

MODELOS PARA OBTENÇÃO DA CAPACIDADE E DO NÍVEL DE SERVIÇO EM ROTATÓRIAS URBANAS

Vinícius Coelho Sousa

José Elievam Bessa Júnior

Juliângelo Kayo Sangi de Oliveira

Universidade Federal de Minas Gerais

Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes

Felipe Costa Bethonico

Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte

Gerência de Estudos de Circulação de Projetos

RESUMO

A 6ª versão do *Highway Capacity Manual* (HCM-6) fornece um conjunto de métodos desenvolvidos a partir de dados de tráfego coletados nos Estados Unidos e Canadá para avaliar o desempenho multimodal de componentes viários. Tais métodos refletem as características dos motoristas desses lugares e devem passar por um processo de adaptação para serem utilizados com sucesso em outros locais. Nesse sentido, o objetivo deste artigo foi desenvolver modelos para estimar a capacidade e o nível de serviço em rotatórias urbanas. A partir de dados de tráfego coletados na Região Metropolitana de Belo Horizonte, foram realizadas a calibração e a validação do simulador de tráfego escolhido, o Aimsun. Modelos para obter capacidade foram estimados a partir de dados de campo. A partir de resultados obtidos com o Aimsun, foi proposto um modelo para estimar os atrasos das aproximações em função dos fluxos de tráfego que circulam na rotatória. Os resultados obtidos mostram que o HCM-6 subestima o nível de serviço das rotatórias.

ABSTRACT

The 6th edition of Highway Capacity Manual (HCM-6) provides a set of methods developed from traffic data collected in the United States and Canada to evaluate the multimodal performance of road facilities. The HCM's methods reflect the drivers' characteristics of these places and must be adapted to be successfully applied in other places. Thus, the objective of this paper was to develop models to estimate capacity and level of service of urban roundabouts. Based on traffic data collected in the Metropolitan Region of Belo Horizonte, the calibration and validation of the chosen traffic simulator, Aimsun, were carried out. Models to obtain capacity were estimated from traffic data collected in the field. From the results obtained with Aimsun, a model was proposed to estimate vehicle delays in the approaches as a function of the traffic flows that circulate in a roundabout. The results show that the HCM-6 underestimates the level of service of roundabouts.

1. INTRODUÇÃO

Em virtude do intenso processo de urbanização que vem ocorrendo no Brasil desde meados do século passado, mudanças significativas no padrão de mobilidade da população brasileira têm acontecido. Impulsionados pelo crescimento da indústria automotiva no país e por condições de transporte público insatisfatórias, os deslocamentos motorizados individuais se tornaram prioridade. Os sistemas de transporte urbano brasileiros invariavelmente privilegiam os deslocamentos privados, individuais e rodoviários (Carvalho, 2016).

Segundo Stein (2015), esse uso excessivo dos modos motorizados ocasiona problemas como o consumo de combustíveis poluentes e de fontes não-renováveis, problemas de saúde relacionados à poluição do ar e ao estresse no trânsito, aumento do número de acidentes, dentre outros. Nos grandes centros urbanos, onde se concentra a maior parte da frota de veículos, a situação é ainda agravada com os congestionamentos.

Desse modo, é papel da gestão pública tomar medidas a fim de solucionar ou pelo menos amenizar tais impactos. Uma possível abordagem, para tanto, é estudar o funcionamento das estruturas viárias de modo a avaliar sua eficácia no atendimento à demanda existente, e, quando

necessário, executar medidas para minimizar o problema de baixa fluidez do tráfego, recorrente principalmente nas grandes cidades brasileiras. Nesse sentido, Barceló (2010) salienta que tal análise ganha maior relevância tendo em vista que a saturação nas malhas viárias acarreta, dentre outros fatores, em diminuição da produtividade e da qualidade de vida da população.

O *Highway Capacity Manual*, desenvolvido pelo *Transportation Research Board*, cuja 6ª versão foi lançada em 2016 (HCM-6), fornece um conjunto de metodologias e procedimentos para avaliar o desempenho multimodal de componentes viários. Para tal fim, o HCM-6 apresenta formulações desenvolvidas a partir de levantamentos de dados realizados nos Estados Unidos e Canadá e que refletem, portanto, características dos motoristas desses locais. Tendo isso em vista, o próprio manual adverte que seu uso em outros países requer atenção à calibração das equações e tabelas a fim de que os resultados reflitam com maior precisão as condições de tráfego do local estudado (TRB, 2016a).

No Brasil, o HCM-6 tem sido usado com poucas adaptações às condições locais. No que diz respeito às vias urbanas, os estudos brasileiros para determinar a capacidade e o nível de serviço (NS) ainda são superficiais, praticamente inexistentes. Neris (2018) ressalta que, no Brasil, ainda é baixa a taxa de utilização de rotatórias e esse tema ainda é pouco discutido e estudado. Além disso, não há normas específicas para o dimensionamento e operação de rotatórias, por isso as recomendações utilizadas provem de estudos realizados em outros países. Sob essa ótica, este trabalho visa desenvolver, com base na proposição do HCM-6 e a partir de dados de tráfego obtidos na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), modelos para determinação da capacidade e do NS em rotatórias urbanas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

As rotatórias modernas são interseções de formato circular em que os veículos trafegam ao redor de uma ilha central. Nelas, o direito de prioridade é dos veículos em circulação, ou seja, o fluxo de entrada deve sempre dar preferência aos veículos que estão percorrendo o trajeto circular. No Brasil, isso é feito em sentido anti-horário (DNIT, 2005).

Com pequenos raios de curva e reduzida velocidade de conversão, essa solução de interseção não semaforizada passou por um processo de evolução até chegar às regras adotadas atualmente, e teve seu uso difundido, em especial, pela combinação de maior segurança e melhor desempenho que proporciona (Turner, 2011). Sua implantação proporciona os seguintes benefícios:

- Segurança: A implementação de rotatórias reduz os conflitos de tráfego e a velocidade dos veículos, e, com isso, a probabilidade de ocorrência e a gravidade de acidentes (IIHS, 2000).
- Desempenho operacional: Em rotatórias operando dentro de sua capacidade, não é necessária a parada completa dos veículos de entrada, caso não haja conflito. Isso proporciona um fluxo constante que, ainda que em baixa velocidade, reduzem, em comparação a outros tipos de interseção, a ocorrência de paradas e o atraso, proporcionando um melhor desempenho (Bertoncini e Demarchi, 2005).
- Estética urbana: Um bom projeto paisagístico (com plantas, flores e arbustos, por exemplo) pode tornar o ambiente mais agradável e esteticamente interessante, bem como reforçar a identidade do local (TRB, 2016b).
- Meio ambiente e eficiência: Mesmo quando há volumes altos, os veículos avançam lentamente em filas em movimento, em vez de parar por completo. Essa redução do número

de ciclos de aceleração/desaceleração e do tempo gasto em marcha lenta é benéfica ao meio ambiente, pois diminui impactos associados à poluição sonora e do ar e o consumo de combustível (TRB, 2016b).

- Custo: A economia proporcionada pelo uso de rotatórias é significativa. Os custos de manutenção e de operação são baixos. Não é necessária a aquisição de equipamentos semafóricos, e o consumo de energia se restringe ao suficiente para abastecer a iluminação local. A única ressalva deve-se ao custo de implementação, ligeiramente superior ao de outros tipos de interseções (TRB, 2016b).

Mesmo com a consolidação do modelo de rotatória atual, algumas variações na sua configuração continuam sendo estudadas. Dentre elas, cita-se o estudo de Neris (2018), que avaliou parâmetros de tráfego em uma rotatória na cidade de Araraquara, interior de São Paulo, utilizando o simulador de tráfego Aimsun para testar um novo modelo de rotatória com dispositivos semafóricos para controlar a chegada do fluxo de veículos nas aproximações.

A implantação de rotatórias é recomendada caso não haja grande discrepância entre os volumes da via principal e secundária. Além disso, sua implantação demanda mais espaço do que uma interseção semaforizada, e, portanto, é importante considerar a Lei de Uso e Ocupação do Solo da região, bem como fatores econômicos e socioculturais ao se analisar a viabilidade de sua implementação. Não se recomenda, por outro lado, a implementação de rotatórias em uma rede cercada por interseções semafóricas (DER-SC, 2000).

A escolha por determinado tipo de interseção urbana recai na consideração acerca da demanda de tráfego frente à oferta planejada, a fim de que a solução apresentada atenda às necessidades locais e apresente uma fluidez adequada. Nesse sentido, o HCM-6 propõe, como medida de desempenho para calcular o nível de serviço, o atraso médio veicular, cuja formulação, para uma determinada faixa de tráfego i , é dada por:

$$d = \frac{3600}{c} + 900 \cdot T \cdot \left[x - 1 + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c}\right) \cdot x}{450 \cdot T}} \right] + 5 \cdot \min(x, 1) , \quad (1)$$

em que: d = atraso médio na rotatória (s/veic); x = relação v/c da faixa i ; c = capacidade da faixa i (veic/h); e T = período de análise (h) (0,25 h para um período de 15 minutos de pico).

O HCM-6 também sugere uma forma de determinar a capacidade das aproximações em função do fluxo conflitante que circula na rotatória. Para isso, deve-se usar o seguinte modelo:

$$c_{cpe} = A \cdot e^{-B \cdot v_c} , \quad (2)$$

com os parâmetros A e B sendo obtidos por:

$$A = \frac{3600}{t_f} , \text{ e} \quad (3)$$

$$B = \frac{t_c - \frac{t_f}{2}}{3600} , \quad (4)$$

em que c_{cpe} = capacidade da faixa da aproximação (cpe/h); v_c = fluxo conflitante em circulação na aproximação (cpe/h); t_c = headway crítico (s/veic); e t_f = follow-up headway (s/veic).

O t_c consiste no menor *headway* aceito pelos motoristas para entrar na corrente de tráfego que circula na rotatória. O t_f consiste no *headway* quando um ou mais veículos entram na rotatória aproveitando a mesma brecha utilizada pelo veículo líder. Por exemplo, se $t_c = 3$ s e 3 veículos aproveitam uma brecha de 8 s, então $t_f = (8 - t_c)/2 = (8 - 3)/2 = 2$ s (Eleferiadou, 2014). Esse foi o método utilizado para estimar os *headways* em campo neste trabalho.

O atraso médio de cada aproximação é obtido pela média ponderada dos atrasos das faixas de tráfego das aproximações, com o peso sendo o fluxo de tráfego de cada faixa. De forma similar, o atraso da rotatória é calculado pela média ponderada dos atrasos nas aproximações, com o peso sendo o fluxo veicular das aproximações. Com isso, o NS da rotatória é calculado de acordo com o critério apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Critério para determinação do NS em rotatórias

Atraso (s/veic)	NS de acordo com a relação volume-capacidade (v/c)	
	$v/c \leq 1,0$	$v/c > 1,0$
0 – 10	A	F
> 10 – 15	B	F
> 15 – 25	C	F
> 25 – 35	D	F
> 35 – 50	E	F
> 50	F	F

3. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO SIMULADOR DE TRÁFEGO

O método utilizado neste trabalho para atingir a meta traçada consiste em obter dados de tráfego em campo de modo que se possa calibrar e validar o simulador de tráfego escolhido, o Aimsun, versão 8.3 (AIMSUN, 2018). Por sua vez, o simulador é utilizado para modelar rotatórias em determinadas condições geométricas e de tráfego, cujos resultados obtidos são utilizados para ajustar o modelo de atraso veicular.

O processo de calibração e validação do Aimsun é fundamental para a obtenção de resultados mais próximos da realidade. Dessa forma, foram utilizados os tempos de viagem em corredores específicos de uma rede de Belo Horizonte como medida de desempenho. Comparou-se, então, os resultados da simulação com os observados em campo, obtidos em Magalhães *et al.* (2017). A Figura 2 ilustra a rede viária utilizada, com destaque para os corredores em que foram obtidos os tempos de viagem. O conjunto de dados foi coletado nos dias 4, 5, 6, 18, 19 e 20 de abril de 2017, durante o pico da manhã (das 7 h às 8 h).

Foi desenvolvido um Algoritmo Genético (AG) para calibração do Aimsun, baseado em um AG aplicado em trabalhos anteriores (Magalhães *et al.*, 2017; Bessa Jr. *et al.*, 2017; Bessa Jr. e Setti, 2018). O AG é baseado na teoria da evolução, que faz com que se mantenham os indivíduos mais adaptados na população, com a transferência de suas principais características às gerações seguintes e o desaparecimento dos indivíduos menos adaptados (Goldberg, 1989).

O AG utilizado neste trabalho inicia-se com a criação de uma população inicial de 20 indivíduos, baseado no intervalo de busca dos parâmetros de calibração que os compõe, com cada um deles associado a um determinado nível de agressividade: alto, médio e baixo. Cada simulação foi realizada com cinco replicações usando-se diferentes sementes de números aleatórios.

Os 11 parâmetros de calibração foram escolhidos por terem sido os que mais afetavam os resultados da simulação (tempos de viagem). A Tabela 2 mostra os valores *default* dos parâmetros de calibração e seus intervalos de busca, que são divididos em três partes iguais de acordo com o nível de agressividade. Cada cromossomo representa um conjunto de parâmetros de calibração que são inseridos na metade dos arquivos de entrada das correntes de tráfego de 15 minutos obtidas em campo. A outra metade foi usada para realizar a validação do AG.

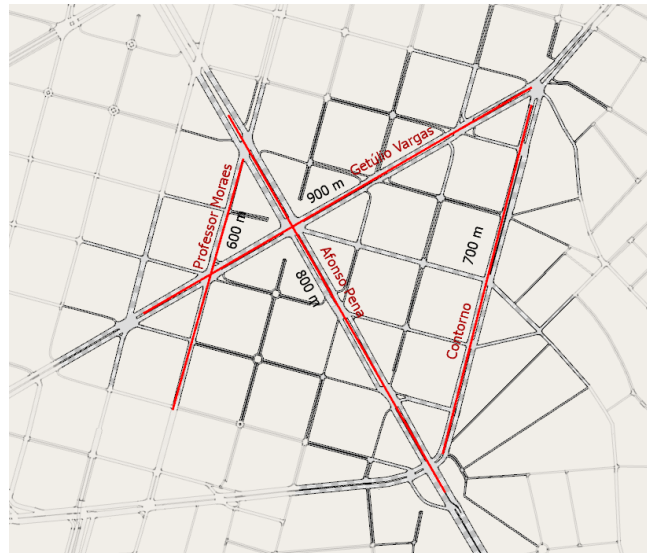


Figura 2: Corredores viários para coleta dos tempos de viagem (Magalhães *et al.*, 2017)

Tabela 2: Parâmetros de calibração do Aimsun

Parâmetro	Categoria	Valor <i>default</i>	Intervalo de busca	
			Mínimo	Máximo
Número de veículos		4	1	6
Distância máxima entre veículos (m)	<i>Car-following</i>	100,00	50,00	150,00
Diferença máxima de velocidade (m)		50,00	25,00	75,00
Tempo de reação (s)		0,75	0,50	2,00
Tempo de reação em paradas (s)	Tempo de reação	1,35	0,70	3,00
Tempo de reação no semáforo (s)		1,35	0,70	3,00
Máxima velocidade desejada (km/h)		110,00	50,00	180,00
Máxima aceleração (m/s ²)		3,00	2,00	4,00
Aceitação da velocidade para os automóveis	Características veiculares	1,10	0,50	2,00
Espaçamento livre (m)		1,00	0,50	2,00
Tempo médio de cessão de preferência (s)		10,00	5,00	15,00

Devido à vantagem de penalizar os maiores erros, optou-se pela função objetivo (*fitness*) *Somatório dos Erros Quadráticos (SE)*, com o intuito de minimizá-la. Sua formulação é dada por:

$$SE = \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2, \quad (5)$$

em que y_i = i-ésimo tempo de viagem obtido na simulação; e x_i = i-ésimo tempo de viagem obtido em campo.

O critério de parada do AG é o número máximo de gerações (20). O tipo de seleção de dois indivíduos (pais) para realização de cruzamento (*crossover*) é baseado na técnica da roleta, em que a probabilidade de serem selecionados é função do seu grau de adaptação ao meio (Goldberg, 1989). Portanto, quanto menor for o *SE* do indivíduo, mais chance ele tem de ser selecionado para realização de cruzamento. O novo cromossomo de um indivíduo da geração seguinte possui genes (parâmetros de calibração) que são resultados da média aritmética dos genes dos seus pais.

A mutação é a seleção aleatória de genes (parâmetros) da população de modo que eles são substituídos por outros gerados aleatoriamente em função do seu respectivo espaço de busca. A predação significa selecionar os piores indivíduos da população (maiores valores de *SE*) e substituí-los por outros gerados aleatoriamente, também em função do espaço de busca dos parâmetros de calibração. A mutação e a predação, que possuem, respectivamente, taxas de 30% e 20%, são aplicadas a cada duas gerações, de modo que a diversidade genética inserida possa ser absorvida paulatinamente.

Com a aplicação do *crossover*, é possível que alguns genes dos indivíduos de uma nova geração da população tenham agressividades diferentes daquelas definidas no início do processo de calibração (baixo, médio ou alto). Nesses casos, cada gene deverá ser substituído por um outro produzido aleatoriamente com base no espaço de busca, de acordo com seu nível de agressividade. A esse processo foi denominado “alteração genética” (Baluja, 1994; Bean, 1994). Os resultados da aplicação do AG podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3: Melhor conjunto de parâmetros encontrado pelo AG

Parâmetro	Categoria	Valor obtido pelo AG
Número de veículos		2
Distância máxima entre veículos (m)	<i>Car-following</i>	80,17
Diferença máxima de velocidade (m)		29,96
Tempo de reação (s)		0,90
Tempo de reação em paradas (s)	Tempo de reação	1,60
Tempo de reação no semáforo (s)		1,58
Máxima velocidade desejada (km/h)		77,23
Máxima aceleração (m/s ²)		2,45
Aceitação da velocidade para os automóveis	Características veiculares	0,90
Espaçamento livre (m)		1,31
Tempo médio de cessão de preferência (s)		12,12

Utilizando os valores *default* dos parâmetros de calibração, obteve-se o valor de *SE* = 446.347. Com a aplicação da melhor solução encontrada com o AG, obteve-se um valor de *SE* = 10.533, 97% menor do que usando-se os parâmetros *default*. Para o processo de validação, testando-se a melhor solução encontrada na etapa de calibração, obteve-se um *SE* = 17.647, valor 96% menor que o encontrado a partir dos parâmetros *default*, igual a 448.634.

Sobre os resultados dos parâmetros calibrados, obteve-se valores menos agressivos para os parâmetros relacionados aos modelos de características veiculares e tempos de reação. Os parâmetros do modelo de *car-following*, por outro lado, indicam uma maior agressividade do motorista brasileiro em relação ao motorista *default*. Dentro das três categorias estabelecidas para os motoristas em função do nível de agressividade (alto, médio e baixo), o motorista típico, encontrado para as condições observadas, foi considerado com alta agressividade.

4. CAPACIDADE E NÍVEL DE SERVIÇO

Para calibrar um novo modelo de capacidade e aplicar os modelos propostos pelo HCM-6 e por este trabalho para obter atrasos veiculares, foi realizada uma coleta de dados de cerca de trinta minutos com um drone, com início às 7 h do dia 14/12/2017, na rotatória que fica na Praça dos Trabalhadores, localizada no município de Contagem-MG, pertencente à RMBH. A rotatória é composta por quatro entradas, com as aproximações Norte e Oeste possuindo duas faixas por sentido mais uma faixa de estacionamento, a aproximação Sul com duas faixas por sentido e sem faixa de estacionamento e a aproximação Leste com três faixas por sentido e sem faixa de estacionamento. A parte circular é toda composta por três faixas de tráfego (Figura 3).

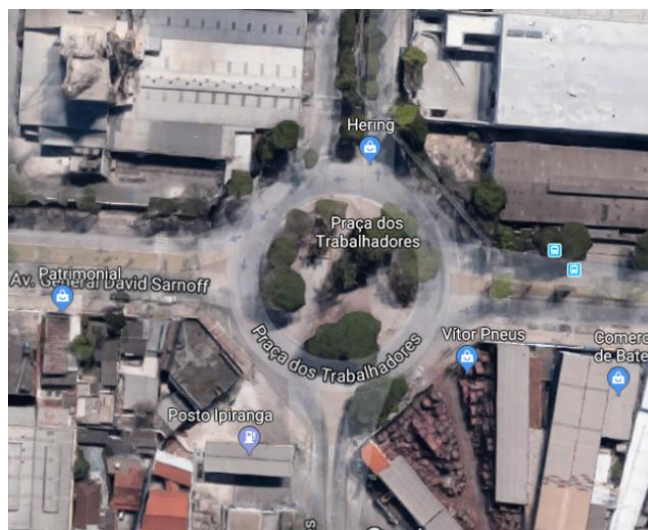


Figura 3: Visão superior da rotatória (Fonte: Google Maps)

4.1. Capacidade

O curto período de filmagem com o drone ocorre pela limitação das três baterias disponíveis, que duram, com segurança, aproximadamente 10 minutos cada. Por essa razão, extrapolou-se o conjunto de dados para se obter quatro correntes de tráfego, tendo sido estimadas as matrizes origem-destino (OD) para os períodos. As correntes de tráfego foram coletadas em períodos abaixo da capacidade. Com as informações, foram estimados os *headways* de *follow-up* e crítico para cada aproximação, conforme ilustra a Tabela 4, em intervalos em que a fila era contínua.

Tabela 4: *Headways* das quatro aproximações da rotatória observada

<i>Headway</i>	Aproximação			
	Norte	Sul	Leste	Oeste
Crítico	3,0 s	3,0 s	4,0 s	3,0 s
<i>Follow-up</i>	1,5 s	2,0 s	3,0 s	5,0 s

Utilizando-se as Equações 2 a 4, foram encontrados, para as aproximações Norte, Sul, Leste e Oeste da Praça dos Trabalhadores, respectivamente, os seguintes modelos para cálculo de capacidade para as faixas das aproximações:

$$c_{cpe} = 2400 \cdot e^{-6,25 \cdot 10^{-4} \cdot v_c} , \quad (6)$$

$$c_{cpe} = 1800 \cdot e^{-5,56 \cdot 10^{-4} \cdot v_c} , \quad (7)$$

$$c_{cpe} = 1200 \cdot e^{-6,94 \cdot 10^{-4} \cdot v_c} , \quad (8)$$

$$c_{cpe} = 720 \cdot e^{-1,39 \cdot 10^{-4} \cdot v_c} , \quad (9)$$

com o volume circulante, v_c , sendo a soma dos volumes das faixas da parte circular.

O HCM-6 fornece modelos para estimar a capacidade das aproximações nas rotatórias de acordo com o número de faixas na parte circular e nas aproximações. Com exceção do modelo com faixa de acomodação para virar à direita (*right-turn bypass lane*), os outros modelos são voltados para as seguintes configurações: i) uma faixa na aproximação e outra na parte circular; ii) duas faixas na aproximação e uma faixa na parte circular; iii) uma faixa na aproximação e duas faixas na parte circular; e iv) duas faixas, tanto para a aproximação quanto para a parte circular. Para os três primeiros casos, os modelos são, respectivamente:

$$c_{cpe} = 1380 \cdot e^{-1,02 \cdot 10^{-3} \cdot v_c} , \quad (10)$$

$$c_{cpe} = 1420 \cdot e^{-0,91 \cdot 10^{-3} \cdot v_c} , e \quad (11)$$

$$c_{cpe} = 1420 \cdot e^{-0,85 \cdot 10^{-3} \cdot v_c} . \quad (12)$$

Para o quarto caso, o HCM-6 fornecem modelos distintos de capacidade para a faixa da direita e da esquerda na aproximação, da seguinte forma:

$$c_{cpe} = 1420 \cdot e^{-0,85 \cdot 10^{-3} \cdot v_c} , e \quad (13)$$

$$c_{cpe} = 1350 \cdot e^{-0,92 \cdot 10^{-3} \cdot v_c} . \quad (14)$$

Nas aproximações Norte, Leste e Oeste da rotatória em que foram obtidos os dados de tráfego neste trabalho (Figura 3), foi observado que a capacidade era reduzida pela existência de faixa de estacionamento nas seções das rotatórias, a partir dessas aproximações. O HCM-6 não traz informações acerca das condições geométricas com que os modelos propostos foram obtidos, sem menção à presença de estacionamento na parte circular da rotatória. Além disso, não fornece um modelo para rotatórias com mais de duas faixas na parte circular e na aproximação.

Sendo assim, para efeito de comparação, foram considerados os modelos da Equação 7 – que representa a aproximação Sul da interseção observada em campo, com duas faixas de entrada e sem faixa de estacionamento na rotatória – e as Equações 13 e 14 – voltadas para a configuração com duas faixas para a aproximação e para a parte circular, que é o caso mais próximo da situação observada em campo. Os modelos apresentados nas Equações 7, 13 e 14 podem ser visualizados na Figura 4, em que se observa que os modelos propostos pelo HCM-6 fornecem capacidades inferiores aos obtidos neste trabalho, o que corrobora com a ideia de que os motoristas brasileiros são mais agressivos. Utilizando os fluxos de circulação obtidos na coleta de dados em campo, obteve-se seus respectivos valores de capacidades, mostrados na Tabela 5.

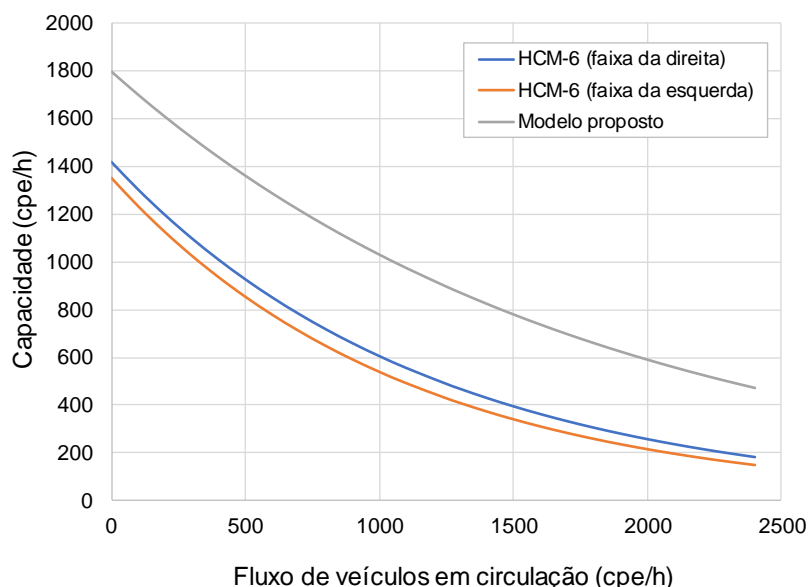


Figura 4: Curvas de capacidade das aproximações em função dos fluxos em circulação

Tabela 1: Capacidades das faixas das aproximações com o modelo proposto e com o HCM-6

Modelo	Capacidade da faixa (cpe/h)
Proposto	$c_{cpe} = 1800 \cdot e^{-5,56 \cdot 10^{-4} \cdot 1243} = 902$
HCM-6 (faixa da direita)	$c_{cpe} = 1420 \cdot e^{-0,85 \cdot 10^{-3} \cdot 1243} = 494$
HCM-6 (faixa da esquerda)	$c_{cpe} = 1350 \cdot e^{-0,92 \cdot 10^{-3} \cdot 1243} = 430$

4.2. Atraso e Nível de Serviço

Para obtenção de um modelo alternativo para estimar atrasos em rotatórias urbanas, foram realizados experimentos de simulação a partir de novas matrizes OD, variando sucessivamente os valores da matriz observada em campo, de 5% em 5%, entre 50% e 150% da demanda atual, para cada tipo de veículo. Para cada nível de demanda, foram calculadas as médias dos atrasos das aproximações, resultados de cinco replicações com diferentes sementes de números aleatórios. A partir dos atrasos (d , em s/veic), ajustou-se uma curva com a formulação apresentada na Equação 15, com erro padrão residual igual a 68,62, conforme pode ser visto na Figura 5.

$$d = 3,735 \cdot e^{2,476 \cdot 10^{-3} \cdot v_c} \quad (15)$$

Os dados obtidos com a curva proposta na Figura 5 foram condizentes com os atrasos obtidos a partir das simulações, especialmente para fluxos em circulação de até 750 veic/h. Calculou-se, por meio do modelo proposto, os atrasos das quatro aproximações, conforme Tabela 6. Por meio da Equação 16, foi possível verificar o atraso calculado para a rotatória, que apresenta, segundo o modelo proposto e de acordo com a Tabela 1, um NS = A.

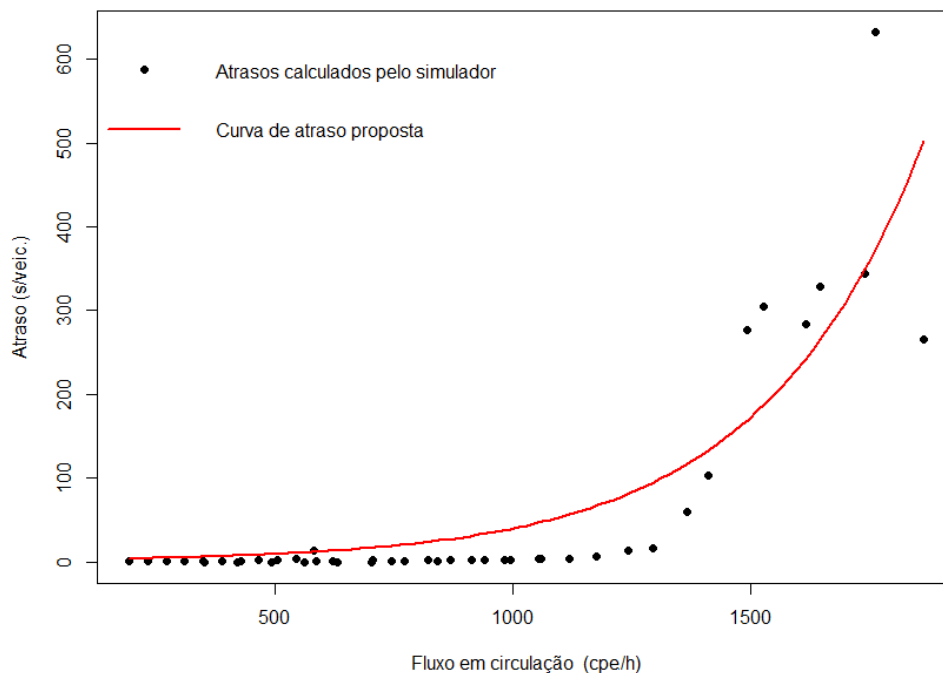


Figura 5: Curva proposta de atraso em função do fluxo em circulação

Tabela 6: Atrasos calculados pelo modelo proposto

Sentido Norte	Sentido Sul	Sentido Leste	Sentido Oeste
5,26 s/veic	2,51 s/veic	5,01 s/veic	3,84 s/veic

$$d_{rotatória} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \cdot d_i}{\sum_{i=1}^n v_i} = \frac{551 \cdot 5,26 + 791 \cdot 2,51 + 685 \cdot 5,01 + 600 \cdot 3,84}{551 + 791 + 685 + 600} = 4,06 \text{ s/veic}, \quad (16)$$

em que $d_{rotatória}$ = atraso da rotatória (s/veic); d_i = atraso para uma aproximação i (s/veic); e v_i = fluxo para uma aproximação i (cpe/h).

Utilizando as capacidades calculadas na Tabela 5, para a proposta do HCM-6, foram calculadas as relações volume-capacidade, conforme mostradas na Tabela 7, com a capacidade sendo a média das faixas da direita e da esquerda. Em seguida, foram calculados os atrasos de cada aproximação, conforme Equação 1 e o atraso médio da rotatória (Equação 17). É importante ressaltar que foi utilizado um período de análise de 15 minutos, conforme recomendado pelo HCM-6. Os valores obtidos estão na Tabela 8. A rotatória apresenta, portanto, segundo o HCM-6 e de acordo com a Tabela 1, um NS = B.

O modelo proposto neste trabalho, portanto, indica que os atrasos encontrados em rotatórias brasileiras são menores do que aqueles obtidos com o HCM-6 sem adaptação. Isso pode ser explicado pela tendência do motorista brasileiro em ser mais agressivo do que os motoristas da América do Norte, que são os motoristas típicos usados no desenvolvimento do HCM-6.

Tabela 7: Relações volume-capacidade, conforme modelo do HCM-6

Sentido Norte	Sentido Sul
$x_i = \frac{138}{(494 + 430)/2} = 0,30$	$x_i = \frac{198}{(494 + 430)/2} = 0,43$
Sentido Leste	Sentido Oeste
$x_i = \frac{171}{(494 + 430)/2} = 0,37$	$x_i = \frac{150}{(494 + 430)/2} = 0,33$

Tabela 8: Atrasos calculados conforme modelo do HCM-6

Sentido Norte	Sentido Sul	Sentido Leste	Sentido Oeste
12,57 s/veic	15,65 s/veic	14,15 s/veic	13,12 s/veic

$$d_{rotatória} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \cdot d_i}{\sum_{i=1}^n v_i} = \frac{551 \cdot 12,57 + 791 \cdot 15,65 + 685 \cdot 14,15 + 600 \cdot 13,12}{551 + 791 + 685 + 600} = 14,04 \text{ s/veic} \quad (17)$$

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O HCM-6 fornece formulações para a determinação do NS a fim de avaliar o desempenho operacional de rotatórias urbanas. Desenvolvidas a partir de levantamentos de dados realizados nos Estados Unidos e no Canadá, elas refletem características dos motoristas desses locais, o que implica na obtenção de resultados insatisfatórios quando aplicado no Brasil. Tendo isso em vista, neste trabalho, foi proposto um método alternativo ao do HCM-6 para a determinação da capacidade e do NS de rotatórias urbanas, usando, para isso, dados coletados na RMBH.

Os modelos propostos forneceram valores maiores para as capacidades e menores para os atrasos das aproximações, em relação aos valores obtidos com o HCM-6. Isso é explicado, inclusive, pela calibração realizada para o simulador utilizado, o Aimsun, que encontrou um motorista típico do tipo agressivo. Dessa forma, a utilização do HCM-6 subestima os NS encontrados em campo, o que poderia acarretar intervenções em campo, buscando uma melhoria operacional, antes do momento adequado. Esse tipo de resultado foi encontrado para outras análises no Brasil, para vias rurais (Utamura *et al.*, 2007; Pereira e Bessa Jr., 2017), mas ainda não havia sido realizado um estudo similar para rotatórias urbanas.

Para futuros trabalhos, sugere-se a utilização de uma base de dados mais ampla, com coletas em rotatórias de regiões distintas e com diferente número de faixas nas aproximações e na parte circular, inclusive próximas das configurações do HCM-6. Isso pode, também, afetar a calibração e a validação do simulador de tráfego. Propõe-se, ainda, uma análise em outros horários, no pico e fora pico, a fim de que diferentes níveis de demanda possam ser analisados. Recomenda-se, ainda, a consideração da impedância causada pela presença de pedestres, e, por fim, a avaliação da influência dos raios das rotatórias em seus desempenhos operacionais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG, pelo apoio financeiro sob número de processo APQ-03818-18, e ao CNPq, pela Bolsa de Produtividade sob o número de processo 312651/2018-0. Agradecem, ainda, à CAPES, pelo suporte à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Baluja, S. (1994) *Population-Based Incremental Learning: A Method for Integrating Genetic Search Based Function Optimization and Competitive Learning*. Technical Report nº CMU-CS-94-163. Carnegie Mellon University.
- Barceló, J. E. (2010) *Fundamentals of Traffic Simulation*. Springer: International Series in Operations Research and Management Science.
- Bertoncini, B. V. e S. H. Demarchi (2005) Impacto nas medidas de desempenho operacional devido à substituição de interseção semaforizada por rotatória. *Anais do XIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte*, ANPET, Recife, v.2, p. 1058-1069.
- Bean, J. (1994) Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization. *ORSA Journal of Computing* 6(2), p.154-160.
- Bessa Jr, J. E.; J. R. Setti (2018) Evaluating Measures of Effectiveness for Quality of Service Estimation on Two-Lane Rural Highways. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, v. 144, p. 04018056.
- Bessa Jr, J. E.; J. R. Setti; S. S. Washburn (2017) Evaluation of Models to Estimate Percent Time Spent Following on Two-Lane Highways. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, v. 143, p. 04017010.
- Carvalho, C.H.R. (2016) *Mobilidade urbana sustentável: Conceitos, tendências e reflexões*. Brasília: IPEA.
- DER-SC (2000) *Utilização e configuração de rotatórias em estradas fora de áreas urbanizadas*. Departamento de Estradas de Rodagem de Santa Catarina: diretoria de estudos e projetos. Florianópolis.
- DNIT (2005) *Manual de Projeto de Interseções*. 2ª edição. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro.
- Elefteriadou, L. (2014) *An Introduction to Traffic Flow Theory*. Springer. New York.
- Goldberg, D. E. (1989) *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, Massachusetts.
- IIHS (2000) *Crash reductions following installation of roundabouts in the United States*. Arlington: Insurance Institute for Highway Safety.
- Magalhães, V.; W. S. Oliveira; B. C. S. Maciel; J. E. Bessa Jr.; M. E. V. Moura e J. M. Pinto Jr. (2017) *Calibração de submodelos comportamentais do simulador Aimsun para Belo Horizonte*. Belo Horizonte.
- Neris, D. F. (2018) *Análise de desempenho do tráfego em rotatórias com alto e desequilibrado fluxo de veículos empregando semáforos na via principal*. Tese (Doutorado em Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes) – EESC-USP, São Carlos.
- Pereira, H. M.; J. E. Bessa Jr. (2017) Análise comparativa de métodos para cálculo do nível de serviço em rodovias de pista simples. *Anais do XXXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Rio de Janeiro, v. 1. p. 1-12.
- Stein, P.P. (2015) Introdução ao gerenciamento da mobilidade sustentável: Investigação dos desafios e estratégias adotadas em campi universitários. Biblioteca 24 Horas. São Paulo.
- TRB (2016a) *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board. 6th. Edition. Washington: National Academy of Science.
- TRB (2016b) *Roundabouts: an information guide*. Transportation Research Board. 2nd. Edition. Washington: National Academy of Science.
- AIMSUN (2018) *Manual do Usuário do Simulador Aimsun Next*. Aimsun SLU, Barcelona.
- Turner, D. (2011) *Roundabouts: a literature review*. Seattle.
- Utamura, F. S.; J. R. Setti; C. Y. Egami; M. L. Mon-Ma (2007) Verificação da acurácia de estimativas do nível de serviço em rodovias de pista simples no estado de São Paulo. *Anais do XXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Rio de Janeiro. Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes 2007. p. 1-8.

Endereço para contato:

Eng. Vinícius Coelho Sousa (sousa-vinicius@hotmail.com)

Prof. Dr. José Elievam Bessa Júnior (elievamjr@gmail.com)

Eng. Juliângelo Kayo Sangi de Oliveira (jkayoso@hotmail.com)

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Mestrado em Geotecnia e Transportes (GeoTrans)

Avenida Antônio Carlos, 6.627, Escola de Engenharia, Bloco 1, Pampulha, Belo Horizonte, MG, 31.270-901

MSc. Felipe Costa Bethonico (felipe.bethonico@pbh.gov.br)

Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte (BHTRANS), Gerência de Estudos de Circulação e Projetos (GECIP)

Av. Eng. Carlos Goulart, 900, Buritis, Belo Horizonte, MG, 30.455-902