

# Aplicação de métodos determinísticos para a obtenção de gap crítico em rotatórias urbanas brasileiras

Diego Fernandes Neris<sup>1</sup>, Antonio Clóvis Pinto Ferraz<sup>2</sup>, Ana Paula Camargo Larocca<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, diego.neris@usp.br

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, coca@sc.usp.br

<sup>3</sup>Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, larocca.ana@usp.br

## Recebido:

10 de outubro de 2018

## Aceito para publicação:

05 de maio de 2019

## Publicado:

31 de dezembro de 2019

## Editor de área:

Sara Ferreira

## Palavras-chaves:

Rotatória,  
Gap crítico,  
Capacidade.

## Keywords:

Roundabout,  
Critical gap,  
Capacity.

## RESUMO

O presente estudo tem o objetivo de avaliar o gap crítico e o follow-up headway para rotatórias brasileiras e comparar com estudos estrangeiros. Para tanto, foram selecionadas três rotatórias brasileiras de duas faixas de circulação e de entrada. Para a obtenção de gaps críticos foram utilizados cinco métodos determinísticos: Sieglöch (1973), Raff (1950), Miller & Pretty (1968), Wu (2012) e Bunker (2012), sendo que pelo primeiro método foi possível obter também o follow-up headway. Os valores de gaps críticos foram consideravelmente diferentes em função da faixa utilizada: na faixa da direita, os motoristas aceitam gaps menores para entrar na interseção. Esta diferença não foi significativa quando se trata de valores de follow-up headway. Em seguida, os métodos de estimação de gap crítico foram validados comparando a capacidade das interseções pelo método de Hagring (1998) com dados de fluxos agregados por minuto. Finalmente, os valores brasileiros foram comparados com dados estrangeiros e foram verificadas semelhanças com países como Suíça, Itália e Portugal.

## ABSTRACT

This paper focuses on evaluating the critical gap and the follow-up headway for Brazilian roundabouts and on comparing it to the results of foreign studies. Three two-lane roundabouts were selected to obtain the critical gap through five methods: Sieglöch (1973), Raff (1950), Miller & Pretty (1968), Wu (2012) and Bunker (2012). Through the first method, it was also possible to obtain the follow-up headway. The critical gap values were considerably different in each lane: on the right lane, the drivers accepted smaller gaps to cross to the intersection. This difference was not significant when it came to the follow-up headway. After that, the critical gap estimation methods were validated by comparing the intersection's capacity using the Hagring (1998) method with the combined data per minute of traffic flow. Finally, the resulting Brazilian values were compared to foreign data. There were similarities to the results found in countries like Switzerland, Italy and Portugal.

DOI:10.14295/transportes.v27i4.1866



## 1. INTRODUÇÃO

O sistema viário urbano deve ser adequado para conduzir o tráfego de veículos e pedestres com segurança e fluidez. Essas características são muito importantes, principalmente nos cruzamentos, uma vez que esses constituem pontos críticos do sistema viário no tocante à capacidade do tráfego e acidentes. Quando o fluxo de veículos em uma interseção é pequeno, a operação com a via mais movimentada tendo preferência de passagem é a solução normalmente empregada. No entanto, quando o volume de veículos é maior, outras soluções devem ser equacionadas, tais como semáforo, rotatória ou viaduto (transposição em desnível).

A interseção do tipo rotatória oferece a equidade de hierarquia entre as aproximações, maior fluidez ao trânsito, reduz a necessidades de paradas, e facilita a conversão à esquerda, pois não há conflito com veículos de sentido oposto. Como resultado, os atrasos e filas são reduzidos (Federal Highway Administration, 2010).

A capacidade da rotatória e de qualquer outro tipo de interseção sem semáforos depende do processo de aceitação de *gap*, função cognitiva de julgamento sobre a possibilidade de entrada na via principal, neste caso a via circular, por parte dos motoristas das aproximações (que não possuem a referência). Rotatórias oferecem a simplicidade de uma interseção de três aproximações, no formato “T”, para interseções com mais aproximações, além do fluxo na via principal ser em sentido único, facilitando assim os processos de tomada de decisão.

Dois parâmetros são essenciais para entender o processo de aceitação de *gap* e, consequentemente, entender a capacidade da rotatória. O primeiro é o *gap* crítico, ou seja, mínimo *gap* que um veículo, da aproximação não preferencial, aceita para entrar na via principal. Esse parâmetro varia em função da atitude do motorista, da dimensão da rotatória e pode variar em função do fluxo de veículos (Polus, 2005). O segundo parâmetro representa como esses *gaps* são aproveitados, ou seja, a quantidade de veículos que entra em um mesmo *gap*, calculado em função do *headway* médio entre esses veículos. Este parâmetro é chamado de *follow-up headway* (TRB, 2010).

## 2. CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA

O *gap* crítico não pode ser medido diretamente através de observação em campo, portanto existem técnicas determinísticas que podem estimá-lo a partir da distribuição de *gaps* na via preferencial e com a classificação de quais foram aceitos ou rejeitados. Entre as técnicas, destacam-se as três mais utilizadas: Siegloch (1973), Raff (1950) e Miller & Pretty (1968). Existem ainda outras duas técnicas mais recentes que são as de Wu (2012) e de Bunker (2012) que foram utilizadas no trabalho de Vasconcelos (2014) para aplicação em Portugal.

Já o *follow-up headway* pode ser determinado por observação do *headway* médio da fila de veículos que entra na rotatória em um mesmo *gap* ou pode ser determinado pelo método de Siegloch (1973), o mesmo método que determina o *gap* crítico.

Hagring (2000) salienta que, independentemente do método utilizado para a determinação de *gap* crítico, existem duas situações que podem ser consideradas em casos de rotatórias de múltiplas faixas: a primeira ao realizar o levantamento de *gaps* por faixa da via circular e a segunda ao considerar como se fosse um fluxo apenas, portanto definindo *gaps* entre veículos, independente das faixas que estejam. Vasconcelos (2014) verificou que os resultados para o segundo caso são mais compatíveis com a realidade, pois mesmo que o veículo da aproximação decida entrar na faixa externa da rotatória, o fluxo na faixa interna também interfere no processo de aceitação de *gap*.

Segundo o *Highway Capacity Manual* 2010 (TRB, 2010), para estudos realizados nos EUA, o valor do *gap* crítico em rotatórias varia entre 4,1 e 4,6 segundos enquanto o valor de *follow-up headway* varia entre 2,6 e 3,1 segundos. Diversos autores realizaram o estudo de *gap* crítico e *follow-up headway* para rotatórias de duas faixas de circulação. A seguir são apresentadas as experiências para a Suécia, Suíça, EUA, Itália, Portugal e Índia.

Hagring *et al.* (2003) realizaram a análise de *gap* crítico para a Suécia em uma rotatória de duas faixas. Os autores identificaram uma leve queda no valor de *gap* crítico conforme o fluxo na via circular aumenta. O valor médio do *gap* crítico encontrado no estudo de Hagring *et al.*

(2003) foi de 4,08 segundos para a faixa da direita e 4,36 segundos para a faixa da esquerda, enquanto o *follow-up headway* médio foi de 2,64 segundos.

Lindenmann (2006), em seu estudo aplicado na Suíça, afirma que os veículos da faixa da esquerda, por ter condições de visibilidade melhor, tendem a partir antes para entrar na rotatória. Em contrapartida, os veículos da faixa da direita trafegam com um *follow-up headway* menor. Lindenmann (2006) encontrou o valor de 3,49 segundos de *gap* crítico para a faixa da esquerda e 3,45 segundos para a faixa da direita e, ao analisar as duas faixas em conjunto, encontrou uma média de 3,65 segundos. O *follow-up headway* encontrado nos estudos da Suíça foi 2,73 segundos para a faixa da esquerda e 2,55 segundos para a faixa da direita.

Rodegerdts *et al.* (2007) realizaram a análise de *gap* crítico em rotatórias de múltiplas faixas dos EUA e determinaram um *gap* médio de 4,85 segundos para a faixa da esquerda e 4,15 para a faixa da direita. O *follow-up headway* foi 3,90 segundos para a faixa da esquerda e de 3,55 para a faixa da direita, valores consideravelmente superiores aos propostos pelo HCM 2010 (TRB, 2010).

Gazzarri *et al.* (2012) realizaram as análises de *gaps* críticos em rotatória de múltiplas faixas da Itália. Para a faixa da esquerda foi encontrado o valor de 3,76 segundos, enquanto para a faixa da direita, 3,60 segundos. O *follow-up headway*, determinado através de observação em campo, resultou em 2,65 segundos para a faixa da esquerda e 2,64 segundos para a faixa da direita, portanto praticamente não houve alteração.

Vasconcelos (2014) realizou o estudo de *gap* crítico e *follow-up headway* para rotatórias localizadas em Portugal. O *gap* crítico encontrado foi de 3,40 segundos para a faixa da esquerda e de 3,20 para a faixa da direita. O *follow-up headway* resultou em um valor médio de 2,2 segundos para as duas faixas de entrada.

Na Índia, Rao *et al.* (2016) realizaram estudos em seis rotatórias e obtiveram resultados discrepantes em comparação aos outros países. O *gap* crítico obtido foi de 1,87 segundos, sem distinção de faixas, pois não havia sinalização horizontal limitando-as, tanto nas aproximações quanto na via circular das rotatórias. Para o *follow-up headway*, o valor observado foi de 1,15 segundos, também muito inferior aos encontrados em outros países. Mahesh, Ahmad e Rastogi (2014), que realizaram estudos semelhantes na Índia, encontraram um *gap* crítico de 2,2 segundos e *follow-up headway* de 1,2 segundos. Os autores citam que os valores são discrepantes devido ao alto fluxo de veículos sob duas rodas (que se aproxima a 40% do fluxo total) e pelo comportamento mais agressivo dos motoristas, justificando que em países em desenvolvimento os valores tendem a ser menores.

A determinação do *gap* crítico e *follow-up headway* são fundamentais para a calibração de modelos de capacidade de interseção. O modelo proposto por Haging (1998) possibilita a aplicação segregada por faixa de entrada na rotatória, conforme indicado na equação a seguir.

$$Q_k = \frac{e^{[-\sum \lambda_i(t_{c,k} - \Delta_i)] \times \sum \lambda_i} \prod \frac{\phi_i}{\phi_i + \lambda_i \Delta_i}}{1 - e^{(-\sum \lambda_i t_{f,k})}} \quad (1)$$

em que  $k$ : Índice da faixa de entrada (direita ou esquerda)  
 $\lambda_i, \phi_i$  e  $\Delta_i$ : Parâmetros de Cowan para a faixa "i" da via prioritária (circular)  
 $t_{c,k}$ : *Gap* crítico da faixa de entrada "k" (s)  
 $t_{f,k}$ : *Follow-up headway* da faixa de entrada "k" (s)

### 3. METODOLOGIA

Foram selecionadas três rotatórias modernas (com preferência para a via circular), duas em Araraquara/SP e uma em Campinas/SP, com duas faixas de circulação cada. Foram realizadas gravações de uma hora, em cada rotatória, na aproximação com maior fluxo de veículos (para a obtenção de maior número de dados possível).

A primeira rotatória, localizada em Araraquara/SP (Avenida Abdo Dajn, Rua João Batista de Oliveira, Rua Genesia Schiavinato e Rua Piauí), é uma interseção com quatro aproximações cujo diâmetro externo é de, aproximadamente, 40 metros. A aproximação analisada possuiu o dobro de fluxo de veículos ao comparar com o fluxo conflitante (na via circular). A segunda rotatória, também em Araraquara (Avenida Presidente Vargas e Rua Castro Alves), possui um diâmetro externo aproximado de 54 metros e, diferentemente da primeira, o fluxo predominante foi na via circular. A última rotatória analisada encontra-se no município de Campinas (Avenida Doutor Ângelo Simões, Avenida Marechal Carmona e Rua Engenheiro Roberto Mange) e possui um diâmetro externo de aproximadamente 50 metros com o fluxo semelhante entre a aproximação analisada e a via circular.

A partir de um ponto de referência de passagem de veículos em cada vídeo, foram contabilizados e medidos todos os *gaps* na via circular com o auxílio da ferramenta *Macro* da *Microsoft Excel* para obter maior precisão na cronometragem e para identificar a quantidade de veículos que entra em cada *gap*. Em seguida, foram aplicadas as metodologias de estimação de *gaps* críticos apresentadas a seguir para a caracterização de cada interseção.

#### 3.1. Siegloch (1973)

O método de Siegloch é o único dos métodos que determina além do *gap* crítico, o *follow-up headway*. A limitação desse método é que deve ser aplicado apenas em situações em que há filas na aproximação em análise, ou seja, situações de saturação, para que não haja distorções na determinação do *follow-up headway*. O método é aplicado da seguinte forma:

- Determina-se o *gap* médio necessário para cada quantidade de veículos entrando em fila na rotatória.
- Elabora-se o gráfico que relaciona a quantidade de veículos que entram em fila e o *gap* médio para que ocorra esta entrada.
- Identifica-se a equação linear de tendência do gráfico elaborado. Nesta equação, o termo independente é chamado de " $t_0$ " e o termo dependente representa o *follow-up headway* em segundos, identificado como " $t_f$ ".
- Aplica-se a equação a seguir para a determinação do *gap* crítico (em segundos) pelo método de Siegloch (1973), cujas variáveis foram identificadas na etapa anterior.

$$t_c = t_0 + \frac{t_f}{2} \quad (4)$$

#### 3.2. Raff (1950)

O método de Raff retorna o valor mediano do *gap* crítico, porém é razoável para a utilização em modelos de capacidade e pode ser determinado conforme o procedimento a seguir:

- Identificam-se os *gaps* aceitos e rejeitados, separando-os e ordenando-os do menor para o maior valor. Dentre os *gaps* rejeitados pelo mesmo veículo, deve-se considerar apenas o maior, partindo do princípio que os motoristas não aceitariam *gaps* menores que

aqueles rejeitados. Este fato pode não ocorrer já que o tamanho do *gap* esperado pelo motorista para entrar na via principal pode reduzir conforme aumenta o tempo de espera.

- Elaboram-se funções de distribuição acumuladas desses *gaps*, uma para os *gaps* aceitos -  $F_a(t)$  - e outra para os *gaps* rejeitados -  $F_r(t)$ .
- Plotam-se os gráficos das funções acumuladas dos *gaps* aceitos e rejeitados, sendo que para este último, plota-se a função complementar, ou seja,  $1-F_r(t)$ .
- valor mediano do *gap* crítico é aquele relacionado à interseção das duas funções.

### 3.3. Miller & Pretty (1968)

O método de Miller & Pretty, também chamado de método da máxima verossimilhança, realiza uma análise comparativa entre o maior *gap* rejeitado por um motorista e o *gap* aceito pelo mesmo motorista, portanto considera apenas os motoristas que rejeitaram ao menos um *gap*, reduzindo assim a quantidade da amostra. Além disso, devem ser eliminadas as situações em que o *gap* aceito é menor que o maior *gap* rejeitado. O método é aplicado da seguinte forma:

- Realiza-se a distribuição acumulada do tipo log-normal para cada *gap* aceito e maior *gap* rejeitado por cada motorista, conforme a equação a seguir:

$$F(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sqrt{2}\sigma}\right) \quad (5)$$

em que  $F(t)$ : Função log-normal podendo ser para o *gap* aceito -  $F_a(t)$  - ou para o *gap* rejeitado -  $F_r(t)$ ,

$x$ : *gap* a ser considerado (s)

$\operatorname{erf}(x)$ : Função erro de "x"

$\mu$  e  $\sigma$ : Média e desvio-padrão, parâmetros a serem otimizados conforme as etapas a seguir.

- Para cada motorista "d", realiza-se o cálculo da diferença entre a função de distribuição log-normal do *gap* aceito ( $a_d$ ) e a função de distribuição log-normal do *gap* rejeitado ( $r_d$ ) e, ao final, determina-se o produto dessas diferenças para todos os "n" motoristas:

$$L = \prod_{d=1}^n [F_a(a_d) - F_r(r_d)] \quad (6)$$

- A equação anterior é de verossimilhança que deve ser maximizada, com o auxílio da ferramenta "Solver" do Excel ou similar, com a finalidade de obter o valor médio ( $\mu$ ) e o desvio-padrão ( $\sigma$ ) relativos ao produtório máximo.
- *gap* crítico ( $t_c$ ) pelo método de Miller & Pretty é determinado pela equação a seguir.

$$t_c = e^{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2} \quad (7)$$

### 3.4. Wu (2012)

O processo para a determinação de *gap* crítico pelo método de Wu, também chamado de equilíbrio das probabilidades, é mais recente e trabalha com os mesmos dados do método de Raff (1950), porém não é necessário separar os *gaps* aceitos dos rejeitados, conforme o processo a seguir:

- Devem-se ordenar os valores de *gaps*, do menor valor para o maior; independente se foi aceito ou rejeitado, porém identificando-os em coluna auxiliar.
- Aplica-se a função de distribuição acumulada de forma individual (colunas separadas)



entre *gaps* aceitos e rejeitados. Quando um *gap* for classificado como aceito, por exemplo, atualiza-se a função acumulada de *gaps* aceitos e deve mantêm-se o último valor da função acumulada de *gaps* rejeitados. O contrário também ocorre, mantendo assim um valor de função de distribuição acumulada para *gap* aceito ou rejeitado para todos os *gaps* (independentemente de sua classificação).

- Para cada *gap*, calcula-se uma estimativa da função densidade acumulada do *gap* crítico -  $F_{tc}(t)$  - da seguinte forma:

$$F_{tc}(t) = \frac{F_a(t)}{F_a(t) + 1 - F_r(t)} \quad (9)$$

sendo que  $F_a(t)$ : Função de distribuição acumulada de *gaps* aceitos.  
 $F_r(t)$ : Função de distribuição acumulada de *gaps* rejeitados.  
 $t$ : *gap* considerado (s).

- Em seguida, determina-se a frequência dos *gaps* críticos estimados através da diferença entre o valor da função densidade acumulada do *gap* crítico estimado atual ( $t_j$ ) e do anterior ( $t_{j-1}$ ):

$$p_{tc}(t_j) = F_{tc}(t_j) - F_{tc}(t_{j-1}) \quad (10)$$

- Calcula-se a média do *gap* atual com o anterior e, finalmente, multiplica-se esse valor pela frequência dos *gaps* críticos estimados -  $p_{tc}(t_j)$  - descrito na etapa anterior, obtendo uma multiplicação para cada *gap*.
- Finalmente devem-se somar todos os produtos citados na etapa anterior, sendo essa soma o valor do *gap* crítico pelo método de Wu (equilíbrio das possibilidades).

O método de Wu realiza uma estimativa de uma função densidade acumulada do *gap* crítico baseado em cada *gap* determinado em campo. Este método atribui maior peso para os dados intermediários de *gaps*, minimizando possíveis erros causados por acontecimentos fora do padrão, além de ser resolvido apenas por cálculos simples, sem estimativas de parâmetros ou interpretações gráficas.

### 3.5. Bunker (2012)

No método de Bunker os dados a serem considerados são os mesmos do método de Miller & Pretty (1968): o maior *gap* rejeitado e o *gap* aceito por cada motorista, ou seja, considera apenas motoristas que rejeitaram, ao menos, um *gap*. A determinação do *gap* crítico é realizada conforme o procedimento a seguir:

- Elabora-se uma lista de possíveis *gaps* críticos. No caso deste trabalho, variou-se de zero até 8 segundos em intervalos de 0,01 segundos.
- Para cada valor dos possíveis *gaps* ( $t$ ), deve-se somar a quantidade de intervalos de *gaps* (entre o *gap* rejeitado -  $t_r$  - e o *gap* aceito -  $t_a$ ) levantados em campo de cada motorista que os abrangem esses possíveis *gaps*, ou seja, todos os casos em que  $t_r < t < t_a$ .
- Ao final, elabora-se o gráfico que relaciona o número de casos em que ocorreram a situação acima descrita ( $t_r < t < t_a$ ) e os valores de possíveis *gaps* ( $t$ ), sendo considerado o *gap* crítico aquele que esteve incluso no máximo intervalos entre *gaps* rejeitados e aceitos por cada motorista.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, foi observado em campo que há influência, na reação dos motoristas, da faixa em que o veículo se encontra para entrar na via principal: os veículos que se aproximam pela faixa da direita tendem a aguardar por um *gap* ultrapassando a faixa de retenção, já ocupando parte da rotatória. Sendo assim, é importante que a análise seja realizada por faixa de aproximação.

Na Tabela 1 são apresentados os resultados encontrados pelos métodos de determinação de *gap* crítico para cada uma das três rotatórias analisadas, separados por faixa de entrada e por método.

**Tabela 1 – Gaps críticos (em segundos)**

Método	Rotatória	Araraquara 1		Araraquara 2		Campinas	
	Faixa	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita
	Raff	3,58	3,12	3,38	2,78	3,42	2,95
	Miller & Pretty	3,96	3,26	3,72	3,12	3,73	3,33
	Wu	3,80	3,04	3,55	2,83	3,62	2,98
	Bunker	3,72	3,02	3,53	3,29	3,48	3,12

Para todos os casos analisados, o *gap* crítico resultou menor quando a faixa de entrada na rotatória é a da direita. A maior diferença verificada foi na rotatória “Araraquara 2” ao aplicar o método de Wu (2012), sendo 25% maior o *gap* crítico na faixa da esquerda em relação ao da direita.

Em geral, os menores valores foram obtidos ao aplicar o método de Siegloch, pois é o método que utiliza apenas dados em situação de saturação, confirmando a influência do tempo de espera do veículo na determinação do *gap* crítico.

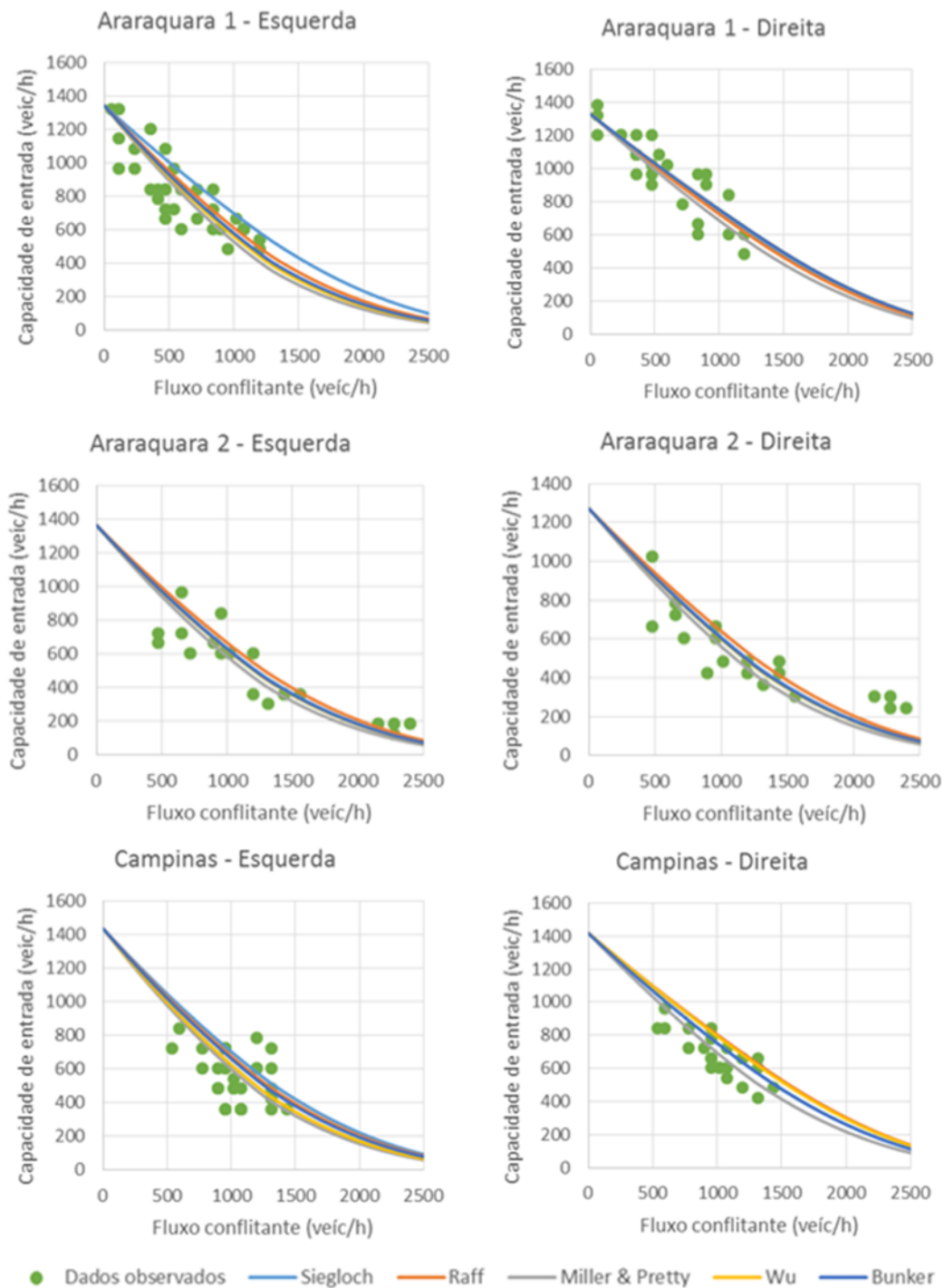
Pelo método de Siegloch ainda foi possível determinar o *follow-up headway*, que resultou entre 2,51 e 2,83 segundos, conforme a Tabela 2 a seguir.

**Tabela 2 – Follow-up headway (em segundos)**

Rotatória	Faixa de entrada	
	Esquerda	Direita
Araraquara 1	2,68	2,71
Araraquara 2	2,64	2,83
Campinas	2,51	2,54

Pode ser verificado que o *follow-up headway* não alterou significativamente em função da faixa utilizada para a entrada na rotatória.

O impacto da escolha do método para a determinação da capacidade de entrada pode ser significativo, portanto é importante validar os resultados obtidos com a finalidade de verificar se há algum método que deve ser evitado. A validação para as rotatórias analisadas foi realizada a partir da comparação das curvas de capacidade para cada método estudado com os dados obtidos em campo em momentos de saturação na entrada da rotatória. Como o fluxo de veículos não é constante, Vasconcelos (2014) sugere realizar análise agregada em dados obtidos a cada minuto, selecionando, aproximadamente, vinte intervalos de um minuto com maior saturação. Para as rotatórias analisadas e utilizando o modelo de capacidade de Hagring (1998), a validação dos dados foi conforme a Figura 1 a seguir.



**Figura 1.** Validação dos dados de *gap* crítico e de *follow-up headway*

Pode-se observar que a variação entre os dados coletados em períodos de saturação é maior que a variação de capacidade obtida pelos métodos de determinação de *gap* crítico, validando assim os cinco métodos abordados para as interseções em análise.

Na Tabela 3 são apresentados os valores resultantes desta pesquisa, ao realizar uma média ponderada em função do fluxo de veículos, e de outras já realizadas em diversos países para o caso de rotatória com duas faixas. Os resultados são apresentados por faixa, exceto para a Índia devido à falta de limitação de faixas (direita e esquerda).



**Tabela 3** – Valores de *gaps* críticos para rotatórias em diversos países

Autor	País	Gap crítico (s)		Método utilizado
		Esquerda	Direita	
Hagring <i>et al.</i> (2003)	Suécia	4,36	4,08	MV
Lindenmann (2006)	Suíça	3,49	3,45	MV e S
Rodegerdts <i>et al.</i> (2007)	EUA	4,50	4,20	MV
Gazzarri <i>et al.</i> (2012)	Itália	3,76	3,60	MV e R
Vasconcelos <i>et al.</i> (2014)	Portugal	3,40	3,20	MV, S, R, EP e B
Rao <i>et al.</i> (2016)	Índia		1,87	R e EP
Presente pesquisa	Brasil	3,60	3,09	MV, S, R, EP e B

sendo: MV: Método da máxima verossimilhança (Miller & Pretty)  
 S: Método de Siegloch  
 R: Método de Raff  
 EP: Método do equilíbrio das probabilidades (Wu)  
 B: Método de Bunker

Pode ser observado que o Brasil possui a maior diferença de *gap* crítico entre a faixa da direita e da esquerda. Para a faixa da direita, no Brasil foi obtido o menor valor de *gap* crítico ao comparar com os outros países que realizaram a análise segregada. Para a faixa da esquerda, ao comparar com os mesmos países, no Brasil foram obtidos valores superiores à Suíça e Portugal.

Para o *follow-up headway*, os valores são apresentados na Tabela 4, sendo determinados pelo método de Siegloch ou por média de *headways* (por observação). Os resultados são apresentados por faixa da aproximação, exceto para a Índia, onde não havia limitação de faixas, e para a Suécia, em que o autor apresentou apenas um valor médio para as duas faixas.

**Tabela 4** – Valores de *follow-up headway* para rotatórias em diversos países

Autor	País	Follow-up Headway (s)		Método utilizado
		Esquerda	Direita	
Hagring <i>et al.</i> (2003)	Suécia		2,64	Observação
Lindenmann (2006)	Suíça	2,73	2,55	Siegloch
Rodegerdts <i>et al.</i> (2007)	EUA	3,40	3,10	Observação
Gazzarri <i>et al.</i> (2012)	Itália	2,65	2,64	Observação
Vasconcelos <i>et al.</i> (2014)	Portugal	2,20	2,20	Siegloch
Rao <i>et al.</i> (2016)	Índia		1,15	Observação
Presente pesquisa	Brasil	2,62	2,67	Siegloch

O *follow-up headway* no Brasil obteve uma característica semelhante entre a faixa da esquerda e da direita, assim como em Portugal e Itália. O valor encontrado se aproxima bastante dos outros países, excluindo os EUA, que resultou em valores superiores a 30% que os valores brasileiros.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O valor do *gap* crítico é de difícil determinação e precisa ser validado em campo em situações específicas, como fluxo no limite de capacidade durante todo o período de análise, o que é praticamente impossível se não for realizada uma análise de dados agregados em períodos menores.

O método da máxima verossimilhança (Miller & Pretty, 1968) foi o método mais conservador entre os analisados, porém é um dos mais utilizados. As diferenças entre os valores obtidos não foram suficientes a ponto de desvalidar algum método nos casos analisados, já que as análises

de capacidade pelo modelo de Hagring (1998) não representaram distorções em relação aos dados coletados em campo em períodos de saturação.

A diferença nos valores de *gaps* críticos para as faixas da direita e esquerda foi de grande proporção, o que pode ser justificado pelo fato de que a maioria dos veículos que chegavam à faixa da direita da aproximação invadia a faixa de retenção para aguardar por um *gap* na própria via circular, devido à dificuldade de visibilidade, consistindo em uma manobra mais próxima à de mudança de faixa. Nos outros países estudados também foram verificados valores de *gaps* críticos menores para a faixa da direita, porém com menores proporções ao comparar com os dados brasileiros.

Os valores de *follow-up headway* foram semelhantes entre as faixas utilizadas. Na rotatória de Campinas foram obtidos valores menores, porém não implica em significativa diferença na capacidade de entrada. O *Follow-up headway* médio encontrando para representar valores brasileiros foi semelhante aos dados obtidos em países como Suécia, Suíça e Itália.

Os dados obtidos podem variar em outras situações tais como rotatórias de faixa simples, de dimensões menores ou locais com características comportamentais diferenciadas dos motoristas, seja por questão cultural ou pela variação do tráfego, porém são valores que podem ser tomados como base para estimativas de capacidade em projetos brasileiros.

## REFERÊNCIAS

- Bunker, J.M. (2012) Novel Methods and the Maximum Likelihood Estimation Technique for Estimating Traffic Critical Gap. *Journal of Advanced Transportation*, v. 48, nº 6, p. 542-555. DOI: 10.1002/atr.1204.
- Federal Highway Administration (2010) *Roundabouts: Na Informational Guide*. 2ª Edição. McLean: U. S. Department of Transportation.
- Gazzarri, A.; M. T. Martello; Antonio P. e Reginald R. S. (2012) Estimation of Gap Acceptance Parameters for HCM 2010 roundabouts Capacity Model Applications. *XVIII Urban Transport: Urban Transport and the Environment in the 21st Century*, V. 128, p. 309-319. DOI: 10.2495/UT120271.
- Hagring, O. (1998) A further generalization of Tanner's formula, *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 32, nº6, p. 423-429. DOI: 10.1016/S0191-2615(98)00010-1
- Hagring, O. (2000) Estimation of Critical Gaps in Two Major Streams. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 34, nº 4, p. 293-313. DOI: 10.1016/S0191-2615(99)00026-0
- Hagring, O.; N. M. Roupail, e H. A. Sorensen (2003) Comparison of Capacity Models for Two-Lane Roundabouts. *Journal of the Transportation Research Board*, v 1852, p. 114-123. DOI: 10.3141/1852-15
- Lindenmann, H. P. (2006) Capacity of Small Roundabouts with Two-Lane Entries. *Journal of the Transportation Research Board*, v. 1988, nº 1, p 119-126. DOI: 10.1177/0361198106198800115
- Mahesh, S.; A. Ahmad e R. Rastogi (2014) An Approach for the Estimation of Entry Flows on Roundabouts. *Transportation Planning and Implementation Methodologies for Developing Countries*, v. 17, p. 52-62. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.11.060
- Miller, A.J. e R. L. Pretty (1968) Overtaking on Two-Lane Rural Roads, *4th Australian Road Research Board Conference*, v. 4, nº1, p. 582-594.
- Polus, A.; Y. Shiftan e S. Shmueli-Lazar (2005) Evaluation of the Waiting-Time Effect on Critical Gaps at Roundabouts by a Logit Model. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, v. 5, nº 1, p. 1-12.
- Raff, M. e J. Hart (1950) A volume warrant to urban stop signs. *Eno Foundation for Highway Traffic Control*, Saugatuck.
- Rao, S.; Y. Krishna; P. Atmakuri e P. Bhuyan (2016) Calibration of Performance of Roundabouts Based on Gap Acceptance Parameters Using Simulation for Indian Scenario. *Transportation Planning and Implementation Methodologies for Developing Countries*, v. 12.
- Rodegerdts, L.; M. Blogg; E. Wemple; E. Myers; M. Kyte; M. Dixon; G. List; A. Flannery; R. Troutbeck; W. Brilon; N. Wu; B. Persaud; C. Lyon; D Harkey e D. Carter (2007b). *Roundabouts in the United States*. NCHRP report 572, Washington, DC: The National Academy of Sciences.
- Siegloch, W. (1973) *Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalsteuerung*, *Strassenbau und Strassenverkehrstechnik* v. 154. Federal Ministry of Transport.
- TRB (2010) *Highway Capacity Manual*. Transport Research Board. 6th. Edition. Washington: National Academy of Science.
- Vasconcelos, A. L. P. (2014) *Análise do Desempenho Operacional de Rotundas: Modelos e Aplicações*. Tese (Doutoramento em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Wu, N. (2012) Equilibrium of Probabilities for Estimating Distribution Function of Critical Gaps at Unsignalized Intersections. *Journal of the Transportation Research Board*, v. 2286, p. 49-55. DOI: 10.3141/228606.