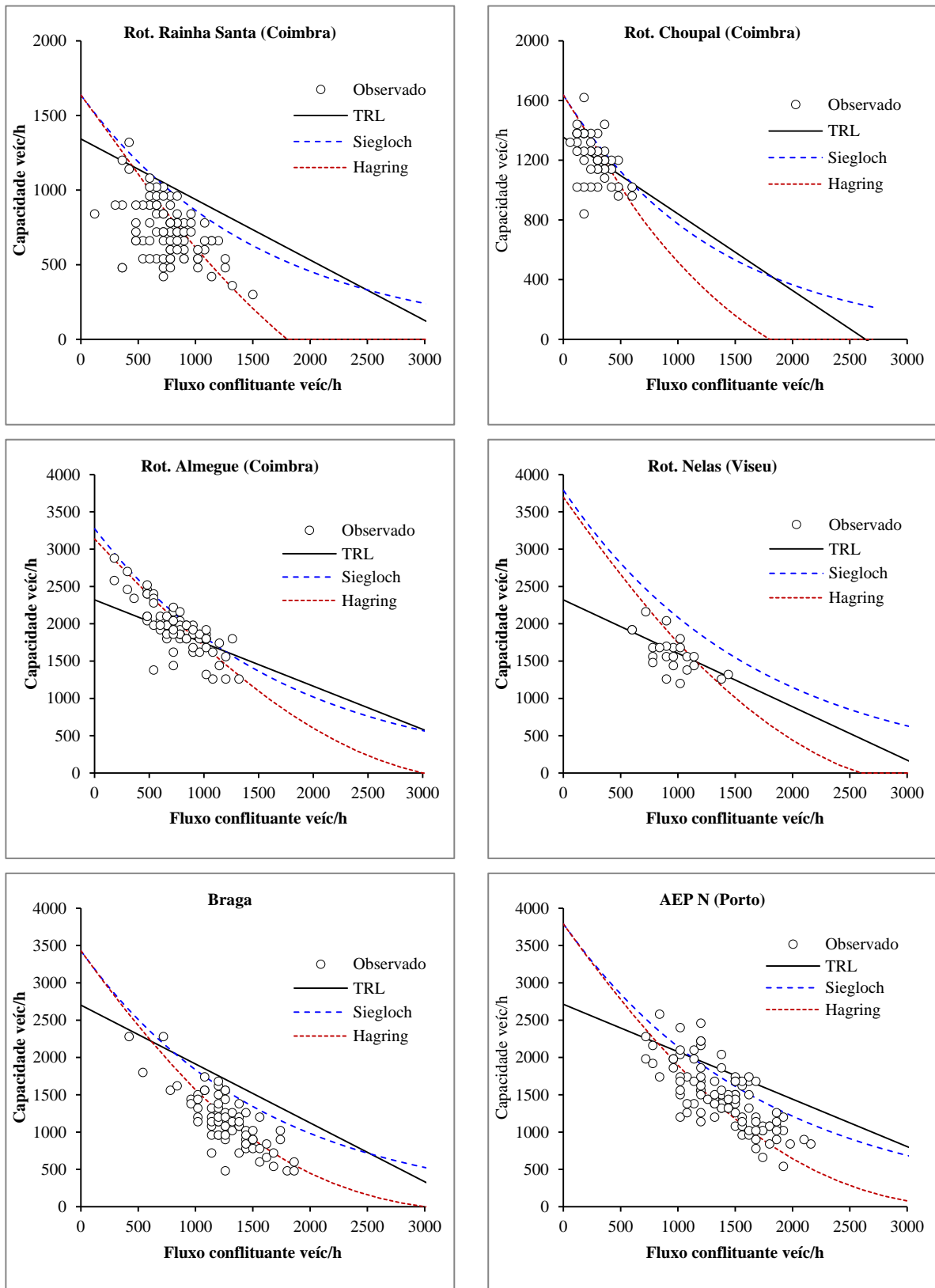


Fig.3. Capacidades observadas e estimadas

Finalmente, o modelo de Hagrind, associado ao modelo de agrupamento desenvolvido e calibrado pelos autores para as condições nacionais, produz estimativas relativamente precisas dentro de toda a gama de variação de fluxos conflituantes. A qualidade do ajuste é evidente quer nas entradas com uma só via de entrada como nas que disponibilizam duas vias. É no entanto de sublinhar que esse ajustamento é particularmente visível nas rotundas com duas vias de circulação, dada a maior variabilidade dos volumes de tráfego conflituante, e o tendencial desajuste dos valores observados aos estimados pelo modelo Siegloch e TRL. Estes resultados respondem ao expectável já que o Modelo de Hagrind e o recurso de parâmetros diferenciados consoante a via de circulação, permitem caracterizar de forma mais fidedigna o comportamento do condutor na entrada de uma rotunda.

4 CONCLUSÕES

As rotundas compactas ou com múltiplas vias assumem um papel cada vez mais relevante na regulação do trânsito, quer em meio urbano quer interurbano. A avaliação do seu nível de desempenho exige a disponibilização de modelos matemáticos capazes de traduzir de forma fidedigna as interações entre os veículos junto à linha de cedência de prioridade. Foi visto que os modelos de simulação permitem integrar a variabilidade da procura de tráfego no tempo e o efeito estocástico das correntes de tráfego, contudo exigem a disponibilização de *hardware* e *software* sofisticado e devidamente calibrado às condições reais. Por sua vez, os modelos matemáticos tradicionais sejam de base empírica ou probabilística são de fácil aplicação exigindo o simples levantamento adequado de parâmetros locais. São por isso de uso recorrente, inclusivamente como instrumento de validação dos modelos de simulação de tráfego.

Nessa linha de ação o presente artigo centrou-se na apresentação de um estudo comparativo de modelos tradicionais baseado na aplicação de três modelos de cálculo – TRL, Siegloch e Hagrind, procurando-se evidenciar as potencialidades e limitações associadas a cada um. O trabalho foi suportado pela criação de uma base de dados real, que integra períodos alargados de saturação estável num conjunto limitado de entradas de rotundas com uma ou duas vias de circulação. Complementarmente foi incluída informação relativa às características geométricas prevaletentes da entrada e da rotunda, assim como à caracterização das correntes de tráfego envolvidas.

Os resultados obtidos evidenciaram que os modelos tradicionais – TRL e Siegloch – se revelaram incapazes de estimar os valores de capacidades adequados para toda a gama de variação do tráfego conflituante. O desajuste tende a agravar-se com o aumento do volume do tráfego conflituante, e por inerência, nas rotundas com múltiplas vias de circulação. Por sua vez, o modelo de Hagrind, associado a um método de parametrização das distribuições de intervalos nas correntes prioritárias desenvolvido pelos autores, e calibrado para as rotundas portuguesas, permitiu obter maiores níveis de ajuste independentemente do número de vias de entrada e de circulação. Este modelo permitiu diferenciar as condições de circulação nas diferentes vias de entrada e de circulação no anel, apresentando-se como mais robusto e capaz de estimar, com maior nível de fiabilidade, os valores de capacidade associados a soluções sujeitas a repartições desequilibradas do tráfego direcional, tanto ao nível das vias de entrada como das vias de circulação.

Importa, no entanto, ter presente que o bom desempenho deste método depende de uma caracterização adequada dos intervalos crítico e mínimo, o que justifica a procura de metodologias de estimação destes parâmetros mais eficientes, nomeadamente através da abordagem microscópica recentemente proposta pelos autores.

5 AGRADECIMENTOS

Este estudo foi desenvolvido no âmbito do projeto AROUND – “Novos Instrumentos de Avaliação Operacional e Ambiental de Rotundas”, projeto de investigação financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia do Ministério da Educação e Ciência e pelo Orçamento do programa COMPETE - Programa Operacional Fatores de Competitividade na sua componente FEDER.

6 REFERÊNCIAS

1. FHWA, “Roundabouts: An Informational Guide”, Federal Highway Administration, Report 672, Virginia, USA, 2000.
2. R. M. Kimber, “The traffic capacity of roundabouts”, TRRL Report LR942, Crowthorne, UK, 1980.

3. T. Luttinen, *Capacity and Level of Service at Finnish Unsignalized Intersections*, Finnish Road Administration, Helsinki, Finland, 2004.
4. W. Siegloch, “Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalsteuerung [Capacity calculations at unsignalized intersections]”, in *Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 154*, Bundesminister für Verkehr, 1973.
5. TRB, *Highway Capacity Manual 2010*, Transportation Research Board - National Research Council, Washington D. C., USA, 2010.
6. R. J. Cowan, “Useful headway models”, *Transportation Research*, vol. 9, no. 6, pp. 331–375, 1975.
7. A. L. P. Vasconcelos, A. J. M. Seco and A. Bastos Silva, “Estimating the parameters of Cowan’s M3 headway distribution for roundabout capacity analyses”, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, vol. VII, no. 4, 2012.
8. R. J. Troutbeck, “Average delay at an unsignalized intersection with two major streams each having a dichotomized headway distribution”, *Transportation Science*, vol. 20, no. 4, pp. 272–286, 1986.
9. O. Hagring, “A further generalization of Tanner’s formula”, *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 32, no. 6, pp. 423–429, 1998.
10. I. A. Kaysi and A. s. Abbany, “Modeling aggressive driver behavior at unsignalized intersections”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 39, no. 4, pp. 671–678, 2007.
11. L. Rodegerdts, J. Bansen, C. Tiesler, J. Knudsen and E. Myers, *Roundabouts: An Informational Guide, Second Edition - NCHRP Report 672*, Transportation Research Board - National Research Council, Washington, D. C., USA, 2010.
12. A. Weinert, “Estimation of Critical Gaps and Follow-Up Times at Rural Unsignalized Intersections in Germany”, in *Fourth International Symposium on Highway Capacity*, 2000.
13. A. L. P. Vasconcelos, A. J. M. Seco and A. M. C. Bastos Silva, “Estimation of critical and follow-up headways at roundabouts”, in *91th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, 2012.
14. A. L. P. Vasconcelos, A. Bastos Silva, A. J. M. Seco and G. Rouxinol, “Estimation of critical headways at unsignalized intersections - a microscopic approach”, *Advances in Transportation Studies*, vol. XXVIII, Special Issue, 2012.
15. A. M. C. Bastos Silva, “Aplicação e Concepção de Intersecções Giratórias nas Redes Viárias Urbana e Rural Portuguesas”, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 1997.