



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

ALESSANDRO MACÊDO DE ARAÚJO

ESTIMAÇÃO DA BRECHA CRÍTICA EM INTERSEÇÕES NÃO SEMAFORIZADAS
UTILIZANDO SIMULAÇÃO MICROSCÓPICA DE TRÁFEGO

FORTALEZA

2018

ALESSANDRO MACÊDO DE ARAÚJO

ESTIMAÇÃO DA BRECHA CRÍTICA EM INTERSEÇÕES NÃO SEMAFORIZADAS
UTILIZANDO SIMULAÇÃO MICROSCÓPICA DE TRÁFEGO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes do Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes.

Orientador: Prof. Ph.D. Manoel Mendonça de Castro Neto.

FORTALEZA

2018

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pelo suporte financeiro por meio de bolsas e recursos de custeio.

Ao prof. Manoel, por todas as orientações voltadas ao desenvolvimento da pesquisa, pelas contribuições no meu crescimento pessoal, acadêmico e profissional, pela inspiração como professor e por toda a atenção ao longo desses anos.

Ao prof. Flávio Cunto, pelas contribuições à minha pesquisa sendo parte da banca examinadora, pelo conhecimento adquirido através das disciplinas por ele ministradas e pelo exemplo de professor.

Ao prof. Álvaro Seco, por participar da banca examinadora e contribuir bastante com suas recomendações.

Aos professores Felipe Loureiro, Bruno Bertoncini, Francisco Moraes e Verônica Castelo pela influência acadêmica e pelo conhecimento transmitido em sala de aula.

Aos meus amigos do grupo de pesquisa, pela parceria mútua no desenvolvimento dos trabalhos e pela motivação adicional.

Aos meus amigos da pós-graduação, pela companhia nas disciplinas, nos congressos e nos momentos de descontração.

Aos amigos da Transitar, pelo crescimento pessoal e profissional, pelo ambiente agradável e descontraído de trabalho/estudo e pelo incentivo ao meu crescimento acadêmico.

Ao Roberto, companheiro de pós-graduação com quem eu tive o prazer de compartilhar 3 anos de parceria com importantes contribuições técnicas, e principalmente pela amizade e motivação fora do ambiente de trabalho/acadêmico.

Aos meus amigos do colégio, pelos ótimos encontros e pela amizade mesmo quando não estão presentes pessoalmente.

Aos meus tios e primos, pelas reuniões familiares em fins de comemoração, em momentos difíceis ou até mesmo sem pretexto algum.

Aos meus padrinhos, Fátima e Gifoni, e à minha prima Emiliana, por todo o carinho e incentivo.

À Marjore, com quem eu pude compartilhar ótimos momentos que me mantiveram motivado.

Ao meu irmão, Paulo Henrique, e aos meus pais, Paulo e Herbênia, a quem dedico todo o meu esforço, por todo o amor e pelas ótimas condições de vida e de estudo a mim proporcionadas.

RESUMO

Um dos principais pontos na modelagem do tráfego urbano consiste em representar a formação e a descarga das filas nas interseções, pois nelas ocorre boa parte das impedâncias sofridas pelos usuários na malha viária. A microssimulação é uma das abordagens para a modelagem de tráfego e uma ferramenta que está cada vez mais sendo utilizada. A calibração de modelos de microssimulação é geralmente realizada com base nas próprias medidas de desempenho do tráfego que se deseja estimar, que dependem de vários fatores que quando não são previamente controlados podem acarretar em ajustes inadequados nos parâmetros de calibração. Este trabalho tem como objetivo principal propor um método para a estimação da brecha crítica em interseções urbanas não semaforizadas com o uso da simulação microscópica. O método proposto tem como medida-alvo o tempo de espera de cada motorista enquanto está na primeira posição da fila avaliando as brechas do fluxo conflitante, sendo sugerida também a verificação da representação do padrão de chegada na via principal por meio do teste de hipótese sobre a distribuição dos *headways*. Para a estimação da brecha crítica foi utilizado tanto o χ^2 quanto a diferença entre as médias dos tempos de espera (simulados e observados) como critérios de qualidade do ajuste; utilizou-se o teste χ^2 e o intervalo de confiança da diferença entre as médias para validar o valor calibrado do parâmetro. O método também incluiu um ajuste nos tempos de espera simulados para melhor adequar o modelo ao comportamento observado em campo. O estudo de casos deste trabalho é composto por duas interseções da cidade de Fortaleza, com níveis de demanda bem distintos. Os resultados indicaram valores do parâmetro *minimum gap time* superiores ao valor *default* de 3,0 segundos, sugerindo, portanto, que o perfil médio dos motoristas nos locais de estudo é um pouco mais cauteloso que o perfil padrão no VISSIM; no caso dos resultados obtidos no TransModeler, o *critical headway* foi, em geral, inferior ao valor médio *default*. Para demandas de tráfego significativamente diferentes, o mesmo valor calibrado não se mostrou adequado na maioria dos casos. Outro objetivo deste estudo consistiu em comparar o método proposto com o método de calibração mais convencional, no qual a medida-alvo é uma medida de desempenho do tráfego, como o tamanho médio da fila. O método proposto neste trabalho conduziu a resultados mais precisos.

Palavras-chave: Interseções não semaforizadas. Aceitação de brechas. Brecha crítica.

Simulação microscópica. Calibração. VISSIM. TransModeler.

ABSTRACT

One of the main points in the modeling of urban traffic is to represent the formation and discharge of queues at the intersections, since they are responsible for most of the impedances suffered by the users in the road network. Microsimulation is one of the approaches to modeling traffic and it is a tool that is increasingly being used. The calibration of microsimulation models is usually performed based on the traffic performance measures to be estimated, which depend on several factors that, when not previously controlled, can lead to inadequate adjustments to the calibration parameters. The main objective of this study is to propose a method to estimate critical gap in urban two-way stop-controlled intersections using microscopic simulation. The proposed method is based on the time that the driver takes in the first position of the queue while waiting for an acceptable gap, being also suggested the verification of the major road's arrival pattern through hypothesis test on headways distribution. To estimate the critical gap, both χ^2 and the difference between the waiting times' means (simulated and observed) were used as goodness of fit criteria; the χ^2 test and the confidence interval of the difference between the means were used to validate the calibrated parameter value. The method also included an adjustment in the simulated waiting times to better match observed field behavior. The case study is composed of two intersections located in the city of Fortaleza, with very different levels of demand. The results indicated minimum gap time values higher than the default value of 3.0 seconds, thus suggesting that the average profile of the drivers at the study sites is a bit more cautious than the standard VISSIM profile; in the case of results obtained in TransModeler, the critical headway was generally lower than the default mean value. For significantly different traffic demands, the same calibrated value was not adequate in most cases. Another objective of this study is to compare the proposed calibration procedure with the conventional one, in which the calibration target measure is a traffic measure of effectiveness, such as the average queue length. The proposed method yielded more accurate results.

Keywords: Two-way STOP-controlled intersections. Gap-acceptance. Critical gap. Microscopic simulation. Calibration. VISSIM. TransModeler.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Interseção não semaforizada modelada com o modelo RP do VISSIM	20
Figura 2 – Interseção não semaforizada modelada no TransModeler	22
Figura 3 – Demais parâmetros que definem o tempo mínimo de parada em INS (TransModeler).....	24
Figura 4 – Exemplo de interseção não semaforizada do estudo de casos de Liu <i>et al.</i> (2012)	25
Figura 5 – Cruzamento não semaforizado em forma de T do estudo de casos de Viti <i>et al.</i> (2013)	27
Figura 6 – Medida-alvo tempo de espera adotada neste trabalho.....	30
Figura 7 – Localização dos <i>data collection points</i> e dos <i>stop signs/lines</i>	31
Figura 8 – Tempo de desaceleração contabilizado como tempo de espera antes do ajuste	32
Figura 9 – INS-1 do estudo de casos (Pereira Valente x Cel. Linhares)	37
Figura 10 – INS-2 do estudo de casos (Dom Lino x Gustavo Sampaio)	37
Figura 11 – Distribuição da velocidade desejada na aproximação da R. Dom Lino (INS-2) ..	41
Fluxograma 1 – Abordagens para estimação dos parâmetros de aceitação de brechas.....	16
Fluxograma 2 – Método empregado.....	28
Gráfico 1 – Padrão de chegada dos veículos na rua Pereira Valente (calibração VISSIM)....	45
Gráfico 2 – Padrão de chegada dos veículos na rua Dom Lino (calibração VISSIM)	46
Gráfico 3 – Calibração pelo método proposto (INS-1 VISSIM).....	47
Gráfico 4 – Calibração pelo método proposto (INS-2 VISSIM).....	49
Gráfico 5 – Validação para o movimento seguir em frente (INS-1 VISSIM).....	50
Gráfico 6 – Validação para a conversão à direita (INS-1 VISSIM)	51
Gráfico 7 – Validação para o movimento seguir em frente (INS-2 VISSIM).....	52
Gráfico 8 – Validação para a conversão à esquerda (INS-2 VISSIM)	53
Gráfico 9 – Validação 2 para o movimento seguir em frente (INS-1 VISSIM).....	53
Gráfico 10 – Validação 2 para a conversão à direita (INS-1 VISSIM).....	54
Gráfico 11 – Validação 2 para o movimento seguir em frente (INS-2 VISSIM).....	55
Gráfico 12 – Validação 2 para a conversão à esquerda (INS-2 VISSIM).....	56
Gráfico 13 – Calibração pelo método convencional (INS-1 VISSIM)	57
Gráfico 14 – Distribuições dos tempos de espera para o movimento seguir em frente (INS-1 VISSIM)	57

Gráfico 15 – Intervalos de confiança para as diferenças entre as médias dos tempos de espera (INS-1 VISSIM)	58
Gráfico 16 – Distribuições dos tempos de espera para o movimento seguir em frente (INS-2 VISSIM)	59
Gráfico 17 – Distribuições dos tempos de espera para a conversão à esquerda (INS-2 VISSIM)	60
Gráfico 18 – Intervalos de confiança para as diferenças entre as médias dos tempos de espera (INS-2 VISSIM)	61
Gráfico 19 – Padrão de chegada dos veículos na rua Pereira Valente (calibração TransModeler)	63
Gráfico 20 – Padrão de chegada dos veículos na rua Dom Lino (calibração TransModeler) ..	64
Gráfico 21 – Calibração do <i>critical headway</i> pelo método proposto (INS-1 TransModeler) ..	65
Gráfico 22 – Calibração do <i>critical headway</i> pelo método proposto (INS-2)	66
Gráfico 23 – Validação para o movimento seguir em frente (INS-1 TransModeler).....	67
Gráfico 24 – Validação para a conversão à direita (INS-1 TransModeler).....	68
Gráfico 25 – Validação para o movimento seguir em frente (INS-2 TransModeler).....	69
Gráfico 26 – Validação para a conversão à esquerda (INS-2 TransModeler).....	70
Gráfico 27 – Validação 2 para o movimento seguir em frente (INS-1 TransModeler).....	70
Gráfico 28 – Validação 2 para a conversão à direita (INS-1 TransModeler).....	71
Gráfico 29 – Validação 2 para o movimento seguir em frente (INS-2 TransModeler).....	72
Gráfico 30 – Validação 2 para a conversão à esquerda (INS-2 TransModeler).....	72
Gráfico 31 – Calibração pelo método convencional (INS-2 TransModeler)	73
Gráfico 32 – Distribuições dos tempos de espera para o movimento seguir em frente (INS-1 TransModeler)	74
Gráfico 33 – Intervalos de confiança para as diferenças entre as médias dos tempos de espera (INS-1 TransModeler)	75
Gráfico 34 – Distribuições dos tempos de espera para o movimento seguir em frente (INS-2 TransModeler)	76
Gráfico 35 – Distribuições dos tempos de espera para a conversão à esquerda (INS-2 TransModeler)	77
Gráfico 36 – Intervalos de confiança para as diferenças entre as médias dos tempos de espera (INS-2 TransModeler)	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição <i>default</i> do parâmetro <i>critical headway</i>	21
Tabela 2 – Demanda de tráfego nas aproximações da INS-1	39
Tabela 3 – Demanda de tráfego nas aproximações da INS-2	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Áreas de Conflito
AMC	Autoria Municipal de Trânsito, Serviços Públicos e Cidadania
CTAFOR	Controle de Tráfego em Área de Fortaleza
EPAM	Erro Percentual Absoluto Médio
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
HCM	Highway Capacity Manual
IC	Intervalo de Confiança
INS	Interseção Não SemafORIZada
PTV	Planung Transport Verkehr
RP	Regras de Prioridade
SCOOT	Split Cycle Offset Optimisation Technique
TRB	Transportation Research Board
UHT	Upper Headway Threshold

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Problema e questões de pesquisa.....	12
1.2	Objetivos.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Modelagem da aceitação de brechas	14
2.2	Modelagem da aceitação de brechas no VISSIM.....	18
2.3	Modelagem da aceitação de brechas no TransModeler	21
2.4	Calibração de modelo de aceitação de brechas utilizando simuladores de tráfego	24
3	MÉTODO EMPREGADO.....	28
3.1	Desenvolvimento do método de estimação da brecha crítica.....	29
3.2	Calibração e validação do parâmetro	33
3.3	Comparação entre o método proposto e um mais convencional	34
4	APLICAÇÃO DO MÉTODO	36
4.1	Escolha das interseções.....	36
4.2	Planejamento, coleta e inserção de dados no modelo	38
4.3	Verificação, calibração e validação do modelo no VISSIM.....	43
4.3.1	<i>Verificação dos headways no fluxo principal</i>	<i>43</i>
4.3.2	<i>Calibração da brecha crítica</i>	<i>46</i>
4.3.3	<i>Validação do parâmetro sob condições de tráfego semelhantes</i>	<i>50</i>
4.3.4	<i>Validação do parâmetro sob condições de tráfego diferentes</i>	<i>53</i>
4.3.5	<i>Comparação entre o método proposto e o método convencional</i>	<i>56</i>
4.4	Verificação, calibração e validação do modelo no TransModeler	61
4.4.1	<i>Verificação dos headways no fluxo principal</i>	<i>61</i>
4.4.2	<i>Calibração do critical headway</i>	<i>64</i>
4.4.3	<i>Validação do parâmetro sob condições de tráfego semelhantes</i>	<i>67</i>
4.4.4	<i>Validação do parâmetro sob condições de tráfego diferentes</i>	<i>70</i>

<i>4.4.5</i>	<i>Comparação entre o método proposto e o método convencional.....</i>	<i>73</i>
5	CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	79
	REFERÊNCIAS.....	83
	APÊNDICE A – OUTROS RESULTADOS OBTIDOS NO VISSIM	86
	APÊNDICE B – OUTROS RESULTADOS OBTIDOS NO TRANSMODELER.....	91

1 INTRODUÇÃO

Nas áreas urbanas, principalmente naquelas de grande porte, problemas relacionados ao tráfego, tais como congestionamento e acidentes, estão presentes no dia a dia da população e em geral possuem tendência de se agravar conforme a malha viária se torna mais carregada, comprometendo assim a qualidade de vida dos indivíduos. Dessa forma, este é um assunto bastante importante para a gestão pública, dado que as tomadas de decisão com base no conhecimento dos fenômenos de transporte podem contribuir para evitar, eliminar ou, pelo menos, amenizar esses problemas.

Uma das principais abordagens para se realizar estudos em um sistema de transporte é por meio da modelagem do tráfego, cujo objetivo primordial no contexto urbano é representar a formação e a descarga das filas nas interseções, elemento responsável por boa parte das impedâncias experimentadas pelos usuários da malha viária. Para interseções não semaforizadas (INS), as filas nas aproximações secundárias dependem fortemente do comportamento de aceitação dos *headways* ou brechas (intervalos de tempo entre dois veículos consecutivos) da via principal pelos motoristas da via secundária. Tal processo de decisão varia com a percepção de cada motorista (GARBER; HOEL, 2015), com o tipo de conversão (BRILON; KOENIG; TROUTBECK, 1999; TRB, 2010; ELEFTERIADOU, 2014) e é a partir dele, juntamente com a demanda veicular na interseção e suas características físicas, que o comportamento da fila é modelado.

Na microssimulação de tráfego são representados o comportamento e as características de cada unidade veículo-indivíduo, com maior nível de detalhamento, visando modelar a interação entre os usuários e a infraestrutura da rede viária (incluindo os dispositivos de controle do tráfego) de forma a se aproximar satisfatoriamente do sistema em estudo. Para atingir esse objetivo, alguns dados devem ser coletados em campo (ex.: volumes e medidas de desempenho do tráfego) e vários parâmetros do modelo de simulação devem ser calibrados, como os relacionados à aceitação de brechas. Há uma variedade de pacotes computacionais com modelos microscópicos disponíveis no mercado, como o VISSIM, o TransModeler e o Aimsun.

O simulador microscópico VISSIM versão 9.0 (PTV, 2016) disponibiliza dois modelos de aceitação de brechas: o *conflict areas*, ou áreas de conflito (AC), cuja abordagem é mais complexa, com maior quantidade de parâmetros ajustáveis; e o *priority rules*, ou regras de prioridade (RP). No caso da microssimulação realizada pelo TransModeler versão 5.0 (CALIPER CORPORATION, 2018), há um único modelo comportamental para a aceitação

de brechas em INS; porém, há uma quantidade razoável de parâmetros interligados a esse modelo e o analista possui bastante liberdade para definir o comportamento dos motoristas e ainda incorporar variabilidade ao fenômeno através da especificação de distribuições discretas para alguns parâmetros. Independente do modelo adotado, a sua calibração é condição essencial para a estimação adequada das medidas de desempenho do tráfego, dado que a configuração *default* dos simuladores pode levar a uma representação do tráfego significativamente distinta do que ocorre no sistema real.

Geralmente a calibração de parâmetros dos modelos de microsimulação tem como medida-alvo (medida cujos erros entre os valores simulados e observados em campo são minimizados) a própria medida de desempenho do tráfego que se pretende estimar, como o tempo de viagem, o atraso veicular, o comprimento de fila ou a capacidade (LIU *et al.*, 2012; MARTIN-GASULLA; GARCÍA; LLORCA, 2017; LIDBE; HAINEN; JONES JR, 2016). Uma grande desvantagem deste procedimento de calibração é que estas medidas de desempenho podem ser bastante influenciadas por outras variáveis que não estão diretamente associadas com o processo de aceitação de brechas, como a própria demanda na via secundária e o espaçamento entre os veículos quando estão em fila. Dessa forma, se estes e outros fatores não estão bem retratados no simulador, os parâmetros do modelo de aceitação de brechas provavelmente não serão calibrados adequadamente, pois a calibração tentará compensar os erros de representação destes fatores por meio de valores irrealistas dos parâmetros.

1.1 Problema e questões de pesquisa

Diante da contextualização apresentada, a problemática deste tema de pesquisa consiste no efeito negativo das impedâncias originadas nos cruzamentos não semaforizados (ex.: formação de filas extensas e elevados tempos de espera na aproximação secundária), em particular os existentes nas malhas viárias urbanas como a de Fortaleza. Dado que a modelagem do tráfego utilizando simulação microscópica é atualmente uma das principais maneiras de análise de sistemas de transporte, incluindo modelos mais simples compostos apenas por um elemento viário como uma interseção, o problema em estudo está associado a como representar satisfatoriamente o tráfego em cruzamentos não semaforizados utilizando-se desta ferramenta, a fim de possibilitar uma boa estimativa do desempenho do tráfego para avaliação de cenários. Para este trabalho, as seguintes questões de pesquisa foram identificadas:

- a) Como estimar o parâmetro *brecha crítica* em interseções não semaforizadas com o uso da microssimulação?
- b) Qual é o efeito do tipo de conversão e das condições de tráfego sobre o comportamento de aceitação de brechas dos motoristas?
- c) Quais são as diferenças em se estimar a *brecha crítica* com uma medida-alvo de calibração que independe (ou depende pouco) de fatores externos ao processo de aceitação de brechas ou estimá-la com base numa medida de desempenho como o tamanho da fila?

1.2 Objetivos

De acordo com o que foi exposto, o objetivo principal deste trabalho é propor um método para a estimação do parâmetro *brecha crítica* em interseções não semaforizadas urbanas utilizando simulação microscópica de tráfego. Os objetivos específicos deste estudo são:

- a) Definir um método para estimar o parâmetro *brecha crítica* utilizando microssimulação de tráfego;
- b) Com o parâmetro calibrado, pretende-se compreender melhor o processo de aceitação de brechas em cruzamentos não semaforizados de Fortaleza, especialmente com relação ao efeito do tipo de conversão e do nível de demanda; e
- c) Comparar o método proposto com um método de calibração mais convencional, que se baseia em uma medida de desempenho da fila, para melhor avaliá-lo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Modelagem da aceitação de brechas

Na literatura não há um consenso sobre a utilização dos termos *headways* e *gaps* (brechas). A convenção mais comum define brecha como sendo o intervalo de tempo entre as passagens da extremidade traseira do veículo líder e da extremidade dianteira do veículo seguidor, enquanto para o *headway* geralmente toma-se como referência as extremidades dianteiras; porém, segundo Elefteriadou (2014), algumas referências definem brecha (*gap*) como o *headway* de tempo entre as chegadas de veículos consecutivos.

Há ainda o uso desses dois termos representando distâncias em vez de intervalos de tempo, porém nessa situação é mais comum explicitar a dimensão considerada, ou seja, utilizar termos como *headway de espaço* (*distance headway*) e *brecha de espaço* (ou, na maioria das vezes, *espaçamento*) (*distance gap*), podendo o mesmo ser feito quando refere-se a tempo – *headway de tempo* e *brecha de tempo* (TRB, 2010; GARBER; HOEL, 2015). A notação utilizada neste trabalho corresponde à convenção mais comum mencionada, ocultando-se a dimensão considerada quando se referir a intervalo de tempo.

O manual americano *Highway Capacity Manual* – HCM (TRB, 2010) adota o uso de *headways* em vez de brechas na análise de interseções não semaforizadas porque facilita a coleta dos dados, pois apenas os instantes de passagem da extremidade dianteira dos veículos precisam ser registrados. Com essa simplificação, os modelos do HCM2010 não consideram a influência direta da extensão dos veículos na tomada de decisão dos motoristas da aproximação secundária, o que pode resultar em uma quantidade superestimada do número de *headways* aceitáveis e, portanto, na superestimação da capacidade da aproximação, principalmente para maiores intensidades de fluxo conflitante (EHLERT; SCHNECK; CHANCHAREON, 2017).

Como a aceitação de brechas rege o comportamento das filas em aproximações secundárias e impacta diretamente na estimativa de medidas de desempenho e de capacidade da aproximação, a sua modelagem corresponde à principal etapa do esforço de representação do tráfego em uma INS. De acordo com Garber e Hoel (2015), o processo de aceitação de brechas varia com a percepção de cada motorista, e, segundo TRB (2010), Viti *et al.* (2013) e Elefteriadou (2014), também é influenciado por diversos fatores como as características dos usuários (ex.: gênero e idade), das vias (ex.: classificação funcional, ângulo de cruzamento, greide e visibilidade oferecida), dos veículos (ex.: dimensões e capacidade de aceleração), da

demanda (ex.: intensidade e padrão de chegada), do tipo de conflito, do tipo de viagem, do uso do solo e das condições meteorológicas, além da presença e intensidade da iluminação.

Em condições de tráfego de pequena a média intensidade, geralmente assume-se que o padrão de chegada dos veículos na via principal pode ser representado pela distribuição de Poisson, correspondendo à distribuição exponencial para os *headways*. De acordo com Troutbeck e Brilon (2001) e Garber e Hoel (2015), a função exponencial também pode ser ajustada para se considerar um *headway* mínimo (em torno de 1,0 s), incorporando assim a distância mínima de segurança entre os veículos.

Quando o tráfego é pouco intenso, os *headways* tendem a ser mais aleatórios, pois nessas condições os veículos trafegam a maior parte do tempo em fluxo livre e, portanto, há menos interações entre eles. Porém, quando o volume de tráfego se aproxima mais da capacidade da via, os *headways* tendem a ser aproximadamente constantes, já que os veículos seguem de maneira mais homogênea os outros que estão logo à sua frente (MAY, 1990). A distribuição dos *headways* também é influenciada pela presença de interseções semaforizadas no entorno do cruzamento em análise, pois nelas ocorre formação de pelotões e, portanto, violam a premissa de aleatoriedade comumente adotada para a chegada dos veículos na aproximação principal (KYTE; DIXON; BASAVARAJU, 2003; ROESS; PRASSAS; MCSHANE, 2004).

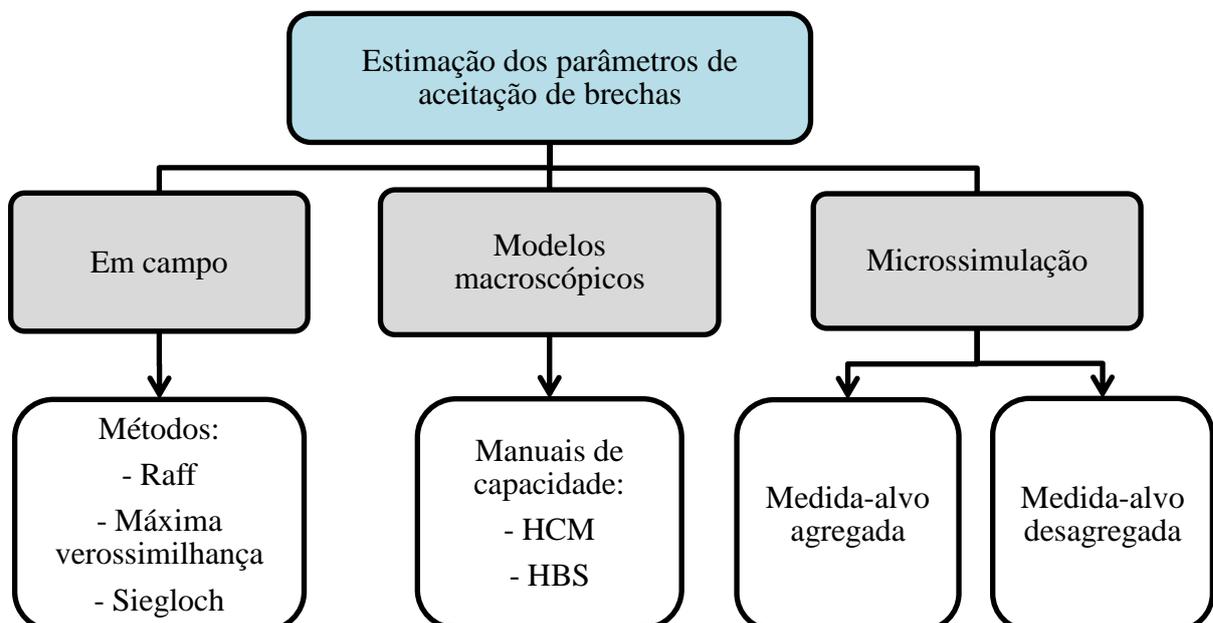
Os principais parâmetros associados à aceitação de brechas definidos na literatura são a brecha crítica, que representa o intervalo mínimo de tempo entre dois veículos consecutivos provenientes do fluxo principal considerado suficiente para um condutor da aproximação secundária completar a manobra desejada, e o tempo de *follow-up*, que é o intervalo de tempo adicional necessário para que outro veículo (consecutivo) da via secundária utilize a mesma brecha disponível (TROUTBECK; BRILON, 2001; TRB, 2010). Em cruzamentos não semaforizados, é comum se considerar duas propriedades para os motoristas: são *consistentes*, ou seja, eles realizam as mesmas decisões quanto à aceitação de brechas quando submetidos às mesmas condições; e constituem um grupo *homogêneo*, o que significa que qualquer subconjunto da população de condutores possui a mesma distribuição dos parâmetros brecha crítica e tempo de *follow-up*. Apesar dessas premissas não serem verdadeiras, assume-se que o comportamento dos motoristas seja melhor representado pela consistência do que pela completa inconsistência (TROUTBECK; BRILON, 2001).

Segundo o HCM (TRB, 2010), estudos têm mostrado que a brecha crítica de um indivíduo diminui ao longo do tempo de espera na aproximação secundária à medida que não encontram uma brecha suficiente para atravessar a interseção, pois os motoristas tendem a

ficar mais impacientes e acabam se submetendo a maiores riscos. Como os valores dos parâmetros de aceitação de brechas variam para cada indivíduo, em função do tempo, entre interseções, tipos de movimento de conversão e condições do tráfego, o processo de aceitação de brechas é considerado estocástico, sendo mais apropriado representar o comportamento da população de condutores através da distribuição dessas variáveis (BRILON; KOENIG; TROUTBECK, 1999), ou através de valores comuns a todos os motoristas, sejam eles fixos ou variáveis, que, apesar de ser uma simplificação, acredita-se que possa resultar numa boa representação do comportamento médio da fila na via secundária.

Há basicamente três maneiras de se estimar os valores dos parâmetros de aceitação de brechas, apresentadas no Fluxograma 1. A primeira consiste na estimativa desses parâmetros em campo ou de variáveis fortemente relacionadas com o conceito de brecha crítica e/ou tempo de *follow-up*. Um exemplo deste tipo de abordagem é o método proposto por Raff, que define a brecha crítica como sendo o intervalo de tempo tal que a quantidade de brechas aceitas com duração menor que ele é igual à de brechas rejeitadas com duração maior que ele (RAFF, 1950). Esse método foi utilizado por Ogallo e Jha (2014) para estimar a brecha crítica associada a conversões à esquerda não protegidas; por Sangole e Patil (2014) na estimativa da brecha crítica de um conjunto de veículos em três interseções em T não controladas, localizadas na Índia; e também no estudo de Vasconcelos *et al.* (2012) para estimativa da brecha crítica em uma rotatória com a finalidade de validar o método por eles proposto.

Fluxograma 1 – Abordagens para estimação dos parâmetros de aceitação de brechas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Há também outras formas de estimativa dos parâmetros de aceitação de brechas em campo, como por meio do método da máxima verossimilhança, que estima a brecha crítica iterativamente buscando a distribuição que maximiza a probabilidade de obtenção da amostra que foi observada em campo (TROUTBECK; BRILON, 2001). De acordo com Brilon, Koenig e Troutbeck (1999), Bunker (2014) e Troutbeck (2014), esse é um dos principais procedimentos para se estimar a brecha crítica em campo, fornecendo resultados mais confiáveis quando comparados com os obtidos na aplicação de outros métodos analisados nesses estudos. O método proposto por Siegloch (TROUTBECK; BRILON, 2001), que se utiliza de regressão linear para estimar tanto a brecha crítica quanto o tempo de *follow-up*, também é uma técnica cujos resultados obtidos foram, em média, confiáveis.

Modelos empíricos como os propostos pelo HCM2010 (TRB, 2010) e pelo manual alemão (*Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen – HBS*) constituem a segunda abordagem de estimação dos parâmetros de aceitação de brechas, nos quais o valor de brecha crítica e tempo de *follow-up* são função das características da interseção e da demanda, como geometria, greide, tipo de conversão analisado e porcentagem de veículos pesados. No caso do HCM2010, foi utilizado o método da máxima verossimilhança para estimação da brecha crítica, porém o que diferencia os seus modelos da forma de estimação em campo é que o método foi aplicado a diferentes grupos de interseções com a finalidade de estabelecer valores base e fatores de ajuste associados às suas características (KYTE *et al.*, 1996). Uma vantagem desses modelos é que eles vêm sendo calibrados e validados há bastante tempo, embora principalmente para a realidade norte-americana. Porém, além da ausência de esforços de validação e de adaptação para o contexto brasileiro, uma das desvantagens é que esses modelos se limitam a condições padrões que podem não representar satisfatoriamente as singularidades da INS em estudo (TARKO; TIAN, 2003; DEPIANTE; GALARRAGA, 2012), como a premissa de que os *headways* do fluxo principal seguem a distribuição de probabilidade exponencial.

A terceira forma se caracteriza pela simulação microscópica do tráfego, que se baseia principalmente nas características comportamentais dos indivíduos e permite modelar diversas configurações geométricas e operacionais. Nesse caso, os parâmetros de aceitação de brechas são estimados por calibração, ou seja, por tentativa e erro, tendo como objetivo a minimização dos erros de estimação de uma medida-alvo.

A calibração de modelos de microssimulação pode ser feita com base em medidas-alvo agregadas, como a extensão média de fila ou o atraso médio na aproximação

secundária, ou desagregadas, como a distribuição dos atrasos experimentados pelos condutores. Como já mencionado, as medidas-alvo utilizadas na calibração desses modelos são muitas vezes as próprias medidas de desempenho que se deseja estimar, mas que podem não ser adequadas no caso em que outros fatores que impactam essas medidas não são controlados, ou seja, quando estes não forem previamente ajustados.

2.2 Modelagem da aceitação de brechas no VISSIM

O VISSIM 9 é um simulador de tráfego amplamente conhecido e utilizado tanto na área acadêmica quanto na área técnica e, como dito anteriormente, apresenta dois modelos de aceitação de brechas: o *áreas de conflito* (AC), que dispõe de nove parâmetros para modelar a tomada de decisão dos motoristas; e o *regras de prioridade* (RP), que considera basicamente um parâmetro associado ao conceito de brecha crítica, um parâmetro mais relacionado à dimensão da área de conflito e outro que define o nível de agressividade dos condutores da aproximação secundária quando a INS se encontra obstruída.

O modelo AC incorpora um grau de colaboração dos condutores da via principal na não obstrução do cruzamento e também a desaceleração desses veículos, quando necessário para evitar colisões, frente aos conflitos com o fluxo secundário, corroborando as conclusões obtidas por Mohan e Chandra (2016). Apesar do modelo RP também possibilitar a representação do comportamento de não obstrução da interseção, apenas o modelo AC permite ao analista especificar a proporção dos motoristas da via principal que evitam bloqueá-la quando há congestionamento. Também somente o modelo AC incorpora a visibilidade nas aproximações do cruzamento, de tal maneira que a partir de determinada posição na aproximação os condutores possuem visão total da corrente de tráfego conflitante.

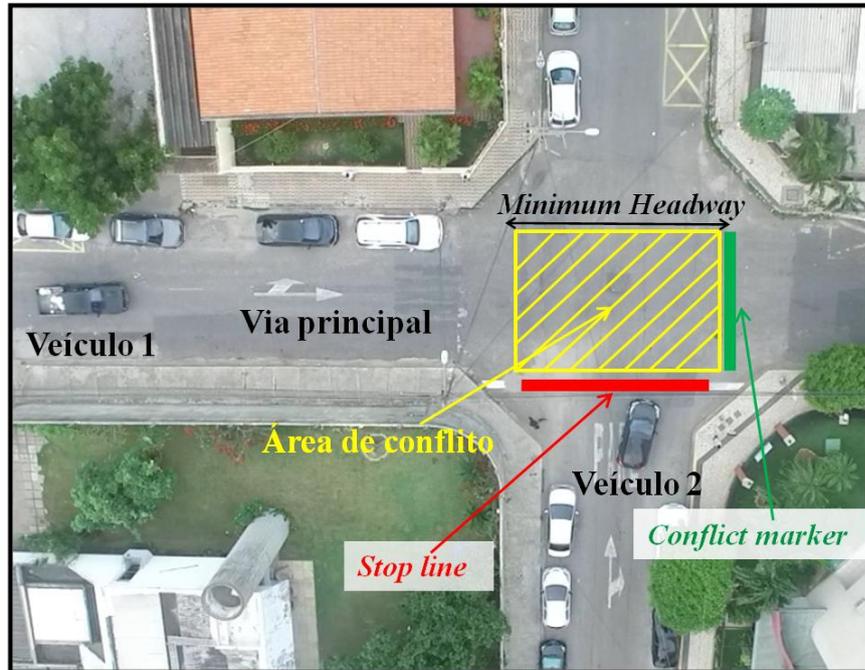
No modelo *regras de prioridade* a representação do processo de aceitação de brechas é mais simples, pois considera menos fatores na tomada de decisão dos motoristas; em compensação, sua simplicidade se reflete em uma menor quantidade de parâmetros a serem calibrados. Exceto em situações de “Dê a preferência”, esse modelo deve ser utilizado juntamente com um sinal de parada obrigatória “PARE”, pois caso contrário, em situações em que a brecha é suficientemente grande, os condutores da aproximação secundária irão atravessar a INS sem desacelerar, pois iniciarão a avaliação com bastante antecedência, como se tivessem plena visão do fluxo conflitante independente de sua posição em relação ao cruzamento.

Daqui em diante, como notação adotada neste estudo, a aproximação/via principal e os veículos provenientes dela serão representados pelo índice “1”, enquanto o índice “2” será atribuído à aproximação/via secundária e aos veículos que nela trafegam, como mostrado na Figura 1. Os atributos do modelo RP estão indicados na figura e/ou listados a seguir:

- a) *Links*, faixas de tráfego e classes de veículo para as quais as regras de prioridade definidas são válidas. Ou seja, é possível diferenciar a avaliação das brechas por movimento de conversão e tipo de veículo;
- b) *Conflict marker*: é a seção de referência para determinação da brecha disponível;
- c) *Stop line*: é a seção que define o local de parada dos veículos nas aproximações secundárias;
- d) *Minimum gap time*: é o mínimo intervalo de tempo, entre o *conflict marker* e o veículo mais próximo que está trafegando em direção a ele, para que a brecha seja aceita;
- e) *Minimum headway* (de espaço): é a mínima distância entre o *conflict marker* e o veículo da via principal a montante da INS para que seja permitida a passagem do veículo da aproximação secundária. Ou seja, esse parâmetro impede a entrada do veículo 2 na área de conflito quando ela estiver ocupada, portanto impacta basicamente em condições de congestionamento da via principal. Vale ressaltar que a zona de conflito associada a cada faixa de tráfego e movimento de conversão pode ser diferente, composta por apenas uma parte da interseção, e depende, principalmente para conversões destinadas à via principal, da agressividade do condutor durante a inserção na corrente conflitante;
- f) *Maximum speed*: é o limite de velocidade acima da qual os veículos da via principal não são considerados na avaliação do *headway* de espaço. Ou seja, mesmo se o veículo 1 estiver (parcialmente) dentro da área de conflito, o veículo 2 irá atravessar a interseção caso o veículo 1 esteja trafegando a uma velocidade maior que a definida pelo parâmetro e caso a brecha disponível seja maior que o *minimum gap time* (o que ocorre se a extremidade dianteira do veículo 1 já tiver atravessado o *conflict marker* ou a sua velocidade é relativamente baixa porém ainda superior ao *maximum speed*). O valor *default* desse parâmetro é de 180 km/h – não interferindo, portanto, na modelagem –, mas, de acordo com o manual do *software* (PTV, 2016), ele pode ser reduzido

quando se deseja representar um comportamento mais agressivo dos veículos 2's em se inserir na INS sob condições de congestionamento no fluxo principal e evitar filas muito maiores que as observadas em campo.

Figura 1 – Interseção não semaforizada modelada com o modelo RP do VISSIM



Fonte: Adaptada de PTV (2016).

Com base no que foi descrito acima, é possível perceber que o *minimum gap time* se assemelha bastante à definição da brecha crítica dos motoristas, pois o veículo 1 só deixa de interferir na decisão do condutor do veículo 2 quando esse passar completamente pelo *conflict marker*. O modelo AC possui dois parâmetros que representam folgas entre o veículo 2 e o veículo 1, que devem ser satisfeitas simultaneamente para que o veículo 2 decida realizar a manobra. Porém, apesar de relacionados com o conceito, esses parâmetros não representam a brecha crítica. Portanto, o modelo RP parece ser mais apropriado para estimar a brecha crítica, que é o parâmetro mais utilizado na literatura para se modelar o processo de aceitação de brechas. Vale ressaltar também que em nenhum dos dois modelos do VISSIM é considerado o aumento da impaciência dos condutores ao esperarem por uma brecha, ou seja, os valores dos parâmetros permanecem constantes ao longo da espera pela brecha aceitável.

2.3 Modelagem da aceitação de brechas no TransModeler

No simulador de tráfego TransModeler há apenas um modelo de aceitação de brechas para interseções não semaforizadas, cujo principal parâmetro é o *critical headway*, que, apesar da sua nomenclatura, não significa o mesmo que o *headway* crítico apresentado anteriormente, mas sim uma margem de segurança, em segundos, entre o veículo da aproximação secundária e o veículo da via principal. O usuário da aproximação secundária estima o tempo necessário para atravessar a interseção e o tempo para que o veículo da via principal alcance o início da área de conflito com base em suas posições, velocidades instantâneas e acelerações; se a diferença entre eles for superior ao *critical headway* a brecha é aceita, como ilustrado na Figura 2 (valor de 1,6 segundos). Dessa forma, esse parâmetro está fortemente relacionado à brecha crítica, porém seus conceitos são diferentes. O analista especifica uma distribuição discreta deste parâmetro, com diferentes valores e suas respectivas frequências relativas, incorporando assim a variabilidade do comportamento dos condutores; a média ponderada da distribuição *default*, apresentada na Tabela 1, é de aproximadamente 1,8 s para o movimento de seguir em frente e conversões à esquerda originadas em vias principais com duplo sentido de circulação (*crossing*) e de 1,6 s para as demais conversões provenientes da aproximação secundária (*merging*) em interseções urbanas.

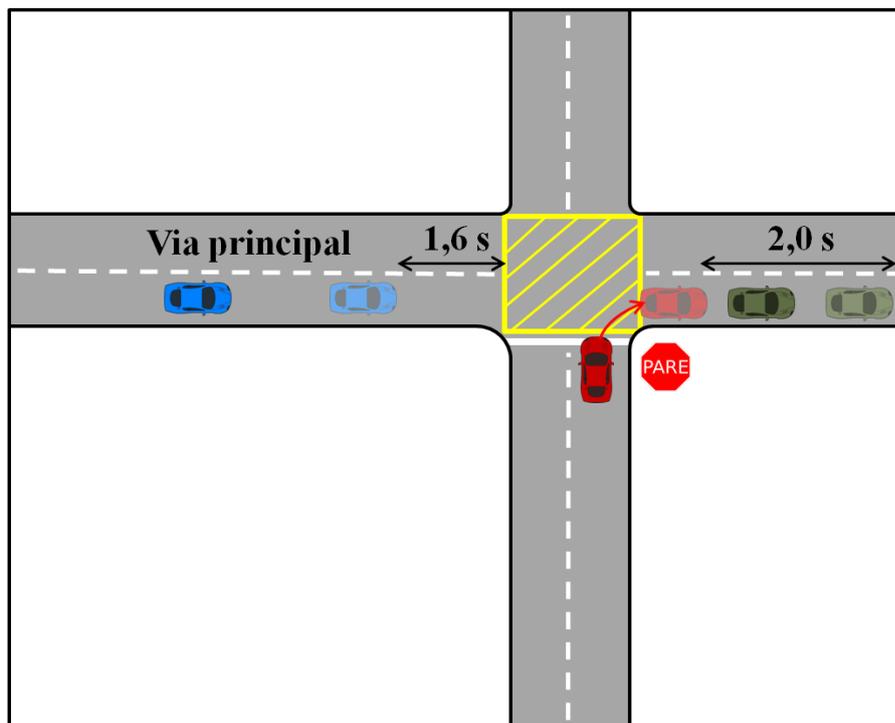
Tabela 1 – Distribuição *default* do parâmetro *critical headway*

Proporção da população	<i>Merging</i> em vias urbanas (s)	<i>Crossing</i> em vias urbanas (s)
20%	1,0	1,0
50%	1,5	1,7
20%	2,0	2,4
10%	2,5	3,0

Fonte: Adaptada de Caliper Corporation (2018).

Em caso de *merging*, quando o veículo da via secundária se insere no fluxo principal, a folga que deve ser mantida em relação ao veículo da via principal que já passou pela INS (veículo líder) é definida pelo parâmetro *following headway*, de forma que o condutor proveniente do fluxo secundário irá acelerar ou desacelerar para atingir o *headway* desejado durante a sua inserção na via principal. Tal parâmetro também se encontra na Figura 2 (2,0 s).

Figura 2 – Interseção não semaforizada modelada no TransModeler



Fonte: Elaborada pelo autor.

No modelo é considerada também uma redução linear do *critical headway* enquanto o veículo está à espera de uma brecha na primeira posição da fila; o valor inicial do parâmetro é aquele gerado pela distribuição discreta de probabilidade estabelecida e o valor mínimo (final) é calculado com base na taxa máxima de desaceleração que o motorista da aproximação principal pode aplicar sobre seu veículo para evitar a colisão, simulando uma entrada forçada do veículo da aproximação secundária devido ao grau de impaciência atingido após um determinado tempo de espera. Os instantes, em relação à chegada na primeira posição da fila, em que essa redução se inicia e termina também são parâmetros definidos pelo modelador e seus valores *default* são de 20 e 60 segundos, respectivamente.

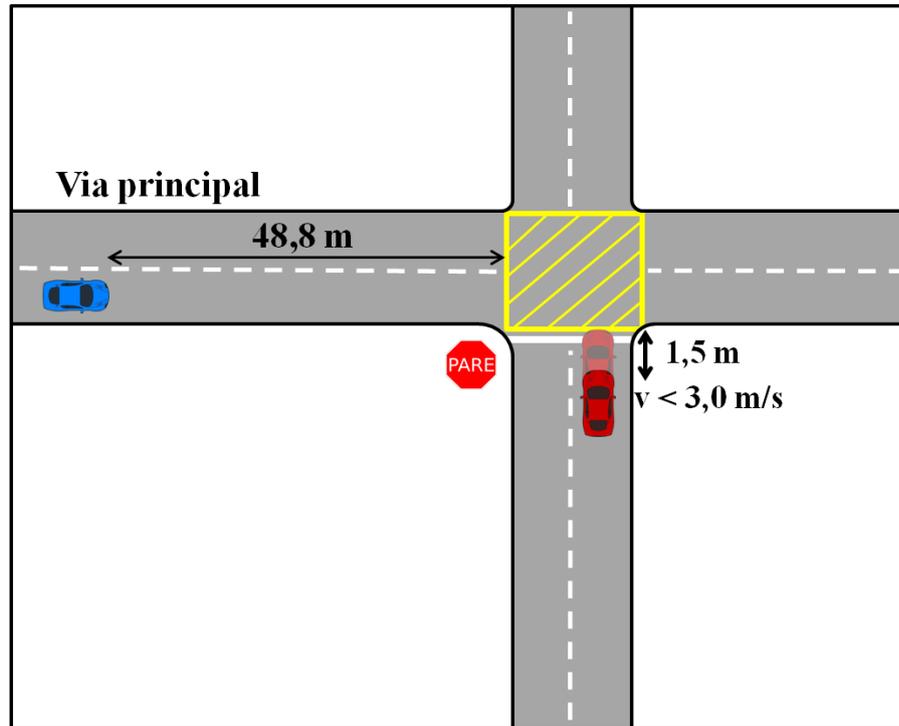
No modelo de aceitação de brechas disponível no TransModeler também existe um parâmetro que representa a distância em relação à interseção a partir da qual os motoristas da aproximação secundária começam a avaliar as brechas no fluxo conflitante, semelhante à distância de visibilidade presente no modelo *áreas de conflito* do VISSIM, permitindo que os veículos antecipem sua decisão e, se a brecha for aceita, entrem na interseção com uma velocidade considerável. Porém, este parâmetro é aplicado apenas em casos onde a parada não é obrigatória, como em rotatórias ou em cruzamentos controlados por sinal de “Dê preferência”.

Para incorporar a entrada forçada de alguns veículos do fluxo secundário na INS em condições de congestionamento na via principal, existem outros parâmetros que modelam a possibilidade do veículo 1 dar passagem ao veículo 2, reduzindo sua velocidade para permitir a inserção do veículo na corrente de tráfego. A probabilidade dessa colaboração ocorrer é estabelecida pelo analista, podendo o motorista proveniente da aproximação principal dar passagem a até 3 veículos de uma vez. Porém, uma condição necessária para que esse fenômeno aconteça é que a velocidade do veículo 1 seja menor que a de um limiar pré-definido, sendo portanto outro parâmetro ajustável. O modelador também pode estabelecer o tempo máximo que um veículo dá passagem a outros, o tempo máximo que um motorista irá esperar pela colaboração e o tempo necessário para que o condutor considere a escolha de outra rota para atingir seu destino.

Por fim, há um conjunto de parâmetros que definem o tempo mínimo de parada dos motoristas, antes de aceitar a primeira brecha avaliada, na presença da sinalização de parada obrigatória. Este tempo mínimo também é dado por uma distribuição discreta estabelecida pelo analista, sendo dependente da presença ou não de tráfego conflitante, já que a avaliação das brechas tende a ser mais rápida e segura quando não há veículos nas aproximações principais; as distribuições *default* variam de 0,5 a 1,5 e de 0,0 a 1,0 segundos, respectivamente, concentrando-se principalmente nos valores inferiores.

O tempo mínimo começa a ser contabilizado a partir do momento em que o veículo atinge simultaneamente uma velocidade inferior a 3 m/s e uma distância de 1,5 m da INS (ambos são parâmetros ajustáveis pelo modelador), permitindo assim a entrada dos veículos na área de conflito sem a necessidade de parar completamente. A verificação da presença ou não de fluxo conflitante ocorre dentro de uma distância de busca ao longo da aproximação principal, cujo valor *default* é de 48,8 m; se, no momento inicial de avaliação das brechas, houver algum veículo na via principal a uma distância em relação ao cruzamento igual ou inferior a essa, então a condição é de existência de tráfego conflitante, e de ausência caso contrário, como mostrado na Figura 3 (limite entra as duas condições).

Figura 3 – Demais parâmetros que definem o tempo mínimo de parada em INS (TransModeler)

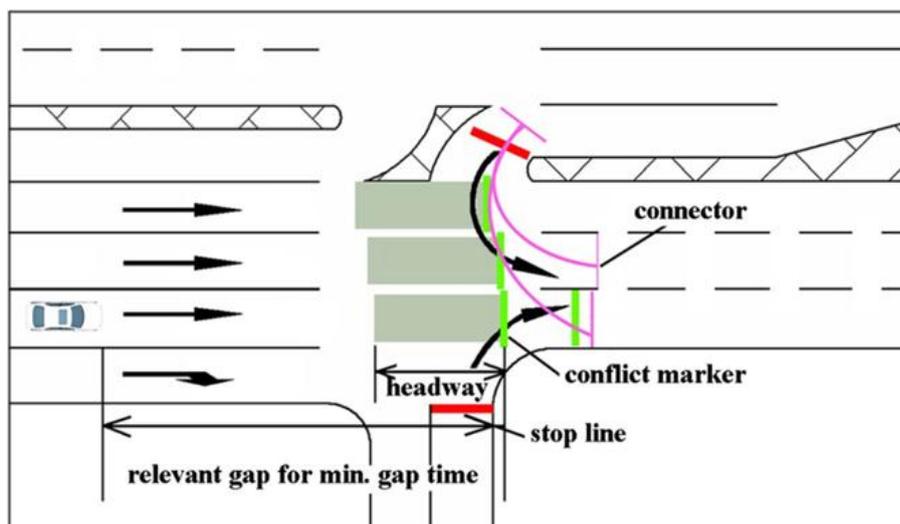


Fonte: Elaborada pelo autor.

2.4 Calibração de modelo de aceitação de brechas utilizando simuladores de tráfego

Na literatura há alguns estudos nos quais foram apresentados esforços de calibração de modelo de aceitação de brechas do VISSIM, como o de Liu *et al.* (2012), que calibraram o *minimum gap time* do modelo RP simultaneamente com os parâmetros velocidade média de conversão e proporção de escolha por cada faixa de destino dos veículos que realizam retorno em interseções não semaforizadas em vias separadas por canteiro central, como ilustrado na Figura 4. Foi utilizada como medida-alvo de calibração a capacidade do movimento de retorno, com um estudo de casos formado por 13 interseções. Na calibração do modelo foi obtido um erro percentual absoluto médio (EPAM) de 17,6% e 20,7%, para vias com 4 faixas (*minimum gap time* de 6,3 segundos obtido) e 6 faixas (*minimum gap time* de 5,1 s), respectivamente, na própria capacidade do movimento. Nota-se que o erro correspondente foi considerável mesmo utilizando, como medida-alvo, a medida que se desejava estimar.

Figura 4 – Exemplo de interseção não semaforizada do estudo de casos de Liu *et al.* (2012)



Fonte: Liu *et al.* (2012).

Martin-Gasulla, García e Llorca (2017) também utilizaram o modelo RP no seu estudo e calibraram simultaneamente a posição das *stop lines* e dos *conflict markers*, extensão de área de redução de velocidade, condição dinâmica da fila formada, *number of observed vehicles* e *look ahead distance* (estes últimos dois pertencem ao modelo de *car-following*) com base no tamanho médio da fila nas aproximações para microssimular o tráfego de uma faixa em rotatórias localizadas na Espanha. A brecha crítica foi estimada utilizando as filmagens de campo e diversos métodos de estimativa e de amostragens diferentes, resultando em valores de 2,6 a 4,7 segundos, que foram adotados para o *minimum gap time* a fim de se estimar a capacidade de uma aproximação da rotatória. O modelo calibrado forneceu melhores estimativas de capacidade ao compará-lo com diversos modelos analíticos avaliados, mas não foi apresentada nenhuma medida de erro para essa variável (apenas ilustrações gráficas).

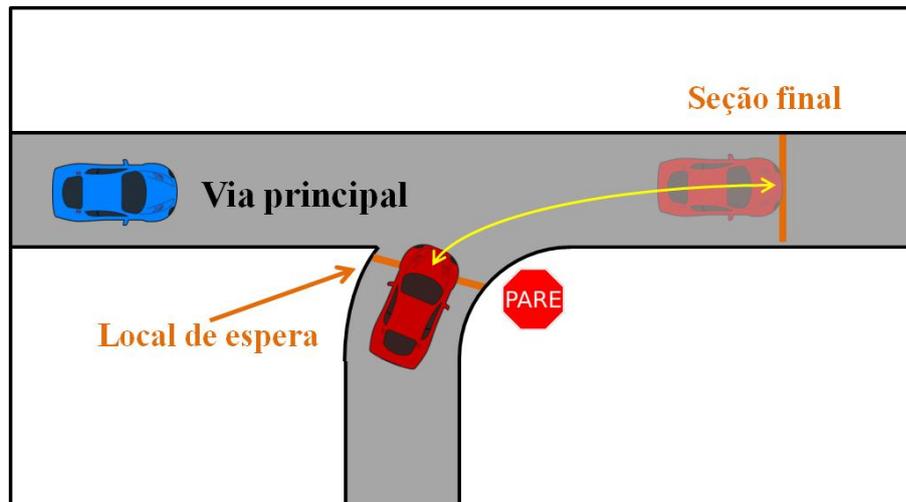
Uma das críticas aos dois estudos citados acima é que as calibrações simultâneas podem resultar em valores irrealistas dos parâmetros, pois diversas combinações diferentes podem corresponder a baixos erros de ajuste. Já no trabalho de Li *et al.* (2013) foi proposta uma calibração para a modelagem de rotatórias com o modelo RP do VISSIM baseada na brecha crítica e no tempo de *follow-up* estimados pelo método da máxima verossimilhança a partir das características das brechas aceitas e rejeitadas para cada veículo que entra na rotatória. Porém, uma das dificuldades nesse método de calibração, principalmente quando há um grande percentual de brechas aceitas na primeira oportunidade (*lag*), consiste em como determinar o momento – tanto em campo quanto no modelo – no qual o motorista da secundária inicia a avaliação das brechas, o que impacta bastante na brecha efetiva disponível

(MARTIN-GASULLA; GARCÍA; LLORCA, 2017). O estudo de caso escolhido consiste em uma aproximação congestionada de uma rotatória localizada em De Pere, Wisconsin, EUA. Os autores concluíram que o *minimum gap time* influencia apenas a brecha crítica, o que os levaram a recomendar o ajuste desse parâmetro para calibrar a aceitação de brechas e a desenvolver uma função que relaciona ambas as variáveis. Como o valor da brecha crítica estimado em campo foi usado como medida-alvo, foi utilizada a função desenvolvida para se obter o valor do parâmetro. A validação do modelo se deu pela comparação da nuvem de capacidade de uma faixa da rotatória obtida pelo modelo calibrado com a nuvem dos dados coletados em campo, que foi satisfatória e correspondeu a uma raiz do erro quadrático médio igual a 116 carros de passeio por hora por faixa.

Uma forma de se evitar (ou amenizar) o impacto de outras variáveis que não estão diretamente relacionadas ao fenômeno em estudo na calibração dos parâmetros do modelo, efeito este presente nos métodos convencionais, consiste em usar medidas-alvo que tentem isolar a influência de fatores externos. No caso de INS, trata-se de medida que depende fortemente da brecha crítica e que não seja influenciada por outros fatores, ou dependa pouco deles.

Uma busca por esse tipo de calibração foi realizada por Viti *et al.* (2013), que calibraram o *minimum gap time* do modelo RP utilizando o tempo de viagem necessário para o veículo da secundária se inserir na via principal de cruzamentos em forma de T, mensurado a partir da posição onde o veículo espera por uma brecha até uma seção a jusante localizada longe o suficiente para a fase de aceleração ser completada, como mostrado na Figura 5. Porém, vale ressaltar que, apesar dessa medida-alvo não depender fortemente da demanda da via secundária, ela possui a desvantagem de depender dos perfis de aceleração dos veículos. Ainda no estudo de Viti *et al.* (2013), foram ajustadas algumas funções que relacionam o *minimum gap time* com a demanda da via principal. Os valores obtidos na calibração do parâmetro variaram de 2,6 a 5,3 segundos para diferentes condições de tráfego em 5 interseções localizadas na Lovaina, Bélgica. Os resultados obtidos pelo modelo exponencial proposto pelos autores foram melhores que os fornecidos por diferentes modelos (funções mencionadas acima) avaliados.

Figura 5 – Cruzamento não semaforizado em forma de T do estudo de casos de Viti *et al.* (2013)



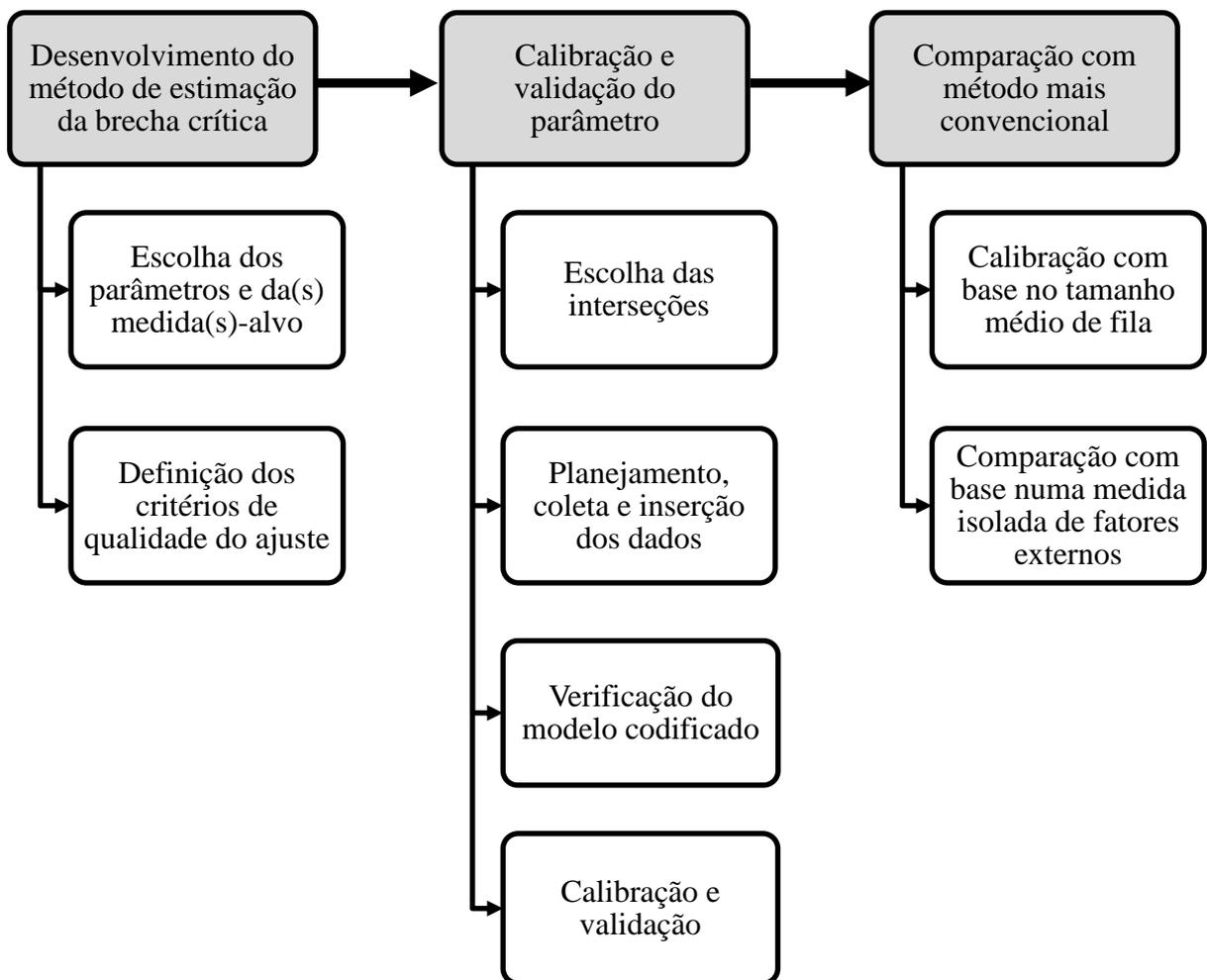
Fonte: Adaptada de Viti *et al.* (2013).

Na revisão da literatura não foram encontradas publicações com método de calibração do modelo de aceitação de brechas *áreas de conflito* do VISSIM nem do modelo do TransModeler para interseções não semaforizadas.

3 MÉTODO EMPREGADO

O método utilizado nesta pesquisa será constituído de três fases, como apresentado no Fluxograma 2 e nas subseções a seguir. Na aplicação do método foram utilizados o TransModeler e o modelo RP do microssimulador VISSIM, pois, além de ser mais simples, este modelo RP apresenta os principais elementos necessários para a modelagem do tráfego em interseções urbanas não semaforizadas típicas, onde os condutores da aproximação secundária precisam se aproximar bastante do cruzamento para conseguirem avaliar as brechas no fluxo conflitante, anulando assim os benefícios em se utilizar o AC para representar os efeitos de distâncias significativas de visibilidade. Além disso, o parâmetro *minimum gap time* representa a brecha crítica, o que talvez seja o principal motivo pelo qual são encontrados na literatura apenas trabalhos de calibração utilizando o modelo RP.

Fluxograma 2 – Método empregado



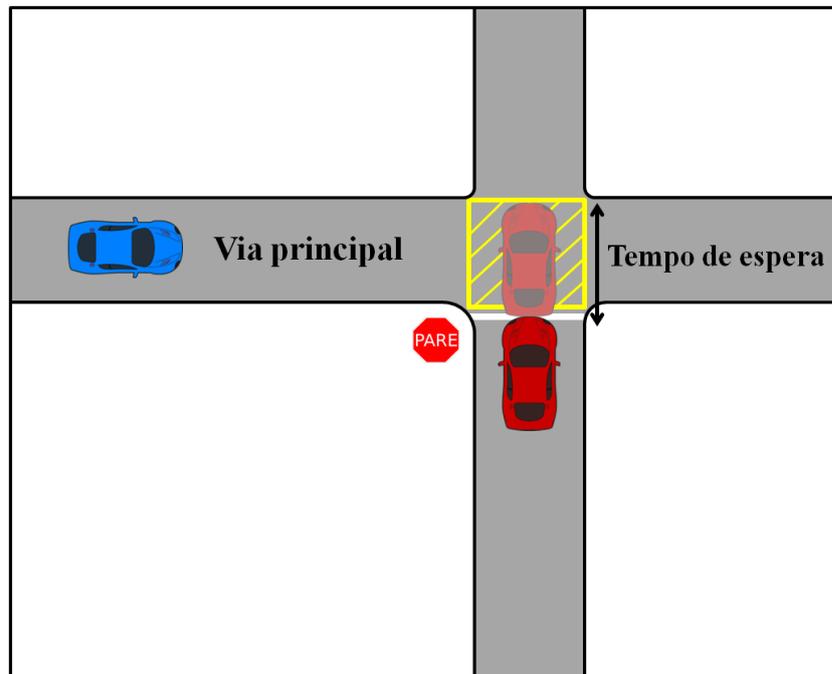
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Desenvolvimento do método de estimação da brecha crítica

A primeira fase teve como principal objetivo *estabelecer a estratégia de estimação* da brecha crítica. Iniciou-se com a seleção do(s) parâmetro(s) a ser(em) ajustado(s): como mencionado, tem-se o *minimum gap time* como o principal do modelo RP, enquanto os demais parâmetros deste modelo são importantes apenas em casos de congestionamento na via principal próximo à interseção e não se relacionam com o conceito de brecha crítica; para o modelo do TransModeler, foi ajustado apenas o *critical headway*, que é o parâmetro mais relacionado ao conceito de brecha crítica, enquanto os demais parâmetros foram mantidos em seus valores *default*. Posteriormente, foi escolhida a medida-alvo de calibração de forma a minimizar o viés da estimativa da brecha crítica, ou seja, que isolasse os efeitos de outros fatores, e cuja coleta em campo fosse viável. Em seguida, foram definidos os critérios para avaliar a qualidade do ajuste para a calibração e validação do modelo.

A medida-alvo proposta neste trabalho para se calibrar o *minimum gap time* e o *critical headway* consiste basicamente no tempo de espera do veículo enquanto avalia as brechas do fluxo principal, ou seja, o tempo de espera do veículo na primeira posição da fila, doravante denominada apenas como “tempo de espera”. O instante inicial do intervalo de tempo foi determinado pela passagem da extremidade dianteira do veículo 2 por uma seção de referência localizada na aproximação secundária e o instante final foi associado à passagem da extremidade traseira dele pela mesma seção, representado na Figura 6, incluindo, portanto, o tempo que o veículo leva para percorrer seu próprio comprimento a fim de evitar a subjetividade associada à percepção de velocidade que estaria presente se o observador tivesse que identificar o período de tempo em que cada veículo se encontra parado. Esta medida-alvo difere da utilizada por Viti *et al.* (2013) principalmente porque diminui a influência da aceleração dos veículos na estimativa da brecha crítica, sendo esta afetada basicamente apenas pelo parâmetro a ser calibrado, o que é desejável.

Figura 6 – Medida-alvo tempo de espera adotada neste trabalho

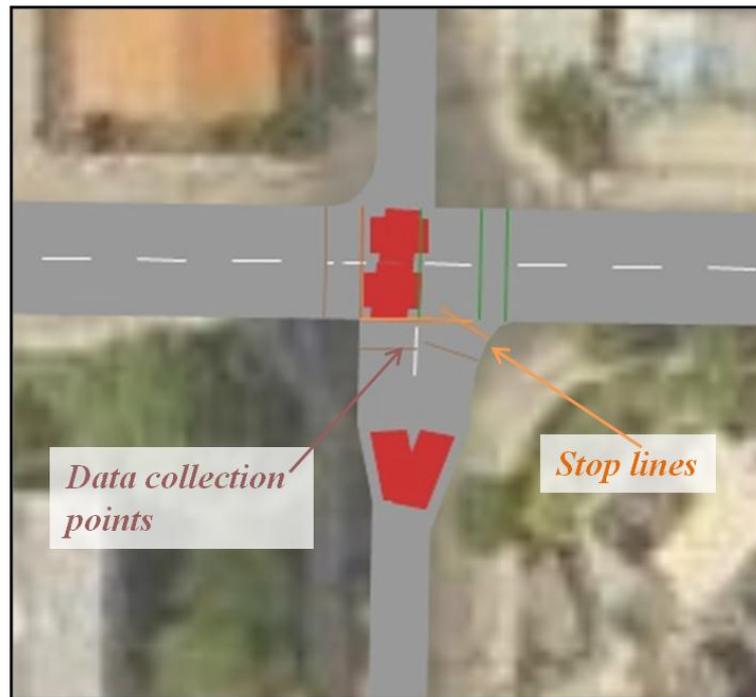


Fonte: Elaborada pelo autor.

A seção tomada como referência para as medições do tempo de espera em campo foi atribuída à faixa de retenção, pois a sua marcação no pavimento facilita a identificação dos instantes que definem o intervalo a ser registrado. No caso dos veículos que pararam a montante dela, que foram a minoria, considerou-se como seção de referência aproximadamente aquela na qual a velocidade nula foi atingida.

No modelo, a localização da seção de referência para obtenção dos dados simulados de tempo de espera (ferramenta *data collection points* do VISSIM e os sensores/detectores do TransModeler) foi escolhida de maneira que os veículos da aproximação secundária, ao avaliarem as brechas, parem sobre ela. Portanto, esta seção não poderia coincidir com a faixa de retenção (*stop line*) do modelo porque os veículos param a montante dela. Em contrapartida, a seção não poderia ser posta muito distante da faixa de retenção porque assim o tempo de espera começaria a ser contabilizado precocemente. Na Figura 7 é indicada a posição adotada para os *data collection points* e as *stop lines* na aproximação secundária de uma das interseções modeladas no VISSIM.

Figura 7 – Localização dos *data collection points* e dos *stop signs/lines*



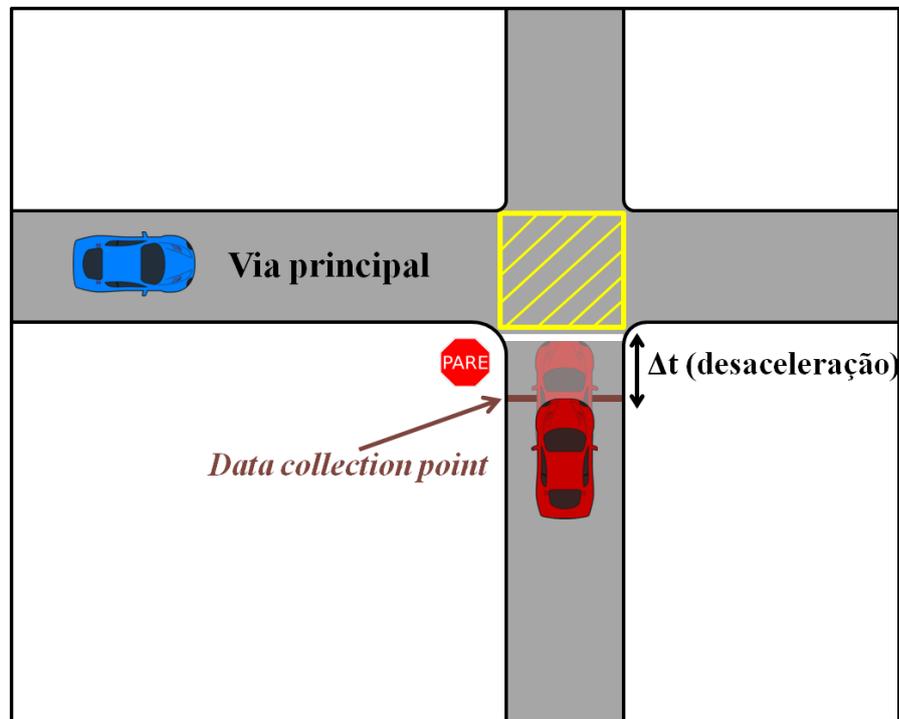
Fonte: Elaborada pelo autor.

Foi realizado um ajuste nos tempos de espera modelados com a finalidade de descontar parte do tempo de desaceleração dos veículos 2's, representado na Figura 8, pois foi identificado que no simulador esse processo de desaceleração ocorre de forma mais lenta, o que se refletiu em valores maiores dos tempos de espera até mesmo no caso em que os veículos pararam só momentaneamente. O valor do ajuste foi estimado de forma que, ao subtraí-lo dos dados simulados, a diferença absoluta entre as médias da medida-alvo obtida em campo e no modelo fosse mínima, considerando somente os veículos que pararam pelo tempo mínimo e aceitaram a primeira brecha disponível, correspondendo assim a uma situação que depende exclusivamente de fatores externos ao processo de aceitação de brechas, como a desaceleração e a localização da seção de referência.

As amostras (de campo e simulada) com as observações de tempos de espera correspondentes à situação de parada momentânea foram definidas através da visualização das filmagens de campo e dos resultados da simulação obtidos com o cenário de calibração modificado apenas pela ausência de fluxo conflitante (fluxo da via principal), desconsiderando os que foram agressivos a ponto de entrar na área de conflito com velocidade incompatível com uma parada. Em seguida, estimou-se o valor do ajuste com base na diferença entre as médias dessas duas amostras, para cada movimento de conversão. Aplicando-se esta correção a todas as observações simuladas, elas se tornam equiparáveis às

coletadas em campo, evitando assim a superestimação devido ao tempo excessivo de desaceleração dos veículos 2's contabilizado em forma de tempo de espera.

Figura 8 – Tempo de desaceleração contabilizado como tempo de espera antes do ajuste



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foi utilizado o teste de aderência χ^2 , com nível de significância de 5%, na comparação entre as distribuições observada em campo e modelada dos *headways* do fluxo principal, para a verificação do padrão de chegada dos veículos, e dos tempos de espera, nas fases de calibração e de validação do modelo. Isto significa que a calibração não se baseou apenas em valores médios da medida-alvo, mas também nas distribuições de frequências.

Um importante contraponto ao que é comumente encontrado na literatura, onde no cômputo da estatística χ^2 as frequências da distribuição dos dados coletados em campo são consideradas como as frequências esperadas (JIE *et al.*, 2013; LEE, 2008), é que neste trabalho foram utilizadas as frequências modeladas como as frequências esperadas (ALEX; ISAAC, 2014), pois o teste de aderência deve verificar se os dados observados em campo podem ser considerados uma amostra da distribuição de probabilidade da variável gerada pelo modelo de simulação. O mesmo ocorre quando se avalia, por exemplo, se uma variável pode ser bem representada por uma distribuição de probabilidade: tomam-se as frequências segundo o modelo de probabilidade como as frequências esperadas, e não o contrário. Além disso, tratar as frequências da distribuição simulada como frequências esperadas permite obter

quantas observações forem desejadas a um menor custo (comparando-se com o esforço para se aumentar a amostra de campo), aumentando assim a probabilidade das frequências esperadas serem representativas da população definida pelo modelo.

A calibração e a validação do modelo foram baseadas também na estimativa da diferença entre as médias dos tempos de espera simulados e observados em campo, sendo a validação apoiada pela estimação intervalar dessa diferença, com grau de confiança de 95%.

3.2 Calibração e validação do parâmetro

A segunda fase do método foi a execução da *calibração e validação do modelo*. Como primeiro passo, foram selecionadas as INS analisadas, considerando características físicas e operacionais como visibilidade nas aproximações, intensidade do tráfego e presença de semáforos nas proximidades, buscando condições que não comprometessem a análise (ex.: visibilidade bastante limitada devido a veículos estacionados muito próximo ao cruzamento) e que permitissem uma boa compreensão do processo de aceitação de brechas (ex.: intensidade de tráfego pelo menos moderada nas aproximações e sem muita formação de pelotões de veículos na via principal, ou seja, padrão de chegada com caráter mais aleatório).

Em seguida, foram definidos quais dados seriam necessários e como seriam coletados e inseridos no modelo, como os dados de demanda, da(s) medida(s)-alvo e da infraestrutura. Metade do período de observação foi utilizado na calibração e a outra metade para validação do modelo, sob condições de tráfego semelhantes; além disso, foi utilizado outro período de filmagem para validação da brecha crítica estimada sob condição de tráfego significativamente diferente.

Na etapa de verificação do modelo, o objetivo é identificar e corrigir, se houver, erros perceptíveis de codificação e comportamentos inadequados na simulação, como demanda de tráfego, velocidade dos veículos e mudanças de faixa na via secundária nas proximidades da INS. Vale salientar a importância de se comparar as distribuições de frequência modelada no simulador e observada em campo dos *headways* da via principal, já que a aceitação de brechas é bastante influenciada pelo padrão de chegada dos veículos do fluxo principal (KYTE; DIXON; BASAVARAJU, 2003; TRB, 2010; ELEFTERIADOU, 2014).

Na comparação entre os valores simulados e os observados para validação do modelo, propõe-se o uso de intervalos de confiança (IC) em vez de testes de hipóteses de igualdade das médias, pois o IC além de oferecer o resultado do referido teste de hipótese –

bastando verificar se o zero pertence ao intervalo $-$, ele também oferece uma estimativa intervalar para a diferença; ou seja, além da significância estatística, ele apresenta também a significância prática. O procedimento de calibração e validação foi aplicado separadamente para cada movimento proveniente da aproximação secundária, pois o tipo de conversão é um dos fatores que impactam no processo de aceitação de brechas (BRILON; KOENIG; TROUTBECK, 1999; TRB, 2010; ELEFTERIADOU, 2014).

3.3 Comparação entre o método proposto e um mais convencional

Por fim, foi realizada a comparação entre o método proposto para a estimação da brecha crítica e um método mais convencional de calibração de parâmetros de microssimuladores, em que a medida-alvo é a própria medida de desempenho do tráfego que se deseja estimar, como tamanho médio de fila ou atraso veicular. Para isso, foi coletada uma amostra de tamanho de fila com observações registradas a cada 15 segundos, tanto em campo quanto no modelo.

Os tempos de espera foram adotados nessa comparação devido à sua forte dependência com o parâmetro brecha crítica que se deseja estimar, mesmo sendo essa a própria medida-alvo do método proposto; o intuito aqui, portanto, é mensurar o nível da suposta imprecisão na representação do processo de aceitação de brechas realizada pelo modelo calibrado com base no tamanho médio da fila. Neste caso, foi considerado o mesmo valor do parâmetro para todos os movimentos de conversão originados na aproximação secundária, pois, além da dificuldade (ou impossibilidade) de isolar o efeito da brecha crítica de cada movimento sobre esta medida-alvo, há diversas combinações de valores do parâmetro capazes de fornecer a mesma extensão média de fila.

Vale ressaltar também a dificuldade de se identificar quando o veículo se encontra em fila. Em campo, a observação foi feita com base na percepção do observador quanto à velocidade do veículo e à proximidade em relação à extremidade final da fila. No modelo, a avaliação foi realizada de forma objetiva: no *default* do VISSIM, o veículo passa a fazer parte da fila quando atinge velocidade abaixo de 5 km/h e deixa de fazer parte dela quando atinge velocidade acima de 10 km/h, enquanto no TransModeler esses limites de velocidade são 6 km/h e 11 km/h, respectivamente. Portanto, a dificuldade de se medir tamanho de fila pode ser considerada como outra desvantagem dessa medida-alvo quando comparada com o tempo de espera.

Para o tratamento dos dados, foi desenvolvida uma rotina computacional em linguagem de programação *Python*, que possui fácil acesso e manipulação aos objetos e funções do simulador VISSIM por meio de interface *COM*. No caso do TransModeler, também foi necessário elaborar um pequeno código computacional na interface de programação do *software* para extrair os dados brutos dos sensores conforme desejado.

4 APLICAÇÃO DO MÉTODO

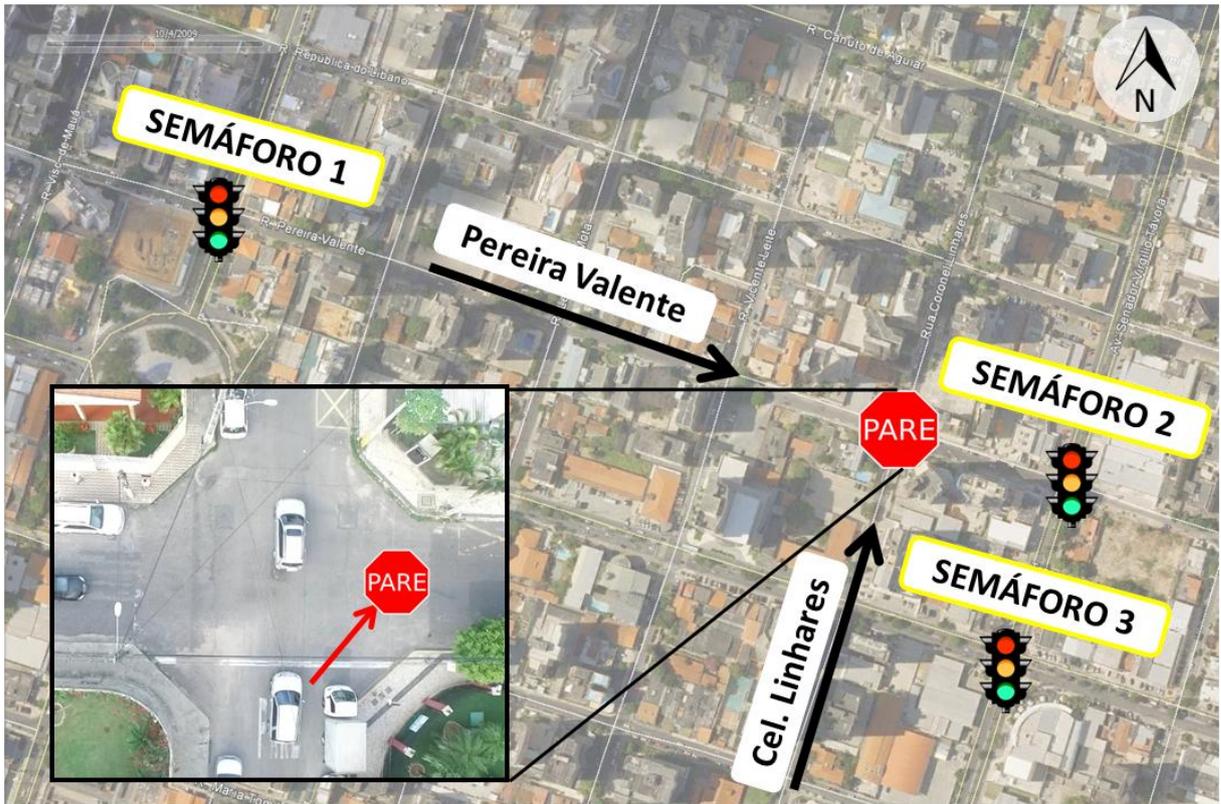
A seguir são apresentados os detalhes da aplicação do método e dos resultados encontrados para as duas interseções analisadas.

4.1 Escolha das interseções

Como mencionado, uma das características que foram levadas em consideração na escolha das interseções do estudo de casos é a presença de semáforos no entorno da INS, mais particularmente a montante da aproximação principal, pois a chegada em pelotões no fluxo principal faria com que os motoristas da secundária se inserissem no cruzamento somente após a passagem de todo o grupo de veículos e, portanto, dependeria pouco da brecha crítica dos condutores. Dessa forma, utilizou-se o banco de dados que contém a localização dos semáforos de Fortaleza como referência, onde foram identificadas algumas áreas da cidade que possuem algumas interseções que se enquadram nesse critério.

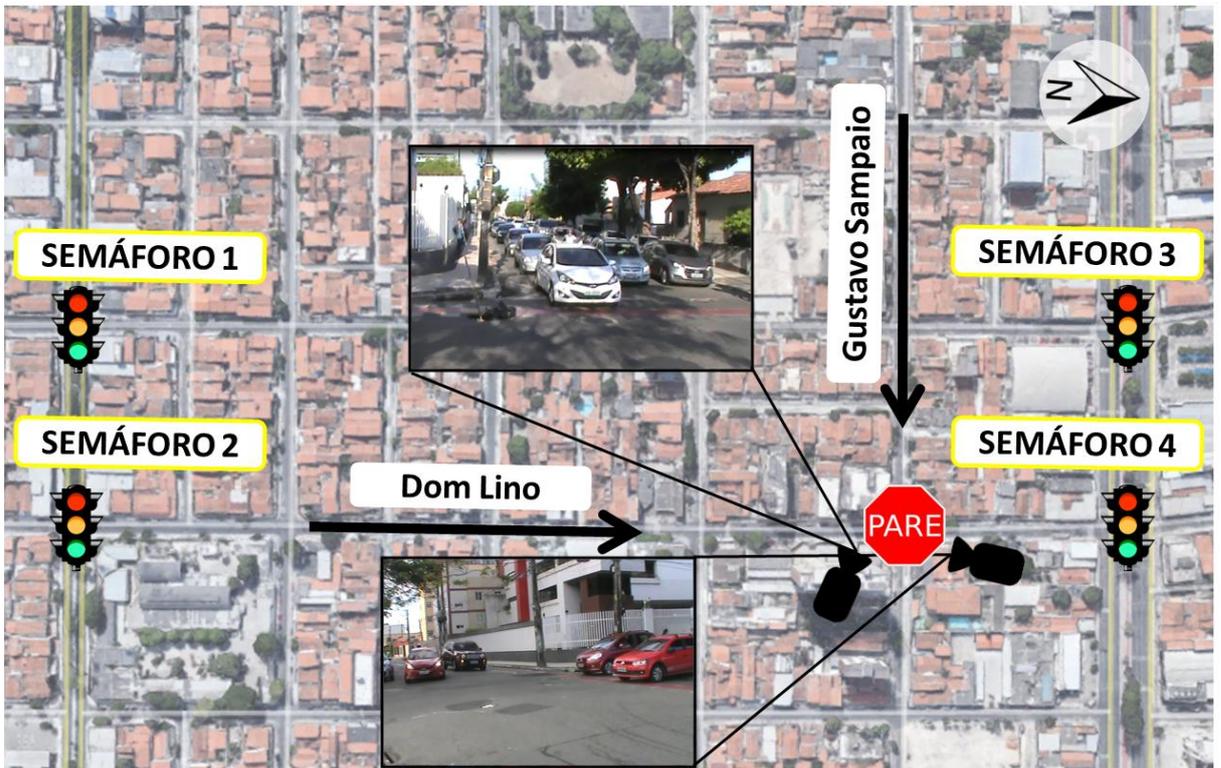
Após visitar alguns cruzamentos nessas localidades, foram selecionadas as interseções entre as ruas Pereira Valente (via principal) e Coronel Linhares (INS-1) e entre as ruas Dom Lino (via principal) e Gustavo Sampaio (INS-2) com base principalmente na demanda de tráfego e na visibilidade fornecida aos motoristas, de forma a melhor conduzir a análise da aceitação de brechas. Todas as quatro vias possuem sentido único de circulação, e seus cruzamentos estão indicados nas Figura 9 e Figura 10 pelo sinal de “PARE”. Nessas figuras, também são apresentados os semáforos mais próximos da INS em análise.

Figura 9 – INS-1 do estudo de casos (Pereira Valente x Cel. Linhares)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 10 – INS-2 do estudo de casos (Dom Lino x Gustavo Sampaio)



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Planejamento, coleta e inserção de dados no modelo

De acordo com o método de calibração e validação proposto nesta pesquisa, foi necessário coletar em campo dados das variáveis *headways* entre os veículos da via principal, os tempos de espera do primeiro veículo na fila e os volumes direcionais nas duas aproximações. Na INS-1, o tráfego foi filmado utilizando-se um *drone* do modelo Phantom 3 com estabilizador triaxial, em dois dias (18 de janeiro e 01 de março de 2016, numa segunda e terça-feira, respectivamente, entre 16:15h e 16:45h), totalizando aproximadamente 1 hora de vídeo, e por meio de câmeras, em um terceiro dia (25 de maio de 2017, numa quinta-feira, entre 16:15h e 17:15h), durante 1 hora – porém, apenas 30 minutos com intensidade de tráfego semelhante ao observado no período dos outros dois dias foram utilizados. Metade das 1,5 h de coleta foi utilizada na fase de calibração e a outra metade na validação do modelo sob intensidades de tráfego semelhantes.

Por fim, houve um quarto dia (27 de março de 2018, numa terça-feira, entre 16:20h e 18:10h) de filmagem do tráfego nesse cruzamento, durante aproximadamente 2 horas, destinado principalmente para a validação do parâmetro sob intensidade de tráfego diferente da observada no cenário de calibração (validação 2). Porém, os 30 minutos iniciais, que possuem características de tráfego semelhantes às observadas nos outros três dias, foram usados para aumentar o tamanho das amostras de calibração e validação sob condições semelhantes.

Os volumes direcionais e classificatórios observados nas duas aproximações da INS-1 são mostrados na Tabela 2, onde é possível perceber que os conjuntos de dados possuem características semelhantes, com uma diferença um pouco maior no percentual de veículos de médio ou grande porte e principalmente no fluxo veicular total da aproximação principal no cenário de *validação 2*, correspondendo a um acréscimo de 18% e de 29% em relação aos cenários de *calibração* e *validação*, respectivamente. Vale ressaltar que foi necessário desconsiderar alguns curtos intervalos de tempo em que a INS-1 ficou obstruída pela fila da rua Pereira Valente devido tanto à presença do semáforo 2 quanto à redução da capacidade dessa aproximação causada pela presença de carros-forte parados por alguns minutos durante o período de coleta, pois tal evento não foi representado na simulação.

Tabela 2 – Demanda de tráfego nas aproximações da INS-1

Etapa	Variável	Aproximação principal		Aproximação secundária
		Total, exceto motos	Motos	Total, exceto motos
CALIBRAÇÃO	Fluxo (veíc/h)	490	67	399
	Proporção de conversão	20%	15%	36%
	Proporção de caminhões pequenos ou vans	0,5%	—	2,7%
VALIDAÇÃO	Fluxo (veíc/h)	545	61	359
	Proporção de conversão	25%	19%	32%
	Proporção de caminhões pequenos ou vans	1,6%	—	1,5%
VALIDAÇÃO 2	Fluxo (veíc/h)	664	52	376
	Proporção de conversão	19%	16%	34%
	Proporção de caminhões pequenos ou vans	0,7%	—	1,2%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Já na INS-2, foram utilizadas câmeras para realizar as filmagens nos dias 12 de setembro e 19 de outubro de 2017 (terça e quinta-feira, respectivamente), aproximadamente de 07h às 08h, sendo um dia utilizado para calibração e um para a validação, e no dia 17 de abril de 2018 (terça-feira), de 15h às 16:30h, para validação do modelo com outro nível de demanda (validação 2). Os fluxos direcionais e classificatórios coletados nas duas aproximações desse cruzamento são apresentados na Tabela 3. Nota-se, no horário de 07h às 08h, um fluxo veicular bastante elevado para uma interseção não semaforizada, o que se reflete em filas extensas na aproximação secundária; no caso do período da tarde, a intensidade do tráfego é moderada. Diferente da INS-1, há linha de ônibus que circula por esse cruzamento, porém apenas uma: 108 – Santa Maria/Bairro Ellery, que trafega pela Gustavo Sampaio (via secundária). Foi também na aproximação secundária onde surgiu uma quantidade maior de veículos pesados, em torno de 2,6% (não considerando as motos no total de referência), sendo a mesma proporção obtida na via principal para o turno da tarde.

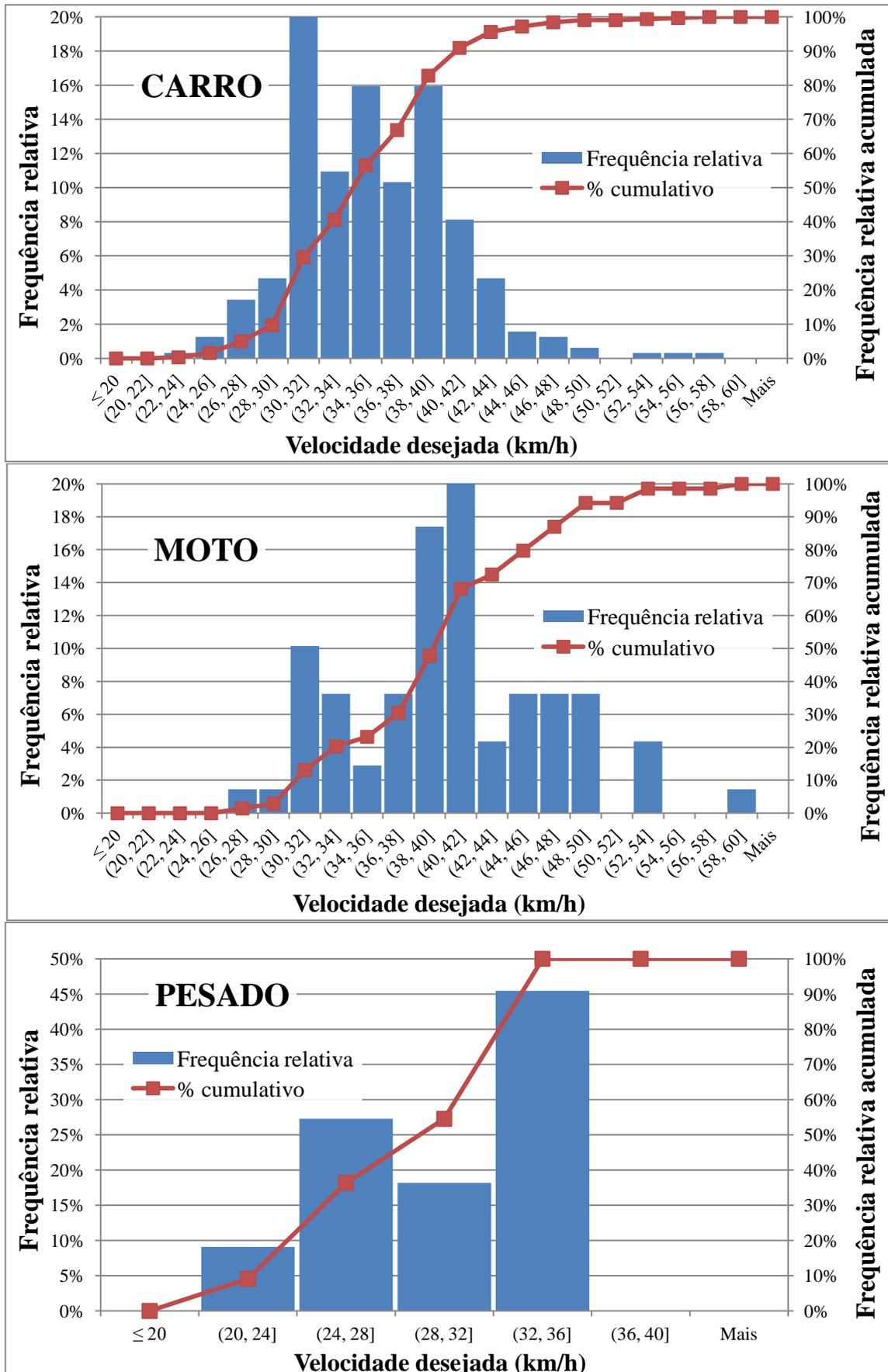
Tabela 3 – Demanda de tráfego nas aproximações da INS-2

Etapa	Variável	Aproximação principal		Aproximação secundária
		Total, exceto motos	Motos	Total, exceto motos
CALIBRAÇÃO	Fluxo (veíc/h)	704	131	708
	Proporção de conversão	15%	12%	33%
	Proporção de caminhões ou ônibus	0,3%	—	2,6%
VALIDAÇÃO	Fluxo (veíc/h)	726	136	608
	Proporção de conversão	16%	14%	35%
	Proporção de caminhões ou ônibus	0,7%	—	2,5%
VALIDAÇÃO 2	Fluxo (veíc/h)	471	118	470
	Proporção de conversão	16%	13%	40%
	Proporção de caminhões ou ônibus	2,6%	—	2,7%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ambas as interseções em estudo foram codificadas no simulador utilizando a imagem do *Google Earth* como plano de fundo, sendo útil também na estimativa da largura das faixas de tráfego. Os valores adotados para o dado de entrada de *desired speed* foram obtidos dos estudos de Lacerda e Castro-Neto (2014) e Lacerda (2016), que foram coletados para vias de Fortaleza localizadas próximas a essa interseção, enquanto que para a INS-2 a distribuição dessa variável foi coletada em campo, pois ela se encontra relativamente distante das vias analisadas nesses trabalhos. Na Figura 11 são apresentados os histogramas obtidos em campo com as velocidades em fluxo livre na via principal, no meio de quadra da aproximação, para cada classe de veículo: carro/automóveis (N = 320 observações), motocicletas (N = 69) e veículos pesados (N = 11).

Figura 11 – Distribuição da velocidade desejada na aproximação da R. Dom Lino (INS-2)



Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível notar uma certa simetria na distribuição das velocidades desejadas dos carros de passeio, com média e desvio padrão amostrais de 36 km/h e 5,1 km/h, respectivamente. Já no caso das motocicletas, a distribuição possui uma simetria menos perceptível e as frequências são mais espalhadas ao longo das classes, correspondendo a uma média amostral de 41 km/h e um desvio padrão de 6,5 km/h. Por fim, na pequena amostra obtida com veículos pesados ($N = 11$) a velocidade variou de 21 a 35 km/h, resultando em uma média de 31 km/h e desvio padrão de 4,5 km/h. As velocidades em fluxo livre coletadas foram relativamente baixas provavelmente devido à presença de uma pequena lombada no início desse quarteirão e de uma escola na esquina da interseção a montante.

Dos três semáforos mais próximos à INS-1, somente o semáforo 2 (ciclo de 128 segundos e tempo de verde para a rua Pereira Valente de 53 s) foi inserido no modelo; o semáforo 1 não foi codificado porque a chegada dos veículos na rua Pereira Valente não ocorre em pelotões, como será mostrado adiante, provavelmente porque ela não é preferencial em todos os cruzamentos entre o semáforo 1 e a INS-1 e também devido à entrada de veículos provenientes dessas três interseções ao longo da aproximação. Dessa forma, a chegada dos veículos 1's na INS-1 foi modelada de forma aleatória, já que para replicar exatamente o padrão de chegada que ocorre em campo seria necessário possuir informações de demanda dos cruzamentos a montante ou fixar os mesmos instantes de chegada para cada veículo; com isso, a etapa de verificação dos *headways* no fluxo principal se torna ainda mais importante. O semáforo 3 também não foi codificado pela sua pouca relevância para o estudo, pois não houve a necessidade de se modelar as chegadas dos veículos 2's com precisão, já que a variável de interesse era o tempo de espera do primeiro veículo na fila; além disso, para replicar o padrão de chegada na aproximação secundária seria necessário ter dados de demanda tanto do cruzamento onde opera o semáforo 3 quanto da interseção da rua Cel. Linhares a montante da INS-1.

Dos semáforos existentes no entorno da INS-2, foi modelado apenas o semáforo 4 (ciclo de 160 segundos e tempo de verde para a rua Dom Lino de 56 s), pois o semáforo 1 é irrelevante na operação da INS-2, o semáforo 3 só impacta no padrão de chegada na via secundária – que exigiria dados de demanda em outros cruzamentos, além de não ser necessário para a aplicação do método proposto – e o semáforo 2, devido tanto à sua localização relativamente distante da INS-2 quanto à chegada de veículos provenientes das vias perpendiculares à aproximação principal, também não torna a chegada dos veículos 1's em pelotão.

A programação dos semáforos modelados foi cedida pelo Controle de Tráfego em Área de Fortaleza (CTAFOR), órgão pertencente à Autarquia Municipal de Trânsito, Serviços Públicos e Cidadania (AMC), implantado no ano de 2000, atualmente responsável pelo controle de 460 dos 820 semáforos em operação no município de Fortaleza. O controle adaptativo é realizado pelo sistema *Split Cycle Offset Optimisation Technique* (SCOOT), em 75 subáreas que cobrem as regiões mais congestionadas da cidade.

4.3 Verificação, calibração e validação do modelo no VISSIM

Este tópico corresponde às fases de calibração e validação do modelo de aceitação de brechas RP do VISSIM para interseções não semaforizadas e de comparação entre os métodos de calibração e é subdividido em cinco subseções: verificação dos *headways* no fluxo principal; calibração da brecha crítica; validação do parâmetro sob condições de tráfego semelhantes; validação do parâmetro sob condições de tráfego diferentes; e comparação entre o método proposto e o método convencional.

4.3.1 Verificação dos *headways* no fluxo principal

Dada a grande influência do padrão de chegada dos veículos da aproximação principal na aceitação das brechas, verificou-se a hipótese de que, mesmo havendo semáforo relativamente próximo (3 quarteirões de distância, no caso da INS-1, e 4 quarteirões no caso da INS-2), a chegada aleatória no modelo geraria uma distribuição de *headways* na principal semelhante à observada em campo, resultante dos volumes provenientes das demais interseções existentes ao longo da aproximação. O teste de aderência entre as distribuições simulada e observada dos *headways* foi realizado utilizando-se a estatística χ^2 com nível de significância de 5% e nove classes, de forma a manter uma quantia razoável de observações por classe (mínimo de 5 para as frequências esperadas).

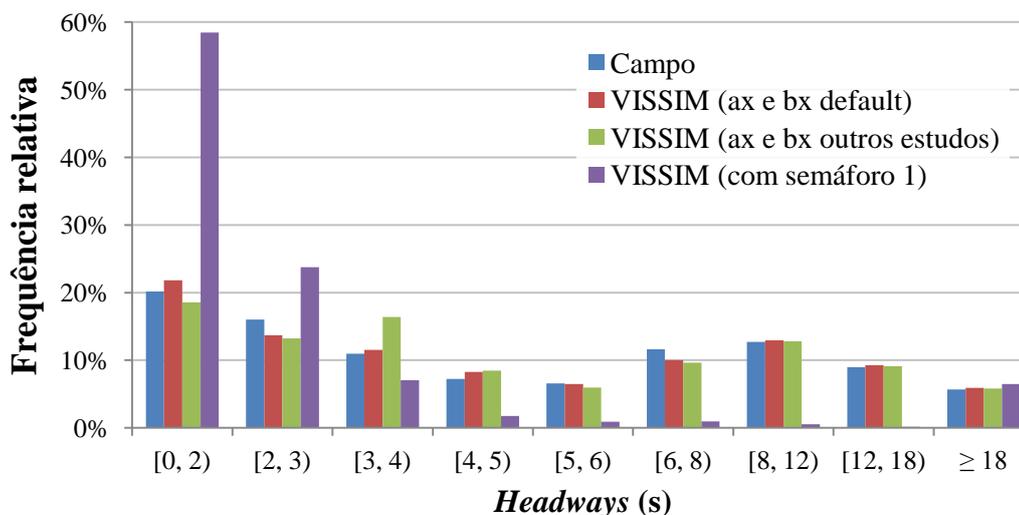
Para a INS-1, os parâmetros comportamentais ax , bx_add e bx_mult do modelo de *car-following* Wiedemann-74 do VISSIM foram mantidos em seus valores *default* ($ax = 2,0$ m; $bx_add = 2,0$ e $bx_mult = 3,0$), pois foi observado através da simulação que os valores adotados nos estudos de Lacerda e Castro-Neto (2014) e Lacerda (2016), que correspondem a um perfil de condutor mais cauteloso que o *default* do VISSIM, geraram uma distribuição de *headways* da via principal menos parecida com a que foi obtida em campo, principalmente no cenário com maior intensidade de tráfego (validação 2). No caso da INS-2, os parâmetros ax ,

bx_add e *bx_mult* calibrados nos estudos mencionados acima resultaram em filas visivelmente mais extensas que as observadas em campo, uma capacidade da aproximação secundária menor que a demanda coletada – em torno de 100 veículos por hora a menos na INS-2, que é mais congestionada – e um padrão de chegada significativamente distinto na via principal devido às interações de *car-following*, o que foi verificado ao testar diversas combinações de valores. Para esse cruzamento, os valores *default* tornaram a distribuição de *headways* simulados bem menos diferente do que a coletada em campo, mas apenas valores mais agressivos foram suficientes para aproximar as distribuições de forma que o teste χ^2 não rejeitasse a hipótese de que a amostra coletada é semelhante à distribuição modelada.

Essas diferenças ocorrem provavelmente porque os perfis dos motoristas que circulam pelos dois cruzamentos são distintos aos observados nas vias analisadas por Lacerda e Castro-Neto (2014) e Lacerda (2016), a condição de *headway* de saturação (utilizada na calibração dos parâmetros nesses estudos) corresponde a respostas mais lentas dos motoristas do que às de *following* e/ou devido às condições de carregamento mais elevadas no cenário de validação 2 da INS-1 e na INS-2, estimulando uma condução mais agressiva dos indivíduos.

No caso da rua Pereira Valente (INS-1), o χ^2 obtido (4,3 no cenário destinado à calibração) foi inferior ao valor crítico de 15,5 (valor-p = 82,5%) quando o cruzamento foi modelado de forma isolada – ou seja, sem precisar representar o tráfego nas interseções vizinhas – e com os parâmetros *ax*, *bx_add* e *bx_mult* em seus valores *default*, portanto não há indícios de que a amostra observada em campo possui distribuição de probabilidade diferente da gerada pela simulação. Já quando foi considerado o semáforo 1, o padrão de chegada na via principal ficou bastante diferente, como mostrado no Gráfico 1. Utilizando-se os valores de *ax*, *bx_add* e *bx_mult* obtidos por Lacerda e Castro-Neto (2014) e Lacerda (2016), o χ^2 resultante (14,6) também foi inferior ao valor crítico (valor-p = 6,8%), porém o mesmo não ocorreu nos cenários de validação (gráficos no Apêndice A). Nota-se a similaridade entre a distribuição de campo e a distribuição simulada em que a INS-1 se encontra isolada, exceto em algumas classes cuja diferença entre as frequências é um pouco mais significativa. Com os valores dos parâmetros dos estudos mencionados, a diferença maior ocorreu nas classes de *headways* mais baixos, principalmente de 3 a 4 segundos, onde as interações de *car-following* são mais atuantes.

Gráfico 1 – Padrão de chegada dos veículos na rua Pereira Valente (calibração VISSIM)



Fonte: Elaborado pelo autor.

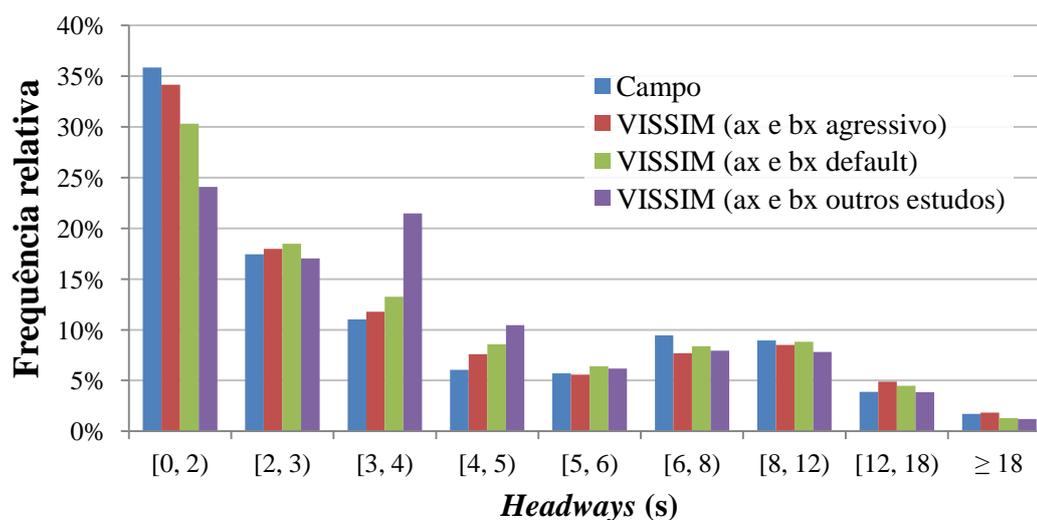
O fluxo principal na rua Dom Lino (INS-2) não foi replicado satisfatoriamente ao modelar o cruzamento de forma isolada e com os valores dos parâmetros ax , bx_add e bx_mult calibrados nos trabalhos de Lacerda e Castro-Neto (2014) e Lacerda (2016), como apresentado no Gráfico 2, correspondendo a um χ^2 de 110,1 bem significativo (valor-p = 0,0%). Com os parâmetros comportamentais do modelo de *car-following* em seus valores *default*, a distribuição dos *headways* simulados já se aproximou bem mais da distribuição observada em campo, como pode ser visto também no Gráfico 2, porém ainda resultou em um χ^2 significativo igual a 21,5 (valor-p = 0,6%).

Ao se estimar a proporção de veículos com destino à rua Dom Lino provenientes de cada aproximação da interseção do semáforo 2 (ver Figura 10) – com base em uma contagem de tráfego realizada em outro dia útil e no mesmo horário das demais coletas – e utilizá-la para modelar também esse cruzamento, o padrão de chegada dos veículos se tornou ainda mais diferente do que foi coletado em campo, possivelmente porque alguns deles, apesar de serem a minoria, são provenientes das demais INS existentes entre esse cruzamento e a INS-2 e/ou porque alguns motoristas param para deixar seus filhos no colégio localizado a um pouco mais de 1 quarteirão do cruzamento em análise, já que o período da coleta coincide com o horário de início das aulas do turno da manhã.

Como mencionado anteriormente, foram testadas outras combinações de valores dos parâmetros de *car-following* correspondentes a um perfil mais agressivo dos condutores e obteve-se um padrão de chegada mais similar ao observado em campo (foram adotados $ax = 1,5$ m; $bx_add = 1,2$ e $bx_mult = 1,5$), como mostrado no Gráfico 2, resultando em um χ^2 de

9,3, inferior ao valor crítico (valor-p = 32,1%). Tal representação pode não corresponder exatamente ao comportamento real dos motoristas, sendo parte do seu erro compensado pelo padrão de chegada dos veículos na entrada da rede pela aproximação principal não replicado fielmente (ausência da modelagem dos cruzamentos vizinhos, por exemplo), porém o que importa no fluxo principal, para a análise deste trabalho, é a distribuição dos *headways* nas proximidades da interseção não semaforizada em estudo.

Gráfico 2 – Padrão de chegada dos veículos na rua Dom Lino (calibração VISSIM)



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Calibração da brecha crítica

Para a INS-1 o ajuste estimado nos tempos de espera simulados foi de 2,3 segundos para o movimento seguir em frente e 2,1 s para a conversão à direita; nos dados da INS-2 esse ajuste foi de 2,0 s para o movimento de seguir em frente e de 1,9 s para a conversão à esquerda.

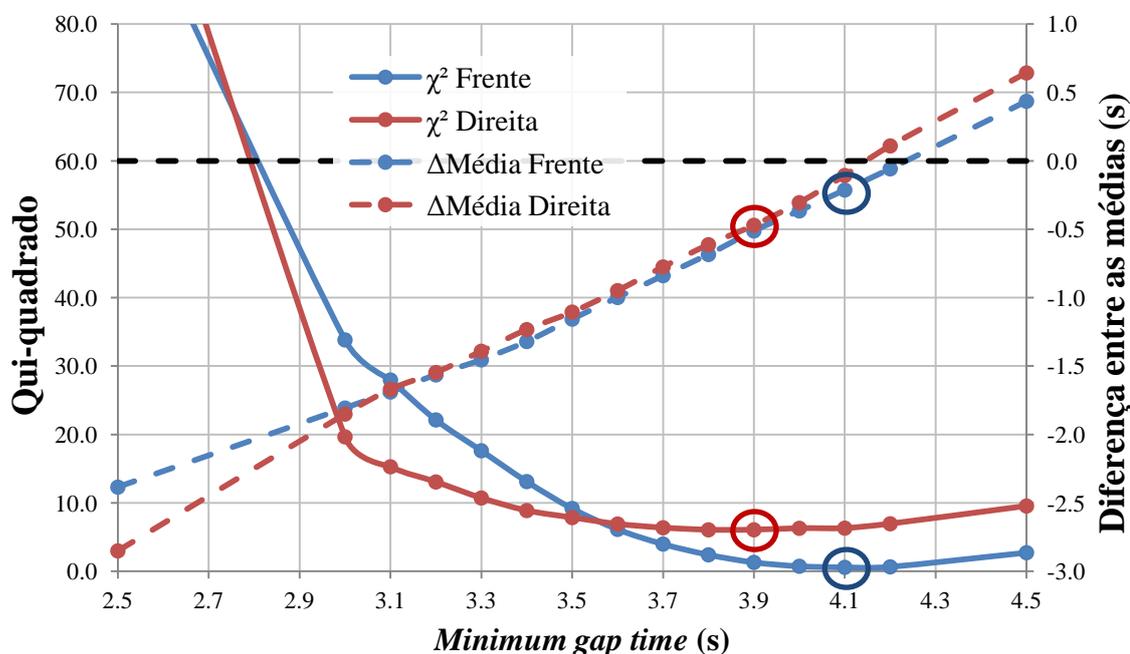
A fim de contemplar a variabilidade do modelo e simultaneamente obter distribuições estáveis das variáveis envolvidas, foram executadas 300 replicações, com duração de 30 minutos cada para a INS-1, e 200 replicações – devido ao maior tempo de execução necessário e à maior quantidade de dados por causa da demanda significativamente maior – com duração de 1 hora no caso da INS-2 (intervalo de tempo observado em campo), além de dois minutos (ou cinco, para a INS-2, que apresenta filas bem maiores) de período de *warm-up*, para cada valor de *minimum gap time* testado. Os erros de estimação da média dos tempos de espera simulados, com grau de confiança de 95%, foi no máximo de 0,1 s,

constatando que a amostra modelada é grande o suficiente para fornecer uma estimativa precisa dessa variável.

Tomaram-se como referência inicialmente os cenários com os valores do parâmetro *minimum gap time* múltiplos de 0,5 segundos, incluindo o *default* (3,0 s). Em seguida, foram testados outros valores, considerando variações de 0,1 s em torno daqueles correspondentes aos menores χ^2 e menor diferença absoluta entre as médias amostrais, refinando assim a busca pelo valor ótimo.

As curvas obtidas para a estatística χ^2 e para as diferenças entre as médias amostrais dos tempos de espera de campo e simulada correspondentes a cada movimento de conversão da rua Cel. Linhares (INS-1) são apresentadas no Gráfico 3. Para computar as médias da medida-alvo, foram desconsiderados os veículos que pararam apenas momentaneamente (ou por um tempo desprezível, se juntando à primeira classe de valores adotada), tanto porque suas durações são menos influenciadas pela brecha crítica e representam, no caso das INS analisadas, uma grande parte das observações, quanto porque as médias dessa classe já foram compatibilizadas ao se realizar o ajuste nos tempos de espera.

Gráfico 3 – Calibração pelo método proposto (INS-1 VISSIM)



Fonte: Elaborado pelo autor.

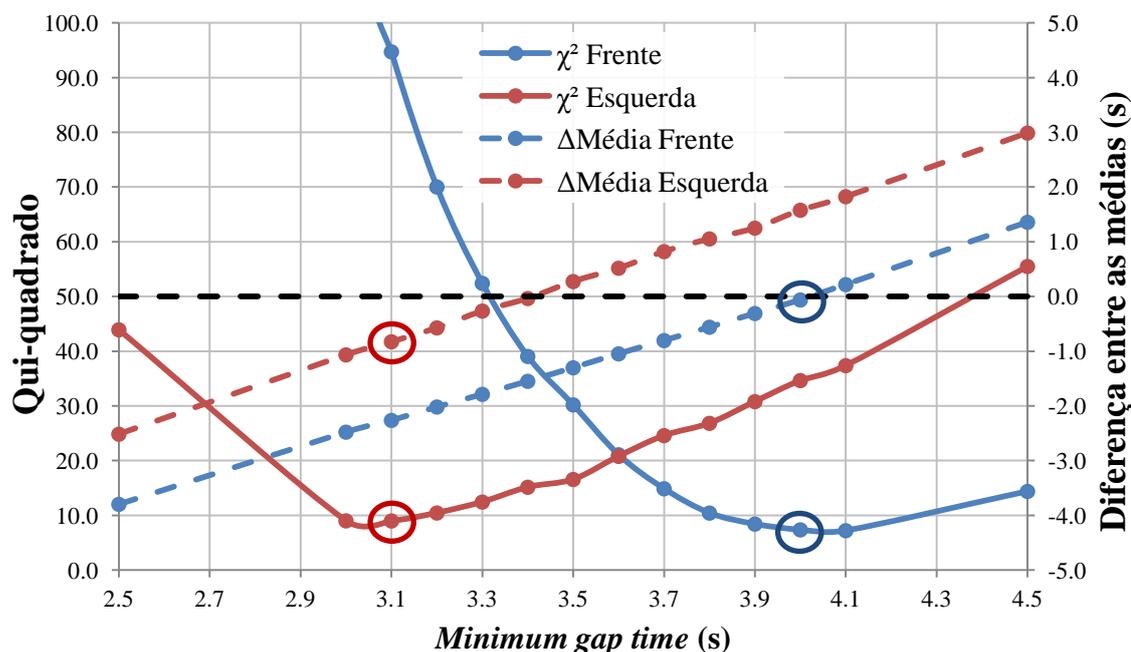
Todos os valores de *minimum gap time* abaixo de 3,5 segundos corresponderam a um χ^2 superior ao crítico para o movimento de seguir em frente, que neste caso é de 11,1 ($\alpha = 5\%$ e $gl = 5$); isso ocorreu principalmente porque nesses cenários as frequências simuladas

para as últimas classes são baixas (em muitos casos foram inferiores ao valor mínimo recomendado de 5 observações e, conseqüentemente, o χ^2 parcial dessas classes foram superestimados). Além disso, esses cenários corresponderam também a uma diferença absoluta elevada entre as médias dos tempos de espera. Percebem-se variações mínimas no χ^2 para valores de *minimum gap time* entre 3,9 e 4,2 s, porém mais perceptíveis no caso da diferença entre as médias. Levando em consideração ambos os critérios, adotou-se o valor de 4,1 segundos para o parâmetro (em destaque no gráfico), correspondendo ao menor χ^2 (0,6, valor-p = 98,8%) e a uma pequena diferença absoluta entre as médias amostrais simulada e observada (0,2 s).

No caso da conversão à direita, os valores de χ^2 obtidos foram superiores ao crítico (9,5) para *minimum gap times* inferiores a 3,3 s ou a partir de 4,5 s, além de terem apresentado as maiores diferenças absolutas entre as médias da medida-alvo. Os menores χ^2 foram obtidos com o valor do parâmetro entre 3,6 e 4,2 s, sendo o valor de 3,9 s o que correspondeu ao menor χ^2 (6,1, com valor-p = 19,3%) e a uma pequena diferença absoluta entre as médias amostrais (0,5 s). Atribuindo-se maior peso à comparação entre as distribuições e considerando que 0,5 s de diferença absoluta entre as médias dos tempos de espera é pouco significativo, adotou-se 3,9 segundos como o valor calibrado para o *minimum gap time*. Nota-se, portanto, que o valor calibrado para a conversão à direita foi um pouco menor que o obtido para o movimento de seguir em frente, o que está de acordo com o esperado (TRB, 2010). Isto possivelmente acontece porque a área de conflito no caso da conversão é menor, ocorrendo principalmente na faixa de tráfego mais próxima, e/ou porque o tempo de execução da manobra influencia no valor da brecha crítica (DEVARASETTY; ZHANG; FITZPATRICK, 2012).

Para o movimento de seguir em frente na INS-2, os valores de *minimum gap time* abaixo de 3,7 segundos resultaram em χ^2 superiores ao crítico, que neste caso é de 15,5 (gl = 8). Com *minimum gap time* de 4,0 segundos, foi obtido um χ^2 de 7,4 (valor-p = 49,7%) e uma diferença absoluta entre as médias dos tempos de espera praticamente nula (menor que 0,1 s), como observado no Gráfico 4, portanto este foi o valor adotado para o movimento de seguir em frente.

Gráfico 4 – Calibração pelo método proposto (INS-2 VISSIM)



Fonte: Elaborado pelo autor.

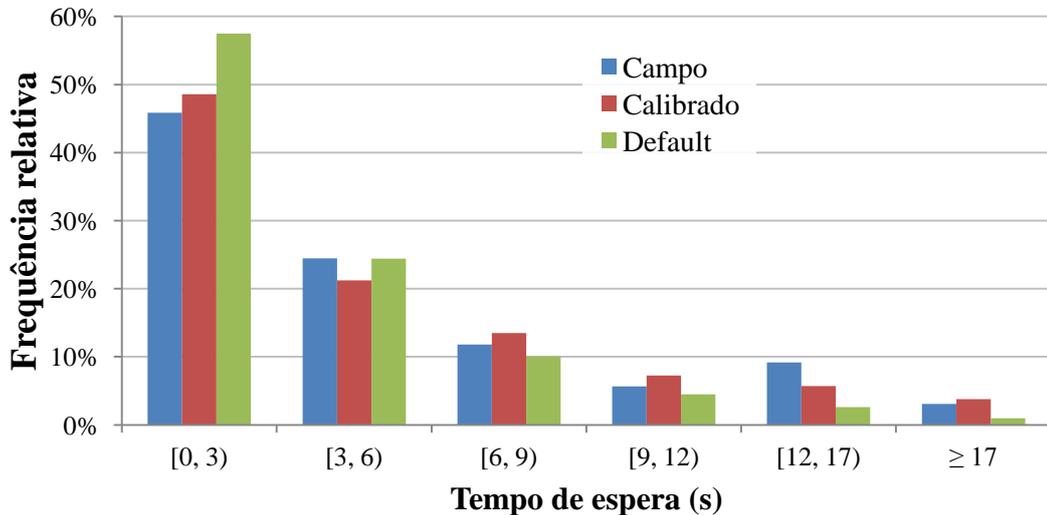
No caso da conversão à esquerda, apenas os *minimum gap times* de 3,0 a 3,3 segundos corresponderam a um χ^2 menor que o crítico, que neste caso é de 12,6 ($\alpha = 5\%$ e $gl = 6$). O menor χ^2 (9,0, valor-p = 17,4%) ocorreu com o valor do parâmetro igual a 3,1 segundos, correspondendo também a uma diferença absoluta entre as médias igual a 0,8 s. Atribuindo-se maior importância à comparação entre as distribuições da medida-alvo, considerou-se o valor de 3,1 s como o calibrado para a conversão à esquerda. Novamente o valor calibrado para a conversão foi inferior ao obtido para o movimento de seguir em frente, como esperado, e com uma diferença bem mais perceptível.

Os valores de χ^2 obtidos para esse cruzamento foram, em geral, maiores que os da INS-1, correspondendo a valores-p de calibração menores. Uma possível explicação para isso ter ocorrido é que o modelo do VISSIM não considera aspectos mais complexos que são mais atuantes nesse cruzamento, como a visibilidade limitada do veículo 2 na faixa da esquerda quando há outro veículo esperando na faixa da direita – o que acontece quase sempre devido à demanda elevada da interseção –, a variabilidade na brecha crítica entre os motoristas e o aumento do grau de agressividade do condutor à medida que o tempo de espera aumenta.

4.3.3 Validação do parâmetro sob condições de tráfego semelhantes

Na validação do modelo com condições de tráfego semelhantes, foram utilizados os valores calibrados de *minimum gap time* no cenário codificado com os dados destinados a essa fase com a finalidade de avaliar se, nesse período, os tempos de espera gerados na simulação permanecem semelhantes aos observados em campo. No Gráfico 5 estão apresentadas três distribuições dos tempos de espera do primeiro veículo da fila (N = 229) para o movimento seguir em frente da aproximação secundária da INS-1: observada em campo, obtida pelo modelo com o *minimum gap time* calibrado (4,1 s) e com o parâmetro com valor *default* (3,0 s) do VISSIM.

Gráfico 5 – Validação para o movimento seguir em frente (INS-1 VISSIM)



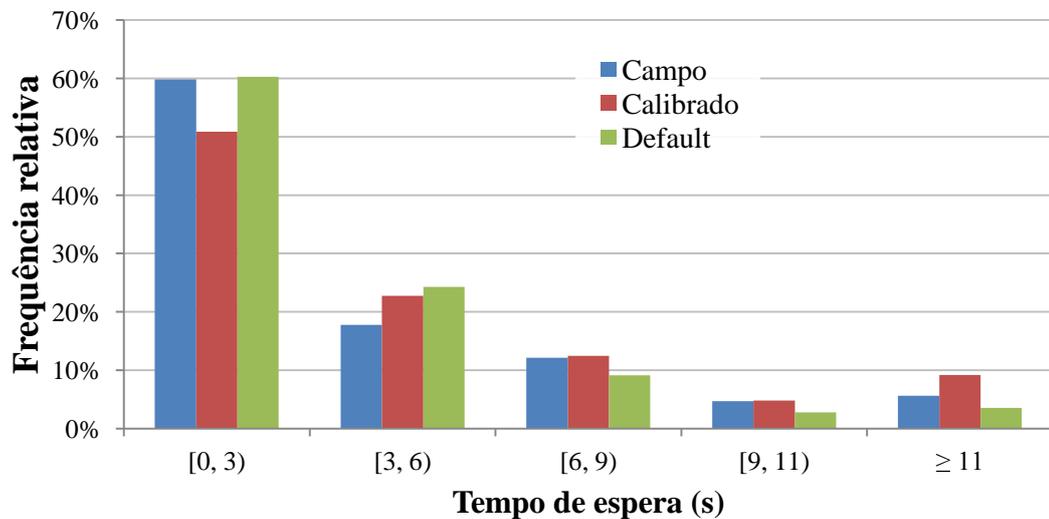
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelo gráfico acima, nota-se que a aderência entre a distribuição dos tempos de espera com o *minimum gap time* calibrado e a de campo foi satisfatória, resultando em um χ^2 de validação igual a 7,9 (valor-p = 16,4%) e, conseqüentemente, na não rejeição da hipótese nula de que a amostra observada pode ser bem representada pela distribuição gerada no modelo de simulação. Já a distribuição gerada com valor *default* se distanciou mais, principalmente nas classes mais extremas (menores ou maiores tempos de espera), com rejeição da hipótese nula ($\chi^2 = 55,1$, valor-p = 0,0%). A média dos tempos de espera observados em campo foi de 8,1 segundos, enquanto a obtida pelo modelo com o parâmetro calibrado foi de 8,4 s, correspondendo a um intervalo de confiança de 95% para a diferença entre as médias igual a [-1,2 s; 0,5 s]. Portanto, como o zero está contido no intervalo, o

intervalo indica que as médias dos tempos de espera modelados e observados são muito similares.

De forma análoga, no Gráfico 6 são mostradas as três distribuições da medida-alvo obtidas para a conversão à direita (N = 107). A aderência entre as distribuições observada em campo e simulada com *minimum gap time* calibrado foi ainda melhor do que para o movimento de seguir em frente, com χ^2 de validação de apenas 4,3 (valor-p = 36,2%), enquanto a aderência entre a distribuição com valor *default* e a de campo foi menos satisfatória, porém também sem rejeição da hipótese nula ($\chi^2 = 5,7$ e valor-p = 22,7%). As médias amostrais obtidas em campo e no modelo calibrado foram iguais a 6,9 e 7,9 segundos, respectivamente, com um IC de 95% igual a [-1,9 s; 0,0 s] para a diferença entre essas médias. Dessa maneira, há indícios para se acreditar que as médias populacionais dos tempos de espera simulados e observados são similares, com uma diferença da ordem de 1,0 s que certamente seria menos perceptível, em termos absolutos, se também fossem consideradas as observações dos veículos que pararam apenas momentaneamente.

Gráfico 6 – Validação para a conversão à direita (INS-1 VISSIM)

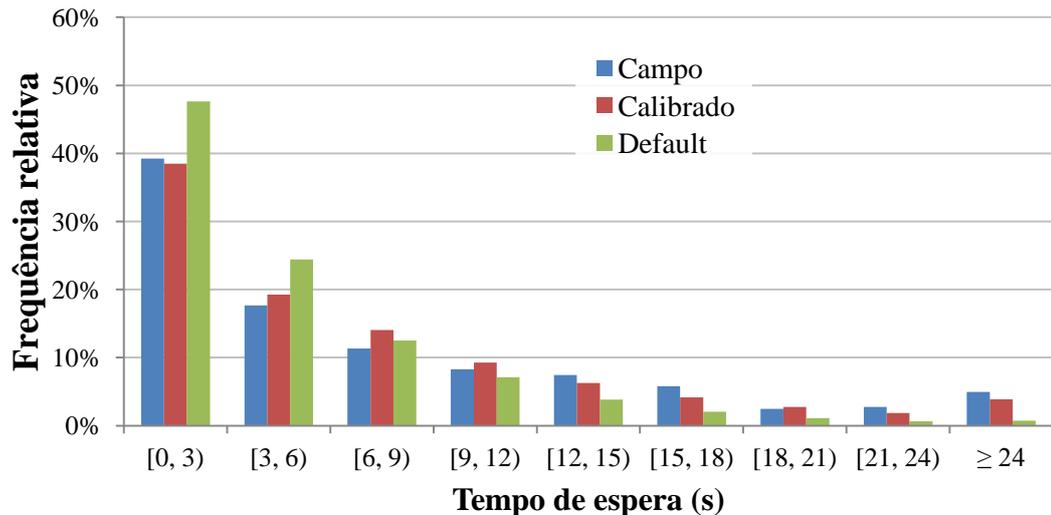


Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso da INS-2 as distribuições dos tempos de espera (N = 362) para o movimento seguir em frente são exibidas no Gráfico 7, onde é possível observar uma aderência muito melhor entre a distribuição obtida com o modelo calibrado e a de campo do que entre a obtida com o valor *default* e a observada em campo. O χ^2 de validação obtido foi igual a 8,8, que é inferior ao crítico de 15,5 (valor-p = 35,9%). Já o χ^2 referente ao modelo com o parâmetro *default* foi bem maior (170,8, com valor-p = 0,0%), devido à diferença entre as distribuições e à baixa frequência obtida nas últimas classes. A média dos tempos de espera

coletados em campo foi de 11,8 segundos, enquanto a obtida pelo modelo *default* foi de apenas 7,9 s e com o *minimum gap time* calibrado foi de 10,7 s, correspondendo a um intervalo de confiança de 95% para a diferença entre as médias igual a [-0,1 s; 2,2 s]. Portanto, há indícios que as médias dos tempos de espera modelados e observados são próximas.

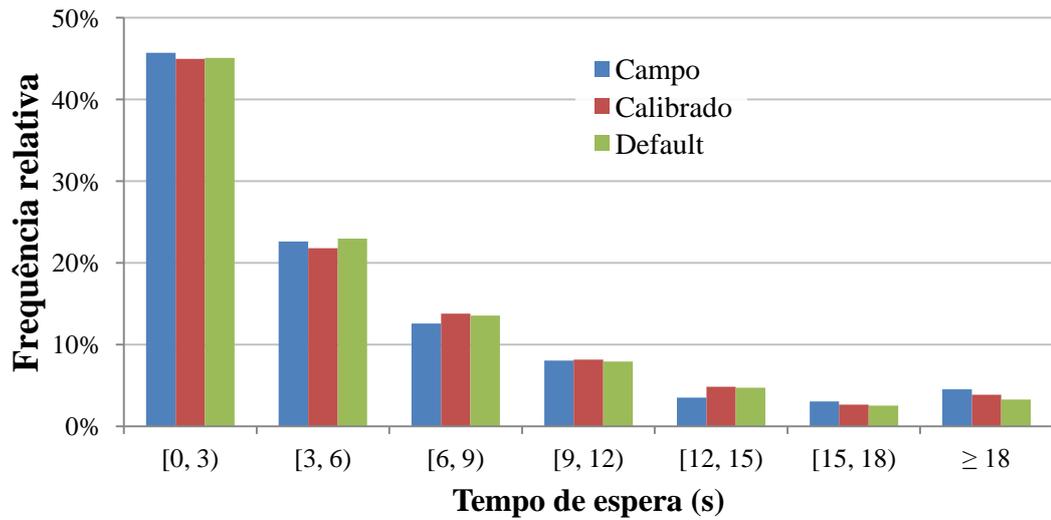
Gráfico 7 – Validação para o movimento seguir em frente (INS-2 VISSIM)



Fonte: Elaborado pelo autor.

No Gráfico 8 são apresentadas as distribuições da medida-alvo no caso da conversão à esquerda da INS-2 (N = 199). Como o valor calibrado para esse movimento (3,1 s) foi bem próximo do valor *default* (3,0 s), as duas distribuições simuladas são muito semelhantes. O χ^2 de validação obtido foi de apenas 1,3, bem inferior ao crítico (12,6; valor-p = 97,0%). Tanto a média dos tempos de espera obtida pelo modelo calibrado como a observada em campo foram de 8,8 segundos, enquanto a média referente ao valor *default* foi de 8,5 s; o intervalo de confiança de 95% para a diferença entre as médias foi de [-1,2 s; 1,2 s], indicando que essas médias são de fato similares.

Gráfico 8 – Validação para a conversão à esquerda (INS-2 VISSIM)

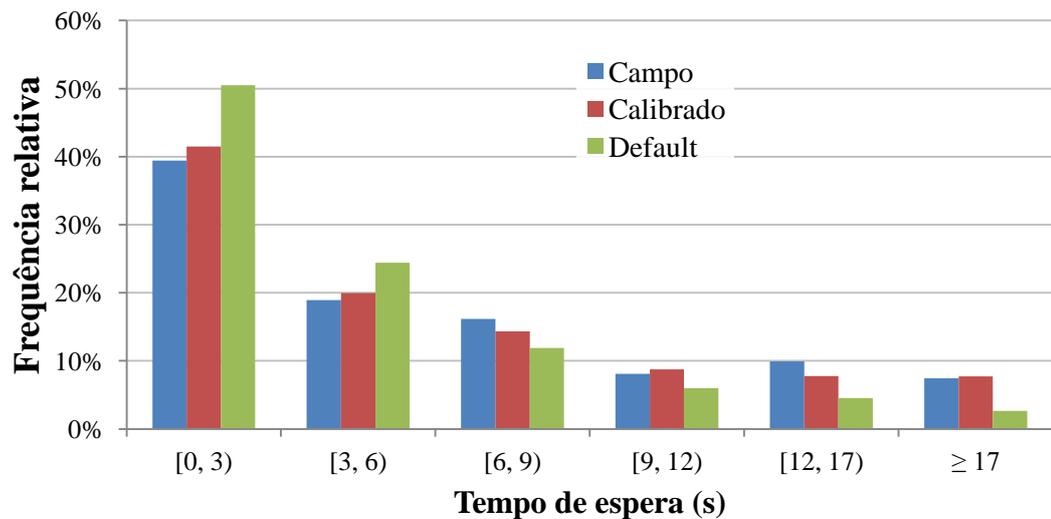


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.4 Validação do parâmetro sob condições de tráfego diferentes

Esta etapa se diferencia da anterior apenas quanto às características da demanda, como mostrado nas Tabela 2 e Tabela 3. As distribuições dos tempos de espera correspondentes ao movimento seguir em frente da aproximação secundária da INS-1 são exibidos no Gráfico 9 (N = 322), enquanto no Gráfico 10 são mostradas as distribuições para a conversão à direita.

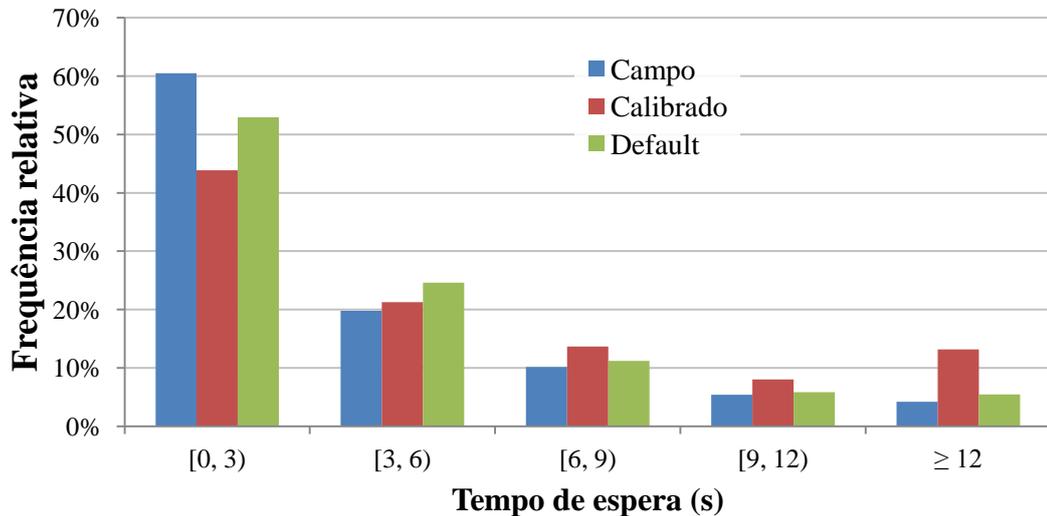
Gráfico 9 – Validação 2 para o movimento seguir em frente (INS-1 VISSIM)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A aderência entre a distribuição dos tempos de espera com o *minimum gap time* calibrado e a de campo, mesmo numa situação diferente de demanda, foi satisfatória, com um χ^2 de validação de apenas 3,4 (valor-p = 63,8%), o que não ocorreu para a distribuição gerada com valor *default*, principalmente nas classes mais extremas, com $\chi^2 = 67,9$ e rejeição da hipótese nula (valor-p = 0,0%). A média da medida-alvo obtida pelo modelo calibrado foi de 10,0 segundos, praticamente igual à observada em campo (10,1 s), resultando em um intervalo de confiança de 95% para a diferença entre as médias igual a [-0,9 s; 1,0 s]; no caso do parâmetro em valor *default*, a média foi de 7,7 s, com IC de 95% igual a [1,4 s; 3,3 s]. O intervalo de confiança obtido indica que as médias dos tempos de espera modelados com o parâmetro calibrado e dos observados são bastante similares.

Gráfico 10 – Validação 2 para a conversão à direita (INS-1 VISSIM)



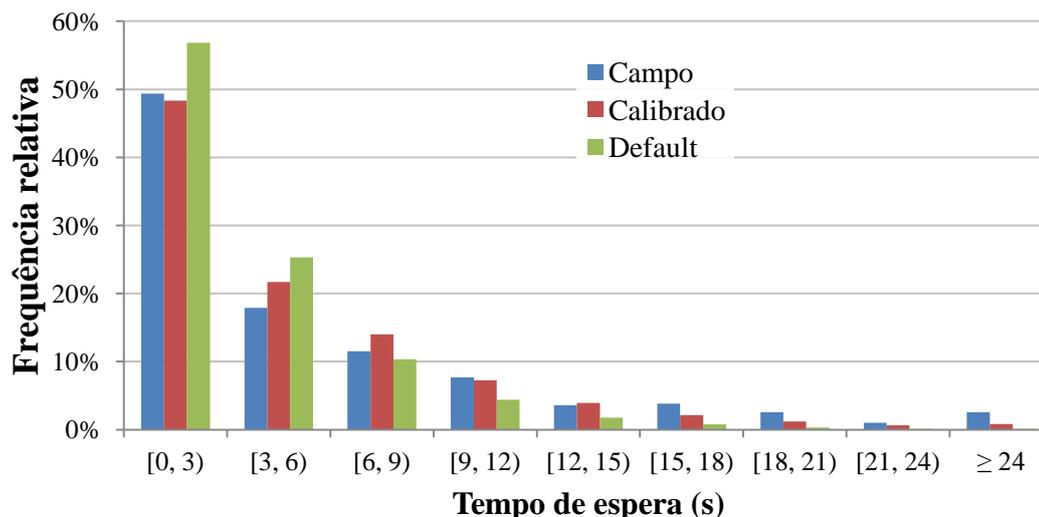
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a conversão à direita o valor calibrado do *minimum gap time* não foi satisfatório, como pode ser observado no gráfico acima. O χ^2 obtido nesse caso foi de 23,8 (valor-p = 0,0%), o que indica a rejeição da hipótese nula de que a amostra de campo pode ter sido obtida de uma distribuição estatisticamente semelhante à que foi gerada no modelo. A média dos tempos de espera modelados foi de 9,3 segundos, significativamente superior à média de campo (7,3 s); o intervalo com 95% de confiança para a diferença entre essas médias foi de [-3,2 s; -0,9 s]. Com o parâmetro em seu valor *default*, o χ^2 foi de apenas 4,1 (valor-p = 39,7%) e a média simulada foi igual à de campo. Isso indica que para este cenário, cuja intensidade do tráfego na via principal é maior, a brecha crítica equivalente é inferior ao valor obtido no cenário de calibração, o que é coerente já que uma maior dificuldade em

encontrar brechas suficientemente grandes estimula os condutores a se arriscarem mais (TRB, 2010; VITI *et al.*, 2013).

Analogamente, têm-se as distribuições dos tempos de espera referentes aos movimentos seguir em frente (N = 391) e conversão à esquerda (N = 264) da aproximação secundária da INS-2, apresentados nos Gráfico 11 e Gráfico 12.

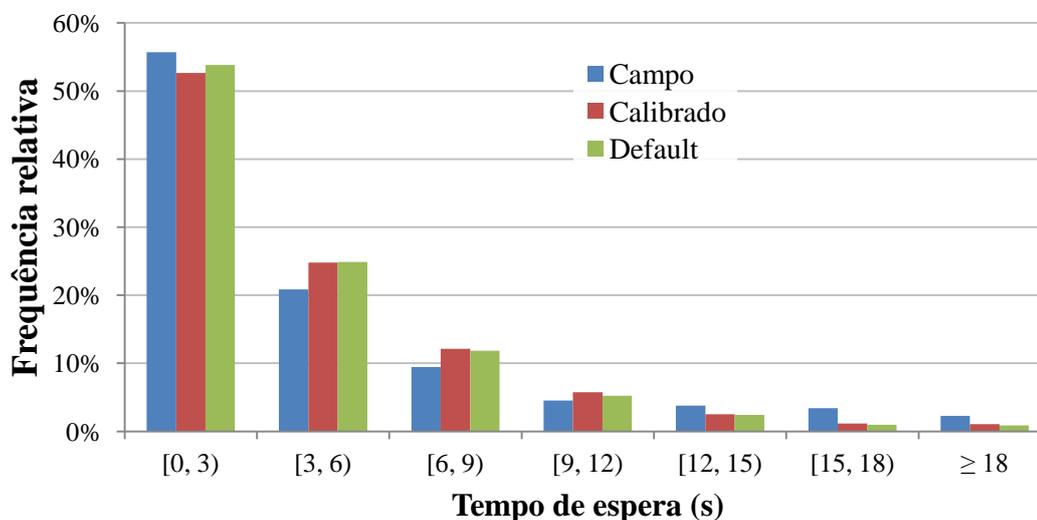
Gráfico 11 – Validação 2 para o movimento seguir em frente (INS-2 VISSIM)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tanto a distribuição obtida com o *minimum gap time* calibrado quanto com o valor *default* resultaram na rejeição da hipótese nula de que a amostra coletada em campo pode ter sido gerada por uma distribuição de probabilidade semelhante, com χ^2 de 32,1 e 354,9 (valor-p = 0,0% em ambos os casos), respectivamente. Quanto à média dos tempos de espera, obteve-se 8,1 segundos no modelo calibrado e apenas 6,5 s com o parâmetro *default*, bem diferentes da média observada em campo (10,1 s); o intervalo de confiança de 95% para a diferença entre as médias do modelo calibrado e coletada em campo foi de [0,9 s; 3,1 s], indicando que elas são estatisticamente diferentes. Tal resultado é coerente, pois como o tráfego neste cenário é menos intenso do que no cenário de calibração, a brecha crítica equivalente da população de motoristas é maior porque há menor necessidade de se arriscar por uma oportunidade de atravessar o cruzamento.

Gráfico 12 – Validação 2 para a conversão à esquerda (INS-2 VISSIM)



Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso da conversão à esquerda o resultado foi semelhante, porém menos destoante. O χ^2 obtido foi de 21,7 (valor-p = 0,1%) para o *minimum gap time* calibrado e de 27,3 (valor-p = 0,0%) com o valor *default*. A média dos tempos de espera de campo foi de 8,3 segundos, enquanto as obtidas pelo modelo calibrado (7,0 s) e pelo modelo com valor *default* (6,9 s) foram inferiores. O intervalo de confiança de 95% para a diferença entre as médias de campo e do modelo calibrado foi de [0,3 s; 2,4 s], o que indica uma subestimação estatisticamente significativa dessa variável pelo modelo.

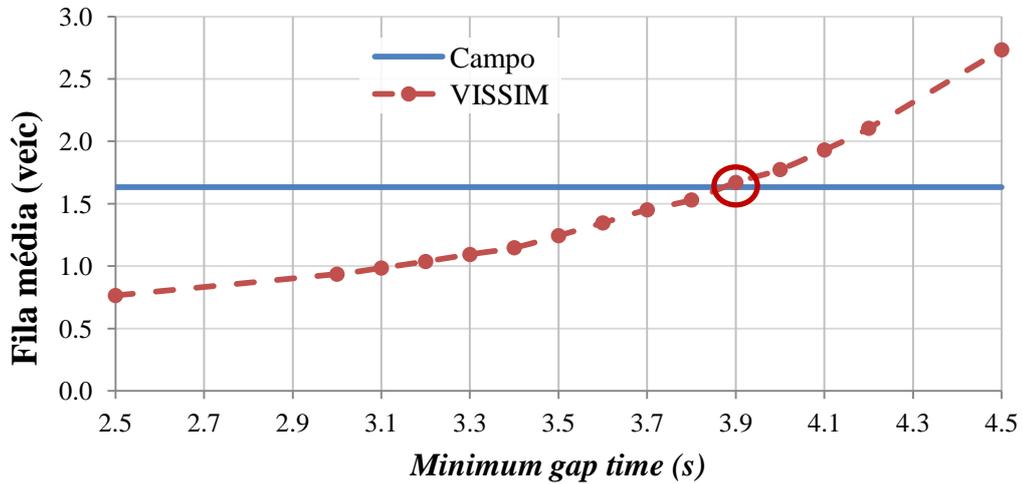
4.3.5 Comparação entre o método proposto e o método convencional

Como um dos objetivos específicos estabelecido nesta pesquisa, foi realizada a comparação entre o método proposto para a estimação da brecha crítica e um método mais convencional, no qual a calibração teve como medida-alvo uma medida de desempenho do tráfego que se deseja estimar; no caso, o comprimento médio da fila formada na aproximação secundária. Na calibração pelo método convencional, foram utilizadas amostras de tamanho de fila com observações coletadas a cada 15 segundos, tanto em campo quanto no simulador.

Utilizando-se o mesmo cenário de calibração da INS-1 estabelecido para o método proposto, o comprimento médio de fila simulado se igualou à média de 1,6 veículos obtida em campo quando o *minimum gap time* foi de 3,9 segundos, como destacado no Gráfico 13, valor esse mantido fixo, como descrito na seção do método de pesquisa, para ambos os movimentos

de conversão. Pelo gráfico, é possível notar a relação levemente exponencial de influência do parâmetro sobre o tamanho médio de fila, comportamento esse também observado para a INS-2, cujo gráfico é similar e está apresentado no Apêndice A.

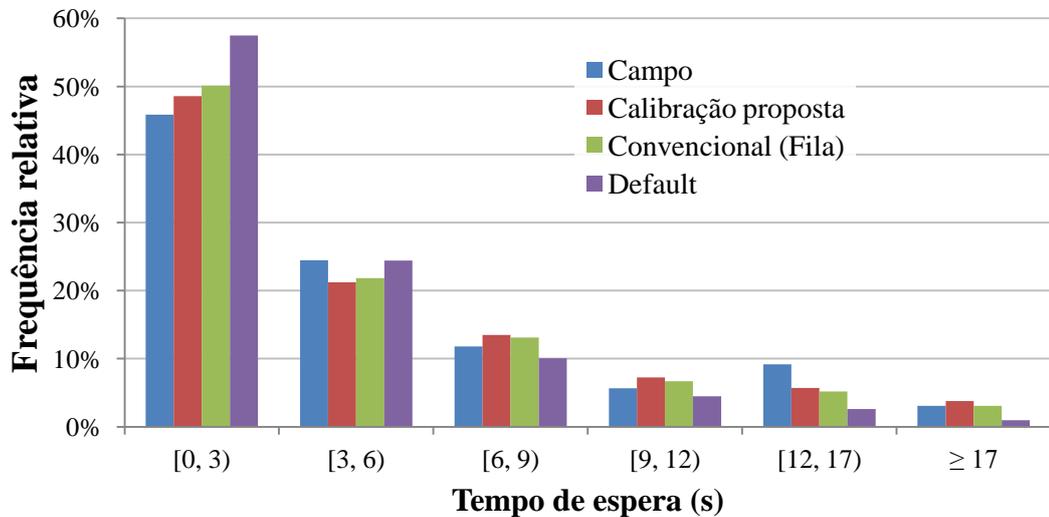
Gráfico 13 – Calibração pelo método convencional (INS-1 VISSIM)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para avaliar a diferença entre os métodos, foram obtidas as distribuições dos tempos de espera para o movimento seguir em frente no cenário de *validação* exibidas no Gráfico 14 (INS-1): coletados em campo, obtidos pelo modelo calibrado com o método proposto, pelo modelo calibrado com o método convencional e pelo modelo com *minimum gap time default*.

Gráfico 14 – Distribuições dos tempos de espera para o movimento seguir em frente (INS-1 VISSIM)

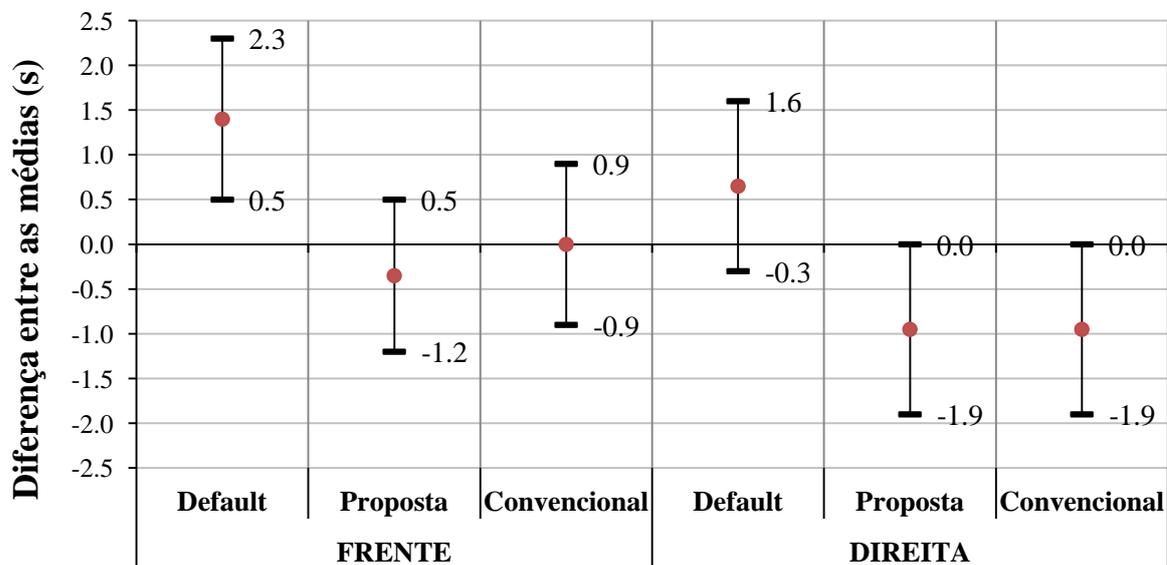


Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelo gráfico acima, percebe-se uma aderência um pouco mais satisfatória entre a distribuição obtida com o parâmetro calibrado pelo método proposto e a distribuição dos tempos de espera observados em campo, principalmente nas classes mais extremas, correspondendo a um χ^2 de 7,9 (valor-p = 16,4%), enquanto a aderência da distribuição gerada com o modelo calibrado pela extensão média da fila resultou em um valor de 9,3 para essa estatística (valor-p = 9,8%). O tempo de espera médio obtido pelo método convencional foi igual ao coletado em campo, de 8,1 segundos, enquanto pelo modelo proposto foi igual a 8,4 s. Os intervalos de confiança de 95% para as diferenças entre as médias dos tempos de espera simulados e dos observados em campo, para cada um dos casos (*default*, calibração proposta e calibração convencional) e ambos os movimentos de conversão da INS-1, são apresentados no Gráfico 15. Neste caso, portanto, a diferença entre os dois métodos de calibração foi pouco significativa.

A diferença entre as distribuições dos tempos de espera obtidos pelos dois métodos de calibração para o movimento de conversão à direita foi praticamente nula, como mostrado no Apêndice A, pois os valores ótimos obtidos do *minimum gap time* foram os mesmos. O χ^2 foi de apenas 4,3 (valor-p = 36,2%), com uma média modelada de 7,9 segundos, superior à média das observações de campo (6,9 s). Quanto maior, em média, e mais variável for a fila formada na aproximação secundária (para a INS-1 o desvio padrão foi de 1,8 veículos), essa medida de desempenho depende mais do parâmetro do modelo de aceitação de brechas; portanto, em cruzamentos mais congestionados, espera-se diferenças mais perceptíveis nos resultados obtidos pelos diferentes métodos.

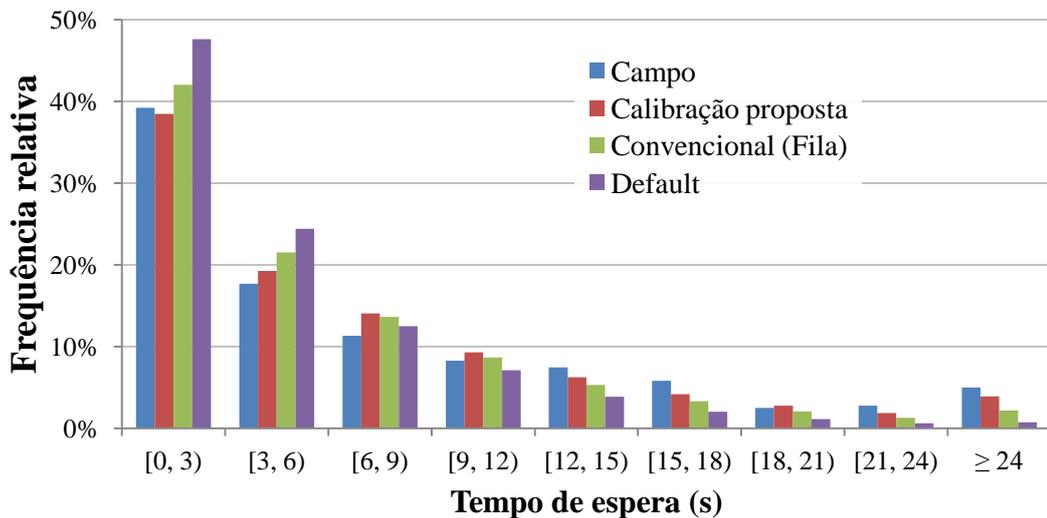
Gráfico 15 – Intervalos de confiança para as diferenças entre as médias dos tempos de espera (INS-1 VISSIM)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido à demanda significativamente superior na INS-2, a fila média da aproximação secundária observada em campo foi de 16,8 veículos (somando a fila das duas faixas de tráfego). O valor do *minimum gap time* que correspondeu à quantidade média de veículos em fila mais próxima foi o de 3,6 segundos, resultando em 15,9 veículos. No Gráfico 16 são mostradas as distribuições da medida-alvo para o movimento seguir em frente na INS-2, onde se pode notar que o método proposto resultou em uma melhor aderência em relação à distribuição observada em campo ($\chi^2 = 8,8$ e valor-p = 35,9%, enquanto a hipótese nula pelo método convencional foi rejeitada com um $\chi^2 = 34,2$ e valor-p = 0,0%). Essa maior diferença nos resultados pode ter ocorrido por causa da fila significativamente mais extensa e mais variável (desvio padrão de 7,2 veículos) do que na INS-1.

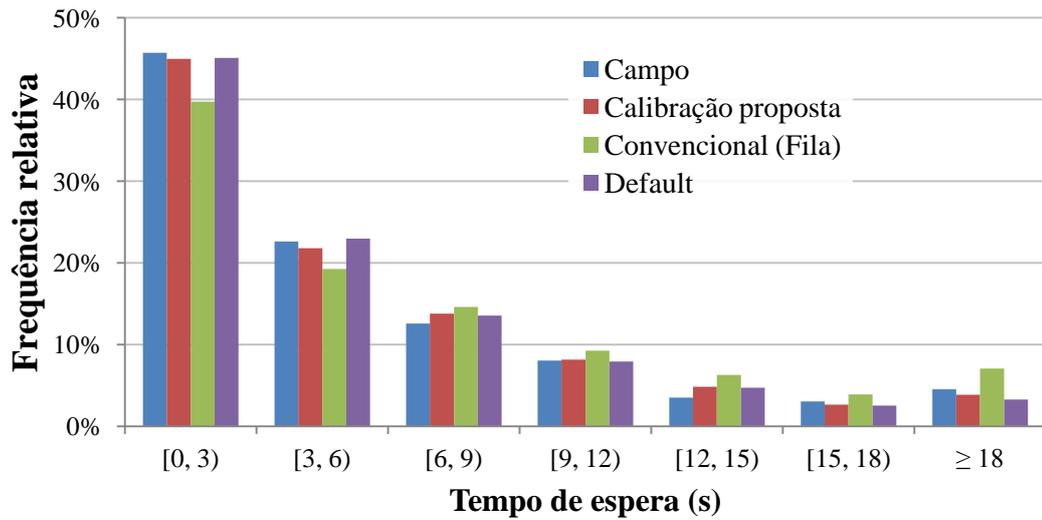
Gráfico 16 – Distribuições dos tempos de espera para o movimento seguir em frente (INS-2 VISSIM)



Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo de espera médio coletado em campo foi igual a 11,8 segundos, enquanto pelo modelo proposto foi igual a 10,7 s e pelo método convencional foi de 9,4 s, indicando novamente que a calibração com base no tamanho médio de fila pode gerar estimativas menos precisas para os tempos de espera. As distribuições dos tempos de espera correspondentes à conversão à esquerda são apresentadas no Gráfico 17.

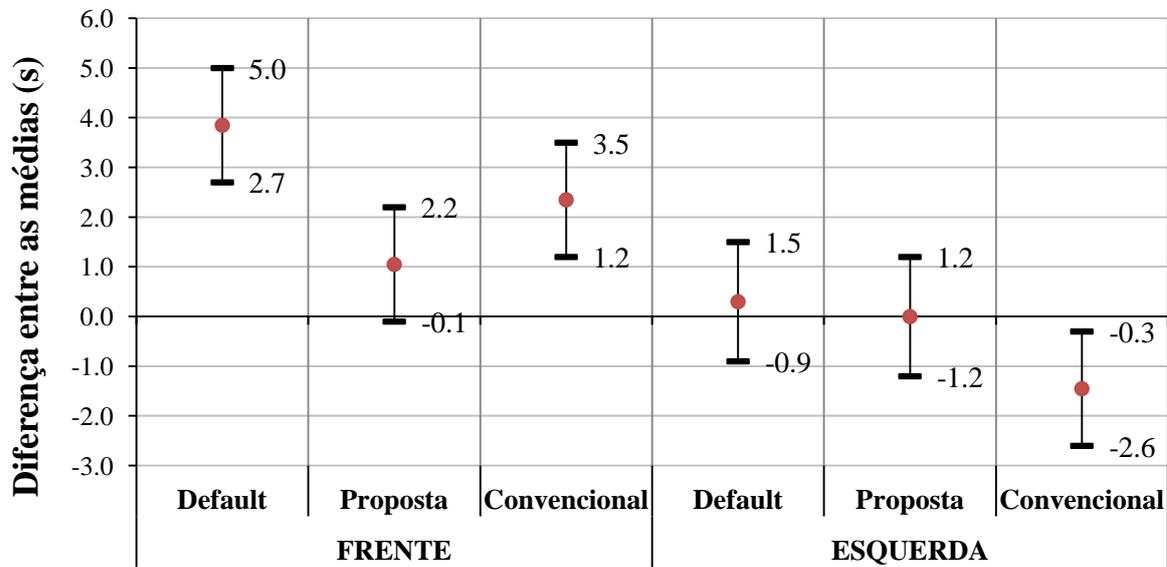
Gráfico 17 – Distribuições dos tempos de espera para a conversão à esquerda (INS-2 VISSIM)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Mais ainda do que para o movimento de seguir em frente, a distribuição da medida-alvo obtida pelo modelo com a calibração proposta e a distribuição observada em campo neste caso foram bem próximas, resultando em um $\chi^2 = 1,3$ (valor-p = 97,0%), enquanto o obtido pelo método convencional foi satisfatório, porém significativamente superior ($\chi^2 = 8,5$, com valor-p = 20,6%). As médias dos tempos de espera coletada em campo e obtida no modelo com a calibração proposta foram as mesmas, iguais a 8,8 s, porém foi superestimada pela calibração com base no tamanho de fila (10,2 s). Como o valor calibrado com base nos tempos de espera foi muito semelhante ao *default*, os resultados neste caso foram bem parecidos ($\chi^2 = 2,0$, valor-p = 92,1% e média = 8,5 s). Os intervalos de confiança de 95% para as diferenças entre as médias dos tempos de espera referentes à INS-2 são exibidos no Gráfico 18.

Gráfico 18 – Intervalos de confiança para as diferenças entre as médias dos tempos de espera (INS-2 VISSIM)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, é possível observar que o método convencional pode gerar resultados menos precisos dos tempos de espera, o que se reflete na estimativa da brecha crítica e ocorre devido a fatores externos que não tiveram seus efeitos previamente controlados, como o padrão de chegada dos veículos na via secundária, espaçamento entre eles e seus perfis de aceleração, correspondendo, provavelmente, a uma modelagem menos representativa da realidade. No Apêndice A são exibidas tabelas com o resumo dos resultados de calibração e validação obtidos para ambas as interseções.

4.4 Verificação, calibração e validação do modelo no TransModeler

Nesta seção são apresentados os resultados e a discussão referentes às fases de calibração e validação do modelo de aceitação de brechas do TransModeler e de comparação entre os métodos para os cruzamentos não semaforizados analisados, possuindo a mesma estrutura da seção anterior.

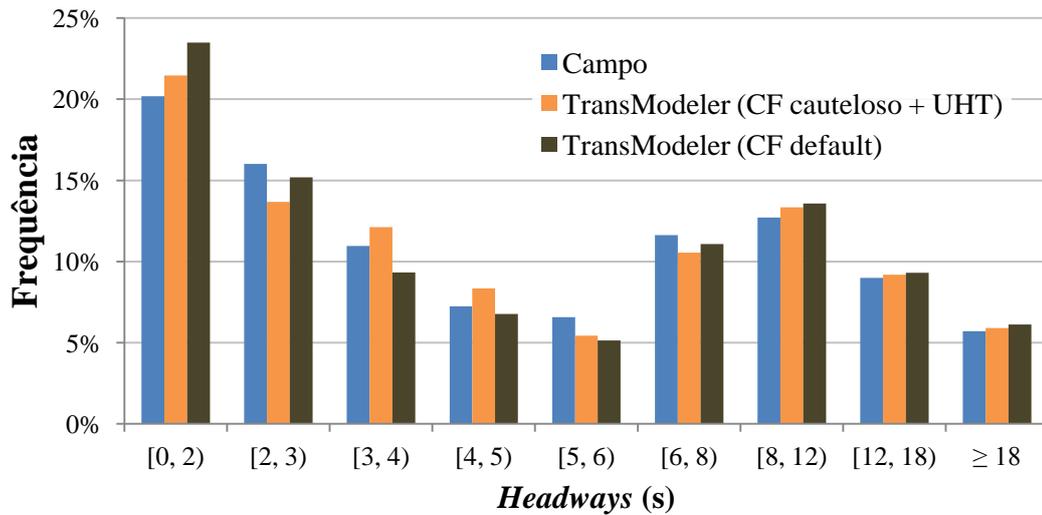
4.4.1 Verificação dos headways no fluxo principal

Para ambas as interseções do estudo de casos, os parâmetros comportamentais α , β e γ do modelo de *car-following* modificado da General Motors foram alterados em relação aos seus valores *default* ($\alpha^+ = 2,81$; $\beta^+ = -1,67$; $\gamma^+ = -0,89$; $\alpha^- = 4,65$; $\beta^- = 1,08$; e $\gamma^- = 1,65$), por

meio de tentativa e erro, para melhor replicar o padrão de chegada na via principal, tomando-se como base a equação que representa esse modelo para identificar o efeito no perfil dos condutores (tornando-os mais agressivos ou cautelosos) dependendo do sentido de ajuste (incremento positivo ou negativo) de cada parâmetro e a percepção adquirida a cada tentativa quanto à sensibilidade deles sobre a distribuição dos *headways*. No caso da INS-1, esses parâmetros foram ajustados no intuito de representar um perfil mais cauteloso para a população de motoristas ($\alpha^+ = 2,00$; $\beta^+ = -2,00$; $\gamma^+ = -0,75$; $\alpha^- = 5,60$; $\beta^- = 1,40$; e $\gamma^- = 1,45$), já que o perfil *default* forneceu uma distribuição de *headways* com frequências levemente superestimadas para as classes de valores mais baixos.

O χ^2 obtido no cenário de calibração para a rua Pereira Valente (INS-1), com *critical headway* em sua distribuição *default*, foi de 5,1, inferior ao valor crítico (15,5, valor-p = 74,2%), de forma que não há indícios para rejeitar a hipótese nula. No Gráfico 19 é possível observar a similaridade entre as distribuições de campo e modelada. Com os valores *default* do modelo de *car-following*, o χ^2 resultante (6,2, valor-p = 62,8%) também foi pequeno, porém o mesmo não ocorreu nos cenários de validação (portanto, o perfil um pouco mais cauteloso foi utilizado em todos os cenários), como pode ser visto no Apêndice B; nesse caso, as maiores diferenças correspondem às classes de *headways* intermediários, principalmente de 5 a 6 segundos. Como essas classes foram pouco influenciadas pelos parâmetros de *car-following*, foi dado um incremento de 2 segundos para cada classe da distribuição do parâmetro que representa o limiar de *headway* entre os regimes de fluxo livre e *car-following* (*upper headway threshold*, UHT, cuja distribuição *default* varia entre 1,75 e 4,6 s), permitindo um maior impacto do modelo de *car-following* nessas classes intermediárias. Vale ressaltar que diversas tentativas de ajuste de outros parâmetros do TransModeler não foram suficientes para obter o mesmo efeito.

Gráfico 19 – Padrão de chegada dos veículos na rua Pereira Valente (calibração TransModeler)

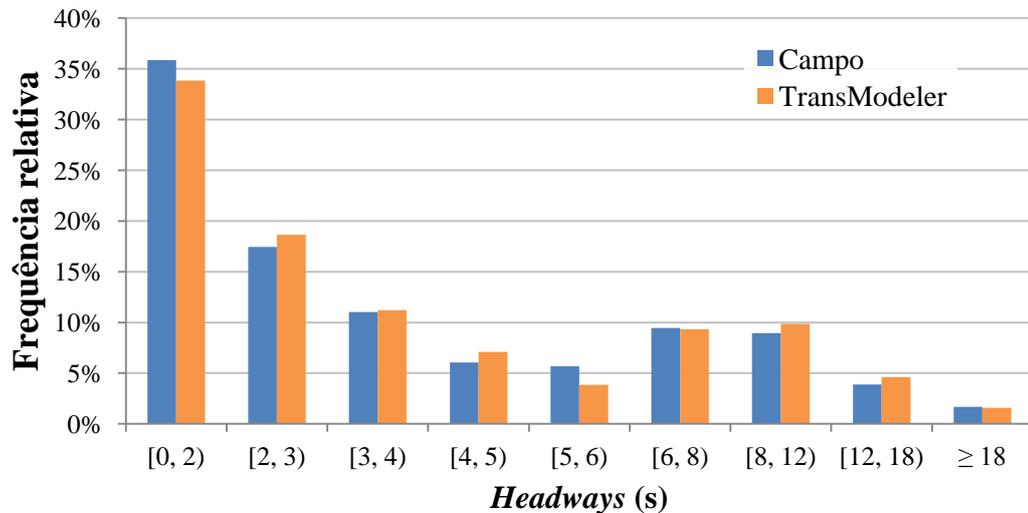


Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os parâmetros comportamentais do modelo de *car-following* em seus valores *default*, a hipótese nula de que o padrão de chegada dos veículos na rua Dom Lino (INS-2) tem a mesma distribuição de probabilidade simulada não pôde ser rejeitada, já que o χ^2 de 12,0 foi menor que o valor crítico (valor-p = 15,3%). Porém, o mesmo não ocorreu para o cenário de validação, que, por corresponder a uma condição de tráfego congestionada, foi adotada uma combinação de valores dos parâmetros de *car-following* associados a um perfil mais agressivo dos condutores ($\alpha^+ = 4,50$; $\beta^+ = -1,70$; $\gamma^+ = -0,80$; $\alpha^- = 3,00$; $\beta^- = 1,10$; e $\gamma^- = 1,60$) para obter uma distribuição de *headways* mais parecida com a amostra de campo, como pode ser visto no Apêndice B, resultando em um χ^2 de 15,5 bem próximo do valor crítico (valor-p = 5,0%).

Para o cenário de *validação 2* da INS-2, cujo fluxo de tráfego na via principal é menos intenso, os parâmetros de *car-following* também foram levemente ajustados a fim de representar um perfil mais cauteloso dos condutores ($\alpha^+ = 2,25$; $\beta^+ = -1,70$; $\gamma^+ = -0,80$; $\alpha^- = 5,50$; $\beta^- = 1,10$; e $\gamma^- = 1,60$) e gerar uma distribuição de *headways* cuja hipótese não fosse rejeitada pelo teste qui-quadrado ($\chi^2 = 14,2$, valor-p = 7,7%). Com as combinações dos parâmetros de *car-following* testados, o *upper headway threshold* não contribuiu significativamente na replicação do padrão de chegada para os cenários da INS-2. Nota-se no Gráfico 20 a semelhança entre as distribuições de *headways* coletada e simulada no TransModeler com os parâmetros em *default*, com uma maior diferença observada na classe de 5 a 6 s, cujo χ^2 parcial foi de 7,4.

Gráfico 20 – Padrão de chegada dos veículos na rua Dom Lino (calibração TransModeler)

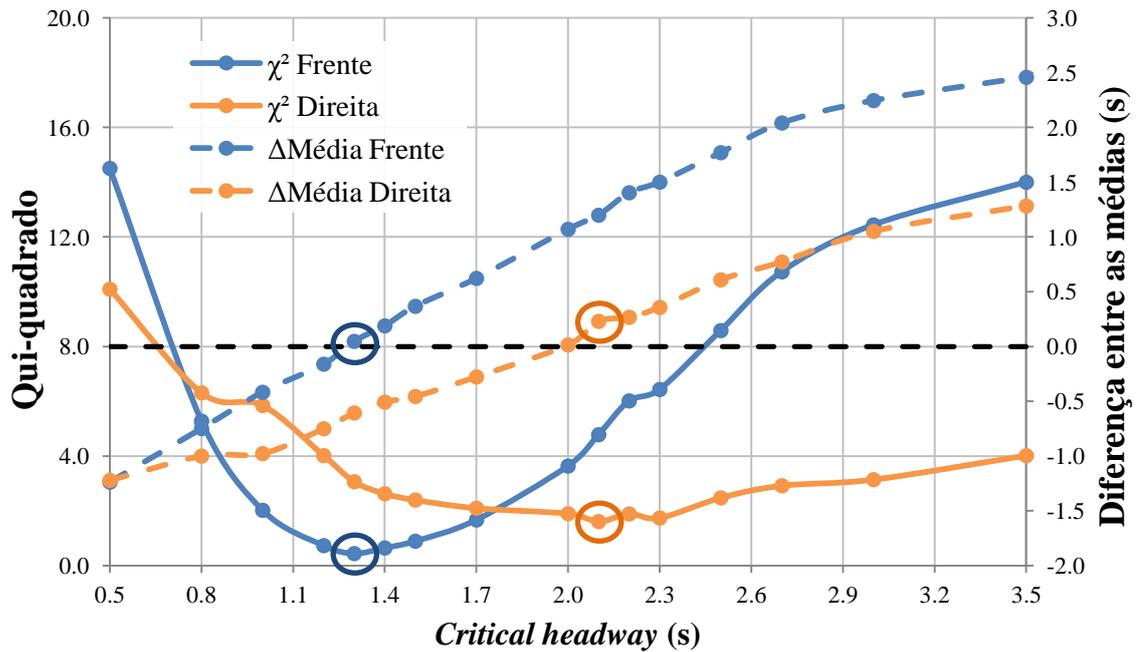


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.2 Calibração do critical headway

No caso do TransModeler, o ajuste estimado nos tempos de espera simulados foi bem inferior, sendo de 0,3 segundos para o movimento seguir em frente e 0,4 s para a conversão à direita na INS-1 e de 0,5 s para ambos os movimentos na INS-2. Percebe-se, portanto, que o processo de desaceleração dos veículos na aproximação secundária ocorre de maneira bem menos demorada nesse simulador (com seus parâmetros em *default*) do que no modelo do VISSIM (com a presença do *stop sign*), porém ainda de forma menos brusca quando comparado ao perfil médio dos condutores observado em campo.

Assim como para o modelo do VISSIM, foram executadas 300 replicações com duração de 30 minutos para cada cenário da INS-1 e 200 replicações com duração de 1 hora para a INS-2, além do tempo de *warm-up*. Também semelhante à consideração do modelo do VISSIM, a população de condutores foi adotada como homogênea quanto à avaliação das brechas, atribuindo um valor único de *critical headway*, já que diversas distribuições poderiam gerar pequenos erros de calibração; apesar de não ser verdadeira, tal premissa é geralmente assumida (TROUTBECK; BRILON, 2001). No Gráfico 21 estão exibidas as curvas obtidas para a estatística χ^2 e para as diferenças entre as médias amostrais dos tempos de espera observados em campo e simulados, para cada movimento de conversão proveniente da R. Cel. Linhares (INS-1).

Gráfico 21 – Calibração do *critical headway* pelo método proposto (INS-1 TransModeler)

Fonte: Elaborado pelo autor.

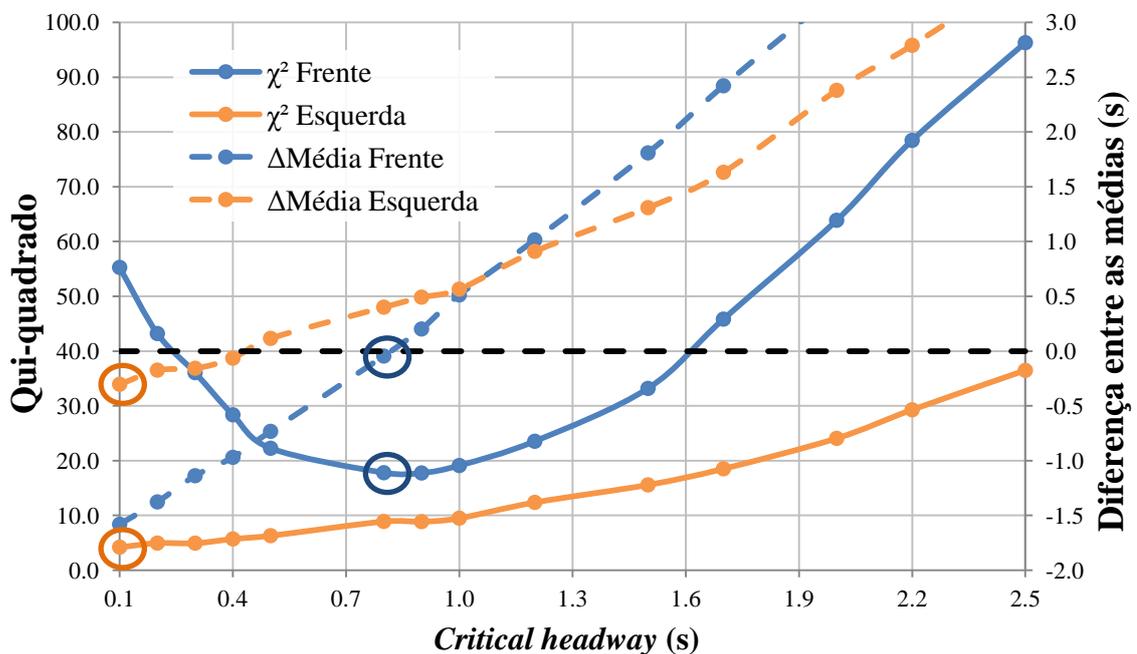
Apenas os valores de 0,5, 3,0 e 3,5 segundos, dentre os *critical headway* testados, geraram um χ^2 superior ao crítico para o movimento de seguir em frente (11,1). A diferença absoluta entre as médias dos tempos de espera também foi maior nesses cenários extremos, constatando que esses valores não são adequados para representar o perfil médio observado em campo para esse movimento. Para *critical headway* entre 1,2 e 1,5 s, o χ^2 e a diferença absoluta entre as médias dos tempos de espera variaram pouco, porém ambas as estatísticas foram mínimas para o valor de 1,3 s (em destaque no gráfico), sendo iguais a 0,4 (valor-p = 99,4%) e 0,05 s, respectivamente.

No caso da conversão à direita, o χ^2 obtido foi superior ao crítico (9,5) apenas para *critical headway* de 0,5 s ($\chi^2 = 10,1$, valor-p = 3,9%), com a maioria dos demais cenários resultando em χ^2 significativamente baixos. O menor χ^2 (1,6, valor-p = 80,6%) foi obtido com *critical headway* de 2,1 segundos, correspondendo a uma diferença absoluta entre as médias dos tempos de espera igual a apenas 0,2 s. Apesar disso, pode-se observar que valores do parâmetro entre 1,4 e 2,5 s também forneceram resultados significativamente baixos para ambas as estatísticas.

Dessa forma, o *critical headway* calibrado para a conversão à direita foi superior ao obtido para o movimento de seguir em frente, aparentemente em oposição aos valores apresentados no HCM e ao que foi observado nos resultados do VISSIM. Porém, vale lembrar

que o conceito de *critical headway* do TransModeler representa uma margem de segurança no momento em que o veículo da aproximação secundária termina de atravessar a interseção, portanto esses resultados obtidos não estão necessariamente em desacordo com os do HCM e do VISSIM levando em consideração que parte da diferença entre as brechas críticas dos movimentos de conversão ocorre devido ao tempo necessário para executá-los (DEVARASETTY; ZHANG; FITZPATRICK, 2012). Analogamente, têm-se as curvas das estatísticas referentes à calibração do *critical headway* para a INS-2 no Gráfico 22.

Gráfico 22 – Calibração do *critical headway* pelo método proposto (INS-2)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos os valores de *critical headway* testados para o movimento de seguir em frente na INS-2 corresponderam a um χ^2 superior ao crítico (15,5), dando indícios de que o modelo não está bem adequado ao fenômeno de campo. Isso pode estar ocorrendo devido à premissa de homogeneidade dos motoristas, às diferenças, mesmo não tão significativas, no padrão de chegada na via principal e/ou a outros comportamentos, como a entrada agressiva de alguns veículos na interseção (mais frequente nesse simulador). Apesar disso, com *critical headway* de 0,8 segundos foi obtido um χ^2 de 17,8, um pouco superior ao valor crítico (15,5, valor-p = 2,3%), e a menor diferença absoluta entre as médias dos tempos de espera, de apenas 0,05 s, sendo portanto o valor adotado para esse movimento.

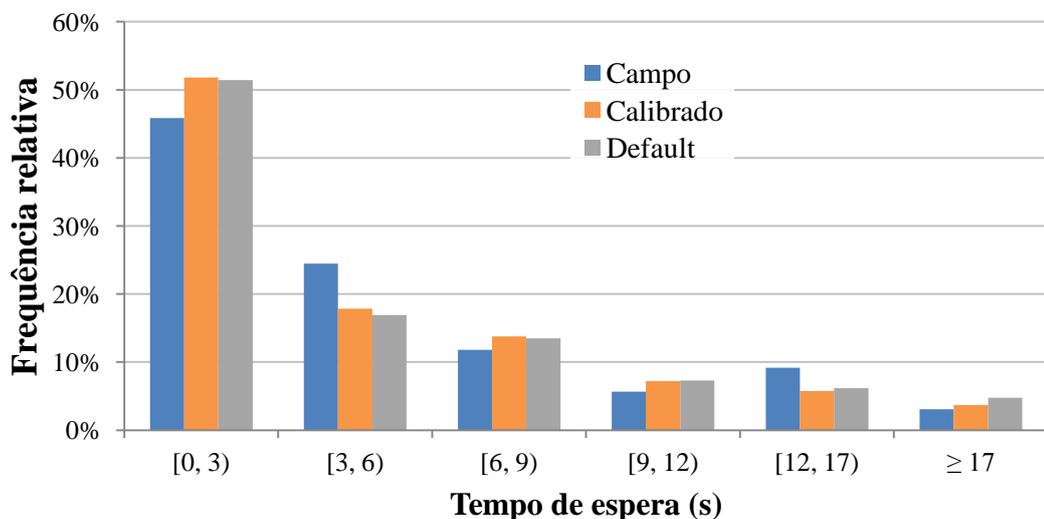
Para a conversão à esquerda, o χ^2 foi inferior ao crítico (12,6) apenas para valores de *critical headway* de até 1,2 s. Com o parâmetro em apenas 0,1 s, o χ^2 obtido foi mínimo

(4,2, valor-p = 64,9%) e a diferença absoluta entre as médias foi de apenas 0,3 s, sendo esse o valor adotado na calibração; porém, *critical headways* abaixo de 0,5 s também corresponderam a pequenos valores para ambas as estatísticas. Como se pode observar, os valores calibrados para a INS-2 foram bem menores, consequência da maior intensidade de tráfego nesse cruzamento; além disso, dessa vez o *critical headway* para a conversão foi inferior ao obtido para o movimento de seguir em frente, indicando uma maior tendência de entrada forçada dos veículos na via principal.

4.4.3 Validação do parâmetro sob condições de tráfego semelhantes

As distribuições da medida-alvo observada em campo, obtida pelo modelo com o *critical headway* calibrado (1,3 s) e com o parâmetro com a distribuição *default* do TransModeler (média ponderada de aproximadamente 1,8 s) para o movimento seguir em frente da INS-1 estão mostradas no Gráfico 23 (N = 229 observações).

Gráfico 23 – Validação para o movimento seguir em frente (INS-1 TransModeler)



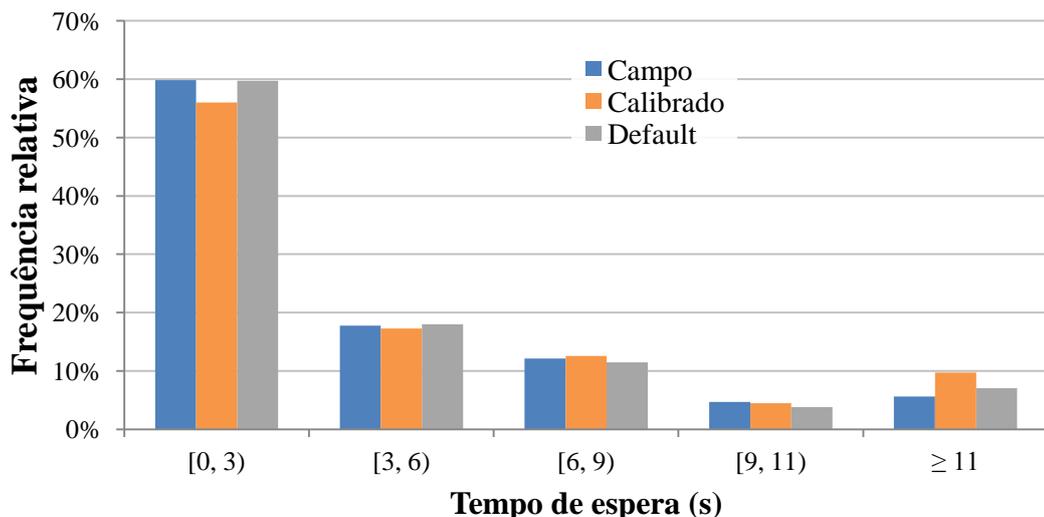
Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se uma diferença razoável entre as distribuições dos tempos de espera modelados e a observada em campo nas classes mais extremas, o que resultou na rejeição da hipótese nula tanto no caso do modelo calibrado quanto para o *critical headway default*, com χ^2 de validação iguais a 13,5 (valor-p = 1,9%) e 15,2 (valor-p = 1,0%), respectivamente, um pouco superiores ao valor crítico (11,1). A média dos tempos de espera simulados foi de 9,2 com o parâmetro *default* e 8,7 segundos com o modelo calibrado, enquanto a observada em campo foi de 8,1 s, com um intervalo de confiança de 95% igual a [-1,5 s; 0,3 s] para a

diferença entre as médias. Dessa forma, não há indícios para rejeitar a hipótese de igualdade entre as duas médias.

No Gráfico 24 são exibidas as três distribuições dos tempos de espera obtidas para a conversão à direita da INS-1 (N = 107 observações), onde é possível visualizar a boa aderência entre elas. Com o *critical headway default*, o χ^2 de validação obtido foi de apenas 0,6 (valor-p = 96,6%), porém com o parâmetro calibrado o χ^2 também foi bastante satisfatório (2,2, valor-p = 70,4%), com maior diferença na última classe da medida-alvo. O modelo calibrado forneceu uma média dos tempos de espera igual a 8,5 segundos, enquanto a observada em campo foi de 6,9, correspondendo a um IC de 95% para a diferença entre essas médias igual a [-2,5 s; -0,6 s]. Assim como nos resultados do VISSIM, houve uma pequena superestimação da média da medida-alvo pelo modelo, o que possivelmente ocorreu devido à diferença entre as amostras referentes aos cenários de calibração e validação mesmo possuindo características semelhantes de tráfego.

Gráfico 24 – Validação para a conversão à direita (INS-1 TransModeler)

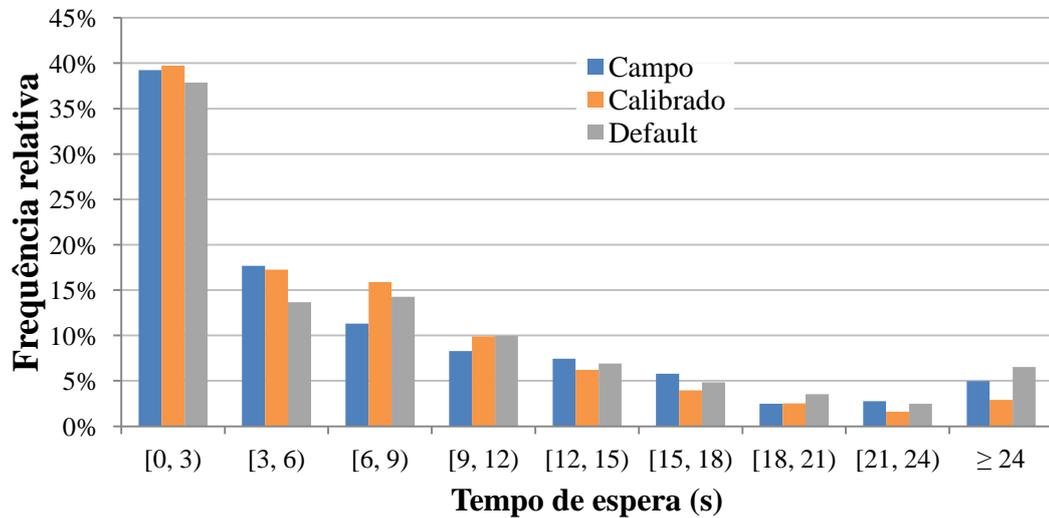


Fonte: Elaborado pelo autor.

As distribuições dos tempos de espera para o movimento seguir em frente da INS-2 são apresentadas no Gráfico 25 (N = 362 observações). Nota-se uma discrepância entre a distribuição de campo e a gerada pelo modelo calibrado nas últimas duas classes e na classe de 6 a 9 s, que contribuíram mais para o χ^2 de 17,9 (valor-p = 2,2%) que indicou a rejeição da hipótese nula. Como isso ocorreu na própria etapa de calibração, não é de se estranhar que o resultado não foi positivo. Já com o *critical headway* em *default*, o χ^2 de validação foi igual a 11,1, inferior ao crítico (valor-p = 19,5%). A média dos tempos de espera coletados em campo foi de 11,8 segundos, enquanto a obtida pelo modelo *default* foi de 12,5 s e pelo

modelo calibrado foi de 10,3 s, correspondendo a um IC de 95% igual a [0,4 s; 2,7 s] para a diferença entre as médias, indicando uma pequena subestimação da média da medida-alvo.

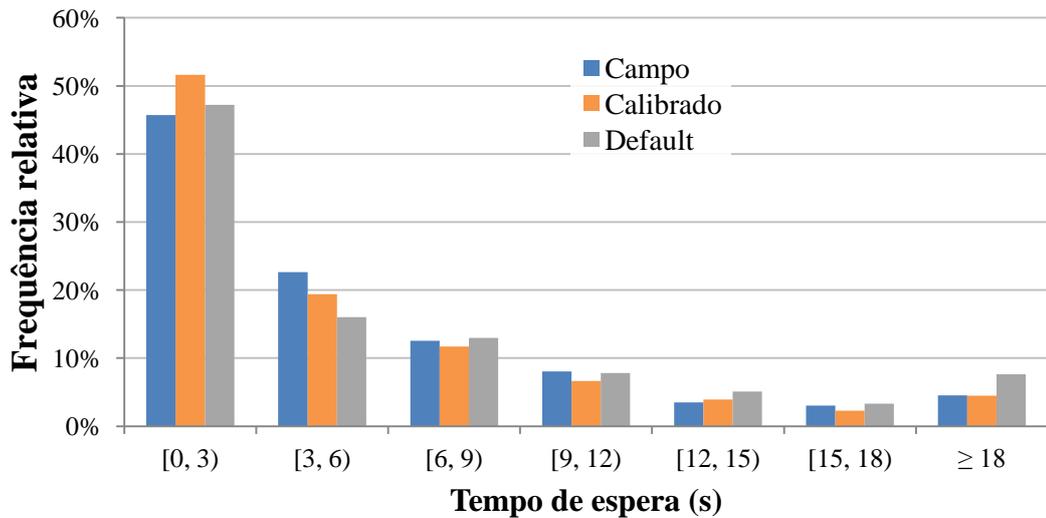
Gráfico 25 – Validação para o movimento seguir em frente (INS-2 TransModeler)



Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso da conversão à esquerda da INS-2, a aderência entre as distribuições dos tempos de espera foi melhor, como ilustrado no Gráfico 26 (N = 199). O χ^2 de validação obtido com o modelo calibrado foi de apenas 3,6, bem inferior ao crítico (valor-p = 72,6%), enquanto que pelo modelo com *critical headway default* a estatística foi de 9,1 (valor-p = 16,9%). A média dos tempos de espera coletada em campo foi de 8,8 segundos, enquanto a média correspondente ao parâmetro *default* foi de 10,7 s e a média obtida com o modelo calibrado foi de 9,1 s, resultando em um intervalo de confiança de 95% igual a [-1,5 s; 0,9 s] para a diferença entre as médias. Portanto, há indícios que as médias de campo e simulada com o parâmetro calibrado são bastante similares.

Gráfico 26 – Validação para a conversão à esquerda (INS-2 TransModeler)

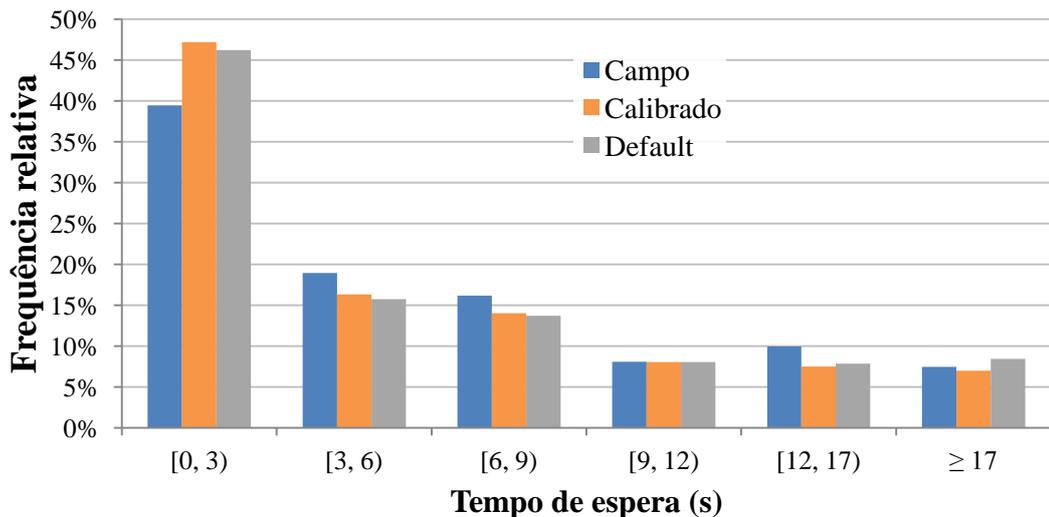


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.4 Validação do parâmetro sob condições de tráfego diferentes

As distribuições dos tempos de espera referentes ao movimento seguir em frente da aproximação secundária da INS-1 para o cenário de *validação 2* são mostradas no Gráfico 27 (N = 322 observações), enquanto no Gráfico 28 são exibidas as distribuições para a conversão à direita.

Gráfico 27 – Validação 2 para o movimento seguir em frente (INS-1 TransModeler)



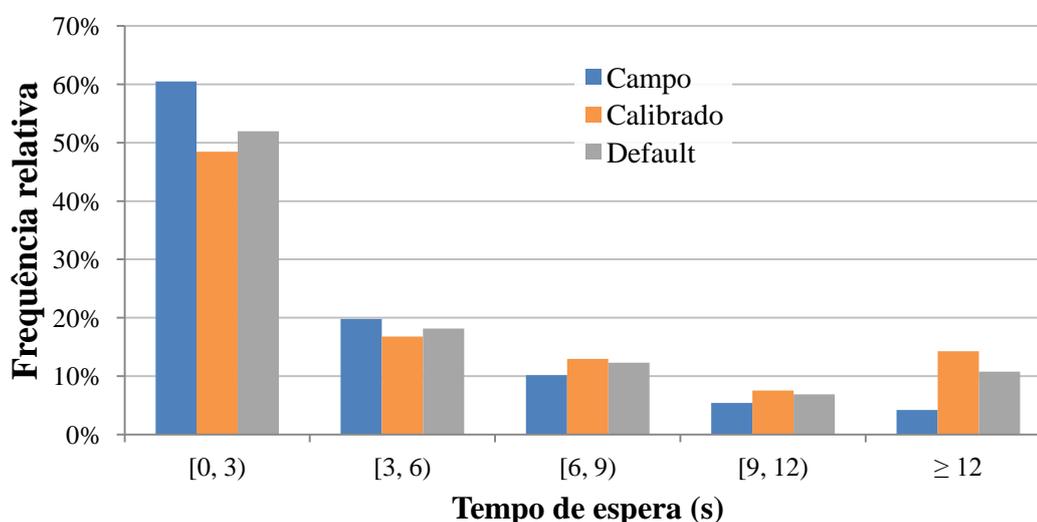
Fonte: Elaborado pelo autor.

Como é possível observar, nesse cenário de *validação 2* a aderência entre a distribuição da medida-alvo com o *critical headway* calibrado e a de campo foi satisfatória,

correspondendo a um χ^2 de 9,2 (valor-p = 10,3%), o que não ocorreu para os cenários de calibração e validação. Com o parâmetro em *default*, o χ^2 também foi satisfatório (8,9, valor-p = 11,3%). A média dos tempos de espera obtida em campo e pelo modelo calibrado foram iguais (10,1 s), com um intervalo de confiança de 95% para a diferença entre as médias igual a [-1,0 s; 1,0 s], confirmando a similaridade entre ambas; para o *critical headway default*, a média foi levemente superior (10,7 s).

Como as condições de tráfego neste cenário são diferentes e o grau de impaciência dos condutores só é alterado para tempos de espera acima de 20 segundos, não era de se esperar que o mesmo valor de *critical headway* calibrado seria capaz de gerar bons resultados neste caso, mas, como se pode notar no gráfico acima e nas etapas de calibração e validação, a distribuição dos tempos de espera desse movimento foi pouco sensível ao valor do parâmetro para valores próximos ao calibrado. Vale lembrar que no modelo do VISSIM este foi o único caso em que o valor do parâmetro foi validado para condições de tráfego diferentes, indicando que o incremento de demanda não foi suficiente para impactar significativamente na brecha crítica média dos motoristas para este movimento.

Gráfico 28 – Validação 2 para a conversão à direita (INS-1 TransModeler)



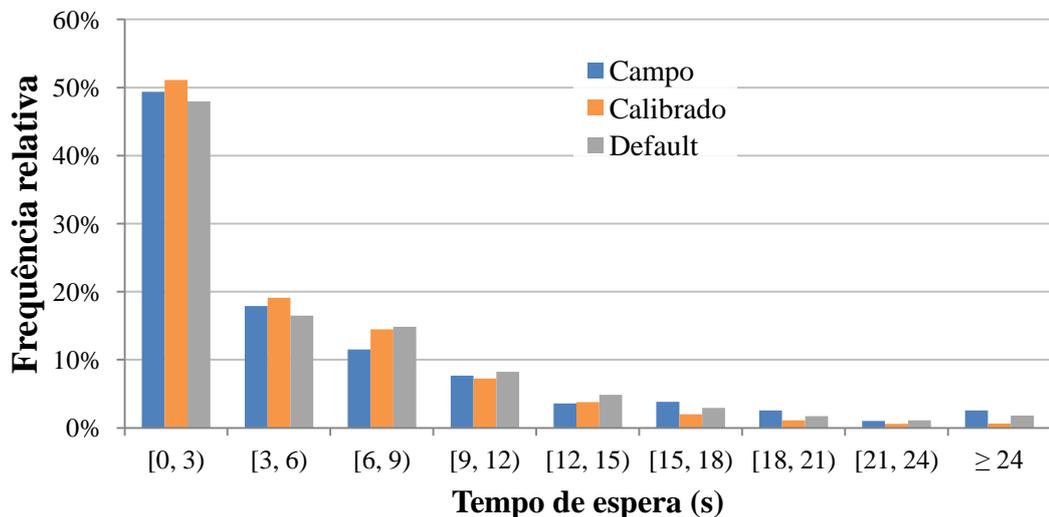
Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso da conversão à direita da INS-1, o valor de *critical headway* calibrado é claramente alto para este cenário com maior demanda de tráfego, pois na distribuição simulada há uma maior concentração de observações nas classes com maiores tempos de espera. O χ^2 obtido foi de 19,7 (valor-p = 0,1%), indicando a rejeição da hipótese de que a amostra de campo pode ter sido obtida pela mesma distribuição gerada no modelo. A distribuição obtida com o parâmetro *default* se aproximou mais da distribuição coletada em

campo, porém a hipótese nula também foi rejeitada, com χ^2 de 10,4 (valor-p = 3,4%). A média da medida-alvo observada em campo foi de 7,3 segundos, consideravelmente inferior à média obtida com o modelo calibrado (10,1 s), correspondendo a um IC de 95% de confiança igual a [-4,0 s; -1,7 s] para a diferença entre as médias. Dessa forma, seria necessário um *critical headway* inferior para melhor representar o comportamento dos motoristas que realizam essa conversão à direita, o que faz sentido já que a via principal se encontra mais carregada neste cenário.

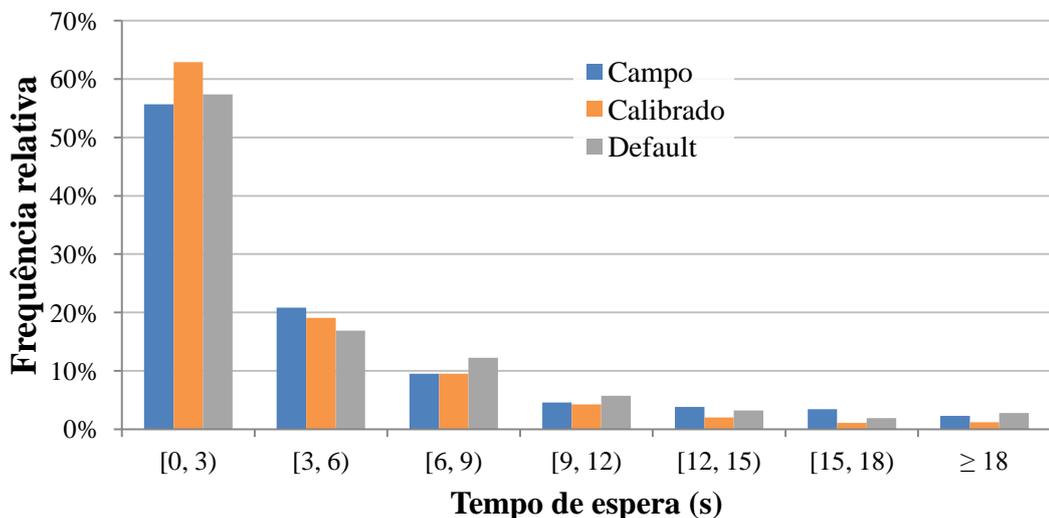
Nos Gráfico 29 e Gráfico 30 são mostradas as distribuições dos tempos de espera para os movimentos seguir em frente (N = 391) e conversão à esquerda (N = 264) da aproximação secundária da INS-2, respectivamente.

Gráfico 29 – Validação 2 para o movimento seguir em frente (INS-2 TransModeler)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 30 – Validação 2 para a conversão à esquerda (INS-2 TransModeler)

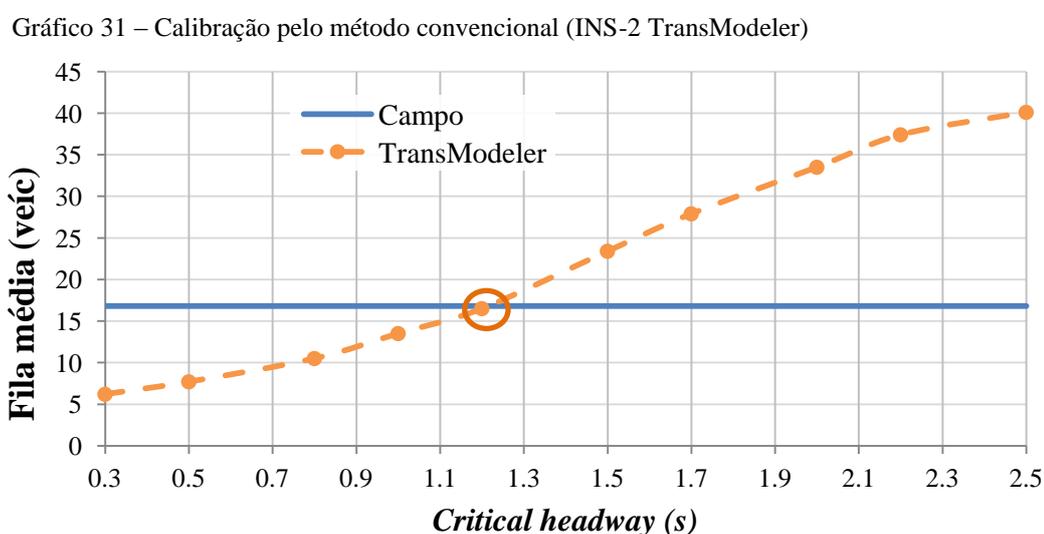


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para ambos os movimentos, o modelo calibrado forneceu uma distribuição da medida-alvo significativamente diferentes da observada em campo, com χ^2 de 42,5 (valor-p = 0,0%) para o movimento seguir em frente e 22,5 (valor-p = 0,1%) para a conversão à esquerda. Já com o *critical headway default*, nenhuma das hipóteses nulas foram rejeitadas (χ^2 de 8,8 para ambos os movimentos, com valores-p = 35,9% e 18,6%, respectivamente). O modelo com o parâmetro *default* também forneceu boas estimativas para a média dos tempos de espera, o que não ocorreu com o valor do parâmetro calibrado: o intervalo de confiança de 95% para a diferença entre as médias foi de [0,9 s; 3,0 s] para o movimento de seguir em frente e [0,1 s; 2,2 s] para a conversão à esquerda. Este resultado era esperado, pois o tráfego da via principal desse cruzamento é menos intenso no cenário de *validação 2*, de forma que os condutores da aproximação secundária precisam se arriscar menos para passar pela interseção.

4.4.5 Comparação entre o método proposto e o método convencional

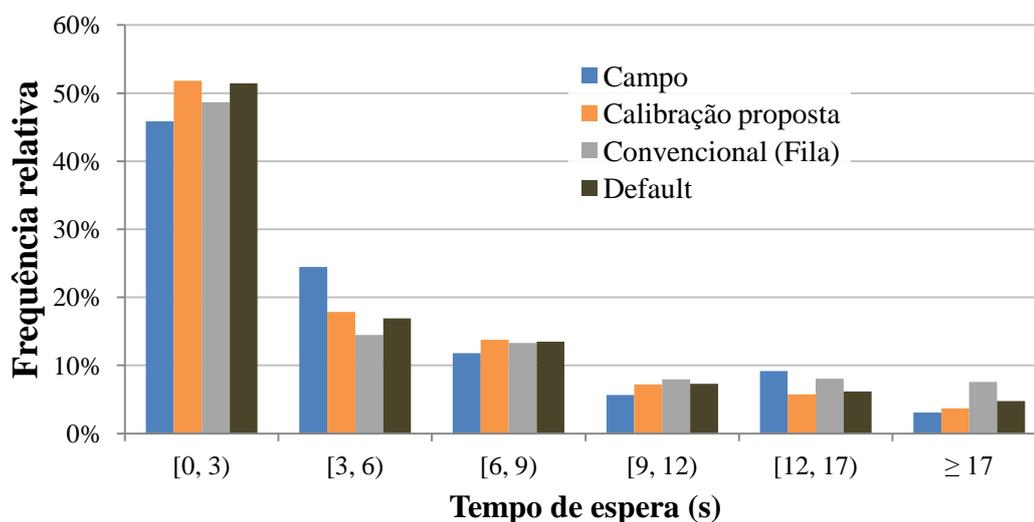
No simulador TransModeler, em ambos os cruzamentos o valor ajustado do *critical headway* com base no tamanho médio de fila (método tradicional) foi superior aos valores do parâmetro obtidos com a calibração proposta, sendo de 2,3 segundos para a INS-1 e 1,2 s para a INS-2. Isso indica que a fila formada nessas aproximações secundárias, com os demais parâmetros do modelo em seus valores *default*, escoou mais facilmente no simulador e o valor do *critical headway* deve ser maior para controlar a descarga da fila. No Gráfico 31 é mostrada a curva dessa medida de desempenho em função do *critical headway* de ambos os movimentos da INS-2; o gráfico referente à INS-1 se encontra no Apêndice B.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As distribuições dos tempos de espera observados em campo, obtidos pelo modelo proposto, pela calibração convencional e pelo modelo *default*, para o movimento seguir em frente da INS-1 no cenário de *validação*, são apresentadas no Gráfico 32.

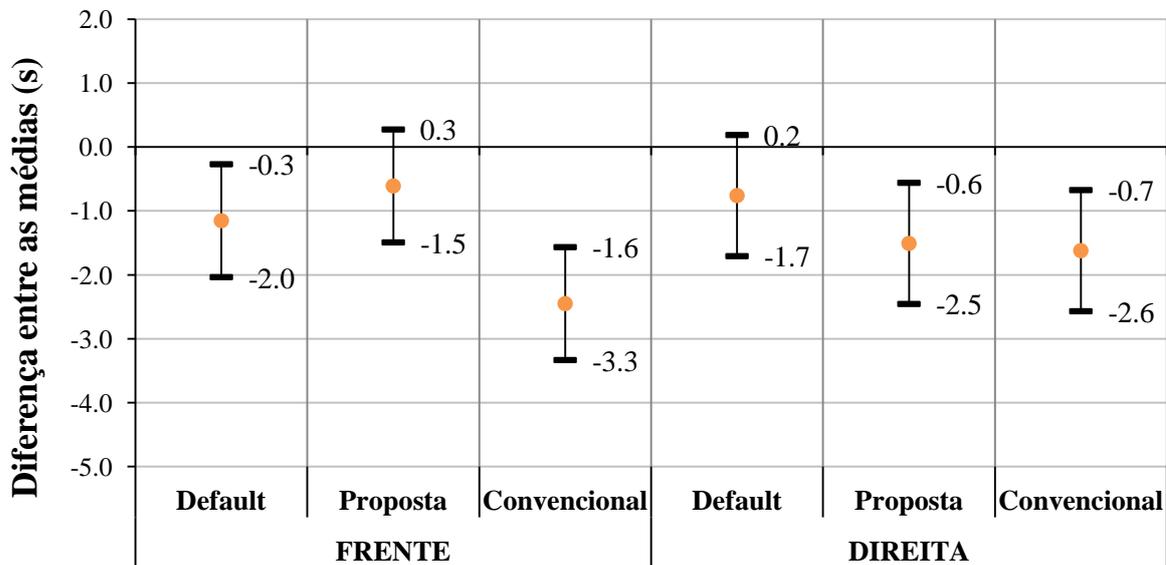
Gráfico 32 – Distribuições dos tempos de espera para o movimento seguir em frente (INS-1 TransModeler)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar da hipótese nula de aderência entre a amostra coletada em campo e a distribuição obtida pelo modelo proposto ter sido rejeitada (com χ^2 de 13,5 e valor-p = 1,9%, apresentado na etapa de validação), nota-se uma melhor estimativa dos tempos de espera através desse modelo; com a calibração convencional, o χ^2 obtido foi de 24,6 (valor-p = 0,0%), significativamente superior. Além disso, o tempo de espera médio estimado pelo método convencional foi igual a 10,5 s, bem superior à média observada em campo (8,1 s) e à média obtida no modelo proposto (8,7 s). Os intervalos de confiança de 95% para as diferenças entre as médias dos tempos de espera modelados e dos coletados são mostrados no Gráfico 33, onde pode ser observado que o método proposto forneceu melhor estimativa para o movimento seguir em frente.

Gráfico 33 – Intervalos de confiança para as diferenças entre as médias dos tempos de espera (INS-1 TransModeler)

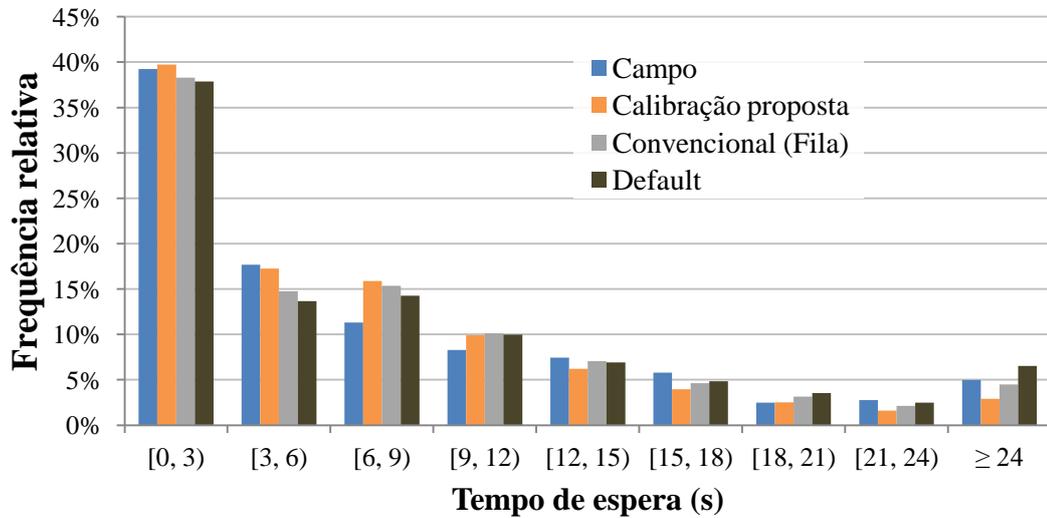


Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso da conversão à direita na INS-1, a diferença entre as distribuições dos tempos de espera obtidos pelos modelos calibrados por ambos os métodos avaliados foi mínima (ver no Apêndice B), já que os valores calibrados do parâmetro foram semelhantes, assim como ocorreu no VISSIM. O χ^2 foi de apenas 2,2 (valor-p = 70,4%) para o modelo proposto e 2,7 (valor-p = 60,6%) para o modelo convencional; as médias dos tempos de espera foram 8,5 e 8,6 s, respectivamente, superiores à média coletada em campo (6,9 s), como apresentado no Gráfico 33.

São exibidas no Gráfico 34 as distribuições dos tempos de espera para o movimento seguir em frente na INS-2; a amostra de campo apresentou melhor aderência à distribuição gerada pelo modelo calibrado pelo método convencional ($\chi^2 = 9,7$ e valor-p = 28,6%), enquanto a hipótese nula referente ao modelo proposto foi rejeitada com $\chi^2 = 17,9$ (valor-p = 2,2%). A média dos tempos de espera também foi melhor estimada pelo modelo tradicional, cujo valor foi de 11,4 s, enquanto a obtida pelo modelo proposto foi de 10,3 s e a coletada em campo foi de 11,8 s.

Gráfico 34 – Distribuições dos tempos de espera para o movimento seguir em frente (INS-2 TransModeler)

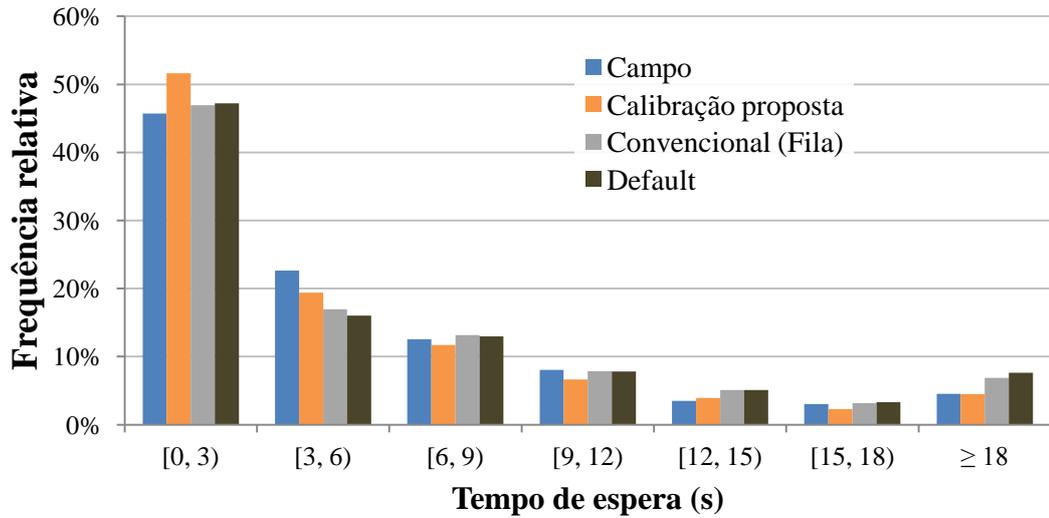


Fonte: Elaborado pelo autor.

Tal resultado desfavorável à calibração proposta pode ter sido obtido devido à diferença entre as amostras utilizadas nos cenários de calibração e validação, que, apesar de corresponderem a uma intensidade semelhante do fluxo principal, apresentaram distribuições diferentes da medida-alvo. Na calibração, a média dos tempos de espera em campo foi de 10,3 s, praticamente igual à obtida no simulador com o *critical headway* calibrado com base nessa medida-alvo (em ambos os cenários), que pode ter sido menor que no cenário de validação por consequência do maior carregamento na aproximação secundária, contribuindo no aumento da agressividade dos motoristas antes mesmo deles atingirem a primeira posição da fila.

Sendo esta hipótese verdadeira, o ideal seria considerar a redução da brecha crítica enquanto os condutores experimentam atraso em fila, não somente quando estão avaliando as brechas, talvez com taxas de decréscimo diferentes. Têm-se no Gráfico 35 as distribuições dos tempos de espera referentes à conversão à esquerda.

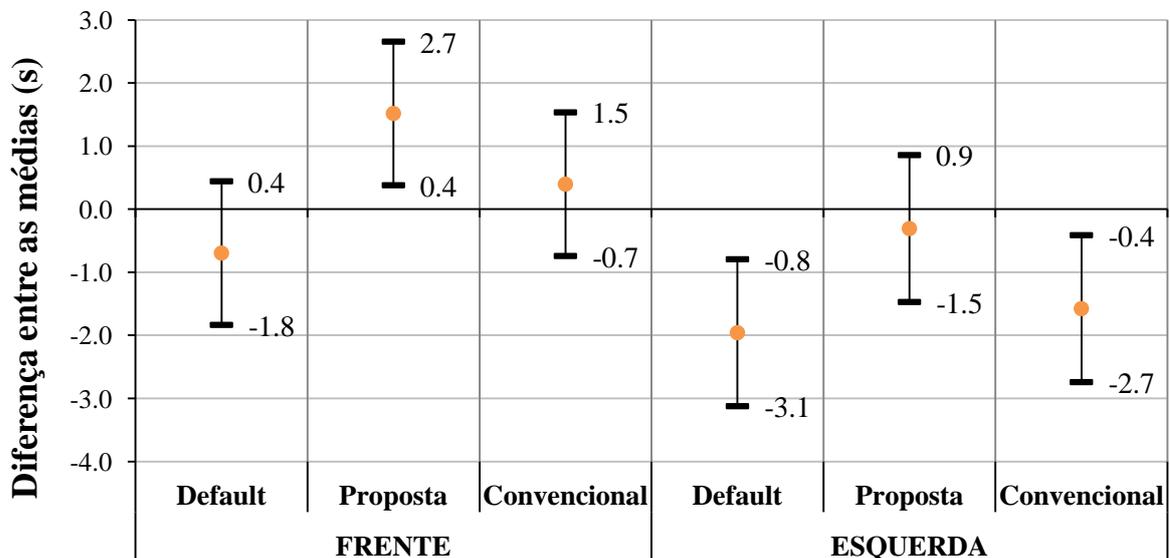
Gráfico 35 – Distribuições dos tempos de espera para a conversão à esquerda (INS-2 TransModeler)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já para a conversão à esquerda na INS-2, a melhor aderência da amostra de campo ocorreu com a distribuição obtida pelo método proposto, correspondendo a um χ^2 de apenas 3,6 (valor-p = 72,6%); com o método convencional também não houve rejeição da hipótese nula, porém com χ^2 um pouco superior (6,5, valor-p = 37,4%). A média dos tempos de espera também foi mais próxima da observada em campo (8,8 s) com o modelo calibrado com base nessa medida-alvo (9,1 s), enquanto ela foi superestimada pelo modelo calibrado com base no tamanho de fila (10,3 s). Os respectivos intervalos de confiança de 95% são mostrados no Gráfico 36.

Gráfico 36 – Intervalos de confiança para as diferenças entre as médias dos tempos de espera (INS-2 TransModeler)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, com o simulador TransModeler também foi observado que, em geral, a modelagem da aceitação de brechas pode ser menos precisa quando a calibração é realizada pelo método tradicional. No Apêndice B são apresentadas tabelas-resumo dos resultados obtidos no modelo do TransModeler.

5 CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Embora na literatura haja diversos trabalhos publicados sobre aceitação de brechas em interseções não semaforizadas, a modelagem desse processo utilizando simulação microscópica do tráfego ainda está avançando. Neste trabalho é proposto um método de calibração e de validação do modelo *regras de prioridade* (RP) do VISSIM e do modelo de cruzamentos não semaforizados do TransModeler que tem o tempo de espera do primeiro veículo da fila da aproximação secundária como medida-alvo, que pouco depende de fatores externos ao processo de aceitação de brechas.

Utilizou-se o modelo RP porque, além de ser mais simples, a modelagem por ele realizada é suficiente para representar o processo de aceitação de brechas das interseções estudadas, as quais possuem visibilidade bastante limitada aos motoristas e, portanto, não há a necessidade do uso do modelo *áreas de conflito* (AC) quanto a este aspecto; em cruzamentos deste tipo, a aceitação de brechas depende basicamente do parâmetro de brecha crítica. Além disso, o parâmetro *minimum gap time* do modelo RP representa a brecha crítica dos condutores, que é o principal parâmetro utilizado em modelos de aceitação de brechas em cruzamentos não semaforizados. Estes talvez sejam os motivos pelos quais se encontram na literatura apenas trabalhos de calibração de modelo de aceitação de brechas com o modelo RP.

Diferentemente do que é geralmente encontrado na literatura, neste trabalho as frequências da distribuição modelada da medida-alvo foram adotadas como valores esperados para o teste de aderência χ^2 . O motivo para esta consideração é que o teste de aderência deve inferir se a amostra coletada em campo pôde ter sido gerada pela população associada ao modelo de simulação, e não o contrário.

Os testes referentes à etapa de verificação dos *headways* entre os veículos na aproximação principal indicaram que não houve indícios para se rejeitar a hipótese de que a distribuição de probabilidade de campo seja igual à distribuição dos *headways* modelados, condição que deve ser atendida para a calibração de qualquer modelo de aceitação de brechas. Na maioria dos casos, foi necessário alterar os valores dos parâmetros comportamentais de *car-following* para corrigir o padrão de chegada; o mesmo pode acontecer com outras interseções cujo perfil médio de *following* dos motoristas é significativamente distinto do perfil padrão do simulador, quando a chegada dos veículos ao longo da aproximação for mais complexa e/ou quando há impedâncias a montante da INS não representadas no modelo.

A ordem de grandeza do ajuste nos tempos de espera simulados pelo VISSIM (1,9 a 2,3 segundos) constata a importância desta correção para se evitar uma parcela de tempo excessiva de desaceleração na contabilização da medida-alvo e, conseqüentemente, a sua superestimação; no caso do TransModeler, a magnitude do ajuste foi menor (0,3 a 0,5 s), mas ainda sim foi relevante. Feito este ajuste, os tempos de espera modelados tornam-se compatíveis com os observados em campo para fins de comparação.

Na calibração realizada para a INS-1, a estatística χ^2 teve variações menos perceptíveis para uma faixa relativamente ampla de valores do parâmetro calibrado, já que a quantidade de observações é menor por causa da menor intensidade de tráfego. Nesse caso, para o χ^2 se tornar mais sensível ao valor do parâmetro pode-se coletar mais dados em campo e dividir os tempos de espera em classes mais estreitas.

Os valores obtidos na calibração do *minimum gap time* para o movimento seguir em frente foram superiores aos valores referentes às conversões, assim como os existentes no HCM; um dos principais motivos deve ser porque a área de conflito para a conversão é menor, enquanto o veículo que segue em frente deve atravessar toda a seção da via principal, e/ou devido à influência do tempo de execução da manobra no valor da brecha crítica (DEVARASETTY; ZHANG; FITZPATRICK, 2012). Todos os valores calibrados do parâmetro foram superiores ao valor *default* do VISSIM, sugerindo que os condutores dos locais em estudo possuem, em média, um perfil mais cauteloso quando comparado ao perfil padrão adotado no simulador; porém, outros fatores também podem ter contribuído no aumento desses valores obtidos, como a não representação dos pedestres e ciclistas, apesar da pouca influência observada nos dois cruzamentos, e as velocidades relativamente mais baixas na via principal de ambos os cruzamentos, já que brechas correspondentes a velocidades mais altas podem ser superestimadas mais facilmente pelos motoristas.

Quanto aos resultados obtidos no TransModeler, não houve um padrão definido, pois o *critical headway* calibrado para o movimento de seguir em frente foi superior ao valor calibrado para a conversão em uma INS e inferior no outro cruzamento, possivelmente devido à própria definição do parâmetro. Além disso, o valor ótimo do parâmetro foi maior que o valor médio da distribuição *default* apenas para a conversão à direita na INS-1, indicando que nesse simulador o perfil médio dos condutores é, em geral, um pouco mais cauteloso do que o da população local e o do modelo *default* do VISSIM.

Aplicando-se nos cenários de validação os *minimum gap times* calibrados para cada movimento na aproximação secundária, em ambas as interseções do estudo de casos, não houve indícios que os tempos de espera observados não correspondam à distribuição gerada

no modelo; além disso, as médias dos tempos de espera simulados para todos os casos foram similares às obtidas em campo. Porém, o mesmo não ocorreu para o caso com intensidade de tráfego diferente, o que reforça a hipótese que quando há maior dificuldade em encontrar brechas suficientemente grandes os motoristas ficam mais impacientes e tendem a se arriscar um pouco mais. Parte dos resultados obtidos no modelo do TransModeler sugerem as mesmas conclusões, porém houve casos em que a validação sob condições de tráfego semelhantes não foi satisfatória (com χ^2 um pouco superior ao crítico ou uma diferença estatisticamente significativa na estimação da média dos tempos de espera), possivelmente devido às diferenças entre as amostras coletadas para cada cenário e/ou às limitações dos modelos construídos para as interseções do estudo de casos. Vale ressaltar ainda que estes resultados não comprovam a eficiência do método de calibração proposto, mas pelo menos fornecem indícios de que o método é satisfatório e reforçam a sua utilização.

A comparação entre os métodos de calibração proposto e convencional indicou que o ajuste realizado com base em medidas de desempenho do tráfego, como tamanho médio de fila, pode gerar resultados menos precisos, já que estas medidas dependem de outras variáveis como a demanda e o espaçamento entre os veículos. Nos casos de calibração simultânea com mais de um parâmetro as diferenças podem ser ainda maiores, pois diversas combinações de valores dos parâmetros podem resultar em pequenas diferenças entre as observações obtidas no modelo e as coletadas em campo e, conseqüentemente, conduzir a ajustes inadequados dos parâmetros. Por isso, propõe-se a estimação da brecha crítica utilizando o tempo de espera do primeiro veículo da fila como medida-alvo, pois ele depende principalmente do parâmetro.

Como a calibração pelo método proposto é realizada com base na distribuição de frequência de variáveis desagregadas, o esforço necessário na coleta dos dados é um pouco maior e há uma maior exigência em relação à quantidade de observações necessárias para se obter uma amostra com maior probabilidade de ser representativa da população local de motoristas. A análise de interseções com outras características físicas e operacionais podem levar a resultados diferentes dos que foram obtidos neste trabalho e, nesse caso, os valores de *minimum gap time* e *critical headway* aqui obtidos não devem ser utilizados diretamente.

Para melhor representar o tráfego em uma interseção não semaforizada, além de estimar com precisão a brecha crítica dos condutores, é importante ainda modelar de forma realista, pelo menos, o processo de desaceleração e o tempo de *follow-up* entre os veículos na aproximação secundária, principalmente quando a demanda de tráfego se aproxima da capacidade do cruzamento. É importante também explorar mais o efeito do tempo de espera

e/ou tempo em fila sobre a brecha crítica, que pode impactar significativamente no nível de agressividade dos motoristas em INS congestionadas, e a influência da distância de visibilidade no processo de aceitação de brechas, em cruzamentos onde este fator é relevante.

Outra possibilidade para trabalhos futuros consiste em comparar o método proposto nesta dissertação com métodos de estimação da brecha crítica em campo bem consolidados na literatura. Por fim, embora o método proposto tenha sido desenvolvido para o modelo RP do VISSIM e o modelo de interseções não semaforizadas do TransModeler, ele pode ser aplicado, com possíveis adaptações, para outros modelos de aceitação de brechas que também sejam baseados em parâmetros de brecha crítica, como o disponível no simulador Aimsun.

REFERÊNCIAS

- ALEX, S.; ISAAC, K. P. Traffic simulation model and its application for estimating saturation flow at signalised intersection. **International Journal for Traffic and Transport Engineering**, [S.l.], v. 4, n. 3, p. 320-338, 2014. [http://dx.doi.org/10.7708/ijtte.2014.4\(3\).06](http://dx.doi.org/10.7708/ijtte.2014.4(3).06).
- BRILON, W.; KOENIG, R.; TROUTBECK, R. J. Useful estimation procedures for critical gaps. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, [S.l.], v. 33, n. 3-4, p. 161-186, abril de 1999. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(98\)00048-2](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(98)00048-2).
- BUNKER, J. M. Novel methods and the maximum likelihood estimation technique for estimating traffic critical gap. **Journal of Advanced Transportation**, Durham, N.C./Washington, D.C., v. 48, n. 6, p. 542-555, out. 2014. <http://dx.doi.org/10.1002/atr.1204>.
- CALIPER CORPORATION. **TransModeler 5.0 User's Guide**. [S.l.]: [s.n.], 2018.
- DEPIANTE, V. S.; GALARRAGA, J. J. Intervalos criticos y capacidad en intersecciones no semaforizadas de tres ramas. *In*: CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA DE TRÁNSITO, TRANSPORTE Y LOGÍSTICA, PANAM, 2012, Santiago, Chile.
- DEVARASETTY, P. C.; ZHANG, Y.; FITZPATRICK, K. Differentiating between left-turn gap and lag acceptance at unsignalized intersections as a function of the site characteristics. **Journal of Transportation Engineering**, [S.l.], v. 138, n. 5, p. 580-588, maio de 2012. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000368](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000368).
- EHLERT, A.; SCHNECK, A.; CHANCHAREON, N. Junction parameter calibration for mesoscopic simulation in VISSIM. **Transportation Research Procedia**, [S.l.], v. 21, n. 0, p. 216-226, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2017.03.091>.
- ELEFTERIADOU, Lily. **An introduction to traffic flow theory**. New York: Springer, 2014.
- GARBER, Nicholas J.; HOEL, Lester A. **Traffic and highway engineering**, 5. ed. [S.l.]: CL Engineering, 2015.
- JIE, L.; ZUYLEN, H. V.; CHEN, Y.; VITI, F.; WILMINK, I. Calibration of a microscopic simulation model for emission calculation. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, [S.l.], v. 31, n. 0, p. 172-184, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2012.04.008>.
- KYTE, M.; DIXON, M.; BASAVARAJU, P. M. Why field measurements differ from model estimates. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, D.C., v. 1852, p. 32-39, 2003. <http://dx.doi.org/10.3141/1852-05>.
- KYTE, M.; TIAN, Z.; MIR, Z.; HAMEEDMANSOOR, Z.; KITTELSON, W.; VANDEHEY, M.; ROBINSON, B.; BRILON, W.; BONDZIO, L.; WU, N.; TROUTBECK, R. NCHRP Web Document 5: **Capacity and level of service at unsignalized intersections: final report, vol. 1 – Two-way stop-controlled intersections**. Transportation Research Board, Washington, D.C., 1996. Disponível em: <<http://www.nap.edu/books/nch005/html>>. Acesso em: 10 dezembro 2017.

LACERDA, V. M.; CASTRO-NETO, M. M. Considerações sobre a calibração do modelo de *car-following* do VISSIM para vias arteriais urbanas. *In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES (ANPET)*, 28., 2014, Curitiba. **Anais...** Rio de Janeiro: ANPET, 2014.

LACERDA, V. M. **Estimação da velocidade média em vias urbanas com uso do microssimulador VISSIM**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

LEE, J. **Calibration of traffic simulation models using simultaneous perturbation stochastic approximation (SPSA) method extended through bayesian sampling methodology**. 2008. Tese (Ph.D em Engenharia Civil e Ambiental) – Rutgers University, New Jersey, 2008.

LI, Z.; DEAMICO, M.; CHITTURI, M.V.; BILL, A. R.; NOYCE, D. A. Calibration of VISSIM roundabout model: A critical gap and follow-up headway approach. *In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 92ND ANNUAL MEETING*, 2013, Washington, USA.

LIDBE, A. D.; HAINEN, A. M.; JONES JR, S. L. Comparative study of simulated annealing and genetic algorithm for calibration of microsimulation model. *In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 95TH ANNUAL MEETING*, 2016, Washington, USA.

LIU, P.; QU, X.; YU, H.; WANG, W.; CAO, B. Development of a VISSIM simulation model for u-turns at unsignalized intersections. **Journal of Transportation Engineering**, [S.l.], v. 138, n. 11, p. 1333-1339, nov. 2012. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000438](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000438).

MARTIN-GASULLA, M.; GARCÍA, A.; LLORCA, C. Headway acceptance decisions on single-lane roundabouts in Spain. Critical and follow headway. *In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 96TH ANNUAL MEETING*, 2017, Washington, USA.

MAY, Adolf D. **Traffic flow fundamentals**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1990.

MOHAN, M.; CHANDRA, S. Influence of major stream composition on critical gap at two-way stop-controlled intersections. *In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 95TH ANNUAL MEETING*, 2016, Washington, USA.

OGALLO, H.; JHA, M. K. Methodology for critical gap analysis at intersections with unprotected opposing left-turn movements. *In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 93RD ANNUAL MEETING*, 2014, Washington, USA.

PTV – PLANUNG TRANSPORT VERKEHR AG. **PTV VISSIM 9 user's manual**. Karlsruhe: PTV AG, 2016.

RAFF, Morton S. **A Volume Warrant for Urban Stop Signs**. Saugatuck, Connecticut: Eno Foundation for Highway Traffic Control, 1950.

ROESS, Roger P.; PRASSAS, Elena S.; MCSHANE, William R. **Traffic Engineering**. 3. ed. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004.

SANGOLE, J. P.; PATIL, G. R. Modeling vehicle group gap acceptance at uncontrolled t-intersections in indian traffic. *In*: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 93RD ANNUAL MEETING, 2014, Washington, USA.

TARKO, A.; TIAN, Z. Example analysis and handling of uncertainty in the *Highway Capacity Manual* with consideration of traffic diversion. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, D.C., v. 1852, p. 40-46, 2003. <http://dx.doi.org/10.3141/1852-06>.

TRB – TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Highway capacity manual**. 5. ed. Washington: TRB, 2010. v. 3.

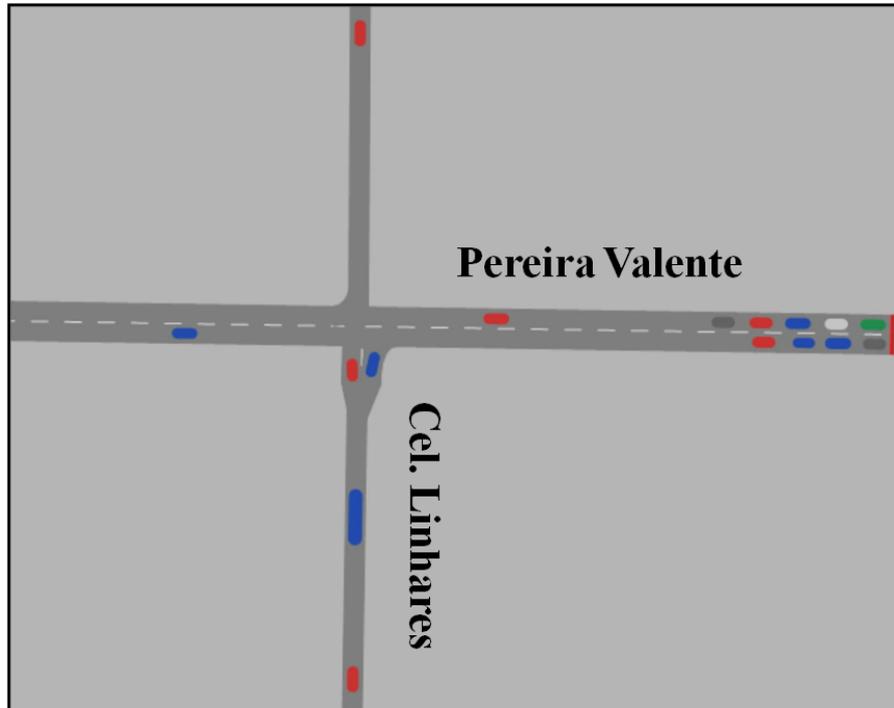
TROUTBECK, R. J.; BRILON, W. Unsignalized intersection theory. *In*: GARTNER, N.; MESSER, C. J.; RATHI, A. K. **Traffic flow theory monograph: a state-of-the-art report**. [S.l.]: [s.n.], 2001. cap. 8.

VASCONCELOS, L.; SILVA, A. B.; SECO, Á.; ROUXINOL, G. Estimation of critical headways at unsignalized intersections – a microscopic approach. **Advances in Transportation Studies**, Roma, edição especial, p. 59-72, dez. 2012. <http://dx.doi.org/10.4399/97888548567146>.

VITI, F.; WOLPUT, B.; TAMPÈRE, C. M. J.; VANDERVELDEN, P. Dynamic modeling of VISSIM critical gap parameter at unsignalized intersections. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, D.C., v. 2395, p. 12-20, 2013. <http://dx.doi.org/10.3141/2395-02>.

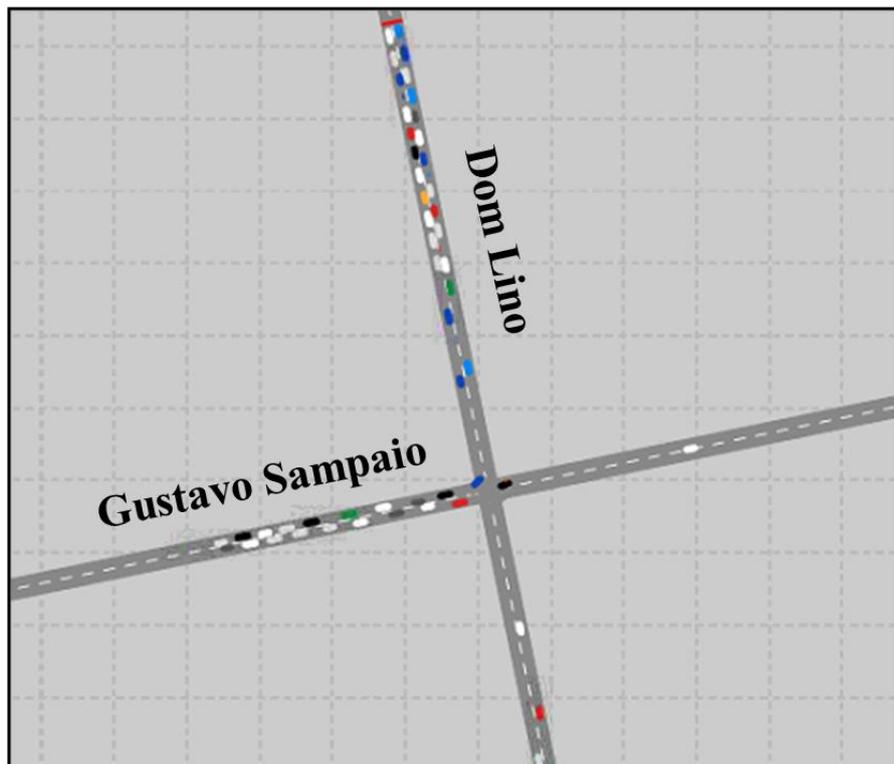
APÊNDICE A – OUTROS RESULTADOS OBTIDOS NO VISSIM

Simulação da interseção entre as ruas Pereira Valente e Cel. Linhares no VISSIM



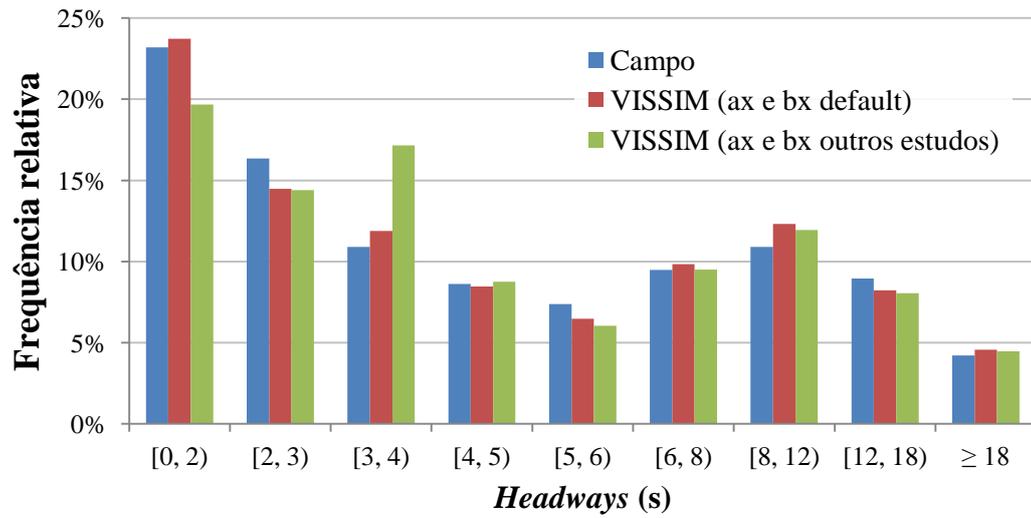
Fonte: Elaborada pelo autor.

Simulação da interseção entre as ruas Dom Lino e Gustavo Sampaio no VISSIM



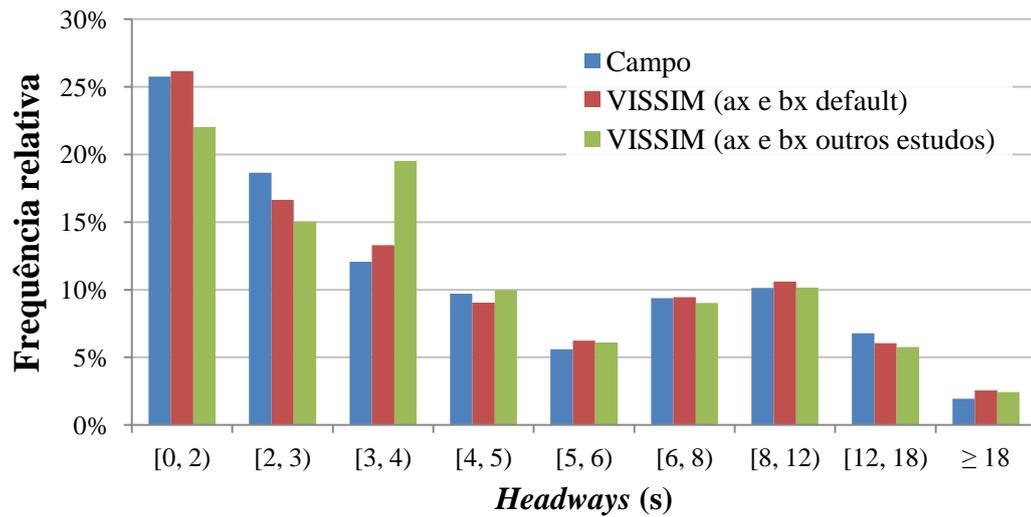
Fonte: Elaborada pelo autor.

Padrão de chegada dos veículos na rua Pereira Valente (validação VISSIM)



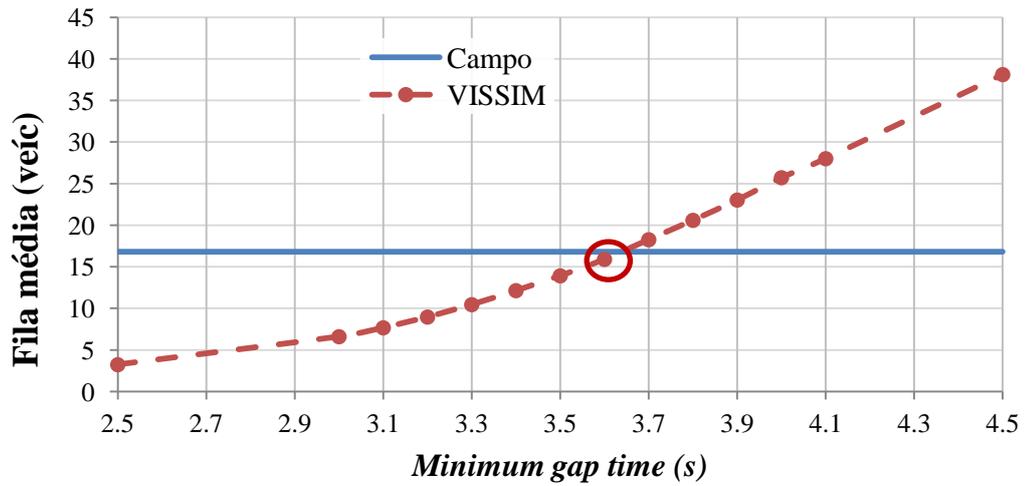
Fonte: Elaborado pelo autor.

Padrão de chegada dos veículos na rua Pereira Valente (validação 2 VISSIM)



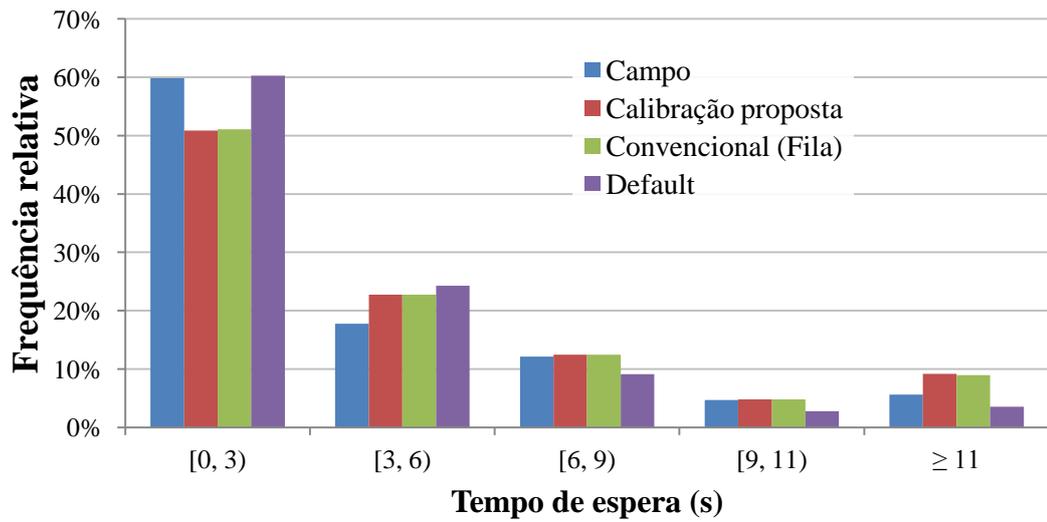
Fonte: Elaborado pelo autor.

Calibração pelo método convencional (INS-2 VISSIM)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Distribuições dos tempos de espera para a conversão à direita (INS-1 VISSIM)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Resumo dos resultados obtidos para a INS-1 (VISSIM)

Etapa	Variável	Método de estimação da brecha crítica		
		<i>Default</i>	Proposta	Convencional
CALIBRAÇÃO	<i>Critical headway</i> Frente (s)	3,0	4,1	3,9
	χ^2 Frente	33,8	0,6	1,3
	Valor-p Frente	0,0%	98,8%	93,3%
	IC 95% Δ Média Frente (s)	[0,8; 2,8]	[-0,8; 1,2]	[-0,5; 1,5]
	<i>Critical headway</i> Direita (s)	3,0	3,9	3,9
	χ^2 Direita	19,7	6,1	6,1
	Valor-p Direita	0,1%	19,3%	19,3%
	IC 95% Δ Média Direita (s)	[0,5; 3,2]	[-0,9; 1,8]	[-0,9; 1,8]
VALIDAÇÃO	χ^2 Frente	55,1	7,9	9,3
	Valor-p Frente	0,0%	16,4%	9,8%
	IC 95% Δ Média Frente (s)	[0,5; 2,3]	[-1,2; 0,5]	[-0,9; 0,9]
	χ^2 Direita	5,6	4,3	4,1
	Valor-p Direita	22,7%	36,2%	39,2%
	IC 95% Δ Média Direita (s)	[-0,3; 1,6]	[-1,9; 0,0]	[-1,9; 0,0]
VALIDAÇÃO 2	χ^2 Frente	67,9	3,4	5,9
	Valor-p Frente	0,0%	63,8%	31,5%
	IC 95% Δ Média Frente (s)	[1,4; 3,3]	[-0,9; 1,0]	[-0,4; 1,5]
	χ^2 Direita	4,1	23,8	22,6
	Valor-p Direita	39,7%	0,0%	0,0%
	IC 95% Δ Média Direita (s)	[-1,1; 1,2]	[-3,2; -0,9]	[-3,2; -0,9]

Fonte: Elaborada pelo autor.

Resumo dos resultados obtidos para a INS-2 (VISSIM)

Etapa	Variável	Método de estimação da brecha crítica		
		<i>Default</i>	Proposta	Convencional
CALIBRAÇÃO	<i>Critical headway</i> Frente (s)	3,0	4,0	3,6
	χ^2 Frente	125,5	7,4	21,1
	Valor-p Frente	0,0%	49,7%	0,7%
	IC 95% Δ Média Frente (s)	[1,6; 3,3]	[-0,8; 0,9]	[0,2; 1,9]
	<i>Critical headway</i> Esquerda (s)	3,0	3,1	3,6
	χ^2 Esquerda	9,0	9,0	20,8
	Valor-p Esquerda	17,3%	17,4%	0,2%
	IC 95% Δ Média Esquerda (s)	[-0,4; 2,5]	[-0,6; 2,3]	[-2,0; 0,9]
VALIDAÇÃO	χ^2 Frente	170,8	8,8	34,2
	Valor-p Frente	0,0%	35,9%	0,0%
	IC 95% Δ Média Frente (s)	[2,7; 5,0]	[-0,1; 2,2]	[1,2; 3,5]
	χ^2 Esquerda	2,0	1,3	8,5
	Valor-p Esquerda	92,1%	97,0%	20,6%
	IC 95% Δ Média Esquerda (s)	[-0,9; 1,5]	[-1,2; 1,2]	[-2,6; -0,3]
VALIDAÇÃO 2	χ^2 Frente	354,9	32,1	93,4
	Valor-p Frente	0,0%	0,0%	0,0%
	IC 95% Δ Média Frente (s)	[2,5; 4,7]	[0,9; 3,1]	[1,6; 3,8]
	χ^2 Esquerda	27,3	21,7	12,5
	Valor-p Esquerda	0,0%	0,1%	5,1%
	IC 95% Δ Média Esquerda (s)	[0,4; 2,5]	[0,3; 2,4]	[-0,6; 1,5]

Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE B – OUTROS RESULTADOS OBTIDOS NO TRANSMODELER

Simulação da interseção entre as ruas Pereira Valente e Cel. Linhares no TransModeler



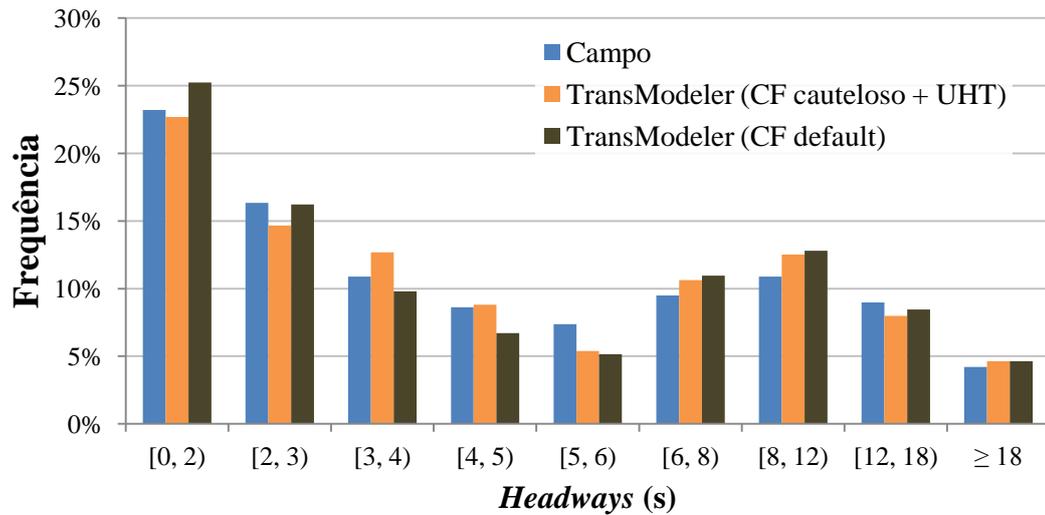
Fonte: Elaborada pelo autor.

Simulação da interseção entre as ruas Dom Lino e Gustavo Sampaio no TransModeler



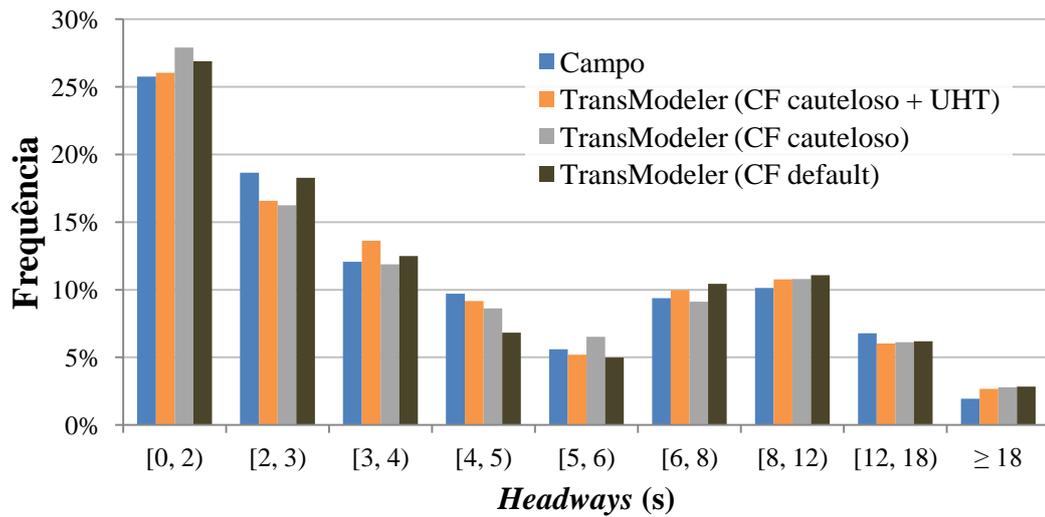
Fonte: Elaborada pelo autor.

Padrão de chegada dos veículos na rua Pereira Valente (validação TransModeler)



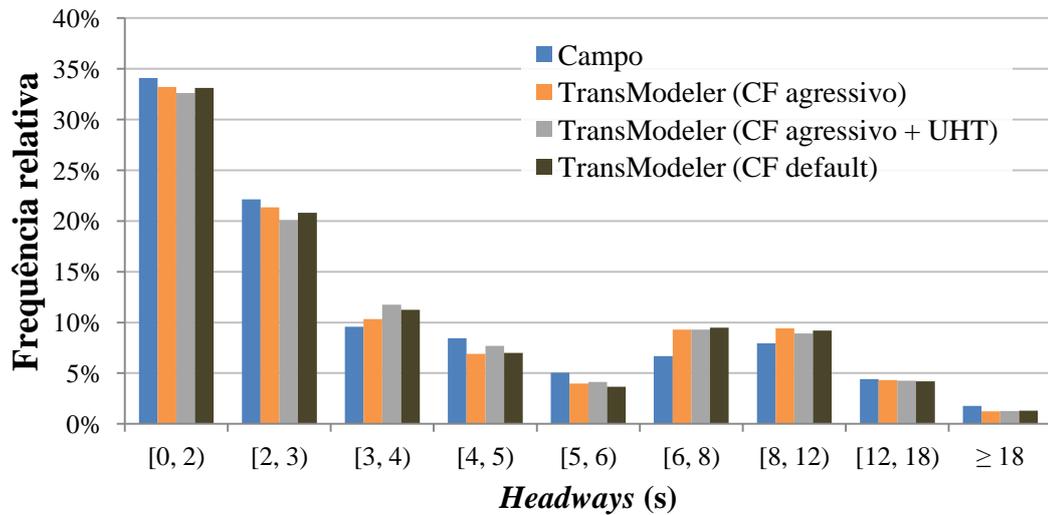
Fonte: Elaborado pelo autor.

Padrão de chegada dos veículos na rua Pereira Valente (validação 2 TransModeler)



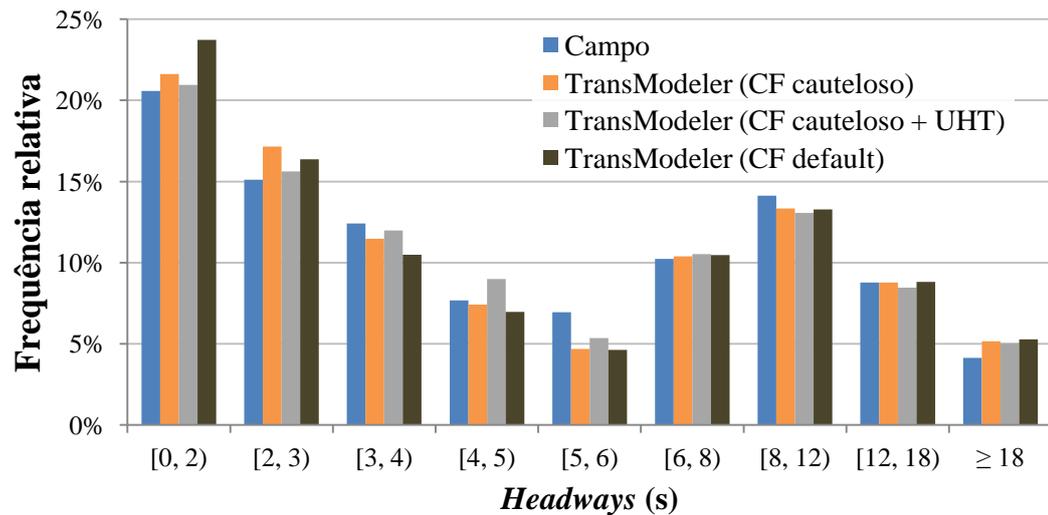
Fonte: Elaborado pelo autor.

Padrão de chegada dos veículos na rua Dom Lino (validação TransModeler)



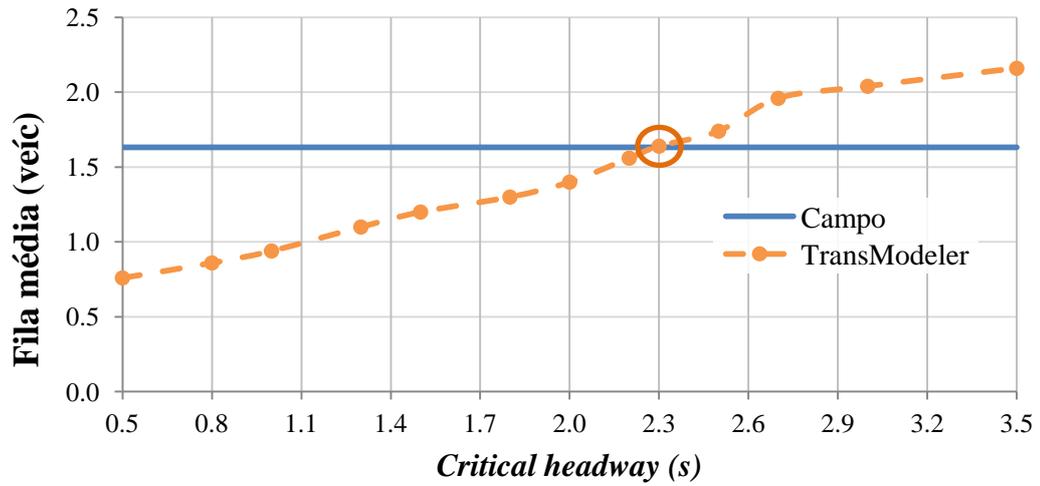
Fonte: Elaborado pelo autor.

Padrão de chegada dos veículos na rua Dom Lino (validação 2 TransModeler)



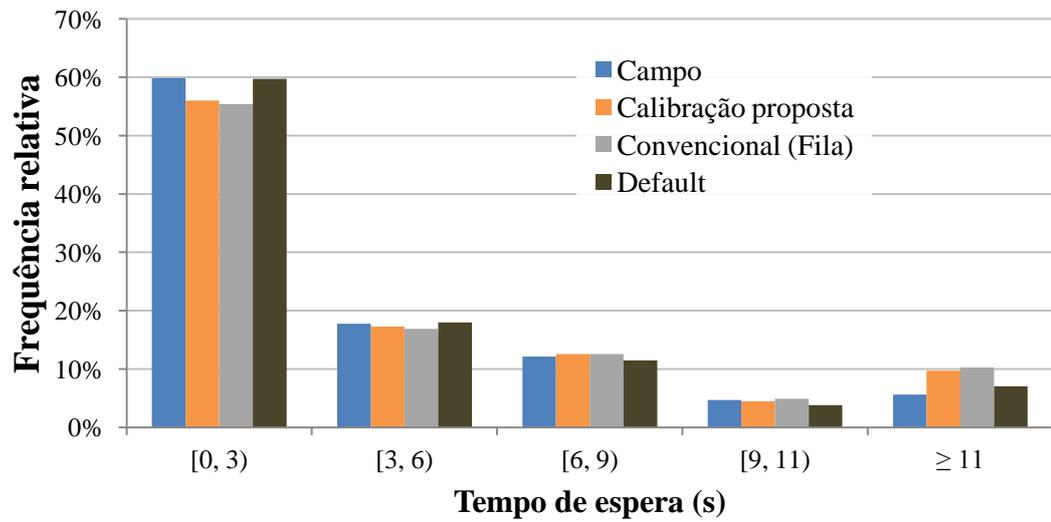
Fonte: Elaborado pelo autor.

Calibração pelo método convencional (INS-1 TransModeler)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Distribuições dos tempos de espera para a conversão à direita (INS-1 TransModeler)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Resumo dos resultados obtidos para a INS-1 (TransModeler)

Etapa	Variável	Método de estimação da brecha crítica		
		Default	Proposta	Convencional
CALIBRAÇÃO	<i>Critical headway</i> Frente (s)	1,8 (médio)	1,3	2,3
	χ^2 Frente	0,7	0,4	6,4
	Valor-p Frente	98,2%	99,4%	26,6%
	IC 95% Δ Média Frente (s)	[-1,4; 0,6]	[-1,0; 0,9]	[-2,5; -0,5]
	<i>Critical headway</i> Direita (s)	1,6 (médio)	2,1	2,3
	χ^2 Direita	2,5	1,6	1,7
	Valor-p Direita	65,2%	80,6%	78,3%
	IC 95% Δ Média Direita (s)	[-0,9; 1,8]	[-1,6; 1,1]	[-1,7; 1,0]
VALIDAÇÃO	χ^2 Frente	15,2	13,5	24,6
	Valor-p Frente	1,0%	1,9%	0,0%
	IC 95% Δ Média Frente (s)	[-2,0; -0,3]	[-1,5; 0,3]	[-3,3; -1,6]
	χ^2 Direita	0,6	2,2	2,7
	Valor-p Direita	96,6%	70,4%	60,6%
	IC 95% Δ Média Direita (s)	[-1,7; 0,2]	[-2,5; -0,6]	[-2,6; -0,7]
VALIDAÇÃO 2	χ^2 Frente	8,9	9,2	18,7
	Valor-p Frente	11,3%	10,3%	0,2%
	IC 95% Δ Média Frente (s)	[-1,6; 0,4]	[-1,0; 1,0]	[-3,2; -1,3]
	χ^2 Direita	10,4	19,7	22,3
	Valor-p Direita	3,4%	0,1%	0,0%
	IC 95% Δ Média Direita (s)	[-3,0; -0,7]	[-4,0; -1,7]	[-4,3; -2,0]

Fonte: Elaborada pelo autor.

Resumo dos resultados obtidos para a INS-2 (TransModeler)

Etapa	Variável	Método de estimação da brecha crítica		
		Default	Proposta	Convencional
CALIBRAÇÃO	<i>Critical headway</i> Frente (s)	1,8 (médio)	0,8	1,2
	χ^2 Frente	37,8	17,8	23,5
	Valor-p Frente	0,0%	2,3%	0,3%
	IC 95% Δ Média Frente (s)	[-3,0; -1,2]	[-0,8; 0,9]	[-1,9; -0,2]
	<i>Critical headway</i> Esquerda (s)	1,6 (médio)	0,1	1,2
	χ^2 Esquerda	15,0	4,2	12,4
	Valor-p Esquerda	2,0%	64,9%	5,4%
	IC 95% Δ Média Esquerda (s)	[-2,7; 0,2]	[-1,1; 1,7]	[-2,4; 0,5]
VALIDAÇÃO	χ^2 Frente	11,1	17,9	9,7
	Valor-p Frente	19,5%	2,2%	28,6%
	IC 95% Δ Média Frente (s)	[-1,8; 0,4]	[0,4; 2,7]	[-0,7; 1,5]
	χ^2 Esquerda	9,1	3,6	6,5
	Valor-p Esquerda	16,9%	72,6%	37,4%
	IC 95% Δ Média Esquerda (s)	[-3,1; -0,8]	[-1,5; 0,9]	[-2,7; -0,4]
VALIDAÇÃO 2	χ^2 Frente	8,8	42,5	19,1
	Valor-p Frente	35,9%	0,0%	1,4%
	IC 95% Δ Média Frente (s)	[-0,4; 1,7]	[0,9; 3,0]	[0,3; 2,4]
	χ^2 Esquerda	8,8	22,5	8,1
	Valor-p Esquerda	18,6%	0,1%	23,4%
	IC 95% Δ Média Esquerda (s)	[-1,2; 0,9]	[0,1; 2,2]	[-0,8; 1,3]

Fonte: Elaborada pelo autor.