



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ALESSANDRO MACÊDO DE ARAÚJO**

**MODELAGEM DO TRÁFEGO EM INTERSEÇÕES NÃO SEMAFORIZADAS DE  
FORTALEZA COM O USO DE SIMULAÇÃO MICROSCÓPICA**

**FORTALEZA**

**2016**

ALESSANDRO MACÊDO DE ARAÚJO

MODELAGEM DO TRÁFEGO EM INTERSEÇÕES NÃO SEMAFORIZADAS DE  
FORTALEZA COM O USO DE SIMULAÇÃO MICROSCÓPICA

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Civil.

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

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

- 
- A687m      Araújo, Alessandro Macêdo de.  
              Modelagem do tráfego em interseções não semaforizadas de Fortaleza com o uso de simulação  
              microscópica / Alessandro Macêdo de Araújo.– 2016.  
              84 f.: il., color.
- Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de  
Engenharia Civil, Fortaleza, 2016.  
              Orientação: Prof. Dr. Manoel Mendonça de Castro Neto.
1. Engenharia de tráfego. 2. Microsimulação. 3. Interseções não semaforizadas. I. Título.

ALESSANDRO MACÊDO DE ARAÚJO

MODELAGEM DO TRÁFEGO EM INTERSEÇÕES NÃO SEMAFORIZADAS DE  
FORTALEZA COM O USO DE SIMULAÇÃO MICROSCÓPICA

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Civil.

Aprovada em: 15/02/2016.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Manoel Mendonça de Castro Neto (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Flávio José Craveiro Cunto  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Eng. Dante Diego de Moraes Rosado e Souza

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Manoel, pelo exemplo de orientação e pelo esforço para contribuir em cada parte deste trabalho. Agradeço também por todos os conselhos dados não apenas para meu crescimento profissional como pessoal.

Ao Prof. Flávio, que foi de grande importância para o meu ingresso à área de engenharia de transportes, não apenas por contribuir a despertar meu interesse por essa área como também por ajudar na busca por um estágio, além de fazer parte da banca examinadora.

Ao Dante Rosado, por ter dedicado um tempo para participar da banca examinadora e pelas contribuições à monografia.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Transportes, em especial os professores Bruno, Felipe, Jorge e Verônica, pelos ensinamentos e por todos os conselhos dados.

Ao Victor Macêdo, pelas horas dedicadas à coleta de dados em campo e pela contribuição técnica.

À Amanda Alves e ao CTAFOR, por disponibilizarem dados essenciais para a realização deste trabalho.

À Jôsy, funcionária do GTTEMA, pela disposição em ajudar a utilizar equipamentos que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos das turmas do colégio, da graduação e do GTTEMA, pelas dúvidas sanadas, pela companhia e pelo incentivo nas horas mais difíceis.

Aos amigos do estágio, pela convivência e pelo ambiente agradável de trabalho.

Aos meus familiares, por todo apoio dado e principalmente pela convivência. Agradeço em especial aos meus padrinhos Francisco Gifoni e Fátima, que foram essenciais para minha formação e para a tomada de decisões importantes.

Ao meu pai Paulo, ao meu irmão Paulo Henrique e especialmente à minha mãe Herbênia, pelo apoio e carinho e por todo o sacrifício em manter as melhores condições de vida para mim.

## RESUMO

A presença cada vez mais intensa de problemas tais como congestionamento e acidentes nas malhas viárias urbanas aumenta a necessidade de conhecimento dos fenômenos de transporte. A simulação microscópica é uma ferramenta computacional que pode ser usada para a análise do tráfego e que se mostra cada vez mais importante pela sua capacidade de modelar o comportamento individual de cada motorista. Esta pesquisa tem como finalidade propor e implementar uma metodologia para modelagem do tráfego em interseções não semaforizadas com o uso de ferramentas de microssimulação. Para concretização desse objetivo, foi feito um estudo dos principais simuladores microscópicos disponíveis no mercado, foi escolhido um deles, com base em critérios de comparação estabelecidos, para realizar a modelagem do tráfego em uma interseção de Fortaleza, foi desenvolvido um método de calibração do submodelo de aceitação de brechas, e por fim foram efetuadas a calibração e a validação do modelo supostamente calibrado para a interseção selecionada para o estudo de caso. O estudo preliminar dos submodelos de aceitação de brechas dos microssimuladores se mostrou essencial para um bom entendimento do funcionamento da modelagem por eles realizada e para justificar as diferenças significativas na estimativa das medidas de desempenho do tráfego e da capacidade da aproximação secundária encontradas. Utilizando o tempo de espera do primeiro veículo da fila da aproximação secundária e a estatística qui-quadrado para calibração do parâmetro *tempo de brecha* do submodelo *regras de prioridade* do VISSIM 6, foram obtidos os valores de 3,6s para o movimento de travessia pela interseção e 3,9s para o movimento de conversão à direita. A validação do modelo ocorreu tanto pelo teste qui-quadrado quanto pela determinação do intervalo de confiança da diferença entre as médias das amostras desses tempos de espera simulados e obtidos em campo, ambos com nível de significância de 5%. Apesar da pouca quantidade de dados coletados, os resultados foram, em geral, satisfatórios.

**Palavras-chave:** Interseções não semaforizadas. Aceitação de brechas. Simulação microscópica.

## ABSTRACT

The increasingly intensity of problems' such as congestion and accidents in urban road networks increases the need for knowledge of transport phenomena. The microscopic simulation is a computational tool that can be used to analyze the traffic and which is increasingly important because of its capability to model the behavior of each individual driver. This research aims to propose and implement a methodology for modeling traffic at STOP-controlled intersections using microsimulation tools. To achieve this objective, the main microscopic simulators available to commercial use were subject of study, one of them was chosen, based on established criteria for comparison, to model traffic at an intersection from Fortaleza, a calibration method of gap-acceptance model was developed, and then the model was calibrated and validated based on the unsignalized intersection selected for this. The preliminary study of the microsimulators' gap-acceptance models was essential for a good understanding of the modeling performed by them and to explain the significant differences in the estimation of both traffic performance measures and the capacity of minor approach obtained. Using the waiting time of the vehicle in the head of minor approach's queue and the chi-square statistic to calibrate time gap parameter of priority rules gap-acceptance model available in VISSIM 6, the values obtained were 3.6s for the crossing movement and 3.9s for the right-turning movement. The model was validated using both the chi-square test and the confidence interval applied to simulated and field data waiting times samples mean's difference, both with 5% significance level. Despite the small amount of data collected in the field, the results were relatively satisfactory.

**Keywords:** STOP-controlled intersection. Gap-acceptance. Microscopic simulation.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
<b>1.1</b>	<b>Problema.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa .....</b>	<b>9</b>
<b>1.3</b>	<b>Questões motivadoras.....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>12</b>
<b>3.1</b>	<b>Fundamentos da modelagem microscópica de interseções não semaforizadas.....</b>	<b>12</b>
<b>3.2</b>	<b>Estimativa dos parâmetros de brecha crítica e de tempo de <i>follow-up</i> .....</b>	<b>13</b>
<b>3.3</b>	<b>Modelagem de interseção não semaforizada nos principais microssimuladores..</b>	<b>14</b>
<b>3.3.1</b>	<b><i>VISSIM</i>.....</b>	<b>14</b>
<b>3.3.2</b>	<b><i>Aimsun</i> .....</b>	<b>21</b>
<b>3.3.3</b>	<b><i>TransModeler</i>.....</b>	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>24</b>
<b>4.1</b>	<b>Estudo dos principais modelos de microssimulação existentes no mercado .....</b>	<b>25</b>
<b>4.1.1</b>	<b><i>VISSIM</i>.....</b>	<b>26</b>
<b>4.1.2</b>	<b><i>Aimsun</i> .....</b>	<b>30</b>
<b>4.1.3</b>	<b><i>TransModeler</i> .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2</b>	<b>Escolha do pacote computacional.....</b>	<b>32</b>
<b>4.3</b>	<b>Desenvolvimento do método de calibração do modelo escolhido .....</b>	<b>32</b>
<b>4.4</b>	<b>Calibração e validação do modelo escolhido .....</b>	<b>34</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>40</b>
<b>5.1</b>	<b>Análise dos parâmetros dos submodelos de aceitação de brechas .....</b>	<b>40</b>
<b>5.1.1</b>	<b><i>VISSIM</i>.....</b>	<b>40</b>
<b>5.1.1.1</b>	<b><i>Áreas de conflito</i> .....</b>	<b>40</b>

5.1.1.2	<i>Regras de prioridade</i> .....	45
5.1.1.3	<i>Correspondência entre os submodelos de aceitação de brechas do VISSIM</i> .....	48
5.1.2	<i>Aimsun</i> .....	54
5.1.3	<i>TransModeler</i> .....	57
5.2	<b>Escolha do simulador microscópico utilizado na modelagem do tráfego</b> .....	61
5.3	<b>Calibração do submodelo de aceitação de brechas</b> .....	63
5.3.1	<i>Verificação da distribuição dos headways no fluxo da via principal</i> .....	63
5.3.2	<i>Ajuste dos parâmetros do submodelo de aceitação de brechas</i> .....	65
5.4	<b>Validação do modelo calibrado</b> .....	68
6	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	72
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	76
	<b>APÊNDICE A – GRÁFICOS DOS RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DO SUBMODELO AC DO VISSIM</b> .....	78
	<b>APÊNDICE B – GRÁFICOS DOS RESULTADOS DA CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS SUBMODELOS DE ACEITAÇÃO DE BRECHAS DO VISSIM</b> .....	81

## 1 INTRODUÇÃO

Em qualquer cidade urbana, à medida que a quantidade de usuários que utilizam as malhas viárias aumenta, problemas relacionados ao tráfego podem surgir ou se agravar ainda mais, tais como congestionamento e acidentes. Dessa forma, há cada vez mais a necessidade de conhecimento que possibilite o estudo de fenômenos de transporte, auxiliando as pessoas responsáveis pelas tomadas de decisão nesse campo de atuação a evitarem, eliminarem ou, pelo menos, amenizarem esses problemas.

A melhoria das tecnologias computacionais em conjunto com a evolução dos *software* de engenharia tem contribuído para que a simulação de tráfego, e em particular para a simulação microscópica, tenha se tornado uma das principais ferramentas para análise e avaliação dos sistemas de transporte. Há uma variedade desses programas computacionais com modelos microscópicos disponíveis no mercado, como: VISSIM, AVENUE e Aimsun. (BARCELÓ, 2010).

A simulação microscópica é uma ferramenta útil para o estudo de fenômenos em uma rede viária, modelando o comportamento de cada motorista individualmente a fim de gerar um modelo de tráfego que se aproxime da situação real a ser estudada com nível de replicação satisfatório. Para atingir esse objetivo, alguns dados devem ser coletados em campo (ex.: volumes de tráfego) e vários parâmetros do modelo de simulação devem ser calibrados, como os do submodelo de aceitação de brechas a ser usado.

Na microssimulação de tráfego, representa-se (com certo grau de complexidade quando comparado com modelos mais simples como os macroscópicos) a interação dos usuários de uma rede viária entre si e desses com sua infraestrutura, ao se modelar: decisões tomadas pelos motoristas, que por sua vez são influenciadas por suas características comportamentais; características dos veículos; e a operação dos dispositivos de controle do tráfego. Portanto, define-se a oferta viária, que é constituído pelos elementos físicos da rede (ex.: vias e localização de semáforos e sinalizações) e o plano de controle do tráfego (ex.: planos semaforicos e regras de prioridade em interseções não semaforizadas), e a demanda, constituída pelas viagens desejadas pelos usuários do sistema e materializada pelos volumes que solicitam a infraestrutura viária. Muitas das variáveis que representam a demanda e a oferta são estabelecidas por distribuições de probabilidades, devendo o analista especificar os parâmetros que as definem, como média e desvio padrão (SPIEGELMAN; PARK; RILETT, 2011).

Um importante elemento de estudo de uma rede de tráfego são os cruzamentos de vias. Uma Interseção do tipo Não SemafORIZADA (INS) é aquela que possui uma via principal com prioridade sobre a outra onde se encontra a sinalização recomendando que o motorista pare o veículo e prossiga apenas quando for possível entrar na área de conflito evitando a ocorrência de acidentes. Nesse tipo de interseção, algumas das principais medidas de desempenho operacional comumente consideradas são o tamanho da fila e o atraso dos veículos na aproximação secundária.

Para prosseguir em uma INS, um motorista proveniente do fluxo de menor prioridade tem como principal fator a considerar a viabilidade da brecha disponível entre dois veículos do fluxo principal, ou seja, se o intervalo de tempo entre dois veículos consecutivos é suficiente para que ele possa completar a manobra. Tal processo de decisão varia com a percepção de cada motorista (GARBER; HOEL, 1996).

## **1.1 Problema**

O problema que motivou a escolha do tema abordado são as impedâncias que geralmente ocorrem em malhas viárias urbanas, e em particular aquelas nas INS de Fortaleza. Tais impedâncias resultam em formação de extensas filas e em elevados tempos de espera nas aproximações secundárias de tal tipo de interseção, gerando estresse e atrasos para seus usuários.

## **1.2 Justificativa**

Optou-se por tal tema devido à importância de uma adequada representação do tráfego veicular em INS, visto que a modelagem resulta na estimação das filas nestas interseções. Há outras maneiras, além da simulação microscópica, que auxiliam na análise dessas interseções, como observar e coletar os dados das medidas de desempenho diretamente em campo, ou ainda utilizar os modelos do *Highway Capacity Manual* (HCM) para estimá-las. Porém, têm-se algumas vantagens significativas ao se usar a modelagem por microsimulação, que é a possibilidade de se testar diversos cenários com um esforço pequeno e sem interferir na operação em campo, quando comparada com a forma convencional de observação direta, e a possibilidade de se ajustar o modelo para melhor representar a realidade da localidade estudada de maneira mais simples, quando comparada com a abordagem do HCM (pois o esforço necessário para coleta de dados em campo para

diferentes situações a fim de ajustar os valores tabelados presentes no procedimento do HCM é bem superior).

A utilização de modelos microscópicos caracteriza-se pela capacidade deles em incorporar o comportamento das unidades veículos-motoristas de forma individualizada. Isto permite maior entendimento e capacidade de replicar o comportamento e o desempenho do tráfego de forma mais detalhada. Vale ressaltar que a revisão da literatura mostra que não há uma metodologia universal para a calibração destes modelos (BARCELÓ, 2010), devendo o analista considerar os objetivos e as particularidades do seu estudo, o que justifica a busca por um método de calibração que seja adequado para a modelagem realizada neste estudo.

Sabe-se que os programas computacionais disponíveis no mercado utilizam diferentes abordagens de simulação: uns possuem submodelos que são mais determinísticos enquanto outros trabalham de forma mais estocástica; uns permitem a mudança de vários parâmetros do modelo pelo usuário enquanto outros são menos flexíveis. Há programas que tratam alguns comportamentos dos motoristas (ex.: modelos de aceitação de brechas) de forma mais complexa, ou seja, com maior quantidade de parâmetros a serem definidos pelo usuário, enquanto outros preferem um modelo mais simples (porém menos flexível). Portanto, não é raro observar resultados significativamente diferentes para as medidas de desempenho fornecidos por esses simuladores, mesmo que calibrados corretamente, o que explica o interesse em se avaliar esses diferentes modelos e escolher o mais adequado.

### **1.3 Questões motivadoras**

Com base no que está exposto – ou no que não pode ser obtido com facilidade – em importantes referências publicadas sobre o tema abordado, foram estabelecidas as seguintes questões de pesquisa para este estudo:

- a) Qual o efeito que os principais parâmetros dos submodelos de aceitação de brechas exercem sobre a estimativa das medidas de desempenho de interseções não semaforizadas?
- b) Qual simulador microscópico é mais adequado para modelar o tráfego em interseções não semaforizadas como as encontradas na cidade de Fortaleza?
- c) Como calibrar e validar o modelo de microssimulação selecionado para a modelagem de interseções não semaforizadas como as encontradas em Fortaleza?

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é propor e implementar uma metodologia para modelagem do tráfego em interseções não semaforizadas urbanas de Fortaleza, com o uso de uma ferramenta computacional de microssimulação disponível.

### **2.2 Objetivos específicos**

De acordo com as questões motivadoras listadas, os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Avaliar os principais modelos de simulação microscópica existentes quanto à sua capacidade em modelar interseções não semaforizadas, mais particularmente os seus submodelos de aceitação de brechas e de estimativa das medidas de desempenho (desses cruzamentos);
- b) Selecionar o pacote computacional mais adequado para a modelagem das interseções não semaforizadas de Fortaleza;
- c) Desenvolver um método apropriado para calibração do simulador selecionado para a modelagem do tráfego em interseções não semaforizadas;
- d) Calibrar e validar o modelo escolhido para a interseção analisada.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Fundamentos da modelagem microscópica de interseções não semaforizadas

A aceitação de brechas em uma INS é influenciada por diversos fatores como: tipo de conversão (à esquerda, em frente ou à direita), quantidade de movimentos veiculares ou de travessias de pedestres conflitantes, luminosidade do local – que pode ocorrer devido à luz solar ou à iluminação pública, ou a inexistência dela –, greide das aproximações, ângulo de cruzamento das vias e extensão da trajetória definida pela manobra, além do comportamento dos motoristas.

Segundo o TRB (2001), o parâmetro brecha crítica ( $t_c$ ) é definido como o menor intervalo de tempo considerado suficiente para um motorista completar a manobra desejada, enquanto o tempo de *follow-up* ( $t_f$ ), ou tempo de seguimento, é o intervalo de tempo adicional para que outro veículo (consecutivo) da aproximação secundária utilize a mesma brecha disponível na via principal. Em interseções não semaforizadas, é comum se considerar que os motoristas são *consistentes*, o que significa que eles tomam as mesmas decisões com respeito ao processo de aceitação de brechas sempre que estiverem submetidos às mesmas condições, e também constituem um grupo *homogêneo*, ou seja, qualquer subconjunto da população de motoristas possui a mesma distribuição de  $t_c$  e de  $t_f$ . Essa afirmação claramente não é verdadeira, mas assume-se que o comportamento dos motoristas seja melhor representado pela consistência do que a completa inconsistência. Devido à inviabilidade de se estimar o valor de  $t_c$  para cada indivíduo, é mais adequado considerar que o comportamento dessa população de motoristas seja representado pela distribuição desse parâmetro (BRILON; KOENIG; TROUTBECK, 1999). Além disso, estudos têm comprovado que a brecha crítica de um motorista varia ao longo do tempo de espera, representada pela impaciência dos motoristas à medida que não encontrarem uma oportunidade para atravessar a interseção (TRB, 2010).

Conforme TRB (2010) e Elefteriadou (2014), a capacidade de cada movimento que não seja de prioridade máxima é influenciada pela demanda dos movimentos de maior hierarquia, geometria da INS e suas regras de prioridade. Além disso, essa capacidade é dependente também dos seguintes fatores: distribuição das brechas no fluxo principal; comportamento dos motoristas e suas características de aceitação de brecha; tempo de *follow-up*; e a maneira como as brechas disponíveis são utilizadas, em caso de interseções com mais de uma manobra não-prioritária (um movimento com prioridade superior, mesmo não sendo o

principal, influencia de forma a reduzir a capacidade de outro de menor prioridade). Há também o efeito causado por interseções semaforizadas próximas à INS em análise, que gera chegada de veículos em pelotões, violando assim a hipótese geralmente assumida de que a chegada dos veículos pela aproximação principal é aleatória (ROESS; PRASSAS; MCSHANE, 2004).

Para fluxos de tráfego de pequena a média intensidade, geralmente é assumido que os intervalos de tempo entre dois veículos consecutivos (*headways*) podem ser representados pela distribuição exponencial, correspondendo a uma representação por Poisson para a distribuição do número de chegadas de veículos por intervalo de tempo. É comum também ajustar essa função exponencial considerando um *headway* mínimo (em torno de 1,0s), já que os veículos ficam defasados entre si pelo menos por uma distância mínima de segurança (GARBER; HOEL, 1996). Segundo comparações feitas por May (1990), quando o volume de tráfego é baixo, a tendência é que os *headways* sejam de fato aleatórios, já que há pouca interação entre os veículos devido a uma maior liberdade para trafegar pela via. Porém, quando esse volume tem valor próximo da capacidade da via, os *headways* são aproximadamente constantes, pois os veículos vão seguindo aqueles que estão logo à frente de forma mais homogênea.

### 3.2 Estimativa dos parâmetros de brecha crítica e de tempo de *follow-up*

De acordo com o TRB (2001), há dois grupos de técnicas para estimar os valores de  $t_c$  e  $t_f$ : com base em análise de regressão ou na estimativa das distribuições desses parâmetros de forma independente. Segundo Akçelik (2007), o tempo de *follow-up* pode ser estimado pelo inverso do fluxo de saturação (de utilização de uma mesma brecha) na aproximação secundária. Algumas das principais técnicas de estimativa desses parâmetros são:

- a) Método de Siegloch, que estima os dois parâmetros a partir de regressão linear;
- b) Método da máxima verossimilhança, que estima o parâmetro brecha crítica iterativamente a partir da distribuição que maximiza a probabilidade de obtenção da amostra que foi observada em campo;
- c) Método de Raff, que define a brecha crítica como sendo o valor com a seguinte propriedade: a quantidade de brechas aceitas com duração menor que ele é igual à de brechas rejeitadas com duração maior que ele.

Conforme Bunker (2014) e Brilon, Koenig e Troutbeck (1999), o método da máxima verossimilhança é uma das principais técnicas de estimativa do parâmetro brecha crítica, fornecendo resultados confiáveis quando comparados com os obtidos por outros métodos analisados nesses estudos. Outro procedimento cujos resultados obtidos foram, em média, confiáveis é o método de Siegloch. Já o método de Raff só gerou resultados corretos da brecha crítica para volumes de tráfego de média intensidade na aproximação principal (em torno de 500veíc/h). Patil e Pawar (2014) fizeram estimativas de brecha crítica para INS na Índia usando os seguintes métodos: Raff, *logit*, máxima verossimilhança, *lag* e Ashworth. Nesse estudo, os valores de  $t_c$  obtidos pelos cinco métodos utilizados foram relativamente próximos.

### **3.3 Modelagem de interseção não semaforizada nos principais microssimuladores**

Nas subseções a seguir, está descrito o que foi extraído da literatura sobre o funcionamento dos submodelos de aceitação de brechas disponíveis em três dos principais simuladores microscópicos existentes no mercado, assim como seus principais parâmetros que governam a modelagem do tráfego em INS.

#### **3.3.1 VISSIM**

Para a modelagem de uma INS, a PTV (2014) recomenda o uso do submodelo de aceitação de brechas denominado por Áreas de Conflito (AC), pois nele é simulado o planejamento dos condutores para cruzar a interseção, considerando o tempo adicional necessário para atravessá-la caso percebam que será preciso reduzir a velocidade ou parar devido a outro(s) veículo(s) localizado(s) depois da área de conflito – ou seja, um usuário da aproximação secundária decide passar pela área de conflito apenas se for possível sair completamente dela durante a brecha disponível. Além disso, os motoristas do fluxo principal tentam satisfazer as condições impostas pelos parâmetros do submodelo para não colidir com outro veículo, reduzindo a velocidade – ou até mesmo parando – quando um veículo da aproximação secundária não consegue completar sua manobra no intervalo de tempo previamente estimado, e entrando na área de conflito apenas quando esse último tiver saído dela, o que contribui para uma representação mais realista do tráfego nessa situação. Esse submodelo possui atributos como:

- a) Distância de visibilidade, que um veículo em uma aproximação tem sobre a outra, que é definida pela posição em relação à interseção onde não há nenhuma construção ou qualquer outro obstáculo que comprometa o campo de visão dos motoristas, conforme a Figura 1;

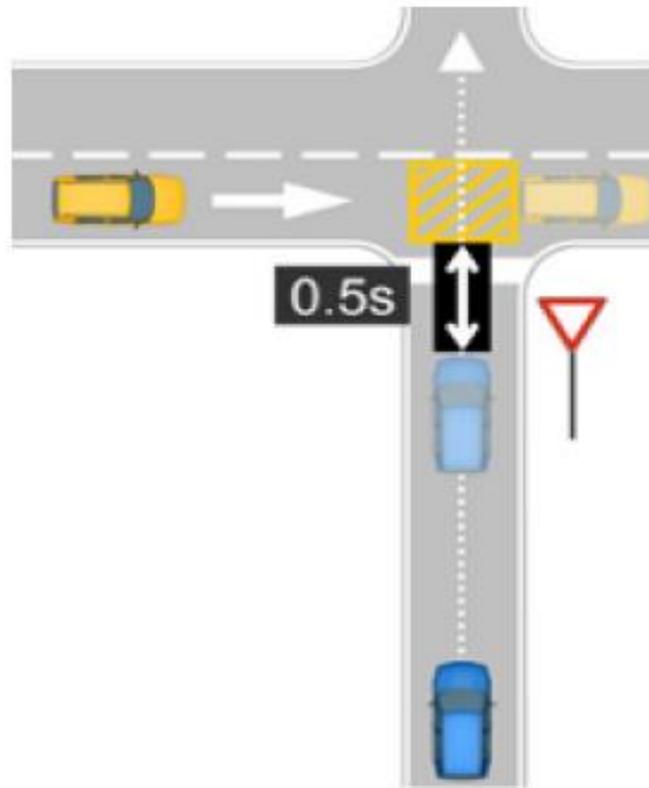
Figura 1 – Distância de visibilidade do submodelo AC do VISSIM



Fonte: Adaptada de PTV (2014).

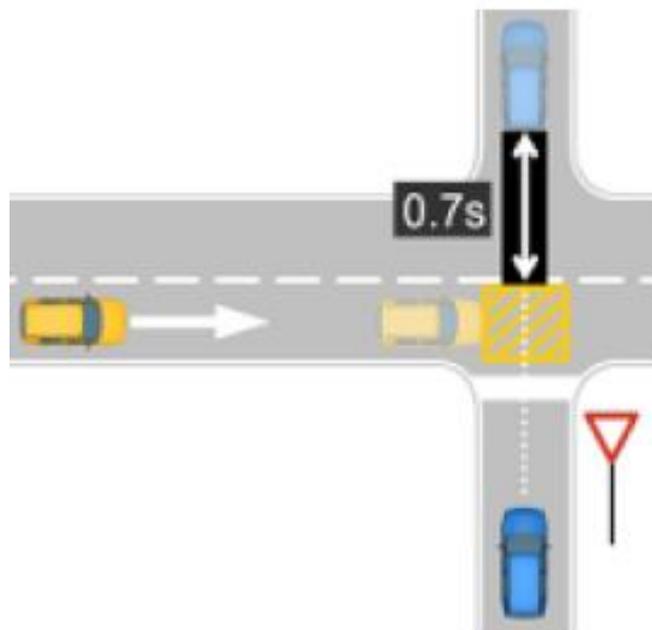
- b) Brecha frontal, que representa o mínimo intervalo de tempo, após a saída da traseira do veículo do fluxo principal (veículo 2) da área de conflito, para que o veículo da secundária (veículo 1) entre na mesma área (Figura 2), ou seja, caso ele estime que tal condição não será satisfeita, ele irá desacelerar (e realizar a manobra assim mesmo, se finalmente a condição for obedecida) ou então esperará por outra oportunidade;
- c) Brecha traseira, definido como o mínimo intervalo de tempo para que o veículo 2 entre na área de conflito após a saída da traseira do veículo 1 da mesma área (Figura 3), ou seja, se o veículo da via secundária estimar que, mesmo acelerando, não conseguirá completar o movimento de tal forma que essa condição seja satisfeita, ele irá esperar por outra oportunidade, ou, caso ele inicie a manobra e não consiga terminá-la a tempo, o veículo da via principal desacelera ou até mesmo para, a fim de não violar tal condição;

Figura 2 – Parâmetro brecha frontal do submodelo AC do VISSIM



Fonte: PTV (2014).

Figura 3 – Parâmetro brecha traseira do submodelo AC do VISSIM

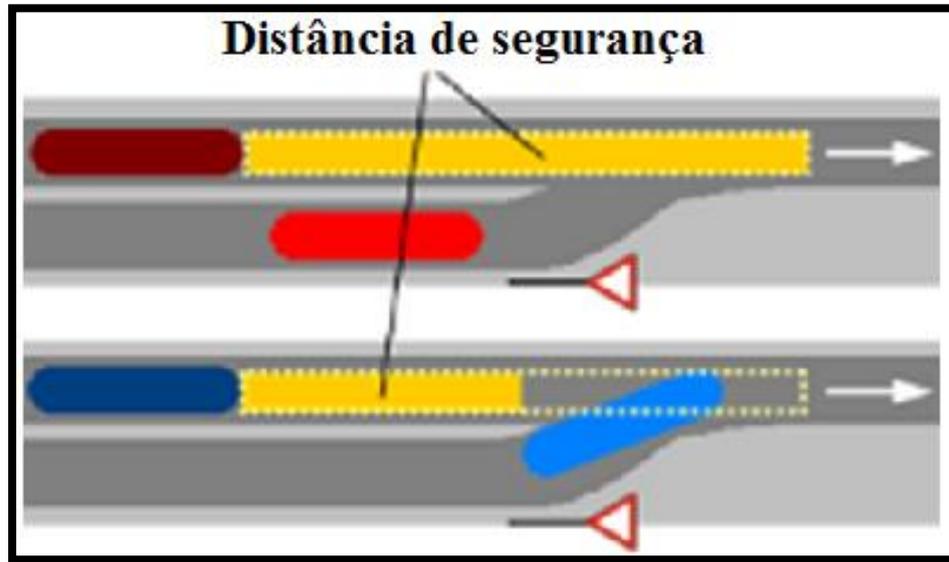


Fonte: PTV (2014).

- d) Fator distância de segurança (aplicado apenas em casos de conversão), que quando multiplicado pela distância de segurança do veículo 2 determina a

mínima distância que o veículo 1 deve estar à jusante do veículo mais próximo assim que entrar completamente na área de conflito, ilustrado pela Figura 4;

Figura 4 – Fator distância de segurança do submodelo AC do VISSIM



Fonte: Adaptada de PTV (2014).

- e) Distância adicional de parada, que define a posição, em relação ao início da área de conflito, onde os motoristas da aproximação secundária irão esperar pela oportunidade de realizar o movimento, influenciando assim no tempo necessário para passar pela interseção;
- f) Uma opção que, quando ativada, faz os veículos do fluxo secundário considerar também aqueles da aproximação principal que pretendem mudar para a faixa onde o conflito ocorre;
- g) Parâmetro que representa a porcentagem de motoristas do fluxo principal que evitam obstruir a área de conflito, caso determinadas condições de distância e velocidade sejam satisfeitas.

Porém, o submodelo AC não é recomendado quando há um desnível superior a 1,0 m entre as aproximações, a interseção possui menos que 0,5 m de extensão ou quando pelo menos uma das vias possui menos de 5 m de extensão após o início da área de conflito.

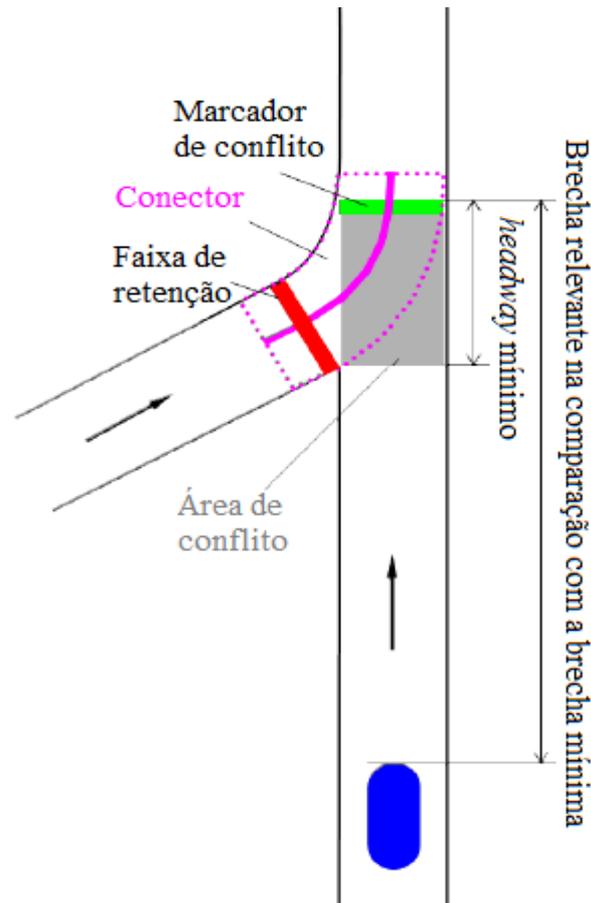
Outro submodelo de aceitação de brechas fornecido pelo VISSIM é o chamado de Regras de Prioridade (RP), onde define-se qual fluxo de aproximação irá esperar por uma brecha no fluxo principal para passar pela interseção. Essa opção é mais apropriada em conjunto com um sinal de PARE, pois caso contrário, em situações em que há brecha

suficientemente grande, os motoristas da via secundária poderão atravessar a INS sem desacelerar, como se já soubessem com antecedência. O usuário pode utilizar a ferramenta *toll counter*, que modela tempos de serviço em praças de pedágio, como uma forma de definir distribuições de tempos mínimos de parada para a aproximação secundária. Alguns dos atributos desse submodelo são:

- a) Faixas de tráfego para as quais as regras de prioridade definidas são válidas;
- b) Posição das seções em cada aproximação que definem o local de parada dos veículos (faixa de retenção) e a partir de onde os veículos do fluxo principal não influenciam mais na decisão daqueles do fluxo secundário (marcador de conflito);
- c) Classes de veículo para as quais se aplicam as regras (pode-se criar mais de uma regra de prioridade na mesma interseção, aplicável quando se deve ter regras diferentes para classes de veículo diferentes);
- d) Brecha mínima (*minimum time gap*), que é o mínimo intervalo de tempo, entre o marcador de conflito e o veículo mais próximo que está trafegando em direção a ele, para que a brecha seja aceita;
- e) *Headway* mínimo, que é a mínima distância, entre o marcador de conflito e o veículo mais próximo antes dele, para que seja permitida a passagem do veículo da aproximação secundária (útil em situações de congestionamento da interseção);
- f) Limiar de velocidade, acima da qual veículos da aproximação principal não são considerados na comparação entre o *headway* disponível e o mínimo atribuído.

A Figura 5 ilustra a situação modelada pelo submodelo RP, apresentando alguns dos elementos/atributos envolvidos.

Figura 5 – Interseção não semaforizada modelada com o submodelo RP do VISSIM

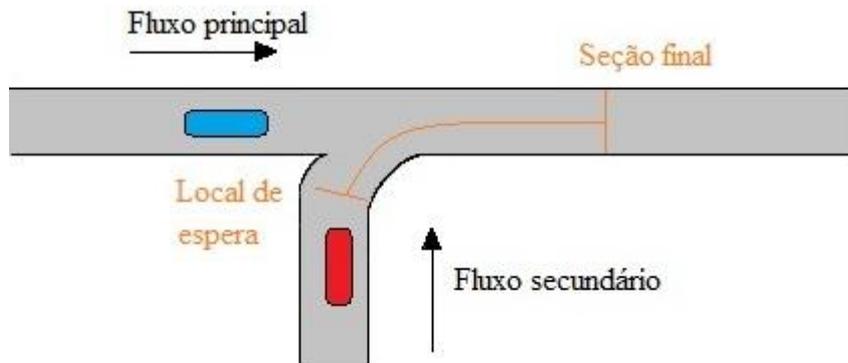


Fonte: Adaptada de PTV (2014).

O custo para se obter dados da trajetória de cada veículo é alto, portanto é comum se valer de dados de variáveis macroscópicas do fluxo de tráfego (ex.: atraso médio) para calibração dos parâmetros do modelo (BARCELÓ, 2010).

No estudo realizado por Viti, Wolput e Tampère (2013), o modelo de *regras de prioridade* foi calibrado para interseções em forma de T tendo-se como medida-alvo o tempo de viagem necessário para os veículos da aproximação secundária se juntarem ao fluxo principal, de maneira que os valores estimados se tornassem semelhantes aos observados em campo. Tais intervalos de tempo foram medidos a partir do local onde os veículos se posicionam para esperar até uma posição longe o suficiente (seção final) para esses veículos completarem sua fase de aceleração, como pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Trajetória definida para medição do tempo de viagem



Fonte: Adaptada de Viti, Wolput e Tampère (2013).

Ainda no estudo citado acima, analisaram-se diversos modelos de brecha crítica em função do volume de tráfego na via principal, sendo dois deles definidos por uma função constante, um com valor *default* do VISSIM (também constante), um representando uma redução linear e outros dois exponenciais. Compararam-se os resultados obtidos pela calibração de alguns desses modelos a partir do erro médio, erro médio quadrático percentual e desvio padrão, e obtiveram-se os melhores resultados com o modelo exponencial proposto pelos autores, que é dado pela função da Equação 1 (cujos parâmetros e fatores de correção devem ser calibrados). O valor calibrado do parâmetro *minimum time gap* com a equação proposta, para o estudo de casos considerado, variou entre 2,6 e 5,3s.

$$t_c = t_{\min} + (t_{\max} - t_{\min}) \times e^{-\alpha(I-I_0)} \quad (1)$$

Em que:

$t_c$  é a brecha crítica dos condutores, em segundos;

$$t_{\max} = t_{base} + t_{c,VP} \times PVP + t_{c,D} \times D + t_{c,V} \times \frac{V}{5} + t_{c,C}, \text{ em segundos}$$

$t_{\min} = 0,75t_{\max}$ , em segundos;

$\alpha$  e  $t_{base}$  = parâmetros a serem calibrados, adimensional e em segundos, respectivamente;

$I$  = volume do tráfego na via principal, em veíc/h;

$I_0$  = limiar do volume de tráfego para o qual se aplica a função exponencial, em veíc/h;

$t_{c,VP}$  = fator de correção para veículos pesados, em segundos;

$PVP$  = porcentagem de veículos pesados;

$t_{c,D}$  = fator de correção para declividade da aproximação secundária, em segundos;

$D$  = declividade percentual da aproximação secundária (positivo se for a favor);

$t_{c,V}$  = fator de correção para velocidade, em segundos;

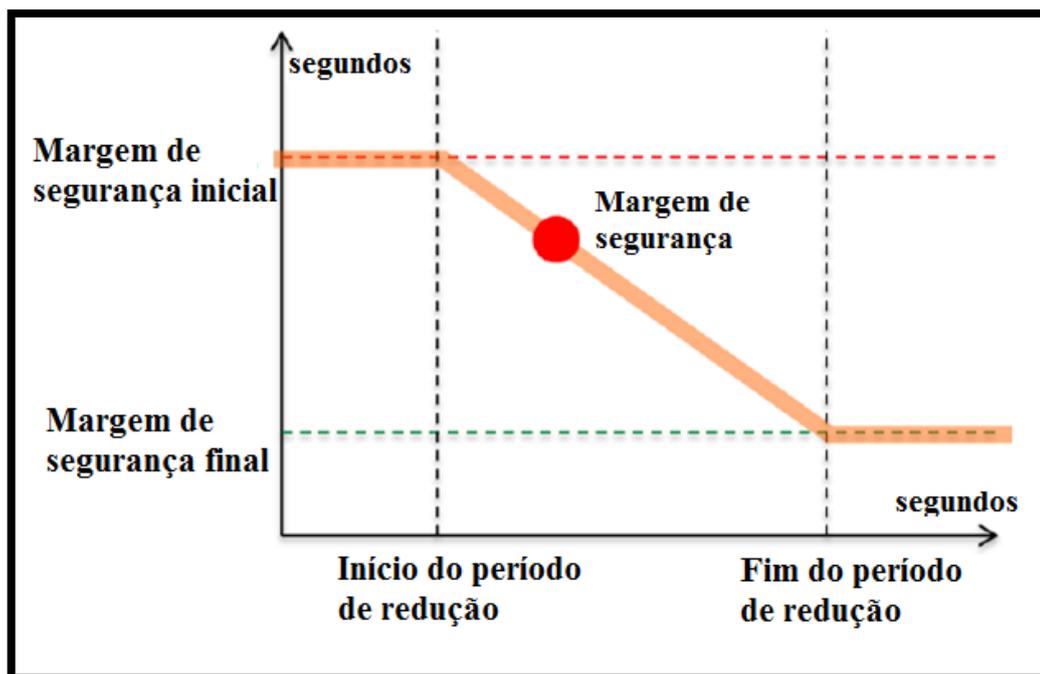
$V$  = diferença algébrica entre a velocidade do fluxo principal e a velocidade padrão de 25~30 km/h;

$t_{c,C}$  = fator de correção para o tipo de conflito (com base no HCM), em segundos.

### 3.3.2 Aimsun

Conforme TSS (2013), o submodelo de aceitação de brechas do Aimsun considera uma redução linear no parâmetro de margem de segurança – que se relaciona com a brecha crítica do motorista e é semelhante ao parâmetro de brecha traseira definido no submodelo AC do VISSIM – para representar o aumento da agressividade e da intolerância do motorista à medida que se aumenta o tempo de permanência dele na fila da aproximação secundária. Inicialmente esse parâmetro é constante, depois se inicia a redução linear, e, por fim, torna-se constante novamente, sendo considerados como parâmetros dois fatores que, quando multiplicados por outro parâmetro (representando o momento em que o condutor fica mais agressivo), definem os instantes de tempo em que ocorrem essas transições, como ilustrado pela Figura 7.

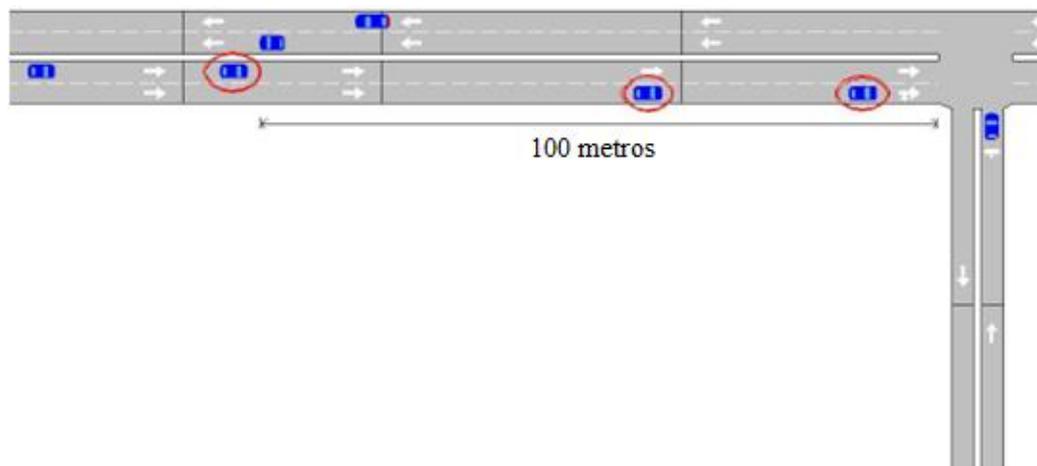
Figura 7 – Redução da margem de segurança no Aimsun



Fonte: Adaptada de TSS (2013).

Alguns parâmetros dos veículos influenciam nos resultados obtidos por esse submodelo, como a velocidade para fazer a conversão numa interseção, aceleração, velocidade desejada e o grau de obediência do motorista quanto à máxima velocidade permitida. No Aimsun, um parâmetro de distância de visibilidade está associado ao campo de visão do motorista da aproximação secundária ao observar o fluxo na principal, definindo assim, em um determinado instante, os veículos do fluxo principal que serão considerados no submodelo, caso estejam pelo menos parcialmente contidos nesse campo de visão (Figura 8). Porém, também há outro parâmetro de distância de visibilidade que define o trecho à montante da interseção ao longo do qual um veículo da aproximação secundária começa a avaliar as brechas no fluxo principal, mas que é utilizado apenas quando a sinalização é de DÊ PREFERÊNCIA (não incluindo situações de controle com sinal de PARE). Nesse modelo, o processo de decisão do motorista é realizado ao considerar a distância entre os veículos e o ponto de colisão teórico, suas velocidades e taxas de aceleração (BARCELÓ, 2010).

Figura 8 – Parâmetro de distância de visibilidade, do fluxo principal, do Aimsun



Fonte: Adaptada de TSS (2013).

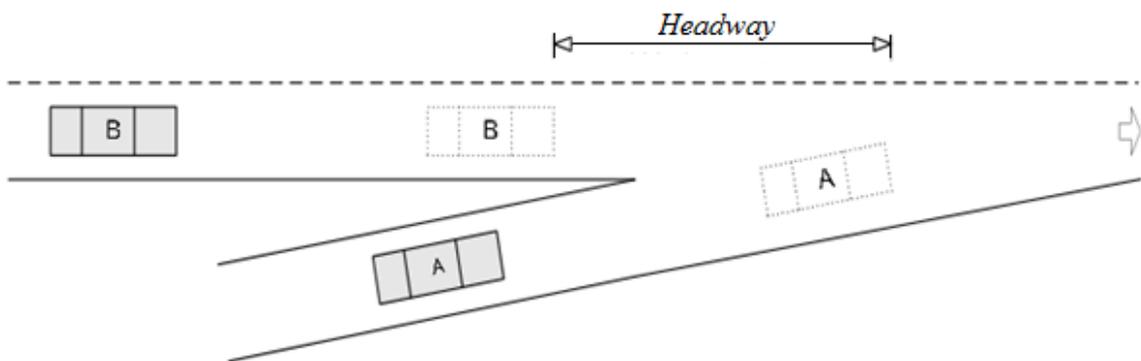
### 3.3.3 *TransModeler*

Segundo a Caliper Corporation (2014), o parâmetro de brecha crítica nesse programa é dado por uma distribuição discreta, definida por porcentagens correspondentes a cada valor fornecido pelo modelador. O TransModeler também considera uma redução linear desse parâmetro, semelhante ao descrito para o Aimsun, mas o valor mínimo é calculado com base na taxa máxima de desaceleração que o motorista da aproximação principal pode aplicar sobre seu veículo para evitar a colisão, pois o motorista da aproximação secundária atinge um grau de impaciência tal que ele tenta passar pelo cruzamento mesmo que haja a necessidade

do outro reduzir sua velocidade. Além disso, o instante de tempo igual a zero de referência é quando o veículo em questão atinge a extremidade inicial da fila, enquanto no Aimsun essa contagem se inicia quando ele é considerado parte dela. Também semelhante ao Aimsun, há um parâmetro de distância que define um trecho à montante da área de conflito ao longo do qual se inicia a aplicação do submodelo de aceitação de brechas, que funciona apenas em interseções controladas por sinal de DÊ PREFERÊNCIA.

O modelo de aceitação de brechas, aplicado em entroncamentos ou INS do TransModeler compara os tempos estimados para os veículos de cada aproximação, na percepção do usuário que avalia as brechas (veículo A), atingirem o ponto de conflito. Caso o veículo A consiga chegar primeiro na interseção e o *headway* estimado entre ele e o veículo da aproximação principal (veículo B) seja superior ao seu valor mínimo aceitável, ele entra na área de conflito. A situação descrita é ilustrada pela Figura 9.

Figura 9 – Avaliação de brechas no TransModeler



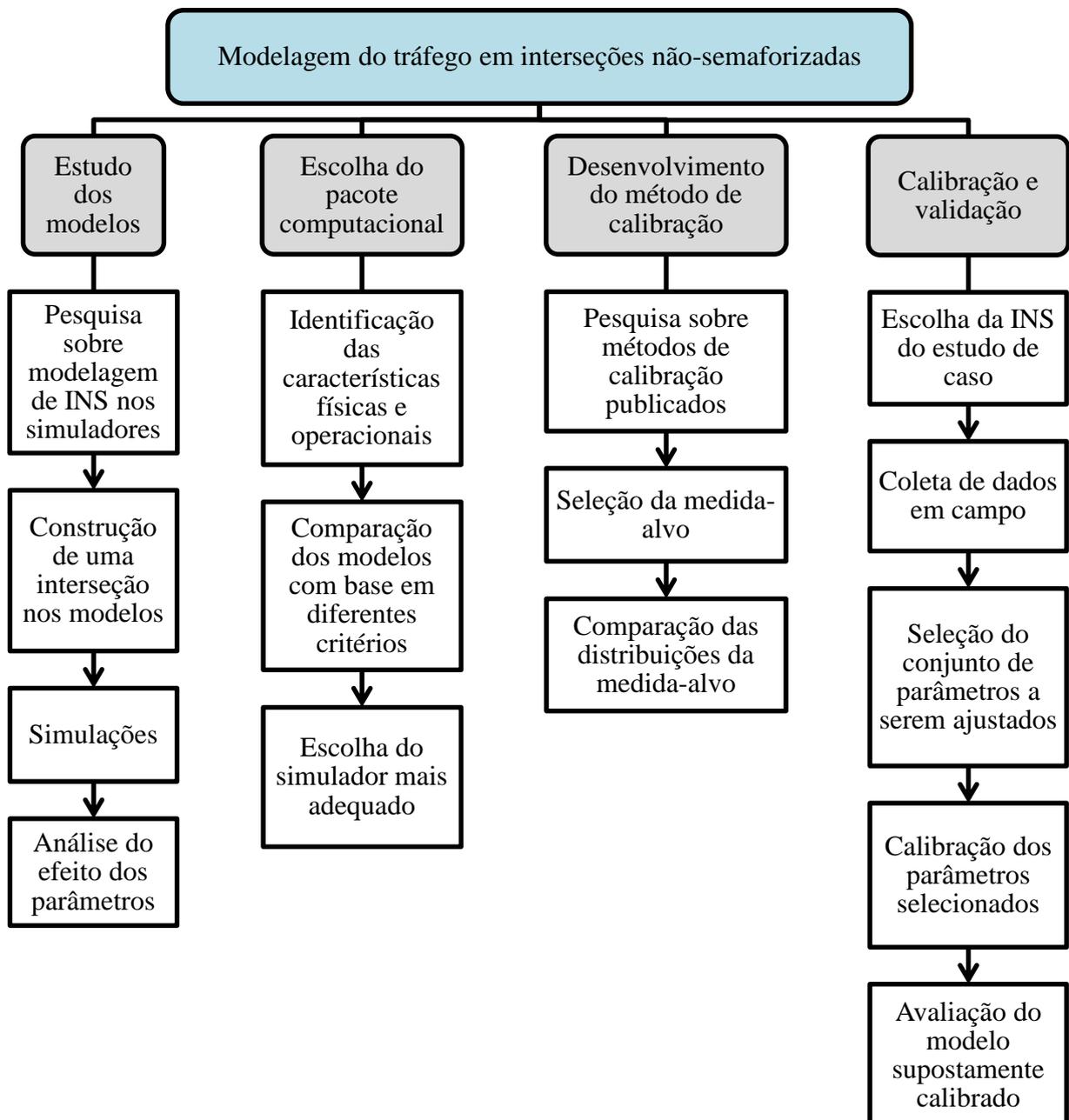
Fonte: Adaptada de Caliper Corporation (2014).

O TransModeler considera a possibilidade do veículo B colaborar com o movimento do veículo A, reduzindo sua velocidade para permitir que o outro realize a manobra. A probabilidade dessa colaboração ocorrer é definida pelo modelador ao fornecer as porcentagens de motoristas correspondentes a cada valor de probabilidade que é estabelecida. Essa situação ocorre quando um veículo proveniente do fluxo principal se aproxima de uma INS com uma velocidade menor que a de um limiar pré-definido, sorteando-se um número de veículos para os quais ele poderá dar passagem. Caso esse valor seja não-nulo, o motorista reduz sua velocidade para permitir que o(s) outro(s) passe(m) pela interseção. O usuário também pode definir outros parâmetros como: o tempo máximo que um veículo dá passagem a outro; tempo máximo que um motorista espera para receber tal passagem; e o tempo necessário para que o motorista considere a escolha de outro caminho.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia proposta neste Projeto de Graduação está apresentada a seguir e é dividida em quatro tópicos, cada qual correspondente a um objetivo específico estabelecido e subdividido em etapas, como pode ser visto no Fluxograma 1. No Grupo de Pesquisa em Transportes, Trânsito e Meio Ambiente (GTTEMA) do Departamento de Engenharia de Transportes (DET) da Universidade Federal do Ceará, teve-se acesso aos três programas computacionais utilizados neste estudo.

Fluxograma 1 – Metodologia

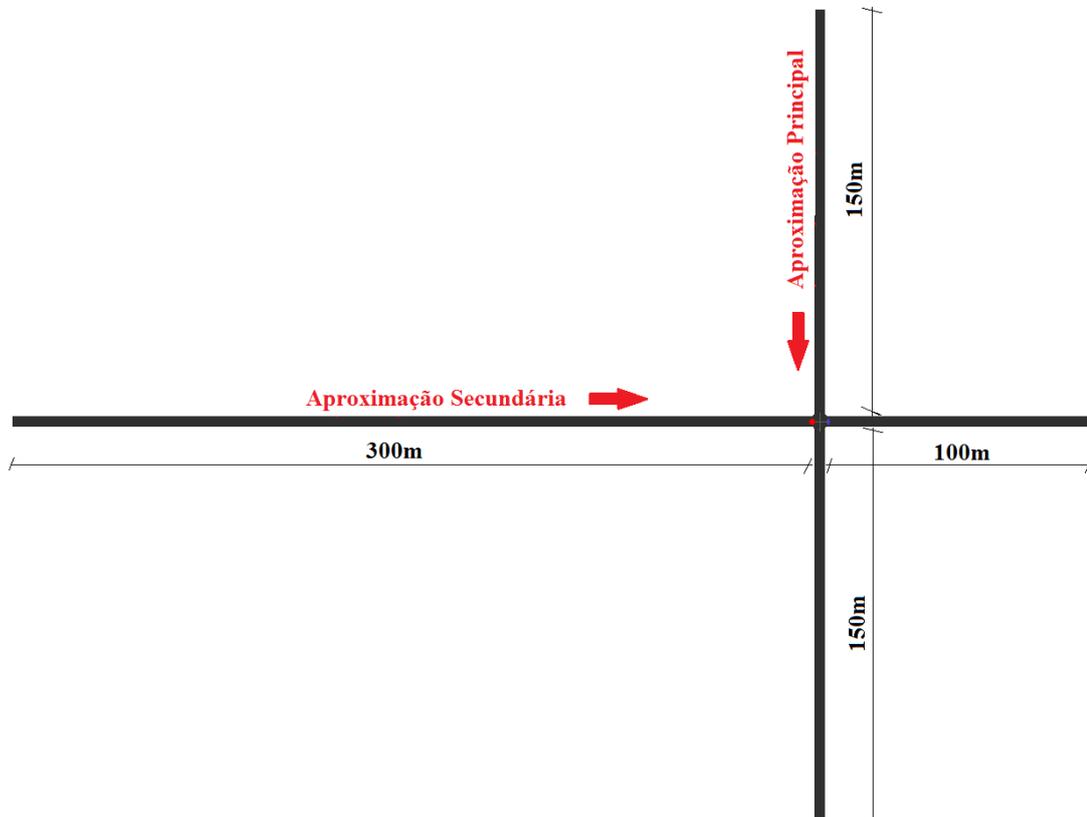


#### 4.1 Estudo dos principais modelos de microsimulação existentes no mercado

Foram pesquisadas referências essenciais para o entendimento da modelagem do tráfego em interseções não semaforizadas realizada pelos três pacotes de simulação microscópica: VISSIM, Aimsun e TransModeler. Para complementar o conhecimento adquirido a partir da leitura das referências bibliográficas, foram executadas e analisadas as simulações em uma INS simples para diferentes configurações para auxiliar a compreensão dos diversos parâmetros envolvidos.

Foi criada, nesses programas, uma interseção não semaforizada hipotética constituída de uma via secundária e uma principal, ambas de sentido único e com apenas uma faixa de tráfego com 3,5m de largura, cujas dimensões são mostradas na Figura 10. Neste estudo preliminar, por simplificação, foi considerado apenas o movimento de cruzar a interseção, ou seja, sem a existência de conversão de veículos de uma via para a outra. O fluxo da aproximação secundária foi mantido em 200 veículos por hora, enquanto foi variado o da principal entre 400, 700 e 1000veíc/h, representando assim três níveis de intensidade do tráfego. A frota de veículos utilizada nas simulações foi composta apenas por carros de passeio.

Figura 10 – Interserção não semaforizada isolada codificada para a análise de sensibilidade



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foi analisado o efeito de cada parâmetro dos submodelos de aceitação de brechas na estimativa das principais medidas de desempenho do tráfego (extensão da fila formada, atraso e tempo de viagem) e da capacidade da aproximação secundária da interseção hipotética, considerando diversas combinações de valores dos parâmetros. Para isso, os níveis de valores estabelecidos para cada variável foram definidos com base no entendimento do significado do parâmetro e na visualização do comportamento dos veículos durante a simulação.

Para se obter a capacidade estimada, cada cenário foi imposto à condição de saturação na aproximação secundária, com um fluxo suficientemente grande (1500veíc/h). Nesta etapa, foram executadas trinta simulações, com período de quinze minutos cada (além dos dois minutos de “aquecimento” da rede), e com as mesmas sementes aleatórias para cada cenário. A partir desta análise de sensibilidade, foi possível compreender melhor a lógica de funcionamento de cada submodelo. A seguir são apresentados os parâmetros, de cada modelo, bem como os valores considerados nos cenários simulados.

#### **4.1.1 VISSIM**

No submodelo *áreas de conflito*, o parâmetro que foi considerado mais importante é a brecha traseira, pois, a partir da própria definição, ele é o que mais se relaciona com o conceito de brecha crítica de um motorista. Outra variável importante na modelagem de uma INS é a brecha frontal, que define o instante em que um veículo do fluxo principal que já tenha atravessado a interseção não mais impossibilita a entrada do motorista da aproximação secundária na área de conflito. Como a distância de visibilidade desse submodelo define a posição em que os condutores da via secundária iniciam a avaliação das brechas, ela também é outro parâmetro que foi incluído na análise de sensibilidade, além do interesse em saber o seu efeito na estimativa das medidas de desempenho do tráfego. Devido à enorme quantidade de cenários gerados, não foi incluído o parâmetro de distância adicional de parada, mas que foi analisado no outro submodelo. Os níveis de valores considerados para esses parâmetros foram:

- a) Brecha frontal: 0,0s, 0,5s e 1,0s. O valor *default* do simulador é de 0,5s;
- b) Brecha traseira: de 0,5 a 4,0s, com incremento de 0,5s entre níveis sucessivos.  
O valor *default* também é de 0,5s;
- c) Distância de visibilidade: 2m, 7m e 12m. O valor mínimo escolhido foi de 2m porque, tanto para o valor nulo quanto para o de 1m, ocorre o fenômeno de um

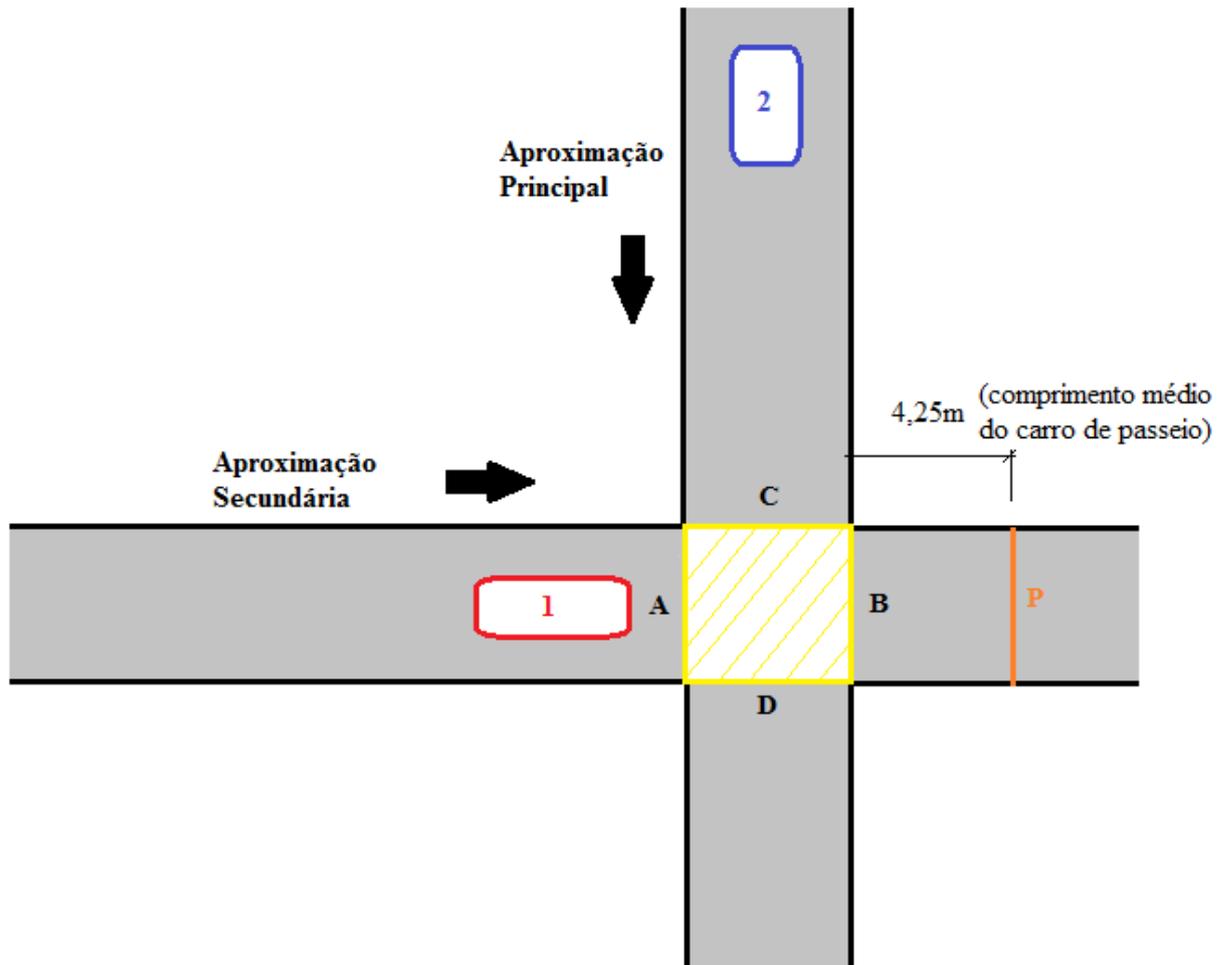
veículo parar um pouco mais longe da faixa de retenção e ficar nessa posição para sempre, impedindo a passagem de todos os veículos da aproximação secundária. Isso poderia ser resolvido se a distância de parada em relação a obstáculos estáticos tivesse sido controlada com um valor diferente do *default* (50 cm), mas a maioria das simulações já havia sido executada, além de não ser algo muito relevante. O valor *default* do programa é de 100m.

No submodelo *regras de prioridade*, além do parâmetro brecha mínima, foi considerada a distância média de parada dos veículos da aproximação secundária em relação à faixa de retenção. Portanto, os níveis adotados foram:

- a) Brecha mínima (*minimum time gap*): de 2,5 a 6,0s, com incremento de 0,5s entre níveis sucessivos. O valor *default* é de 3,0s;
- b) Distância média de parada em relação à faixa de retenção (*standstill distance for static obstacles*): 50 cm (valor *default*) e o valor nulo (em cima da faixa de retenção).

Mesmo sabendo que o submodelo AC incorpora comportamentos não considerados no RP, decidiu-se buscar uma correspondência entre eles para a INS usada na análise de sensibilidade dos parâmetros, já que se trata de uma interseção simples com ausência de outras impedâncias além do controle com sinal de PARE. Foram medidos os tempos de travessia médios, utilizando o submodelo RP, necessários para os veículos da via secundária (veículos 1's) percorrerem de A até P e os veículos da via principal (veículos 2's) percorrerem de C até D (ver Figura 11). Além disso, também foram coletados valores médios de tempo de viagem necessários para os veículos 2's percorrerem de C até outras seções espaçadas de 1m, constatando que a relação entre a distância de C até essas seções e o tempo de viagem médio correspondente é constante, pois os veículos do fluxo principal não encontram obstáculos que os impeçam de manter suas velocidades desejadas. A faixa de retenção foi alocada na seção A e foi adotada uma distância média nula de parada em relação a ela.

Figura 11 – Desenho de referência para a busca pela correspondência entre os submodelos do VISSIM



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para tentar modelar situações semelhantes nos dois submodelos, as seguintes compatibilizações foram impostas para os cenários:

- a) A posição de parada dos veículos 1's foi adotada como sendo a mais próxima possível da faixa de retenção. Como no submodelo de *regras de prioridade*, mesmo com a distância média em relação a obstáculos estáticos fixada em zero, os veículos da aproximação secundária param um pouco antes da seção A, foi considerado, nos cenários do submodelo AC, um valor de 0,16m (valor médio de distância em relação à essa seção obtido a partir de uma pequena amostra durante uma simulação no RP) para o parâmetro de distância adicional de parada;
- b) Para forçar a parada dos veículos 1's (ou pelo menos a desaceleração até uma velocidade quase nula) no submodelo *áreas de conflito*, foi considerada uma

visibilidade de 0,5m, pois um valor abaixo disso causaria o fenômeno de parada “infinita” mencionado anteriormente;

- c) Para igualar o momento em que o veículo 2, ao passar pelo cruzamento, não impossibilite mais o veículo 1 de entrar na área de conflito, o marcador de conflito do RP foi posicionado a 4,5m à montante da seção C para a correspondência com o caso de brecha frontal nula, pois, a partir do instante em que o veículo 2 atinge esse marcador até o momento em que passa por ele totalmente, o *headway* disponível é nulo, ou seja, inferior a qualquer valor de *headway* mínimo estabelecido, e, portanto, o veículo 1 só pode entrar na interseção quando a traseira do veículo 2 passar pelo marcador de conflito. O valor de 4,5m foi determinado a partir de tentativas, até que a posição média dos veículos 2's no instante em que os veículos 1's atingem a seção A ficasse semelhante em ambos os submodelos (desconsiderando, obviamente, os casos em que a brecha é aceita imediatamente após a chegada na faixa de retenção). Para a correspondência com os demais níveis do parâmetro brecha frontal, considerou-se um deslocamento do marcador de conflito que, quando dividido pelo acréscimo de tempo no valor da variável, correspondesse à velocidade média dos veículos da via principal (7,14m para cada acréscimo de 0,5s na brecha frontal, o equivalente a aproximadamente 51,4km/h);
- d) Para relacionar a brecha mínima, do RP, com a brecha traseira, do AC, foi considerada a Equação 2, pois, no submodelo AC, o veículo 1 decide realizar a manobra caso estime que, no momento em que sair da área de conflito, o veículo 2 ainda esteja pelo menos a uma distância correspondente ao tempo da brecha traseira em relação à seção C, conforme ilustrado pela Figura 12. Ou seja, na configuração inicial (durante a avaliação das brechas), é necessário que o veículo 2 esteja a uma distância correspondente à soma entre a brecha traseira e o tempo de travessia de A até P em relação à seção C, o que equivale a estar a uma distância correspondente à soma entre a brecha traseira, o tempo de travessia de A até P e o tempo de travessia de C até D\* em relação à seção D\* (posição do marcador de conflito).

$$BM = BT + TT_{AP} + TT_{CD^*} \quad (2)$$

Em que:

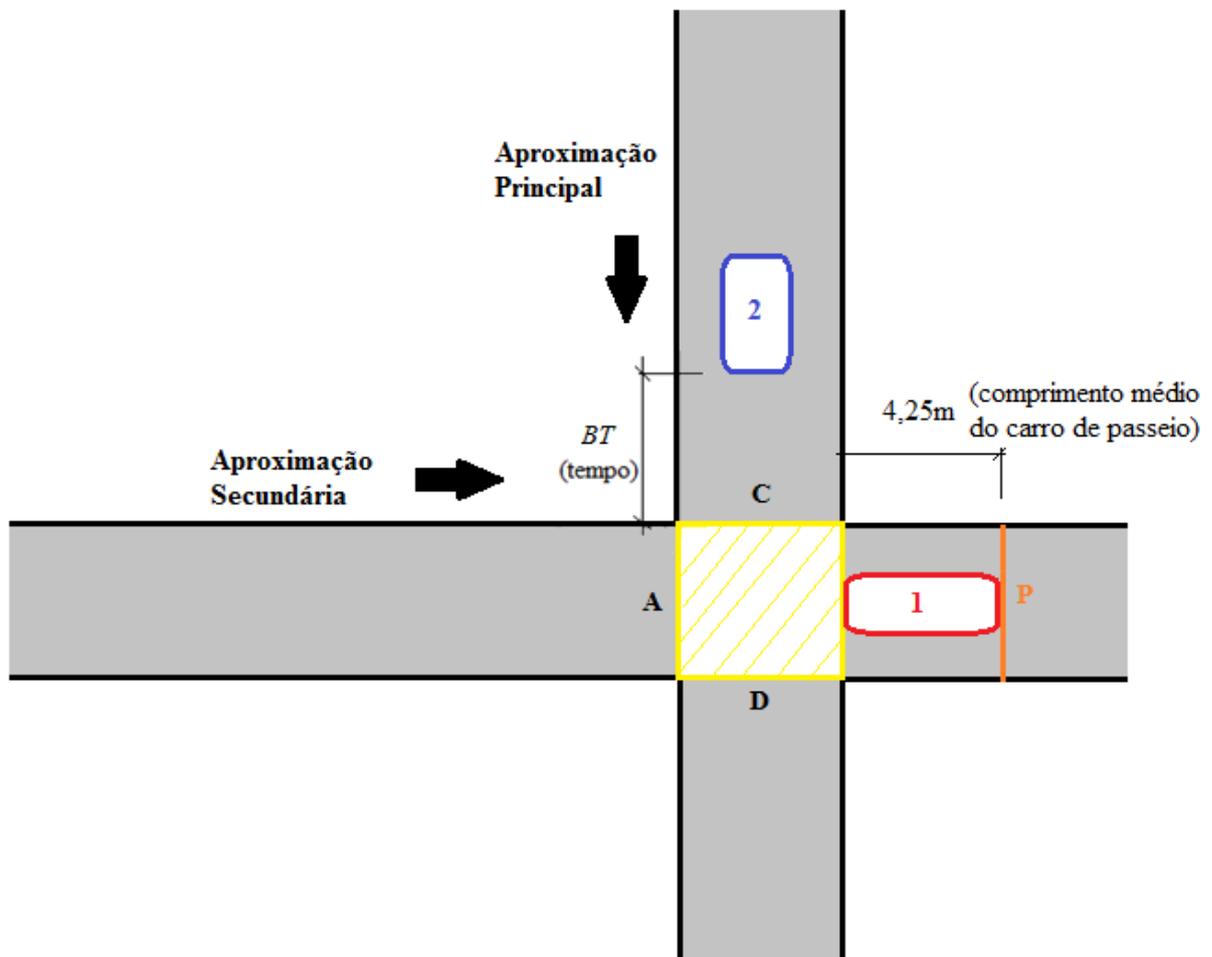
$BM$  = brecha mínima dos condutores;

$BT$  = brecha traseira da população de motoristas;

$TT_{AP}$  = tempo médio de travessia, dos veículos 1's, de A até P;

$TT_{CD}^*$  = tempo médio de travessia, dos veículos 2's, de C até D\*.

Figura 12 – Configuração final limite de uma brecha aceita no submodelo AC



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.1.2 Aimsun

Com base no que foi exposto na revisão bibliográfica sobre o Aimsun e no aprendizado sobre a importância dos principais parâmetros a partir de testes, foi incluído na análise de sensibilidade apenas os parâmetros de margem de segurança inicial e final e o de máximo tempo de dê preferência – que é aquele que define, junto com outros dois fatores multiplicativos, o instante em que os motoristas têm sua margem de segurança decrescente com o tempo e o instante em que se atinge o valor mínimo –, pois a distância de visibilidade que funciona de forma semelhante ao parâmetro do VISSIM não é aplicada a esse caso

estudado, e não é objetivo deste trabalho calibrar parâmetros de performance dos veículos. Os valores adotados para essas variáveis foram:

- a) Margem de segurança inicial: de 0,5 a 4,0s, com incremento de 0,5s entre níveis sucessivos. De início, a faixa de valores adotado foi de 3,0 a 7,0s, mas percebeu-se posteriormente, tanto pelos resultados quanto pela simulação e pela definição do parâmetro, que se tratavam de valores elevados. O valor *default* é de 2,0s;
- b) Margem de segurança final: de 0,25 a 2,0s, porém variado sempre em conjunto com a margem inicial, com metade do seu valor, a fim de manter a proporção usual de 2:1 mencionada em Barceló (2010). O valor *default* é de 1,0s;
- c) Máximo tempo de dê preferência: 10,0s, 20,0s e 30,0s (valor médio). Manteve-se o mesmo coeficiente de variação da distribuição *default*, que é de 0,25 (o desvio padrão foi alterado em conjunto com o valor médio), além das proporções dos valores mínimo e máximo em relação ao valor médio. Os valores *default* são: 10,0s para a média, 2,5s para o desvio padrão, 5,0s para o valor mínimo e 15,0s para o valor máximo. Vale ressaltar que os fatores multiplicativos foram mantidos iguais aos seus valores *default* de 1,0 e 2,0, respectivamente.

#### 4.1.3 TransModeler

O principal parâmetro do submodelo de aceitação de brechas desse microssimulador é o *headway* crítico, que pode ser dado por uma distribuição, mas que, por questões de simplificação, foi atribuído a um valor único representativo da população de motoristas para essa análise de sensibilidade. Além dessa variável, foram considerados os instantes de tempo que definem o início e o fim do decrescimento linear do parâmetro *headway* crítico. Os níveis de valores adotados para esses parâmetros foram:

- a) *Headway* crítico: de 0,5 a 5,0s, com incremento de 0,5s entre níveis sucessivos. A distribuição *default* desse parâmetro no simulador é composta por 20% da população com 1,0s, 50% com 1,7s, 20% com 2,4s e 10% com 3,0s;
- b) Instantes que definem a redução no *headway* crítico: ambos foram variados simultaneamente em três níveis, sempre mantendo o intervalo de redução *default* de 40s, com valores de 10s (início) e 50s (fim); 20s e 60s; e 30s e 70s. Os seus valores *default* são, respectivamente, de 20s e 60s.

## 4.2 Escolha do pacote computacional

Inicialmente, foram identificadas as características físicas e operacionais, presentes em interseções não semaforizadas de Fortaleza, mais importantes que, se bem representadas pelos simuladores, contribuem para uma modelagem adequada do tráfego, como: presença de *yellow-box* (que tem como função alertar os condutores a não obstruírem a interseção em caso de congestionamento), visibilidade reduzida devido a edificações ou estacionamento próximos à interseção e grau de desobediência à parada obrigatória antes da faixa de retenção.

Além de considerar as características citadas acima e eventuais inconsistências no efeito dos parâmetros dos submodelos de aceitação de brechas na estimativa das medidas de desempenho analisadas, a comparação entre os microssimuladores foi realizada com base em:

- a) Reconhecimento na comunidade tecnocientífica;
- b) Facilidade em aplicar métodos de calibração publicados que sejam adequados à modelagem de interseções não semaforizadas de Fortaleza;
- c) Exigência de dados que devem ser coletados para servir de *input*;
- d) Grau de complexidade, que é representado pelo número de parâmetros a serem definidos pelo analista;
- e) Flexibilidade em incorporar a variabilidade do comportamento dos motoristas
- f) Inclusão de fatores que afetam a aceitação de brechas, como visibilidade;
- g) Tipos de medidas de desempenho fornecidos pelo modelo;
- h) Facilidade em se adaptar, na percepção do autor, ao pacote computacional e às suas ferramentas.

A partir dessa comparação realizada, foi escolhido o programa computacional mais conveniente para modelar interseções não semaforizadas da cidade.

## 4.3 Desenvolvimento do método de calibração do modelo escolhido

Foram pesquisados, na literatura, métodos de calibração dos submodelos de aceitação de brechas do microssimulador selecionado, considerando sempre a viabilidade de se coletar em campo os dados que foram usados na calibração. Em seguida, foi selecionada a medida de desempenho utilizada no processo de calibração (medida-alvo), ou seja, aquela que serve como guia para o ajuste dos parâmetros do modelo.

Assim como no estudo do Viti, Wolput e Tampère (2013), a medida-alvo escolhida foi o tempo de viagem, com a diferença que o instante inicial é definido pela passagem da frente do veículo pela faixa de retenção da aproximação secundária, enquanto o instante final é definido pela passagem da traseira dele pela mesma seção (destacada na Figura 13), com a finalidade de minimizar a influência da aceleração dos veículos na estimativa da medida-alvo, já que esses perfis de aceleração não foram calibrados. Dessa forma, o tempo de viagem medido é influenciado basicamente pelo tempo de espera por uma brecha. A seção onde se localiza a faixa de retenção foi escolhida como referência devido ao fato que a própria marcação facilita a identificação dos instantes que definem o intervalo a ser registrado, além de que, na interseção escolhida, a maioria dos motoristas para um pouco após essa seção. O cruzamento que compõe o estudo de caso é justamente o que está ilustrado na figura a seguir.

Figura 13 – Seção da aproximação secundária utilizada como referência para a medida-alvo



Fonte: Elaborada pelo autor.

Vale ressaltar que, para os veículos que pararam antes da faixa de retenção, o instante inicial do intervalo dessa medida-alvo foi considerado aproximadamente o momento em que ele atingiu a velocidade nula. Devido à dificuldade de se relacionar a brecha crítica estimada pelos métodos mencionados na revisão bibliográfica com os parâmetros da maioria dos submodelos de aceitação de brechas estudados, decidiu-se não incorporá-los ao método de calibração utilizado.

O ajuste dos parâmetros do submodelo foi feito a partir da comparação entre a distribuição de frequência da medida-alvo estimada pelo simulador e a distribuição correspondente observada em campo, utilizando o teste qui-quadrado com nível de significância de 5%. O conjunto de valores dos parâmetros calibrados foi aquele cuja estatística qui-quadrado correspondente teve seu valor mínimo.

#### **4.4 Calibração e validação do modelo escolhido**

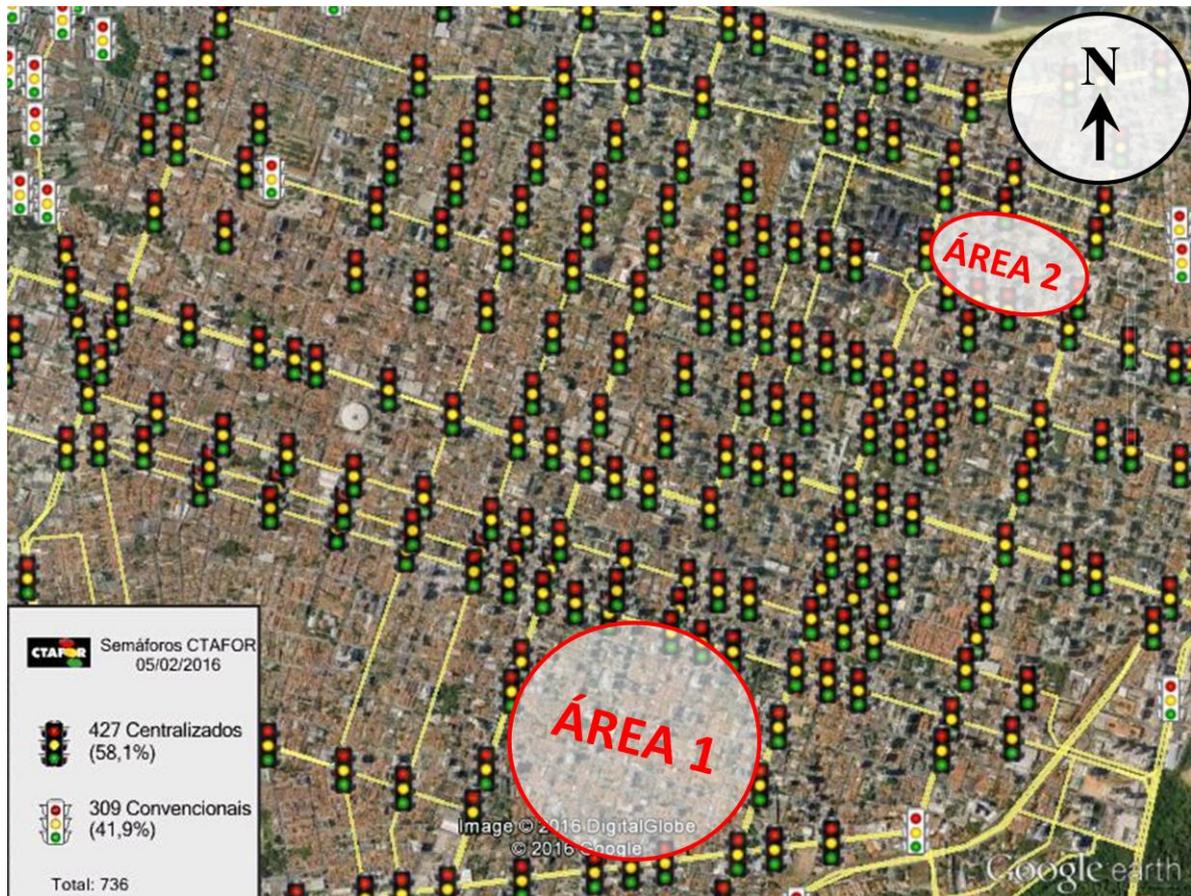
Mantendo a mesma terminologia usada anteriormente, o restante do texto associa a aproximação/via secundária e os veículos provenientes dela ao numeral 1, enquanto a aproximação/via principal e seus veículos são representados pelo numeral 2. Para facilitar o entendimento das informações apresentadas, também são utilizados os termos  $F_1$  (ou VP, como na seção 5.1) e  $F_2$  para representar os fluxos de tráfego dessas vias.

Para o estudo de caso deste trabalho, foi selecionada uma INS de Fortaleza cujas interseções à montante mais próximas, ao longo da aproximação principal, não fossem semaforizadas, caso contrário a chegada dos veículos 2's ocorreria em pelotão. Essa escolha foi realizada com base no banco de dados que contém a localização dos semáforos de Fortaleza, ilustrado na Figura 14. Como a região de interesse do grupo de pesquisa deste trabalho é constituída basicamente pelos bairros Aldeota e Meireles, foram identificadas duas áreas cuja concentração de semáforos é relativamente baixa (áreas 1 e 2 da Figura 14). As duas primeiras tentativas de escolha se encontram na área 1, porém, devido aos baixos volumes de tráfego em uma delas e à visibilidade restrita dos motoristas na outra (presença de veículos estacionados na via principal), decidiu-se selecionar uma INS da área 2, definida pelo cruzamento das ruas Pereira Valente e Coronel Linhares (ambas de sentido único).

Foi utilizado um *drone* para filmar o tráfego no cruzamento selecionado durante dois períodos com duração aproximada de quinze minutos cada: um para a fase de calibração, e o outro para validação do modelo. Essa coleta ocorreu no dia 18 de janeiro de 2016 (segunda-feira), com horário de início de cada período por volta de 16:15h e 16:30h,

respectivamente. A partir dessas imagens, foram coletados dados de volume de conversão, agrupados em carros de passeio e pequenos caminhões ou vans, e da medida-alvo. Apenas na via principal, foram contabilizadas as motocicletas que chegaram isoladas na interseção, ou seja, aquelas que interferiram ou poderiam ter interferido na avaliação de brechas dos veículos 1's. As motos restantes foram desconsideradas porque essa classe foi modelada com o mesmo comportamento dos outros veículos – porém com menores dimensões –, ou seja, trafegando no centro das faixas da via.

Figura 14 – Base de dados com a localização dos semáforos de Fortaleza

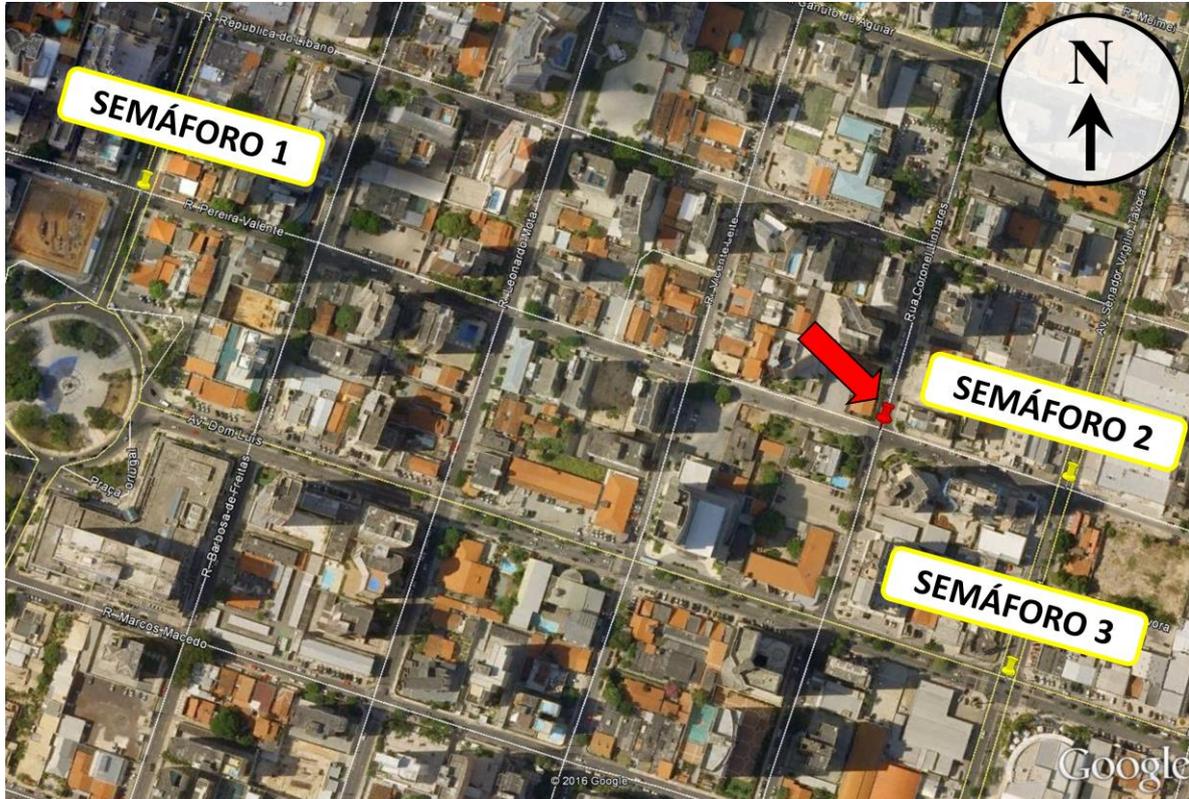


Fonte: Adaptada de CTAFOR.

Com base no que foi compreendido a partir da leitura das referências bibliográficas e no que foi observado no estudo preliminar dos submodelos de aceitação de brechas, foi escolhido o conjunto de parâmetros a serem ajustados, ou seja, aqueles mais relevantes para a modelagem do tráfego da interseção não semaforizada do estudo de caso. No simulador microscópico escolhido, a INS selecionada (representada pelo marcador vermelho na Figura 15) foi codificada utilizando a imagem do *Google Earth* como plano de fundo,

incluindo também as interseções semaforizadas mais próximas que influenciam na operação dela (representadas pelos marcadores amarelos da Figura 15).

Figura 15 – INS do estudo de caso e semáforos próximos que influenciam na sua operação



Fonte: Adaptada de Google Earth.

O semáforo 1 se localiza quatro quadras à montante da INS analisada, portanto exerce alguma influência no instante de chegada dos veículos da aproximação 2 (Rua Pereira Valente). O semáforo 2 se encontra no cruzamento à jusante, o que impacta na velocidade dos veículos do fluxo principal nos momentos em que a fila formada devido a esse semáforo atinge seções próximas à INS. Devido à presença de dois carros-fortes parados próximos ao semáforo 2 no dia da coleta em campo, essa fila formada no trecho da Rua Pereira Valente à jusante da INS congestionou em alguns momentos o cruzamento em estudo, o que não ocorre durante a simulação codificada sem considerar tal condição atípica. Portanto, foi necessário descartar os dados de campo influenciados por esse acontecimento, ou seja, aqueles associados aos momentos de congestionamento.

O semáforo 3 está localizado na Av. Dom Luís, paralela à via principal, e influencia na corrente de tráfego que conflita com os veículos 1's e consequentemente nos momentos de chegada deles no cruzamento estudado. Esse impacto do semáforo 3 seria mais significativo se fosse avaliada a extensão das filas formadas na aproximação secundária.

Como esse não foi o caso, apenas foram inseridos a programação semafórica e um volume na avenida suficiente para poucas brechas serem aceitas pelos condutores da Rua Coronel Linhares durante o período de verde para a corrente de tráfego da Av. Dom Luís.

Os dados de entrada do modelo, ou seja, o volume veicular de cada movimento para cada classe considerada e os planos semafóricos necessários, foram definidos no simulador conforme foram coletados em campo ou disponibilizados pelo Controle de Tráfego em Área de Fortaleza (CTAFOR). Devido às características observadas em campo, a velocidade desejada dos condutores em todas as vias codificadas foi estabelecida em torno de 40km/h. Os parâmetros do submodelo de seguimento veicular foram estabelecidos de acordo com Lacerda e Castro-Neto (2014), que foram calibrados para um trecho de uma via arterial de Fortaleza, localizado no bairro Aldeota.

Na simulação, a presença do semáforo 1 causa a chegada dos veículos em pelotão na aproximação 2, o que não ocorreu em campo, provavelmente porque a Rua Pereira Valente é uma via secundária nos três cruzamentos à montante da INS em análise e/ou devido à entrada de veículos nessa rua a partir dessas interseções. Portanto, foi decidido retirá-lo da rede codificada, tornando a chegada dos veículos 2's aleatória. A parte importante dessa rede modelada no microssimulador, constituída pela INS e pelo semáforo 2, está apresentada na Figura 16.

Figura 16 – Parte principal da rede modelada no microssimulador



Fonte: Elaborada pelo autor.

Antes da calibração dos parâmetros do submodelo, foi realizada a comparação entre as distribuições (modelada no simulador e observada em campo) dos *headways* da aproximação principal, pelo teste qui-quadrado com nível de significância de 5%, além da comparação entre as suas médias amostrais. Tal verificação é importante porque a aceitação de brechas depende bastante da distribuição desses *headways* e a chegada aleatória dos veículos na Rua Pereira Valente é questionável.

Na fase de calibração foram executadas dez simulações de quinze minutos (além dos dois minutos de “aquecimento” da rede) para cada combinação de valores dos parâmetros ajustados. Como foi mencionado na seção anterior, a calibração foi realizada com base na estatística qui-quadrado, porém foram avaliadas também as diferenças entre as médias amostrais da medida-alvo simulada e a obtida em campo. Esse procedimento foi realizado separadamente para cada possibilidade de conversão a partir da aproximação secundária – pois há a possibilidade de que a brecha crítica dos dois casos sejam diferentes –, que são: movimento de travessia, ou seja, continuando na Rua Coronel Linhares, e conversão à direita para a Rua Pereira Valente (visualizar Figura 13, se necessário). Durante essa etapa, percebeu-se a incompatibilidade dos valores da medida-alvo estimados pelo submodelo escolhido, que ocorre devido ao extenso período de desaceleração dos veículos da aproximação controlada.

Mais do que para a observação de campo, no microsimulador é necessário escolher com cautela a posição da seção de referência para coleta dos dados da medida-alvo, pois deve-se atentar para a variabilidade na posição de parada dos condutores, de forma que nenhum (ou pouquíssimas exceções) veículo 1 pare antes dela, já que o intervalo de tempo coletado não corresponderia ao tempo de espera experimentado pelo motorista. Porém, quanto mais distante essa seção de coleta estiver da interseção, maior é a parcela do intervalo de desaceleração presente nos dados coletados.

Para tentar solucionar o problema mencionado, foi feito um ajuste nos dados da medida-alvo coletados no simulador, de forma a descontar a duração excessiva da desaceleração que é imposta nos veículos 1's até que eles atinjam a velocidade nula, instante a partir do qual se inicia a avaliação das brechas. O valor subtraído dos dados coletados no modelo (um para a amostra correspondente ao movimento de travessia e outro para a amostra da conversão à direita) foi determinado a partir da comparação da média de duas amostras (uma de campo e outra do modelo) compostas somente pelos tempos de viagem dos veículos 1's que precisaram parar apenas momentaneamente antes de realizar sua manobra. O valor limite de referência para identificar os que não precisaram parar mais do que o tempo mínimo

foi de 2,0s (condizente aos dados de campo), e os valores de ajuste testados foram tais que os menores dos tempos de viagem modificados não fossem muito baixos (em torno de 0,7s ou menos) – exceto em poucos casos em que o veículo parou com sua extremidade frontal praticamente em cima da seção, o que significa que o seu tempo de viagem pela seção praticamente não possui parcela de desaceleração –, e tais que o número de elementos da amostra fosse condizente com a quantidade de veículos nessa situação durante a simulação.

Para validar o modelo supostamente calibrado, verificaram-se a distribuição dos *headways* entre os veículos 2's e as distribuições dos tempos de espera do primeiro veículo da fila, para ambos os movimentos (frente e direita), para o cenário do período destinado à validação, também utilizando o teste qui-quadrado com nível de significância de 5% e com dez simulações executadas. Além disso, foi determinado o intervalo de confiança para a média dos tempos de espera a partir de uma única amostra composta pelos dados de duas simulações selecionadas aleatoriamente dentre as dez executadas, a fim de comparar amostras com tamanho não tão superior ao das obtidas em campo.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estrutura desta seção é formada por quatro tópicos que exibem os resultados encontrados durante a execução das fases deste trabalho, seguidos de comentários que complementam o entendimento sobre o que está sendo exposto.

### 5.1 Análise dos parâmetros dos submodelos de aceitação de brechas

Como foi mencionado na metodologia, estudaram-se os principais simuladores microscópicos quanto à estimativa das principais medidas de desempenho do tráfego e da capacidade da aproximação secundária de uma interseção fictícia, com foco no efeito dos parâmetros dos submodelos de aceitação de brechas. As medidas de desempenho, apenas para as viagens ao longo da aproximação 1, consideradas foram: atraso médio, tempo de viagem médio e extensão média de fila. Tem-se a seguir, para cada um dos três pacotes computacionais estudados, o que foi observado durante essa etapa do trabalho.

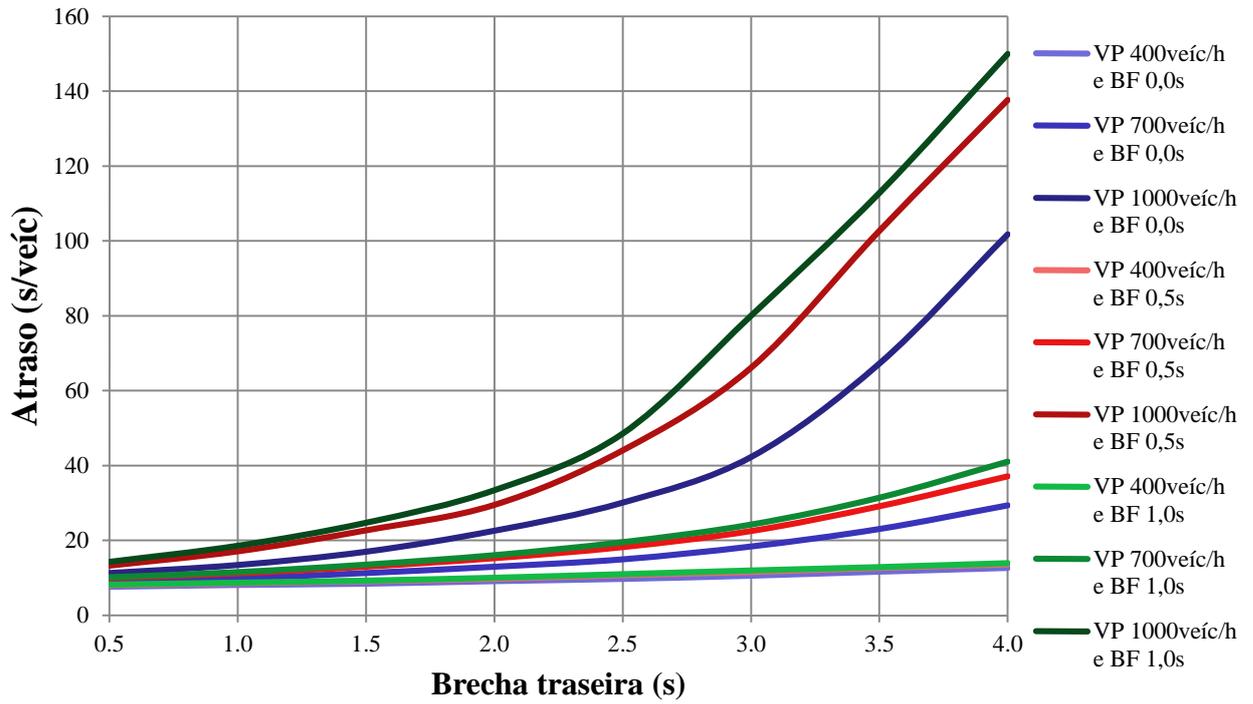
#### 5.1.1 VISSIM

Nas subseções a seguir, estão apresentados os resultados e discussão tanto da análise de sensibilidade dos parâmetros dos dois submodelos de aceitação de brechas do VISSIM quanto da busca pela correspondência entre eles.

##### 5.1.1.1 Áreas de conflito

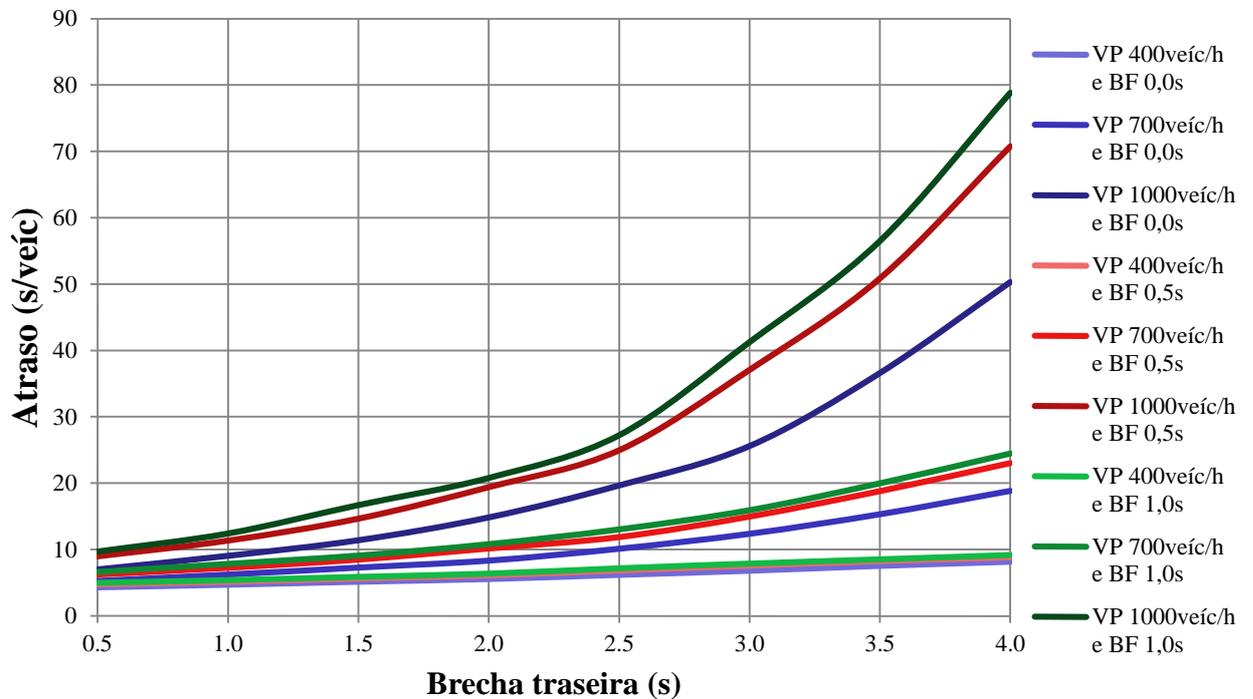
Os cenários considerados neste submodelo foram estabelecidos a partir da variação da distância de visibilidade e da Brecha Frontal (BF) em três níveis, e da brecha traseira em oito níveis, além do volume horário da aproximação principal (VP) com os três valores, comum a todos os submodelos, mencionados na seção 4.1, totalizando 216 casos. Os Gráficos 1, 2, e 3 apresentam as curvas de atraso médio experimentado na via secundária, em função da brecha traseira, obtidas e agrupadas de acordo com a distância de visibilidade correspondente. Para facilitar a leitura desses e de todos os outros gráficos semelhantes, optou-se por utilizar a mesma cor, porém com diferentes tonalidades, para representar curvas cuja única diferença é o fluxo da via principal (a cor se torna mais escura conforme a intensidade veicular aumenta).

Gráfico 1 – Atraso médio obtido no submodelo AC para visibilidade de 2m



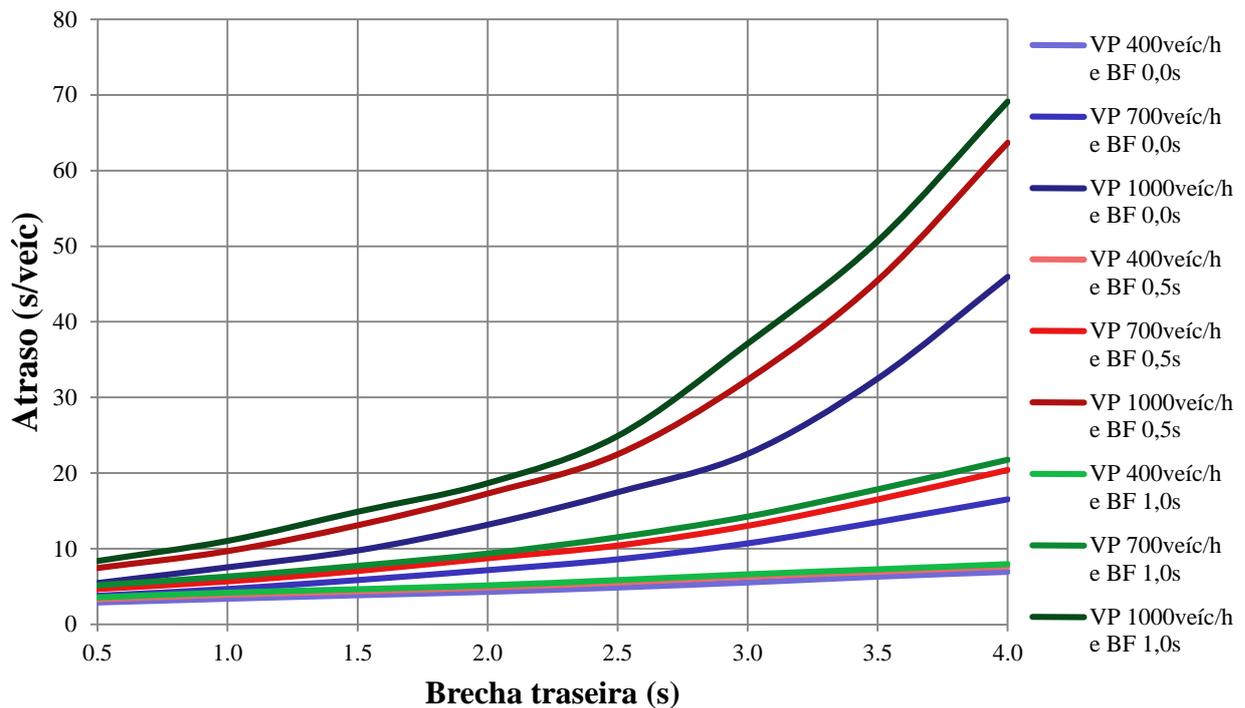
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 2 – Atraso médio obtido no submodelo AC para visibilidade de 7m



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3 – Atraso médio obtido no submodelo AC para visibilidade de 12m



Fonte: Elaborado pelo autor.

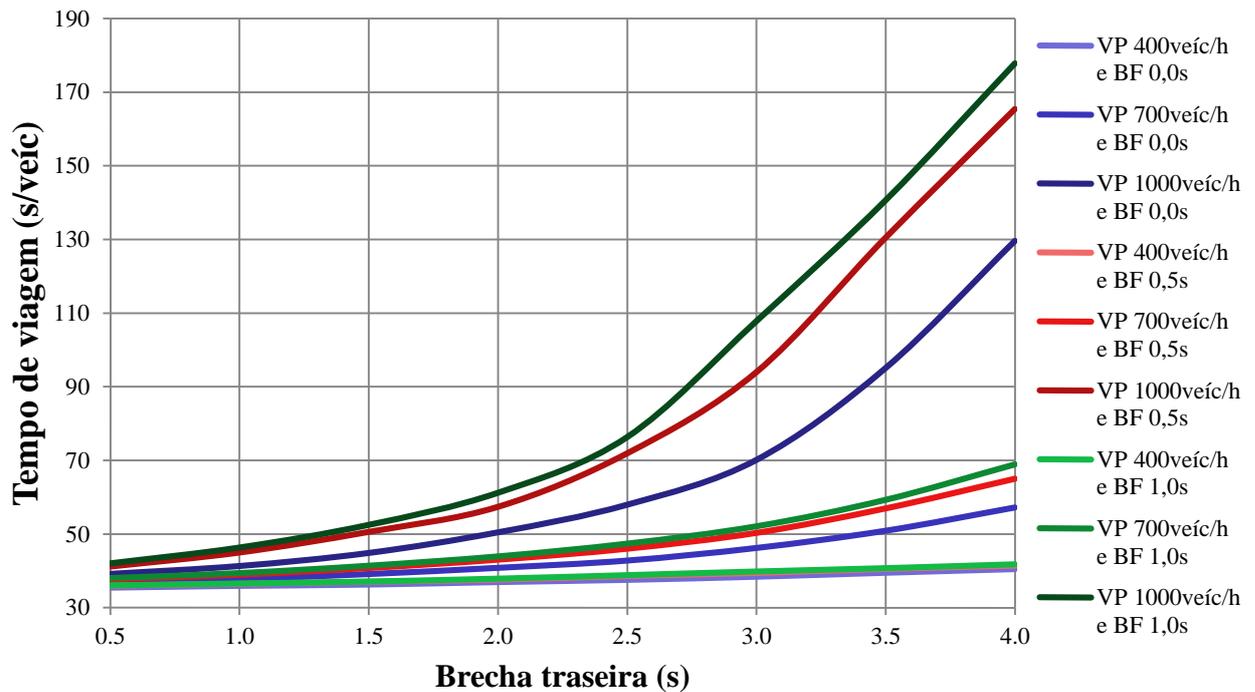
Os resultados dos gráficos anteriores são condizentes com o que era esperado, pois, além de todas as curvas serem crescentes com o aumento da brecha traseira, sempre que o volume na via principal ou a brecha frontal aumenta, o atraso médio também aumenta, ou seja, uma curva correspondente a condições menos favoráveis ao uso das brechas que outra está completamente acima dela. Comparando-se os três gráficos, percebe-se também que a distância de visibilidade tem uma influência significativa no desempenho do tráfego – principalmente quando são comparados os resultados correspondentes a 2m com os de 7m –, já que interseções que oferecem maior campo de visão facilitam a avaliação das brechas para os condutores da aproximação secundária, pois esse processo pode ser iniciado antes mesmo deles chegarem à faixa de retenção.

Pode-se notar que o acréscimo de 300veíc/h no fluxo principal influencia bem mais no atraso médio do que o incremento de 0,5s no valor da brecha frontal. De acordo com esses gráficos, para baixos valores de fluxo na via principal – representados pelo valor de 400veíc/h –, tanto a brecha frontal quanto a brecha traseira impactam muito pouco no valor de atraso médio obtido, pois, além das curvas praticamente se coincidirem, elas possuem baixa inclinação (nos três gráficos).

É possível ver também que, quanto maior a brecha traseira, maior é a inclinação das curvas, ou seja, o efeito do aumento da brecha traseira dos motoristas na medida de

desempenho do tráfego é cada vez maior, já que o tempo médio de espera por uma brecha aumenta e o atraso adicional de cada motorista influencia também no atraso de todos os outros que estão na fila. O Gráfico 4 é semelhante aos anteriores, porém correspondem ao tempo de viagem médio para a distância de visibilidade de 2m (os demais casos estão no Apêndice A).

Gráfico 4 – Tempo de viagem médio obtido no submodelo AC para visibilidade de 2m

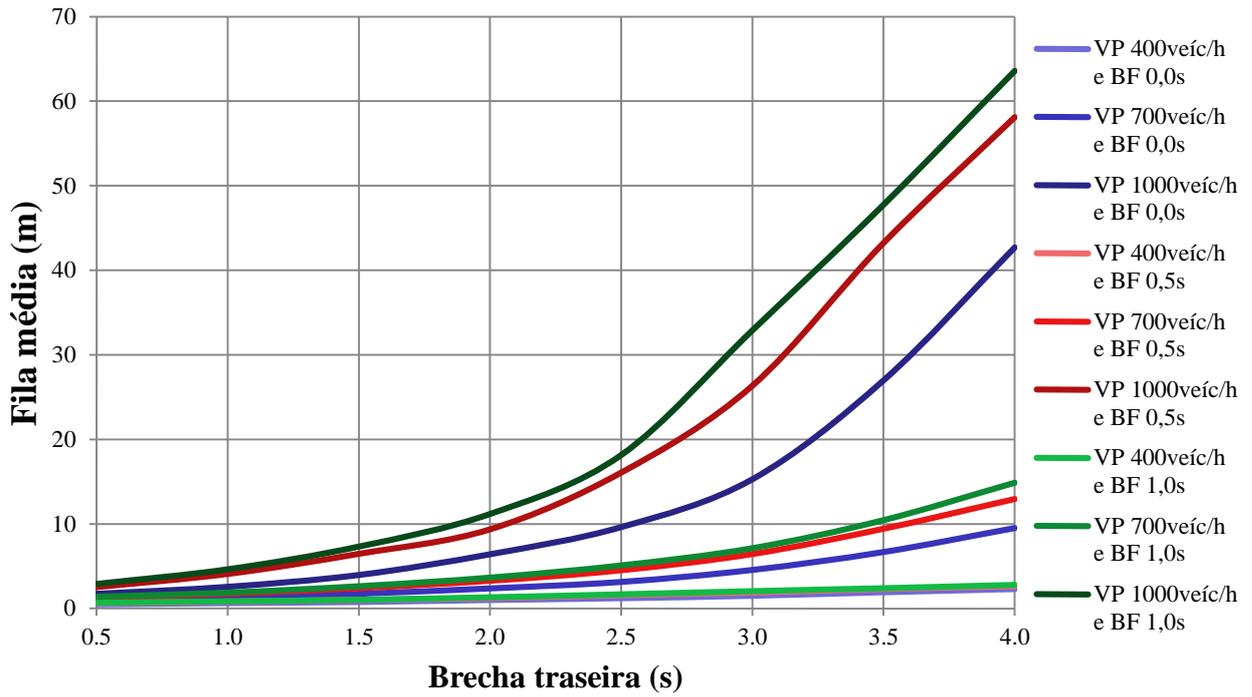


Fonte: Elaborado pelo autor.

Tais curvas equivalem às de atraso médio acrescidas de uma constante, que é o tempo de viagem em condições ideais (fluxo livre e sem conflito com o tráfego de outras aproximações). Portanto, as mesmas considerações feitas para os Gráficos 1, 2 e 3 se aplicam.

As curvas contendo o comprimento médio das filas formadas na aproximação secundária, em cada cenário com distância de visibilidade de 2m, são exibidas no Gráfico 5. Pode-se observar que as curvas possuem as mesmas características para as três medidas de desempenho utilizadas, ou seja, uma curva correspondente a determinadas combinações de parâmetros possui a mesma forma tanto para o atraso médio quanto para o tempo de viagem médio e para a extensão média de fila.

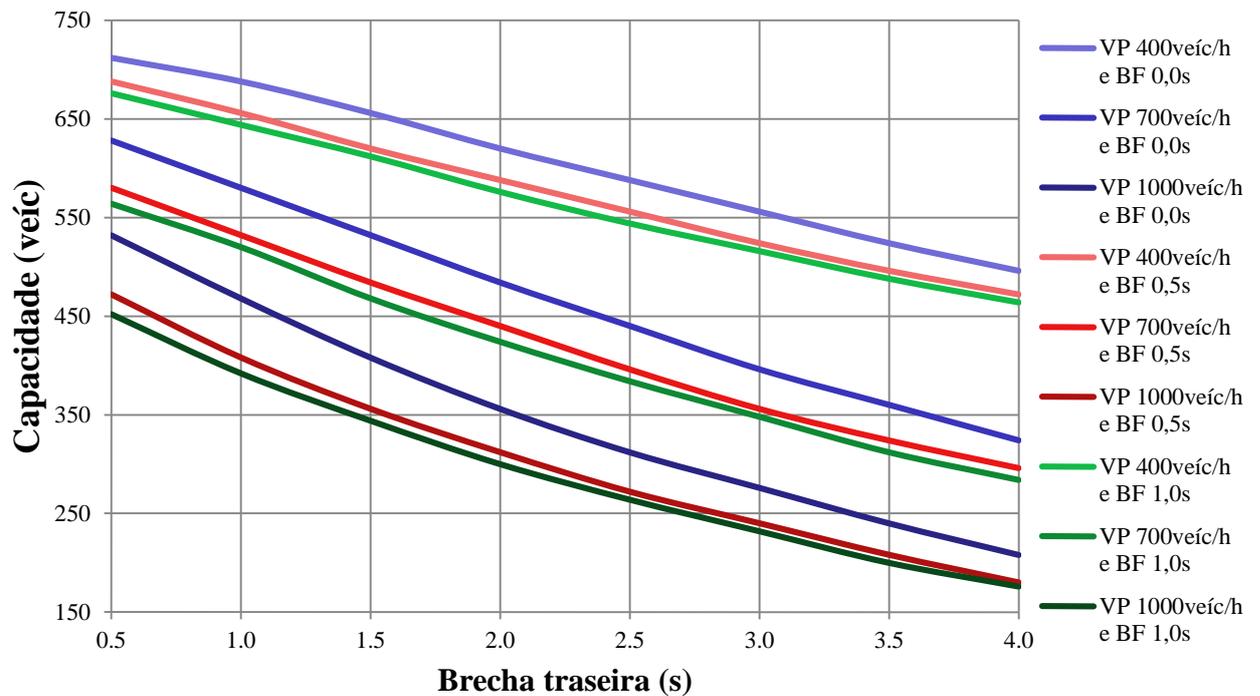
Gráfico 5 – Extensão média de fila obtida no submodelo AC para visibilidade de 2m



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Gráfico 6 apresenta os resultados de capacidade da aproximação secundária estimada pelo submodelo *áreas de conflito* para a distância de visibilidade de 2m.

Gráfico 6 – Capacidade da aproximação secundária obtida no submodelo AC para visibilidade de 2m



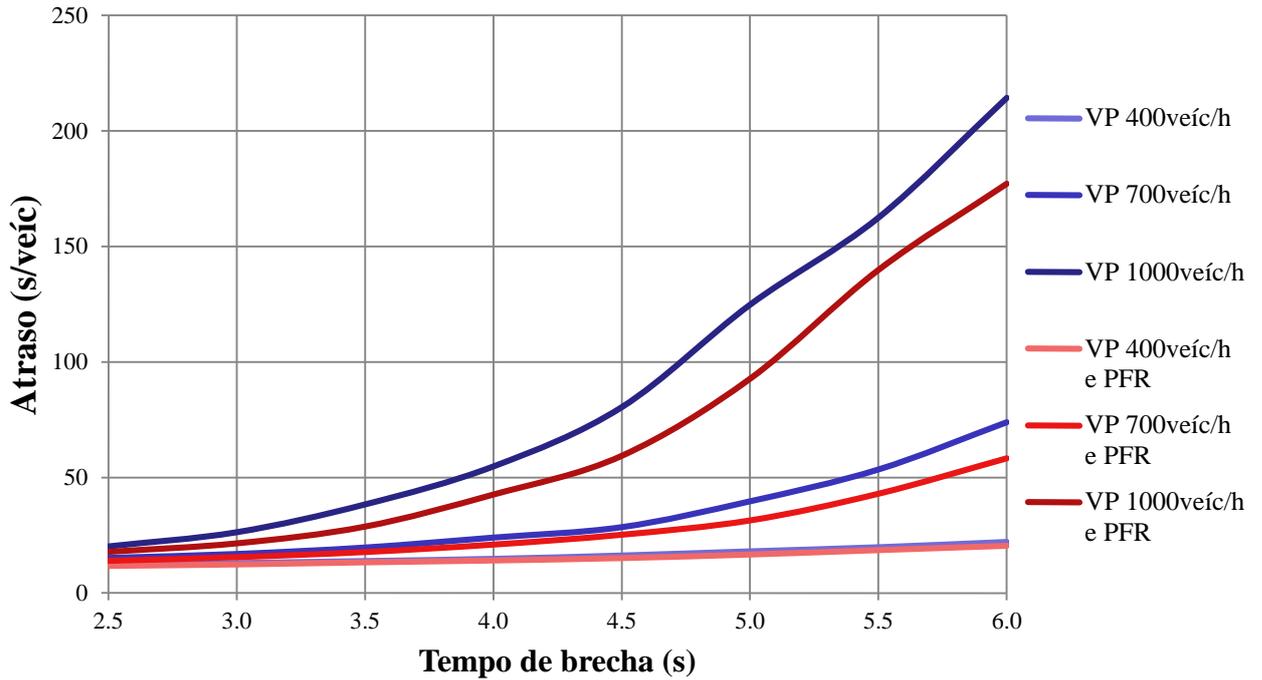
Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como para as três medidas de desempenho, os gráficos da capacidade da aproximação secundária contêm resultados de acordo com o esperado, pois as relações triviais (curvas decrescentes; quanto maior o volume na via principal ou a brecha frontal dos condutores, menor é a capacidade; quanto maior a distância de visibilidade, maior é a capacidade) são obedecidas. As diferenças mais visíveis são que as curvas de capacidade possuem inclinação menos variável (com uma forma mais próxima de retilínea), pois o efeito acumulativo não tem influência nela já que só depende da taxa de atendimento da aproximação secundária, e que o mesmo incremento do valor da brecha traseira causa maior impacto na capacidade estimada quando se trata de valores menores, ou seja, o contrário do que ocorre nas curvas de atraso, tempo de viagem e fila média.

#### 5.1.1.2 Regras de prioridade

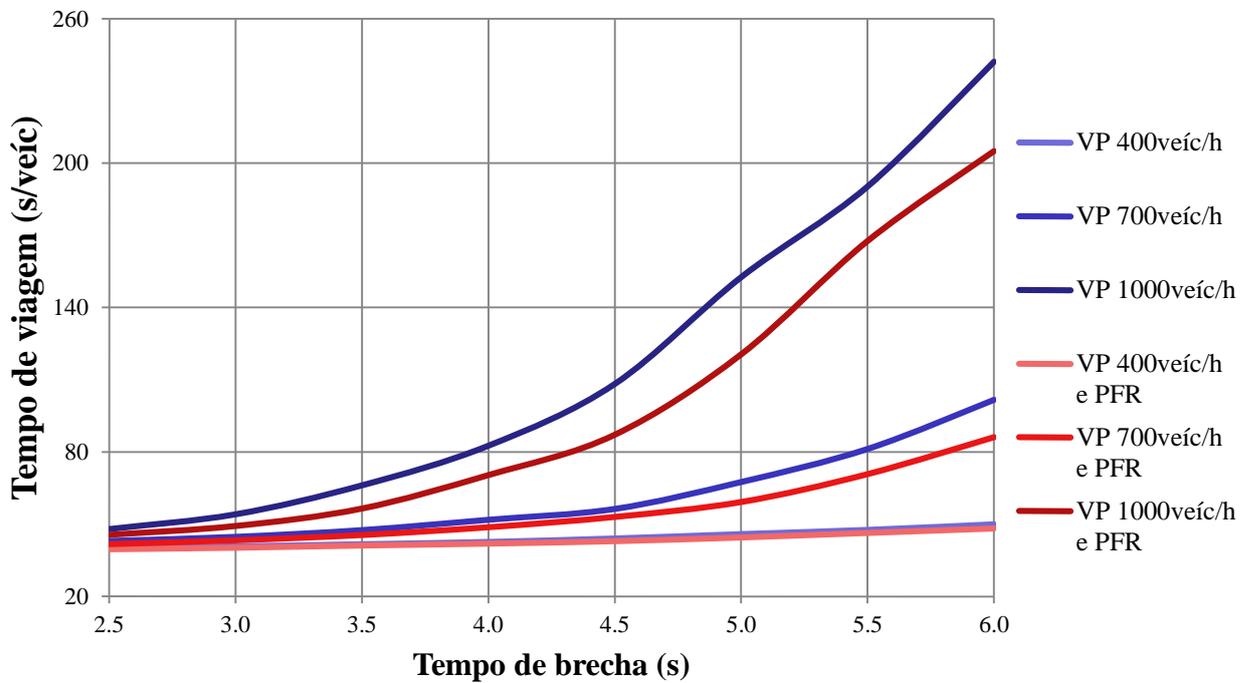
Os cenários considerados no submodelo *regras de prioridade* (*priority rules*) foram definidos a partir da variação da distância média de parada em relação à faixa de retenção em dois níveis: o valor *default*, que é de 50 cm, e o valor nulo, representando a Parada do veículo sobre a Faixa de Retenção (PFR). A brecha mínima dos condutores (tempo de brecha) teve seu valor variado em oito níveis, totalizando então 48 casos. O atraso, o tempo de viagem e o comprimento médios obtidos com esse submodelo são apresentados nos Gráficos 7, 8 e 9, respectivamente, enquanto o Gráfico 10 contém os resultados de capacidade da aproximação secundária estimados.

Gráfico 7 – Atraso médio obtido no submodelo RP



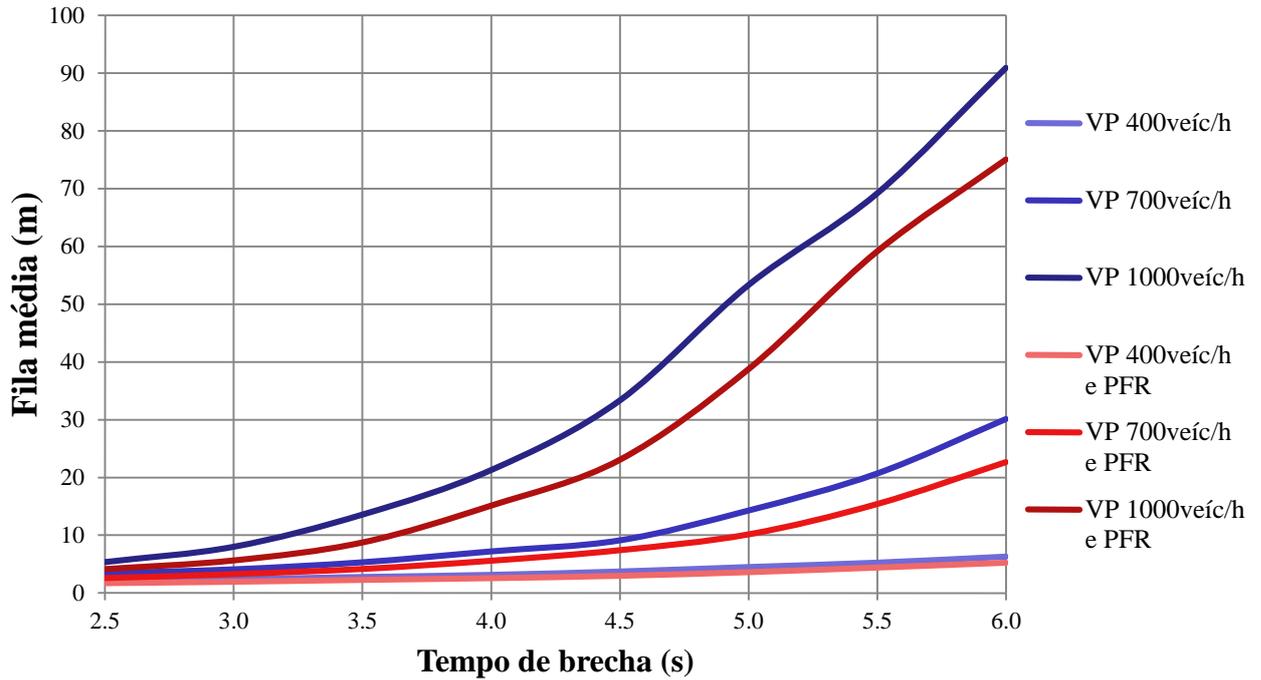
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 8 – Tempo de viagem médio obtido no submodelo RP



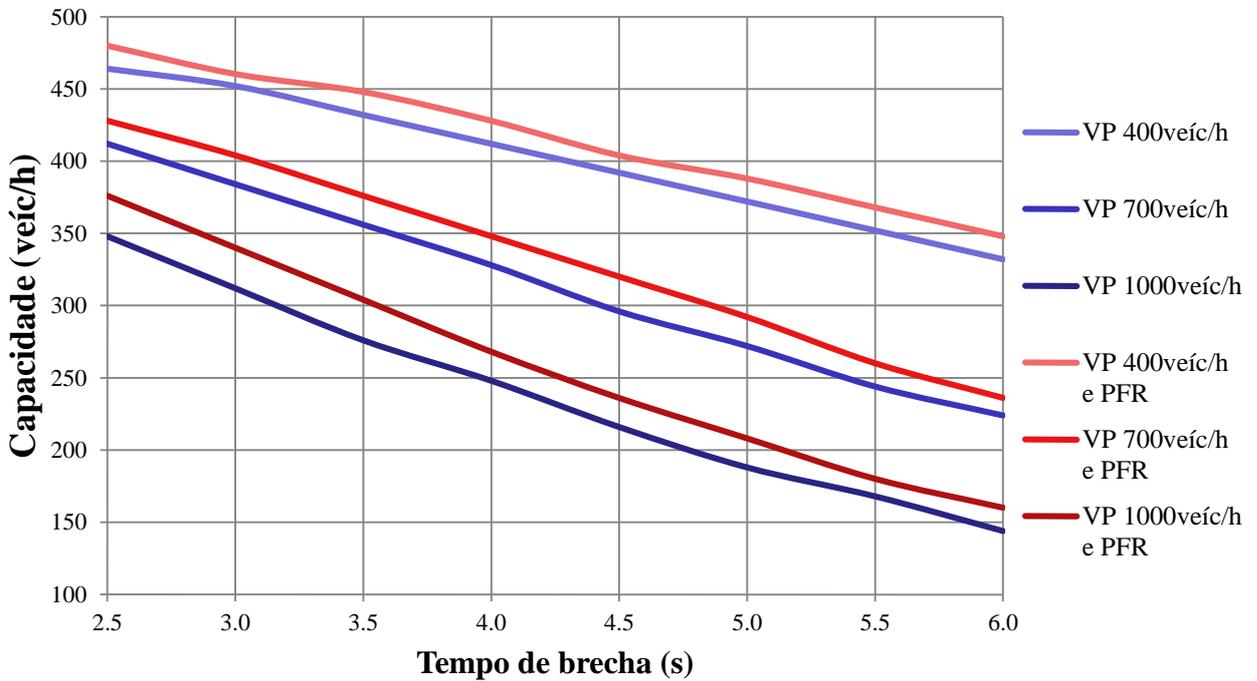
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 9 – Extensão média de fila obtida no submodelo RP



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 10 – Capacidade da aproximação secundária obtida no submodelo RP



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir desses gráficos, é possível verificar a influência significativa, para fluxos da via principal e tempo de brecha mínima consideráveis, que a posição de parada dos

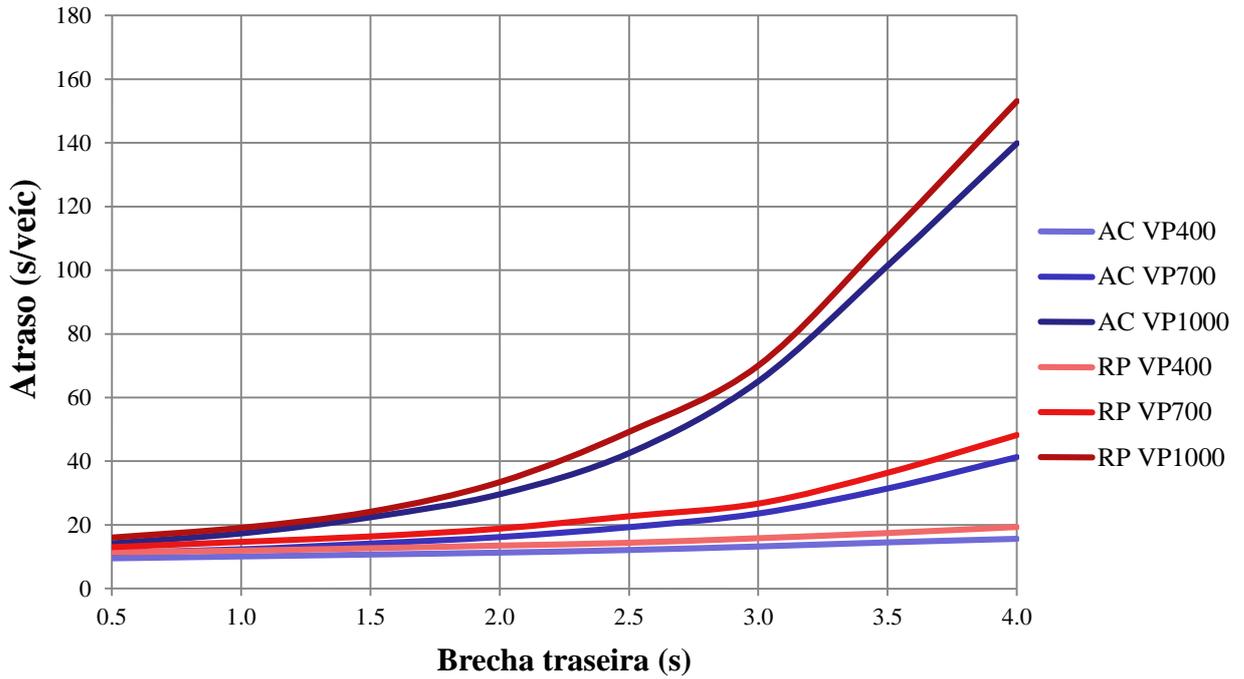
veículos da aproximação secundária tem sobre a estimativa das medidas de desempenho. As características dos quatro gráficos anteriores são semelhantes às daqueles do submodelo *áreas de conflito*, porém os valores das medidas de desempenho do tráfego são significativamente maiores e a capacidade estimada é menor, mesmo em relação às curvas com os níveis de menor distância de visibilidade e maior brecha frontal. Portanto, claramente, ou os cenários modelados para o submodelo RP estão representando situações onde os condutores são mais cautelosos que aqueles correspondentes aos cenários que foram definidos para o AC, ou algum comportamento incorporado pelo submodelo AC é capaz de impactar bastante nesses resultados até nesse exemplo de interseção mais simples. Além disso, o comportamento retilíneo das curvas de capacidade da aproximação secundária, nesse submodelo, foi bem mais evidente.

#### *5.1.1.3 Correspondência entre os submodelos de aceitação de brechas do VISSIM*

Os cenários simulados nesse procedimento são os mesmos utilizados na análise de sensibilidade do AC, exceto pelas características, mencionadas na metodologia, que foram impostas – como a distância de visibilidade, que foi mantida constante em 0,5m –, totalizando 72 casos. Para cada um desses cenários, foi criado um correspondente para o submodelo RP, cujo valor de brecha mínima é obtido pela Equação 2 e a posição do marcador de conflito é estimada a partir do valor da brecha frontal. Os valores de  $TT_{AP}$  e  $TT_{CD}$  foram iguais a 2,06s e 0,25s, respectivamente. O tempo de viagem médio na via principal considerado, portanto, foi de 0,07s para cada metro percorrido, já que foi verificado que essa proporção é constante ao longo da via.

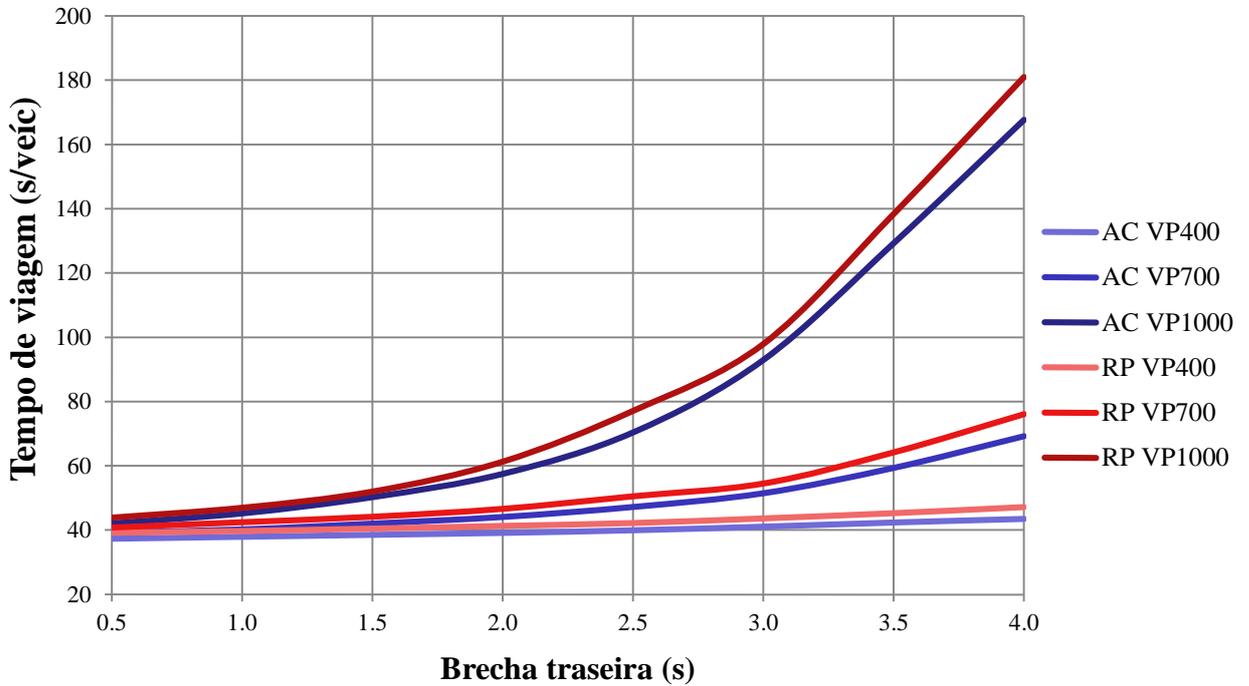
Os Gráficos 11, 12, 13 e 14 apresentam as curvas de atraso médio, tempo de viagem médio, extensão média de fila e a capacidade da aproximação secundária, respectivamente, para os cenários correspondentes à brecha frontal nula, de ambos os submodelos. Analogamente, têm-se os gráficos correspondentes à brecha frontal de 0,5s e os correspondentes à brecha frontal de 1,0s no Apêndice B.

Gráfico 11 – Atraso médio obtido em ambos os submodelos (brecha frontal nula)



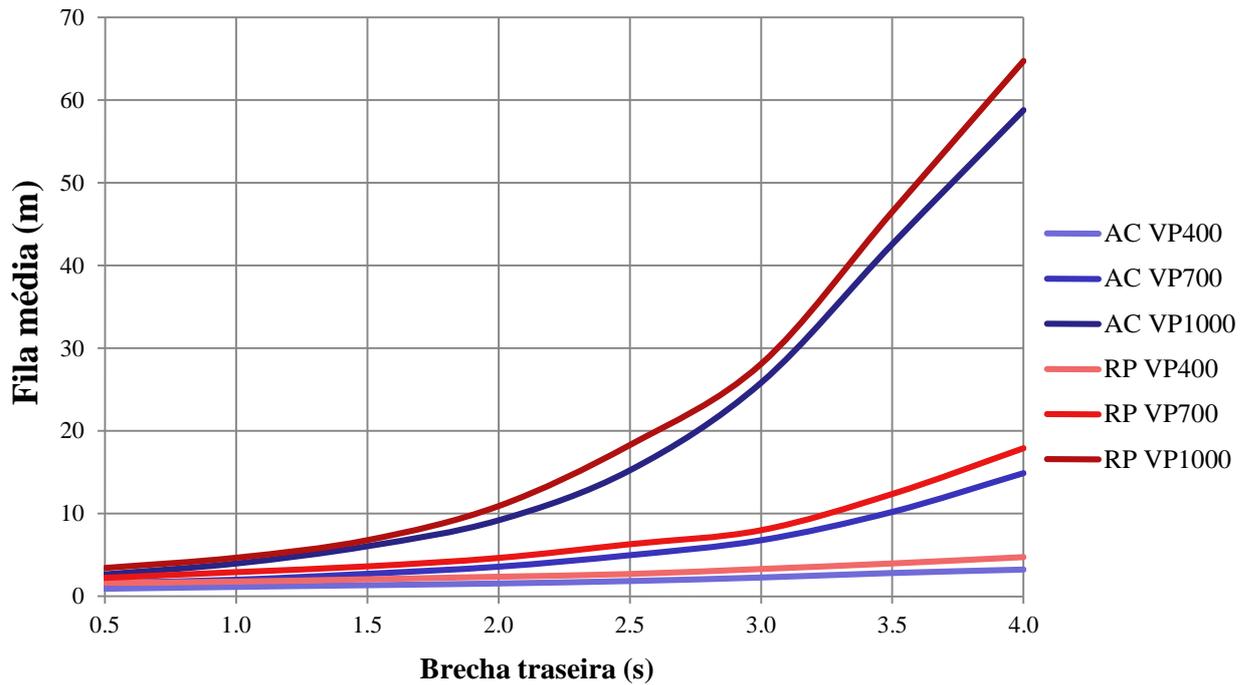
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 12 – Tempo de viagem médio obtido em ambos os submodelos (brecha frontal nula)



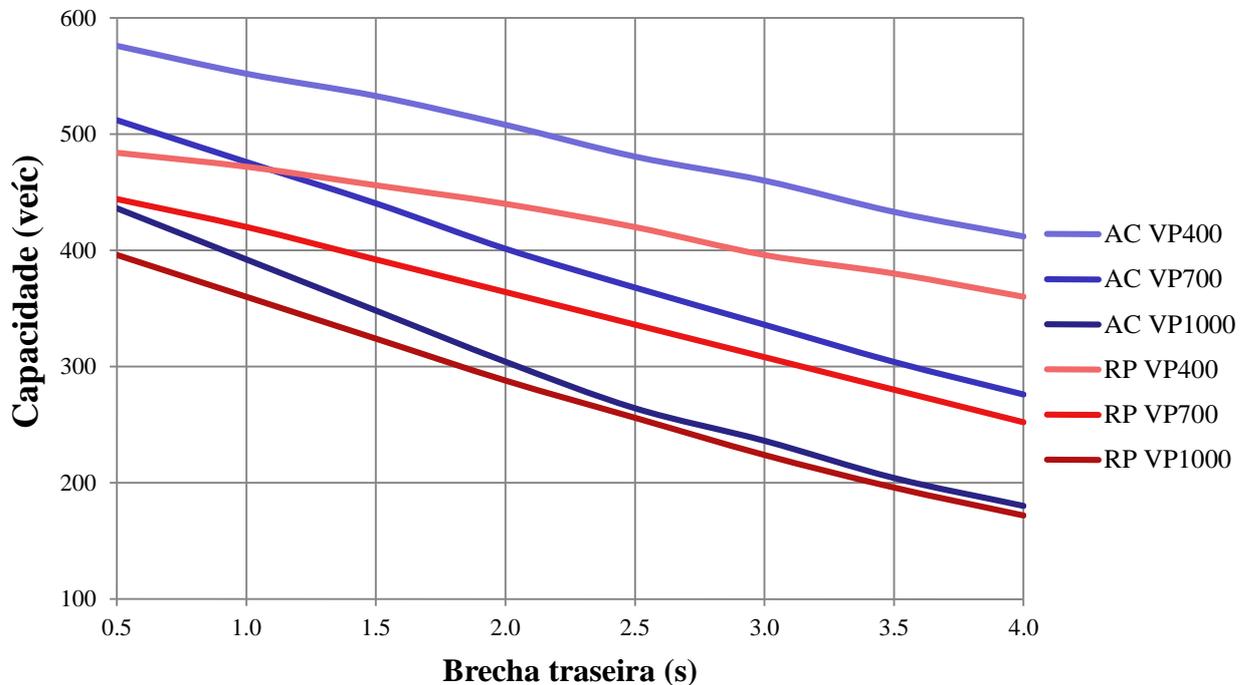
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 13 – Comprimento médio de fila obtido em ambos os submodelos (brecha frontal nula)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 14 – Capacidade da aproximação secundária obtida em ambos os submodelos (brecha frontal nula)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado nesses gráficos, as curvas das três medidas de desempenho utilizadas para representar o tráfego da aproximação secundária, em ambos os

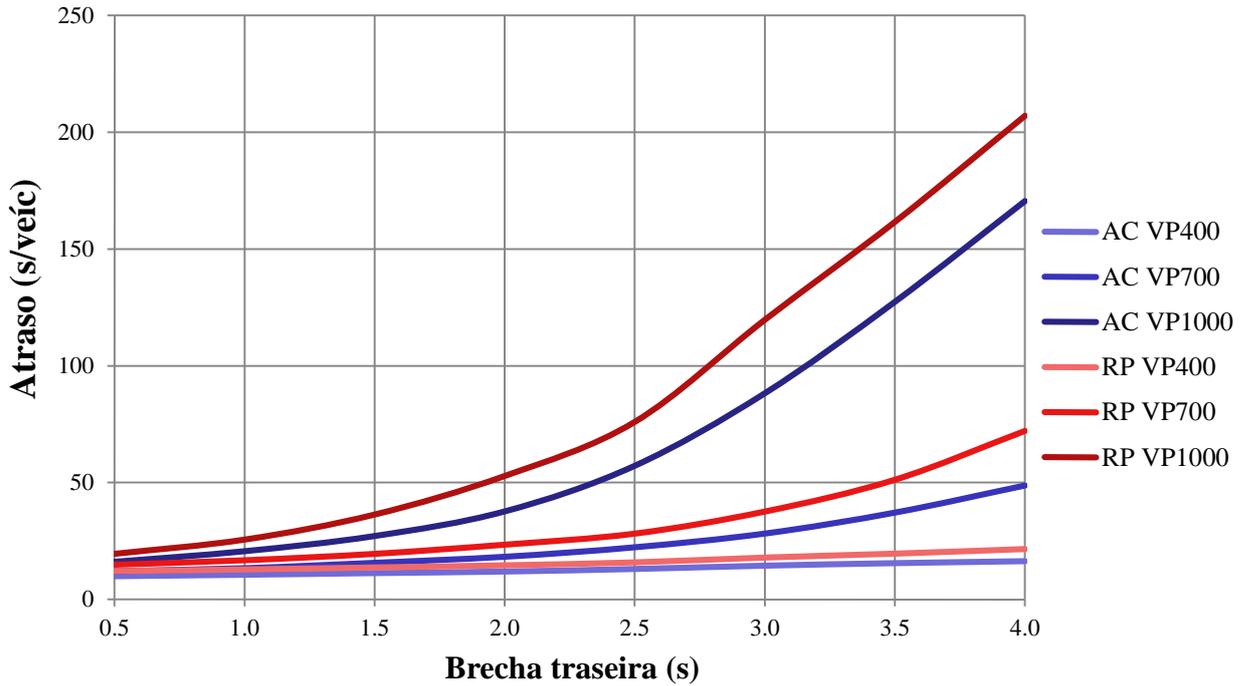
submodelos de aceitação de brechas, ficaram bem mais próximas para o caso de brecha frontal nula do que nos casos restantes, porém ainda com valores um pouco superiores para o submodelo RP. Quanto à capacidade da aproximação secundária, essa diferença foi mais expressiva, porém a distância entre as curvas se reduz conforme as brechas traseira e mínima aumentam. Algumas das possíveis explicações para a ocorrência dessas diferenças são:

- a) A distância de visibilidade presente no submodelo AC, mesmo reduzida, permite aos usuários o início da avaliação das brechas um pouco antes de parar completamente, o que favorece a aceitação de algumas brechas que seriam rejeitadas no RP;
- b) O elevado intervalo de tempo necessário para os veículos desacelerarem até a velocidade zero atrasa ainda mais o início da avaliação das brechas no submodelo RP, aumentando assim o tempo total necessário para o veículo passar pela interseção em casos de aceitação da primeira brecha avaliada. Isso influencia ainda mais na estimativa da capacidade da aproximação secundária, pois o tempo adicional desses casos tem seu efeito acumulado em condição de saturação.

Ambas as justificativas mencionadas podem explicar o porquê da diferença da estimativa da capacidade dos dois submodelos ser maior quanto menor forem o fluxo de tráfego na via principal e a brecha traseira (ou tempo de brecha), pois maior é a quantidade de primeiras brechas aceitas.

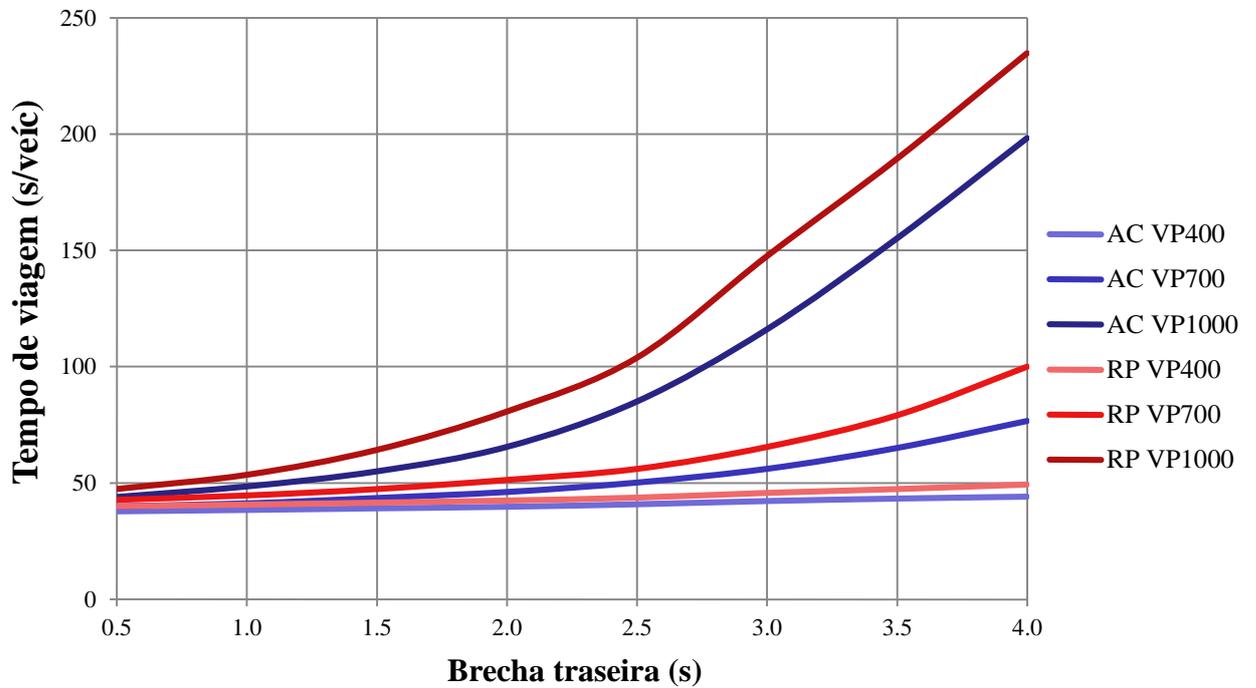
Devido ao aumento da diferença entre as curvas dos dois submodelos para os casos de brecha frontal igual a 0,5s ou 1,0s (Apêndice B), foi verificado se o item “c” das compatibilizações mencionadas na metodologia está sendo obedecido. Ao comparar a posição média dos veículos da via principal no instante em que os veículos da aproximação secundária atingem a seção A (mesma metodologia utilizada para ajustar a posição do marcador de conflito para o caso de brecha frontal nula), foi constatado que os cenários do submodelo RP correspondentes à brecha frontal de 1,0s estavam muito diferentes, nesse quesito, aos cenários do AC, enquanto não foi encontrada diferença significativa para o caso de brecha frontal igual a 0,5s. Portanto, a posição do marcador de conflito foi ajustada até que tais posições médias ficassem semelhantes, o que ocorreu quando ele foi alocado na seção D (extremidade final do cruzamento). Os novos resultados obtidos são exibidos nos Gráficos 15, 16, 17 e 18.

Gráfico 15 – Novas curvas de atraso médio obtidas em ambos os submodelos (brecha frontal 1,0s)



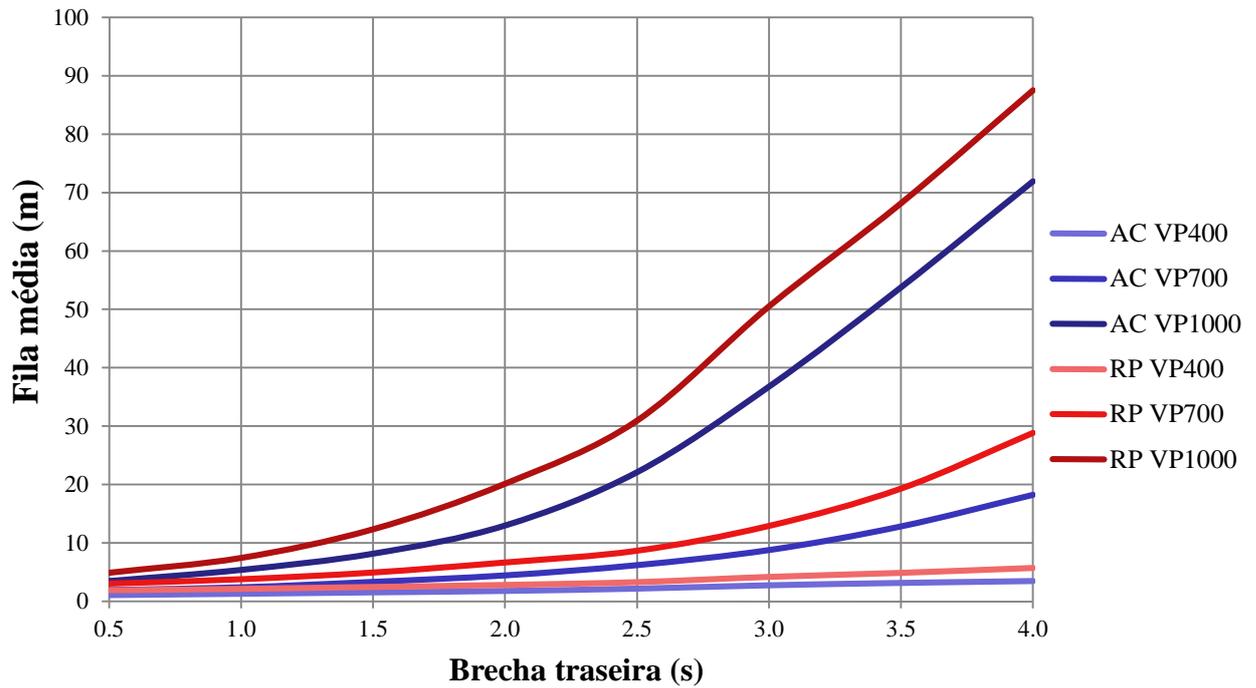
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 16 – Novas curvas de tempo de viagem médio obtidas em ambos os submodelos (brecha frontal 1,0s)



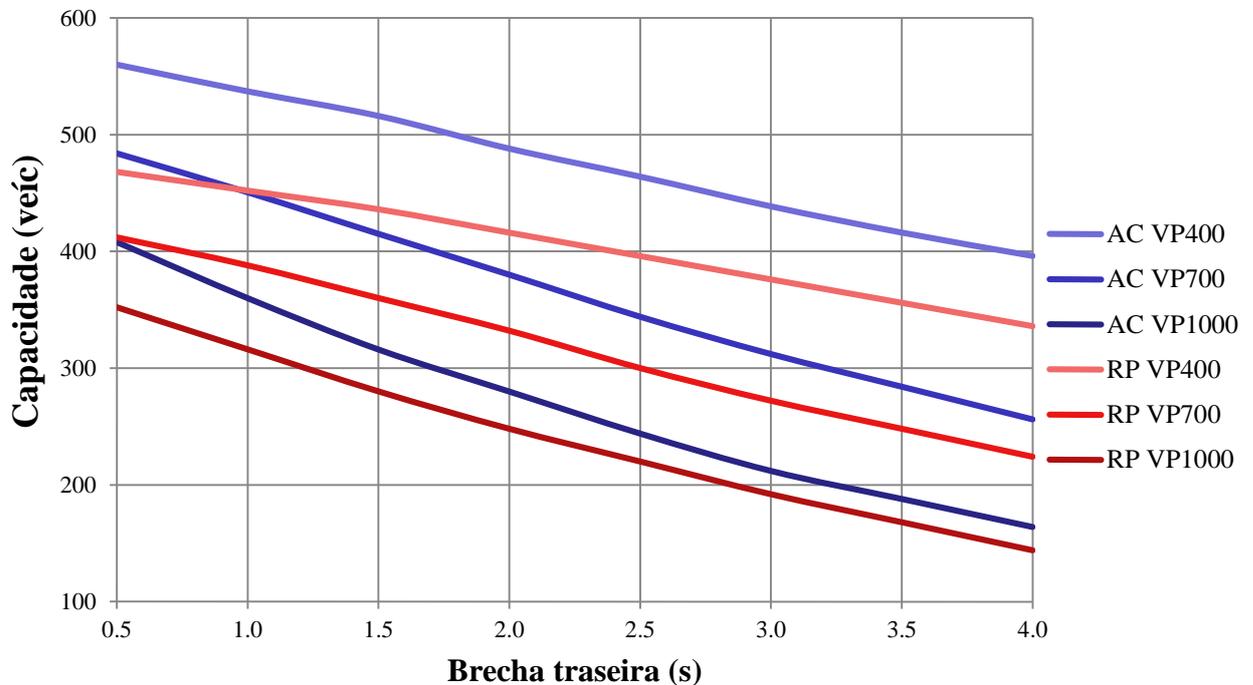
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 17 – Novas curvas de comprimento médio de fila obtidas em ambos os submodelos (brecha frontal 1,0s)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 18 – Novas curvas de capacidade obtidas em ambos os submodelos (brecha frontal 1,0s)



Fonte: Elaborado pelo autor.

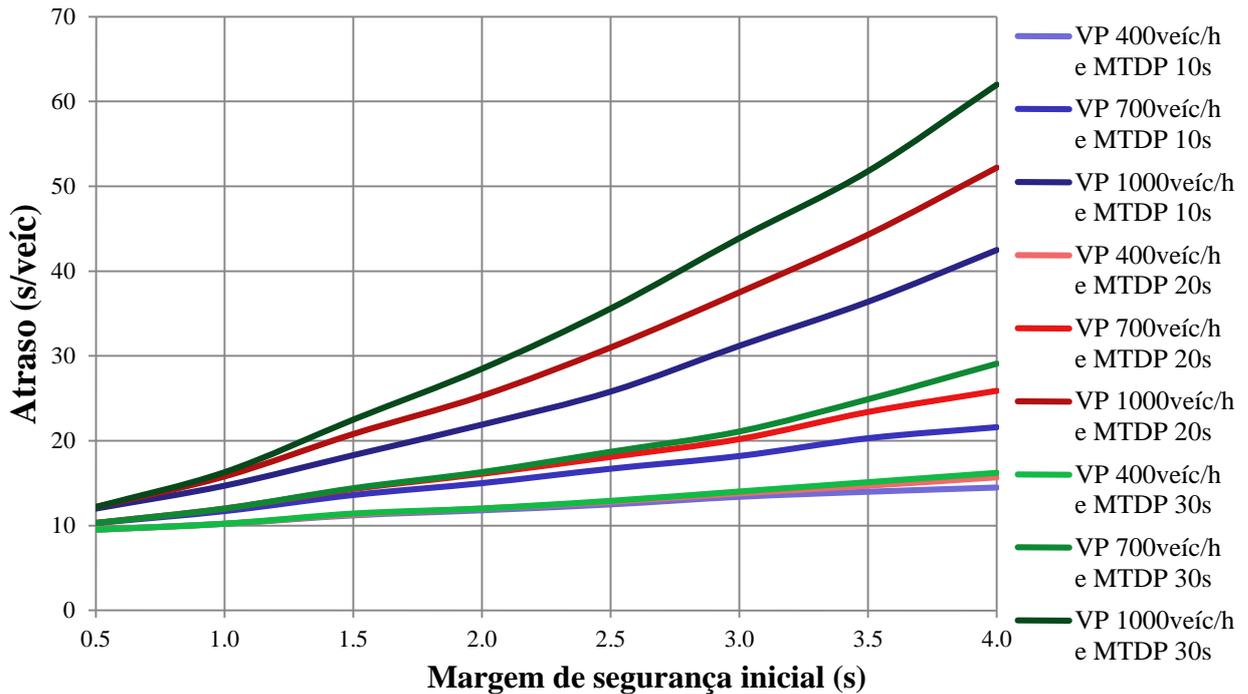
Como é possível observar, a diferença entre as curvas dos submodelos AC e RP se reduziu após o ajuste da posição do marcador de conflito, porém, mesmo assim, não houve

uma correspondência satisfatória entre eles, possivelmente devido às justificativas mencionadas anteriormente. Além disso, pode-se notar um efeito mais expressivo nessa diferença à medida que o valor da brecha frontal aumenta.

### 5.1.2 Aimsun

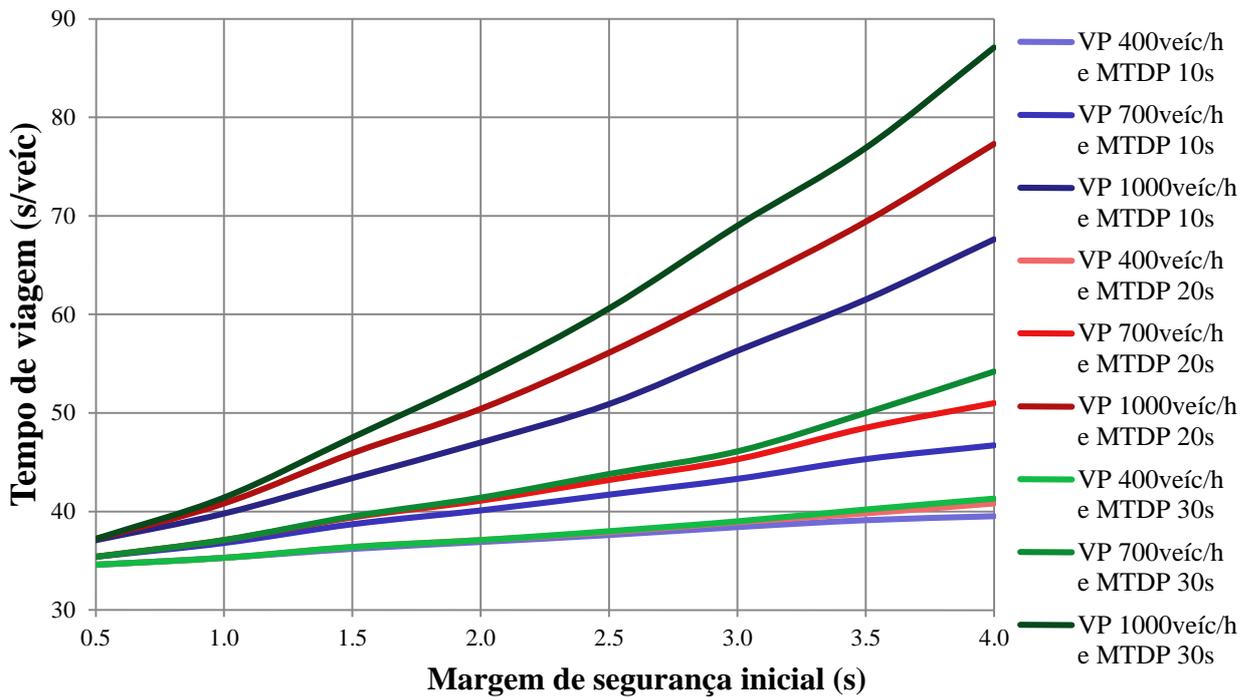
Como mencionado, os cenários considerados no Aimsun foram estabelecidos a partir da variação simultânea das margens de segurança (*safety margin*), em oito níveis, e do Máximo Tempo de Dê Preferência (MTDP, representado pelo valor médio), em três níveis, além das três intensidades de tráfego da via principal, totalizando 72 casos. Os Gráficos 19 e 20 apresentam as curvas de atraso e tempo de viagem médios, respectivamente, em função da margem de segurança inicial, obtidas com o uso desse modelo.

Gráfico 19 – Curvas de atraso médio obtidas nos cenários do Aimsun



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 20 – Curvas de tempo de viagem médio obtidas nos cenários do Aimsun

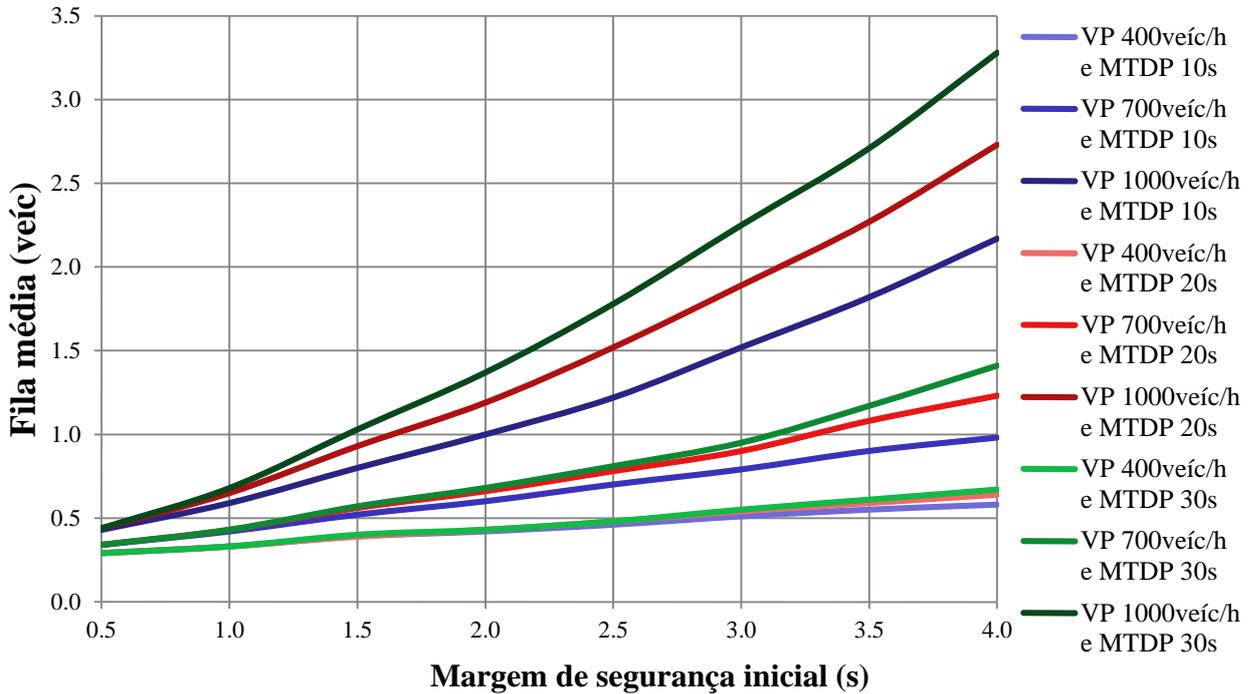


Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado nos gráficos acima, assim como no VISSIM, a diferença entre o tempo de viagem e o atraso médios estimados é constante, pois corresponde ao tempo de viagem ao longo da via secundária em condição de fluxo livre e ininterrupto. As relações triviais foram satisfeitas, pois, além das curvas serem crescentes, se mantido o MTDP constante, uma curva correspondente a um tráfego de maior intensidade na aproximação principal está acima de outra com menor intensidade, e, se mantido o VP constante, uma curva correspondente a um maior valor de máximo tempo de dê preferência está acima de outra com menor valor.

É possível perceber também que quanto maior forem o fluxo da via principal e as margens de segurança, maior é a influência do parâmetro MTDP na estimativa dessas medidas de desempenho. Além disso, diferente do que ocorreu no VISSIM, as curvas tiveram um comportamento mais retilíneo, possivelmente devido à redução da margem de segurança dos motoristas com o tempo de espera na aproximação secundária, já que os valores mais baixos atingidos não permitem que as filas fiquem extensas, como pode ser confirmado com o gráfico seguinte. O Gráfico 21 contém as curvas de fila média formada na aproximação secundária, em quantidade de veículos, que é a unidade utilizada pelo Aimsun para representar a extensão das filas.

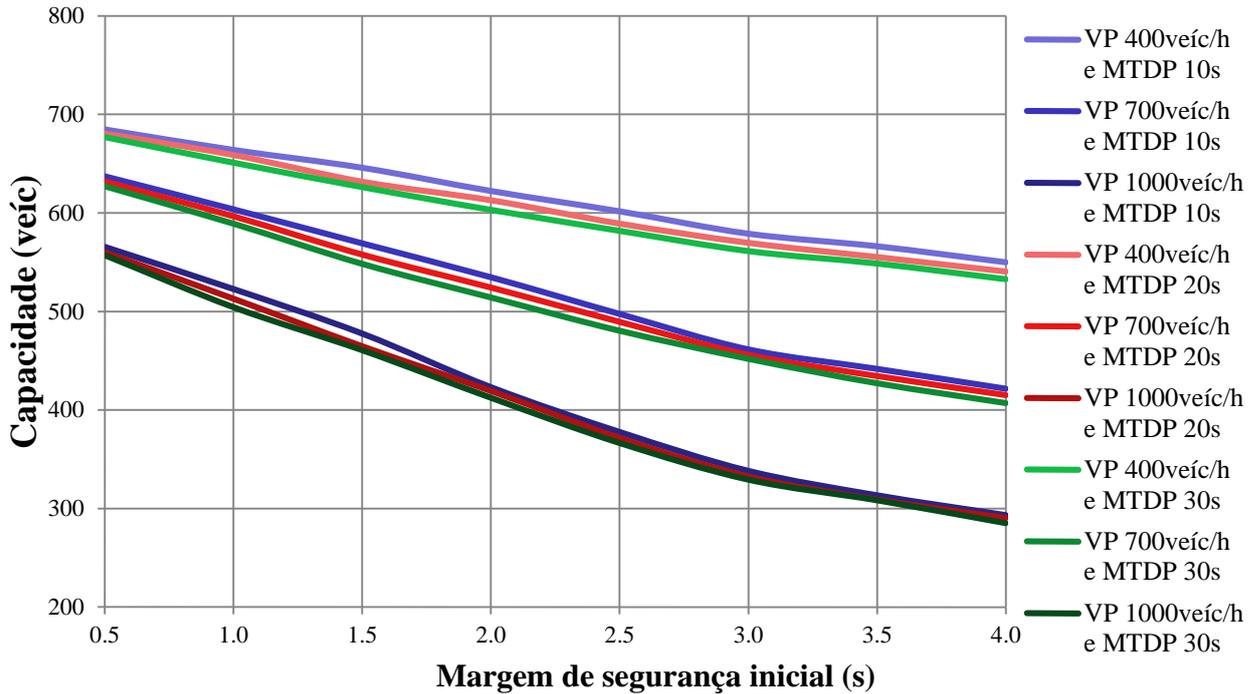
Gráfico 21 – Curvas de fila média obtidas nos cenários do Aimsun



Fonte: Elaborado pelo autor.

O comportamento do Gráfico 21 é o mesmo dos Gráficos 19 e 20, pois as curvas são muito semelhantes. Portanto, as observações feitas para o atraso e tempo de viagem médios também são válidas para o comprimento médio da fila formada na aproximação secundária. Como mencionado, a extensão da fila para esses cenários foi pequena, devido à redução da margem de segurança dos condutores e, possivelmente, a outras diferenças entre os submodelos de aceitação de brechas dos dois microsimuladores, aliviando o efeito acumulativo na estimativa das medidas de desempenho que ocorrem nos submodelos do VISSIM. O Gráfico 22 apresenta os valores de capacidade estimados para a aproximação secundária.

Gráfico 22 – Curvas de capacidade da aproximação secundária obtidas nos cenários do Aimsun



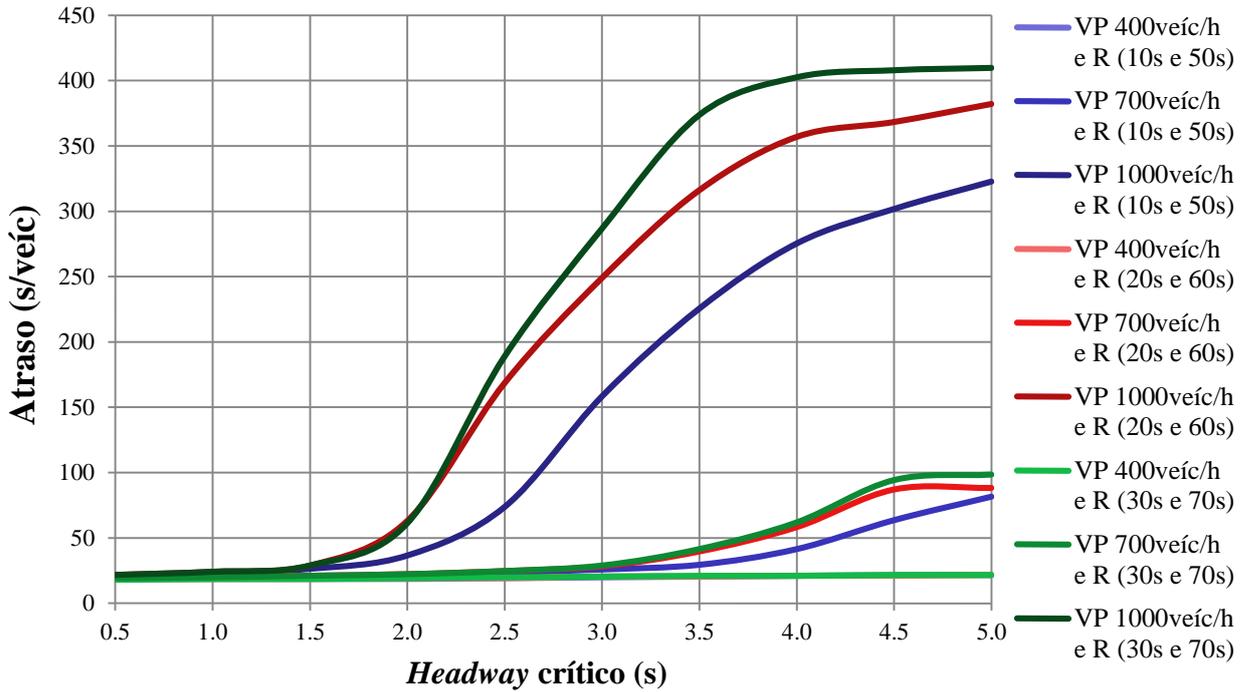
Fonte: Elaborado pelo autor.

Diferente do que ocorreu para as três medidas de desempenho, a capacidade da aproximação secundária praticamente não sofreu influência do máximo tempo de preferência. Isso está condizente com a lógica de funcionamento do submodelo, pois na condição de saturação o tempo necessário para um veículo se locomover da extremidade final da fila até a faixa de retenção é suficiente para reduzir a margem de segurança do motorista ao valor mínimo nos três níveis de MTDP. Como é possível observar, a influência do fluxo da via principal é maior quanto maior for a margem de segurança inicial.

### 5.1.3 TransModeler

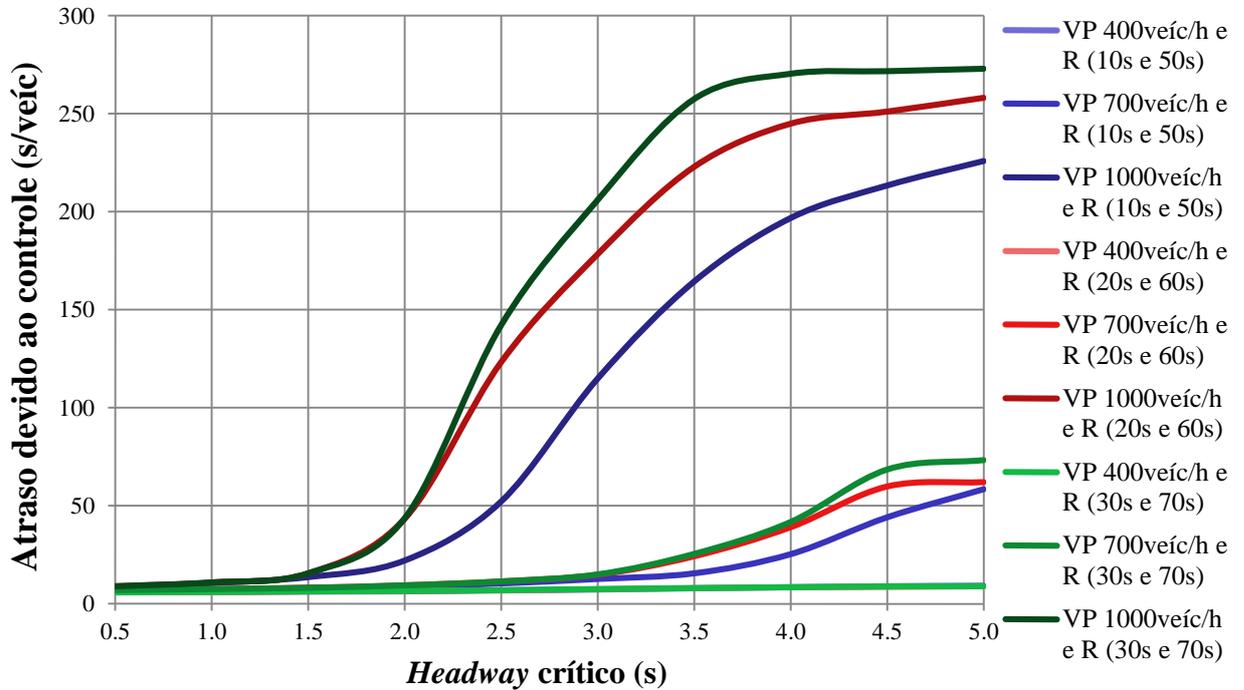
Como descrito na metodologia, os casos considerados no TransModeler foram estabelecidos a partir da variação do *headway* crítico, em dez níveis, e da variação simultânea dos instantes iniciais e finais que definem o intervalo de redução (denominados nos gráficos seguintes pela letra R) do *headway* crítico, em três níveis, além dos três níveis de fluxo da aproximação principal, totalizando 90 cenários. Os Gráficos 23, 24 e 25 apresentam as curvas de atraso, atraso devido ao controle da interseção (dado de saída não disponibilizado pelos outros dois simuladores microscópicos) e tempo de viagem médios, respectivamente, em função do *headway* crítico, obtidas com o uso desse modelo.

Gráfico 23 – Curvas de atraso médio obtidas nos cenários do TransModeler



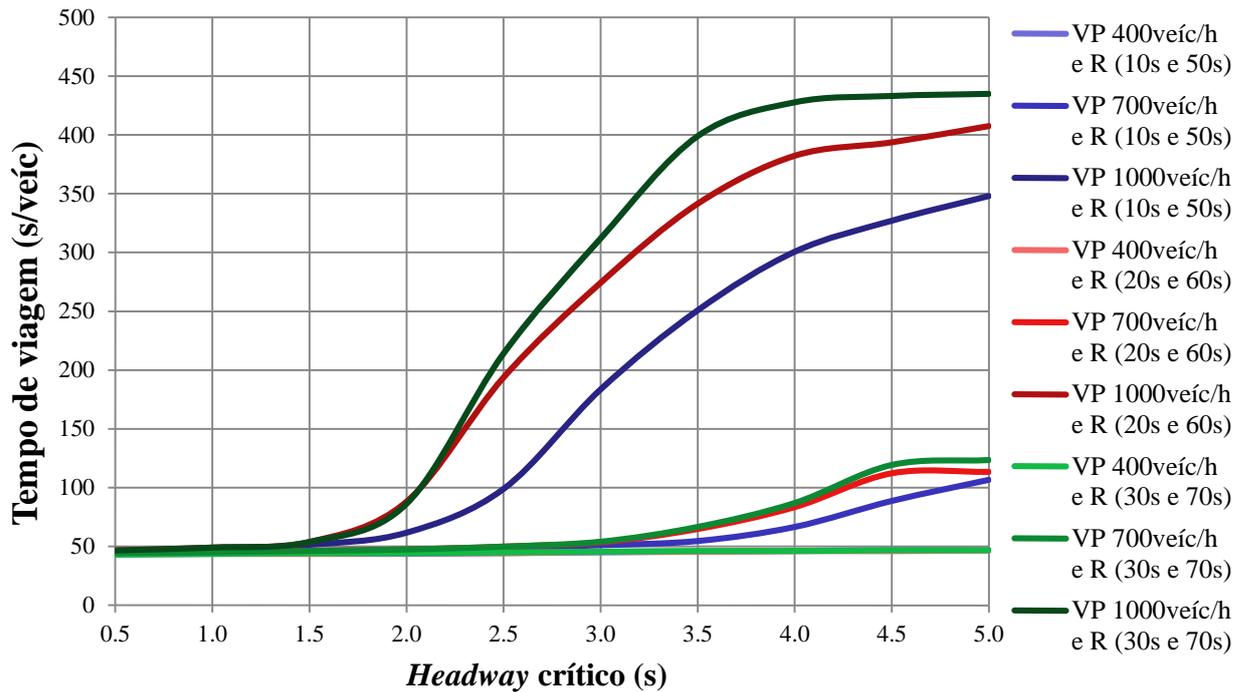
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 24 – Curvas de atraso médio devido ao controle obtidas nos cenários do TransModeler



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 25 – Curvas de tempo de viagem médio obtidas nos cenários do TransModeler



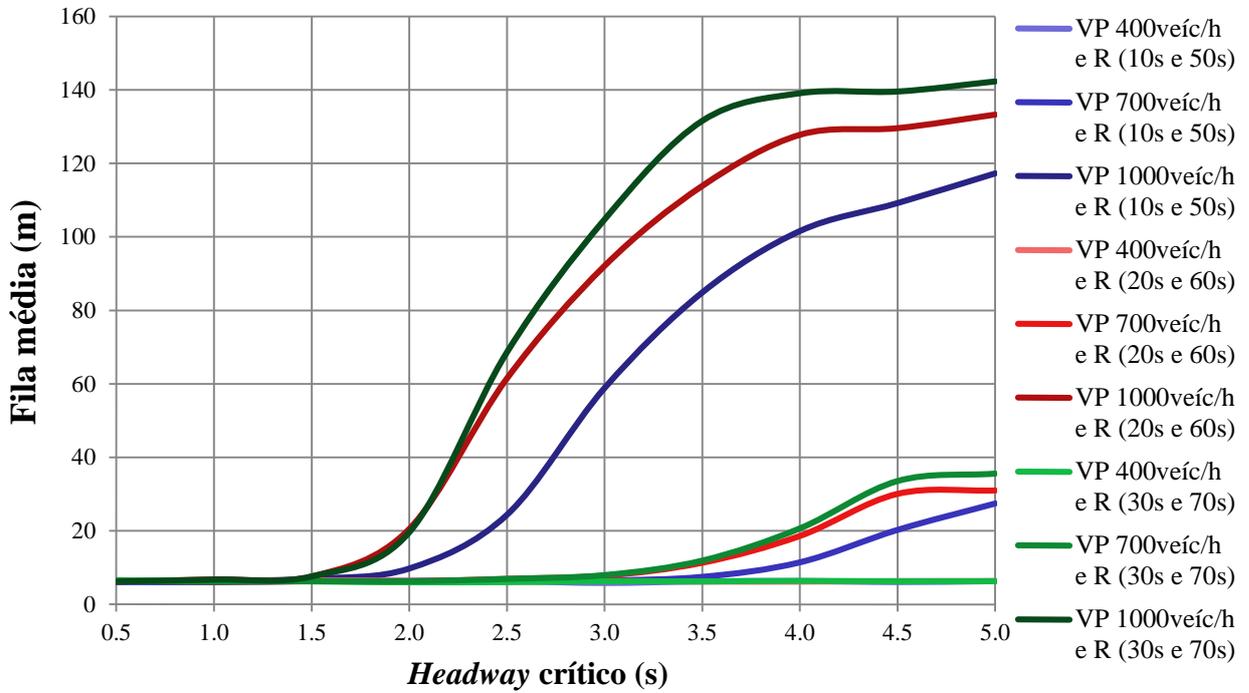
Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como no VISSIM e no Aimsun, a diferença entre o tempo de viagem e o atraso médios estimados é constante. Diferentemente dos outros dois simuladores, é fornecida a estimativa do atraso médio devido ao controle, que constitui uma parcela do atraso médio e é computada de acordo com a definição do HCM2010 – ou seja, a partir do momento em que o motorista começa a desacelerar para se juntar à fila formada em uma aproximação de uma interseção controlada até o instante em que ele passa pelo cruzamento e retorna à sua velocidade, desconsiderando atrasos causados pela geometria da via (ex.: curva horizontal e redução na velocidade para realizar um movimento de conversão). Como é possível notar, as curvas de atraso médio causado pelo controle da interseção possuem forma idêntica à das curvas dos outros dois gráficos.

Para o nível de fluxo na aproximação principal de 400veíc/h, os valores das medidas de desempenho foram praticamente constantes, com variações difíceis de serem notadas com a escala utilizada (acréscimo em torno de 3s de uma extremidade à outra das curvas). Percebe-se também que, para maiores intensidades de tráfego na via principal, o efeito dos instantes que definem o intervalo de redução do *headway* crítico na estimativa dessas medidas de desempenho é bem mais expressivo. A partir de um *headway* crítico entre 1,5 e 2,0s, o desempenho do tráfego na via secundária, com VP = 1000veíc/h, piora muito

rapidamente, atingindo valores de atraso e tempo de viagem absurdos. O Gráfico 26 exibe as curvas de comprimento médio da fila formada na aproximação secundária.

Gráfico 26 – Curvas de fila média obtidas nos cenários do TransModeler



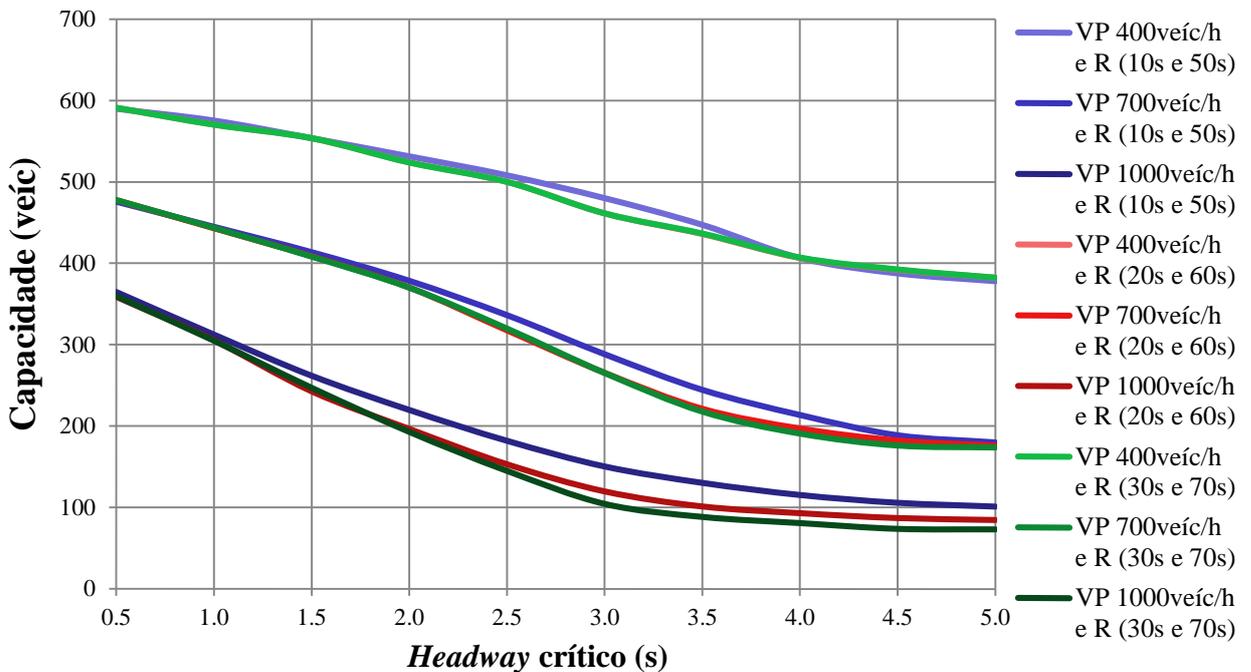
Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma análoga à que ocorre nos outros dois microssimuladores, as curvas de fila média obtidas possuem as mesmas características das curvas correspondentes às medidas de atraso e tempo de viagem médios. Em todos os quatro gráficos anteriores, é possível notar o efeito acumulativo do acréscimo do *headway* crítico na estimativa das medidas de desempenho do tráfego que ocorre imediatamente após o trecho horizontal inicial das curvas, até que o próprio aumento do tempo de espera por uma brecha torna a redução do parâmetro mais expressiva e impõe a horizontalidade do trecho final, justamente porque a maior concentração de duração das brechas se encontra com valores inferiores, ou seja, é necessário, para a maioria dos condutores, que seu *headway* crítico diminua para que ele encontre uma brecha longa o suficiente.

Para compreender melhor o que foi mencionado acima, considere a curva com VP igual a 1000veíc/h e com os instantes de redução *default* (20s e 60s), e suponha que, em média, os motoristas encontram uma brecha quando seu *headway* crítico atinge o valor de 2,5s. O tempo médio de espera (na primeira posição da fila) dos condutores da aproximação secundária nos cenários com *headway* crítico de 4,0s e 4,5s é praticamente o mesmo, pois,

como o valor mínimo é fixo, a taxa de decrescimento desse parâmetro é maior nos cenários com maior valor inicial, de tal forma que o intervalo de tempo necessário para atingir valores próximos de 2,5s é quase o mesmo. O Gráfico 27 contém os resultados de estimativa da capacidade da aproximação secundária obtidos no TransModeler.

Gráfico 27 – Curvas de capacidade da aproximação secundária obtidas nos cenários do TransModeler



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando o gráfico acima, pode-se notar que, para baixos valores de *headway* crítico, a capacidade é basicamente a mesma independente do nível dos instantes que definem o período em que os motoristas se tornam mais agressivos, tanto porque é mais fácil achar uma brecha com duração suficiente logo de início quanto porque a diferença entre os *headways* críticos inicial e final é menor. À medida que esse parâmetro aumenta, as curvas correspondentes à mesma intensidade de tráfego na via principal se distanciam entre si, pois a ordem de grandeza do tempo de permanência de um veículo na primeira posição da fila é tal que a redução do *headway* crítico se torna mais relevante, até que elas tendem a se juntarem novamente com inclinação horizontal, pelo mesmo motivo já mencionado. Para altos valores de *headway* crítico, a diferença na estimativa da capacidade foi menor entre os níveis de VP igual a 700veíc/h e a 1000veíc/h do que entre 400 e 700veíc/h, pois uma baixa capacidade da aproximação secundária já é atingida com fluxo principal de 700veíc/h.

## 5.2 Escolha do simulador microscópico utilizado na modelagem do tráfego

No Quadro 1 se encontram as informações levantadas sobre a capacidade de cada simulador em incorporar tanto as características físicas e operacionais consideradas importantes na modelagem de interseções não semaforizadas de Fortaleza quanto os outros critérios de comparação mencionados na metodologia. Vale ressaltar que foi considerado que tanto o Aimsun quanto o TransModeler são capazes de incorporar o mesmo fator de visibilidade do VISSIM, pois, assim como no submodelo *áreas de conflito*, o veículo da aproximação secundária não necessariamente para no caso de DÊ PREFERÊNCIA.

Nos campos do Quadro 1 preenchidos por números, quanto menor o valor melhor o conceito do submodelo quanto ao critério em questão, de acordo com a literatura ou percepção do autor. A variabilidade do comportamento dos motoristas considerada corresponde à possibilidade de definir grupos de condutores com diferentes níveis de agressividade quanto à aceitação de brechas.

Quadro 1 – Comparação entre os submodelos de aceitação de brechas

Critério	VISSIM 6		Aimsun 8.0	TransModeler 4.0
	AC	RP		
Presença de <i>yellow-box</i> ou qualquer outra forma de controlar a obstrução da interseção	Sim	Sim	Sim	Sim
Visibilidade reduzida devido a obstáculos na via principal (veículos estacionados, principalmente)	Não	Não	Não	Não
Controle da visibilidade devido a edificações ou qualquer obstáculo na aproximação secundária	Sim	Não	Sim	Sim
Controle na posição de parada dos veículos da aproximação secundária	Sim	Sim	Sim	Sim
Reconhecimento na comunidade tecnocientífica	1		2	3
Facilidade em aplicar métodos de calibração publicados	1		2	3
Exigência quanto aos dados de entrada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
Grau de complexidade (quantidade de parâmetros a serem calibrados)	Alta	Baixa	Média/Alta	Média
Variabilidade do comportamento dos motoristas	Não	Não	Não	Sim
Medidas de desempenho fornecidas pelo modelo	2		3	1
Familiaridade do autor com o microsimulador	2		3	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base no que foi exposto no quadro acima, optou-se por utilizar o submodelo RP do VISSIM, pois foi dada maior importância aos critérios de reconhecimento na comunidade tecnocientífica, facilidade em aplicar métodos de calibração publicados, e grau de complexidade do submodelo, já que a calibração pôde ser realizada manualmente, devido ao pequeno número de parâmetros. Como o foco deste trabalho é interseção controlada com sinal de PARE, além de ser mais comum a existência de cruzamentos com baixa visibilidade – onde, mesmo sem a presença de veículos estacionados na via principal, o condutor não consegue avaliar brechas antes de sua chegada à faixa de retenção –, não foi interpretada como desvantagem em relação aos demais submodelos estudados a inexistência de um parâmetro de visibilidade no submodelo RP. Vale ressaltar, porém, que os quatro submodelos de aceitação de brechas apresentados são capazes de modelar o tráfego em uma INS.

### 5.3 Calibração do submodelo de aceitação de brechas

Esta seção é dividida em duas subseções: uma apresenta os resultados da verificação da distribuição dos *headways* dos veículos da aproximação principal e a outra mostra os resultados de calibração dos parâmetros que foram ajustados.

Os dados de fluxo, proporção de conversão e proporção de veículos que se diferenciam dos carros de passeio – pela performance do veículo ou pela extensão – correspondentes ao primeiro período de quinze minutos observado em campo são exibidos no Quadro 2. Vale lembrar que a conversão no caso da aproximação principal é à esquerda, enquanto que na aproximação secundária é à direita, e que apenas as motocicletas que chegaram à INS de forma isolada foram contabilizadas.

Quadro 2 – Dados de volume obtidos em campo para o período utilizado na fase de calibração

Variável	Aproximação principal		Aproximação secundária
	Total, exceto motos	Motos	Total, exceto motos
Fluxo (veíc/h)	490	54	448
Proporção de conversão	19,75%	22,22%	39,19%
Proporção de pequenos caminhões ou vans	0,00%	—	4,05%

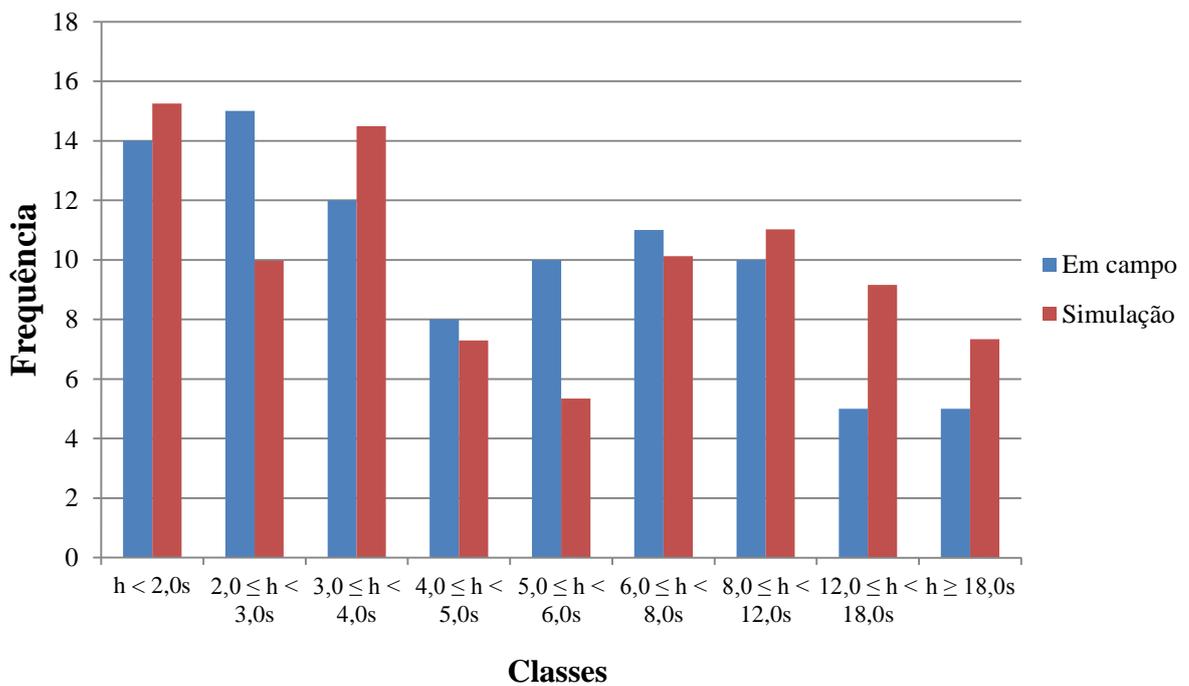
Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.3.1 Verificação da distribuição dos *headways* no fluxo da via principal

Como foi mencionado na metodologia, a configuração final da codificação realizada no microssimulador não possui o semáforo 1 que causava a formação de pelotões na aproximação principal da INS analisada. A fim de verificar se a distribuição dos *headways* dessa aproximação, gerada a partir da chegada aleatória dos veículos 2's, é estatisticamente semelhante à distribuição observada em campo, fez-se o teste qui-quadrado com nível de significância de 5%. Os valores limites dos *headways* ( $h$ ) adotados para definir cada classe, assim como os resultados obtidos são apresentados no Gráfico 28 e no Quadro 3.

As frequências obtidas pelo modelo para uma amostra de mesmo tamanho daquela observada em campo foram estimadas a partir da frequência percentual da classe correspondente, que por sua vez foi dada pela média das frequências percentuais das dez simulações executadas.

Gráfico 28 – Distribuições dos *headways* da aproximação principal no cenário de calibração



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 3 – Teste qui-quadrado para a distribuição dos *headways* da via principal no cenário de calibração

Variável	$h < 2,0s$	$2,0 \leq h < 3,0s$	$3,0 \leq h < 4,0s$	$4,0 \leq h < 5,0s$	$5,0 \leq h < 6,0s$	$6,0 \leq h < 8,0s$	$8,0 \leq h < 12,0s$	$12,0 \leq h < 18,0s$	$h \geq 18,0s$	$\Sigma$
Frequência (de campo)	14	15	12	8	10	11	10	5	5	90
Frequência (simulação)	15,25	9,97	14,49	7,29	5,34	10,13	11,03	9,16	7,34	90
$\chi^2$ (qui-quadrado)	0,11	1,68	0,52	0,06	2,17	0,07	0,11	3,47	1,10	9,29

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o nível de significância de 5% e grau de liberdade igual a 8, o valor crítico do qui-quadrado obtido é de 15,51, que é superior ao valor obtido na comparação das amostras. Portanto, a hipótese de que as duas amostras possuem a mesma distribuição de probabilidade não foi rejeitada. Além disso, a média desses *headways* simulados foi de 7,17s, enquanto o valor médio de campo foi de 6,45s, correspondendo a uma diferença de 0,72s causada pelo modelo estocástico de entrada dos volumes de tráfego na rede, pois esse *headway* médio é equivalente ao inverso de  $F_2$ . Dado o resultado positivo dessa verificação, pôde-se seguir com a calibração dos parâmetros do submodelo de aceitação de brechas.

### **5.3.2 Ajuste dos parâmetros do submodelo de aceitação de brechas**

Como mencionado na metodologia, foi necessário realizar um ajuste nos dados da medida-alvo obtidos no simulador microscópico devido ao extenso período de desaceleração dos veículos 1's que ocorre no submodelo RP do VISSIM. Ao aplicar a etapa metodológica proposta para determinação da constante a ser subtraída dessa variável, foi obtido um ajuste de 2,5s para o movimento de travessia (movimento 1) e 2,8s para a conversão à direita (movimento 2) a partir da aproximação 1.

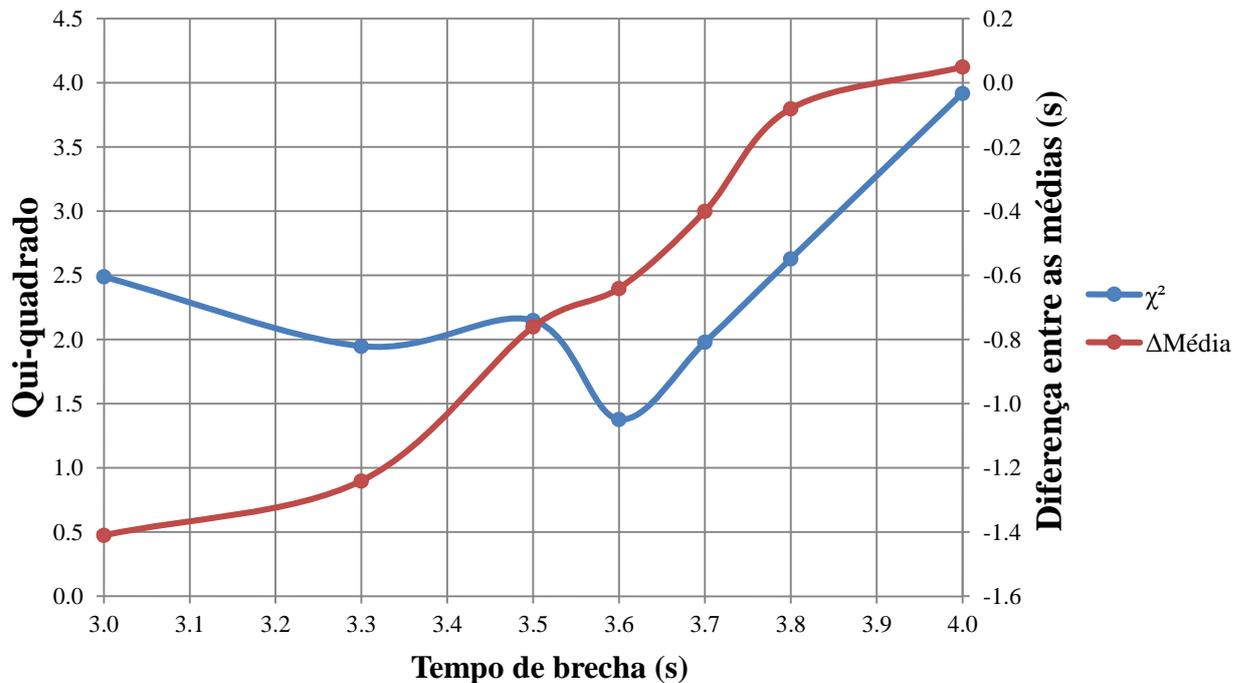
Para o movimento 1 da interseção pela Rua Coronel Linhares, foi obtida em campo uma amostra da medida-alvo com 46 observações, que foi dividida em quatro classes:

- a) Menores que 2,0s (que pararam pelo tempo mínimo), com 26 observações;
- b) Entre 2,0 e 5,0s, com 9 observações;
- c) Entre 5,0 e 10,0s, com 6 observações;
- d) Maiores que 10,0s, com 5 observações.

Como o único parâmetro a ser calibrado no submodelo RP em ambos os movimentos possíveis na aproximação 1 é o tempo de brecha mínima dos motoristas, os cenários avaliados se diferenciam apenas pelo valor dessa variável. No caso do movimento de travessia, o primeiro cenário avaliado foi o com Tempo de Brecha (TB) de 3,0s. Em seguida, foram executadas as simulações dos cenários com TB de 3,5s e 4,0s. Ao verificar que o menor qui-quadrado da distribuição da medida-alvo desses três cenários foi o correspondente ao tempo de brecha de 3,5s, foram avaliados mais cenários contidos nessa faixa de valores do parâmetro, a fim de determinar o valor correspondente ao mínimo qui-quadrado. As curvas obtidas para o valor do qui-quadrado e para as diferenças entre as médias das amostras da medida-alvo – desconsiderando, no cálculo dessas médias, os veículos que pararam apenas

momentaneamente – de campo e simulada (a diferença apresentada é dada pela média dos dados simulados subtraído da média de campo, que foi de 7,5s) para o movimento 1 são apresentadas no Gráfico 29. Os pontos das curvas indicam os valores do tempo de brecha dos cenários simulados.

Gráfico 29 – Qui-quadrado e diferença entre as médias da medida-alvo dos cenários do movimento de travessia



Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos esses cenários simulados corresponderam a um qui-quadrado menor que o valor crítico de 7,81. O valor calibrado do parâmetro TB para esse movimento foi de 3,6s, correspondente ao qui-quadrado de 1,38. Como pode ser observado, a média da amostra dos tempos de viagem obtidos no modelo foi inferior à da amostra de campo em quase todos os cenários avaliados, possivelmente porque a média de  $F_2$  nas dez simulações foi inferior ao observado em campo. Vale ressaltar, porém, que esse mesmo fato mencionado influencia na estatística qui-quadrado, pois, nesse caso, a tendência é que algumas observações da medida-alvo na simulação sejam menores do que deveriam.

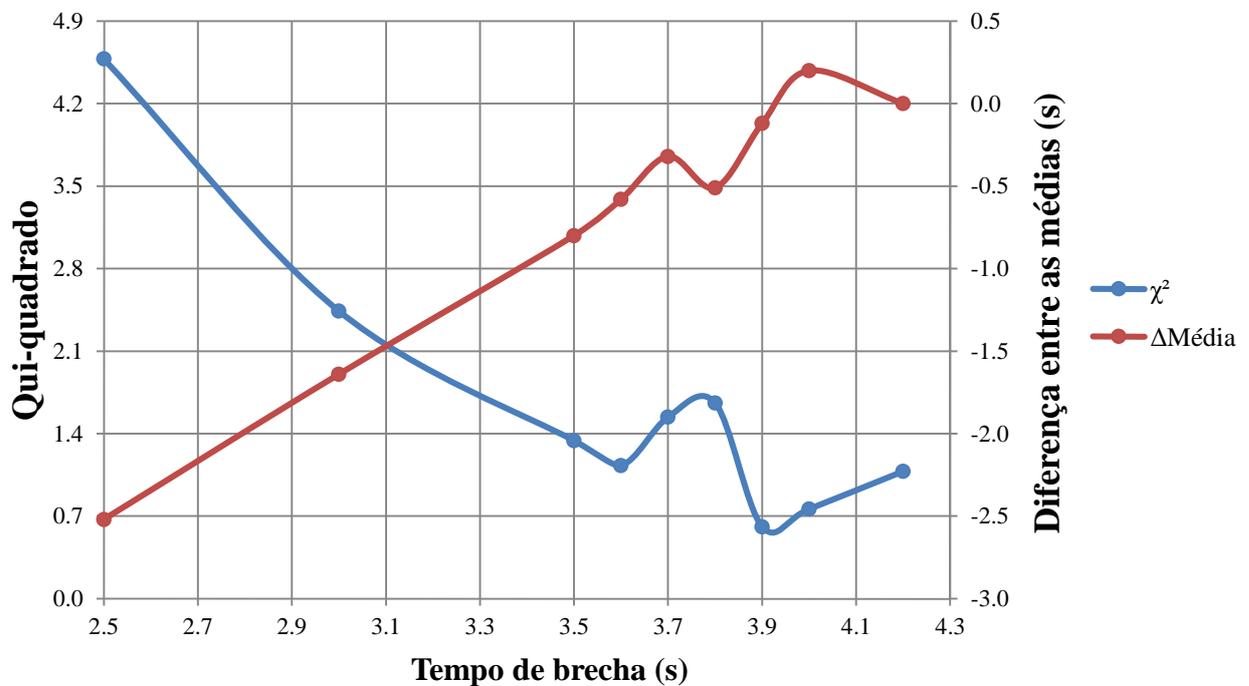
Para o movimento 2 pela aproximação secundária, foi obtida em campo uma amostra de tempo de espera (do primeiro veículo da fila) com 29 observações, que foi dividida em três classes:

- a) Menores que 2,0s (que pararam pelo tempo mínimo), com 15 observações;
- b) Entre 2,0 e 8,0s, com 8 observações;

c) Maiores que 8,0s, com 6 observações.

No caso da conversão à direita, o primeiro cenário simulado foi o com tempo de brecha de 2,5s. Em seguida, foram executadas as simulações dos cenários com TB de 3,0s, 3,5s e 4,0s. Ao verificar que o qui-quadrado da distribuição da medida-alvo do cenário com tempo de brecha de 3,5s e 4,0s foram baixos, foram simulados mais cenários contidos nesse intervalo. As curvas obtidas para o valor do qui-quadrado e para as diferenças entre as médias das amostras da medida-alvo de campo – que também foi de 7,5s – e simulada para o movimento 2 são exibidas no Gráfico 30.

Gráfico 30 – Qui-quadrado e diferença entre as médias da medida-alvo dos cenários para a conversão à direita



Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos os cenários mostrados no gráfico anterior também tiveram o valor do qui-quadrado inferior ao valor crítico, que nesse caso é de 5,99. O valor calibrado do parâmetro tempo de brecha para esse movimento foi de 3,9s, correspondente ao menor qui-quadrado encontrado (igual a 0,61). O TB calibrado para a conversão à direita foi, portanto, um pouco superior ao valor encontrado para o movimento 1, provavelmente porque, apesar dos veículos 1's terem que percorrer uma distância menor no movimento 2, tal manobra é executada com velocidades mais baixas, e também porque enquanto esses veículos estiverem em fase de aceleração, o conflito com o fluxo principal ainda ocorre.

Nesse caso, a média da amostra da medida-alvo do cenário calibrado foi muito semelhante à da amostra de campo. Nesse gráfico, também é possível notar uma inconsistência na curva das diferenças entre as médias dos tempos de viagem acima de 2,0s, pois essa média correspondente aos cenários com TB de 3,8 e de 4,2s foram inferiores à dos cenários de 3,7 e de 4,0s, respectivamente. Possivelmente isso ocorre devido à pequena quantidade de elementos da amostra, que corresponde a uma maior variabilidade na amostra da medida-alvo de cada simulação executada.

#### 5.4 Validação do modelo calibrado

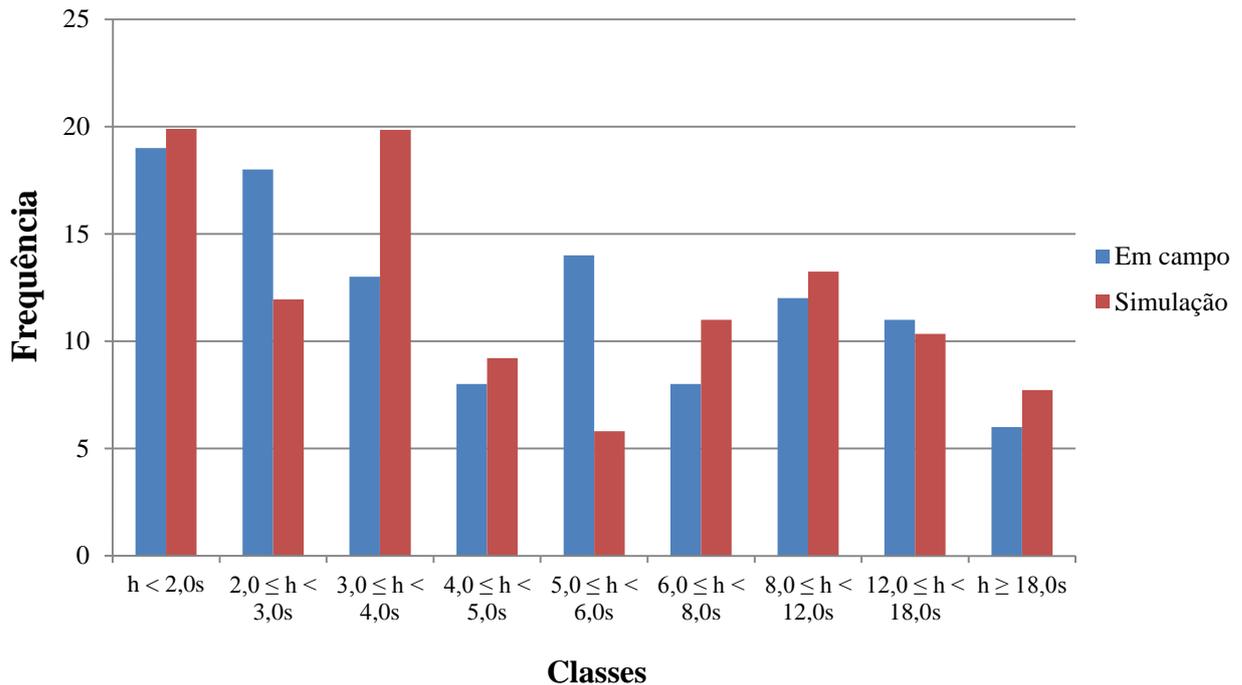
Os dados de fluxo, proporção de conversão e proporção de veículos que se diferenciam dos carros de passeio, correspondentes ao segundo período de quinze minutos observado em campo, são exibidos no Quadro 4.

Quadro 4 – Dados de volume obtidos em campo para o período utilizado na fase de validação

Variável	Aproximação principal		Aproximação secundária
	Total, exceto motos	Motos	Total, exceto motos
Fluxo (veíc/h)	527	37	329
Proporção de conversão	20,79%	0,00%	38,10%
Proporção de pequenos caminhões ou vans	0,99%	—	4,76%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como na fase de calibração, foi verificada a distribuição dos *headways* entre os veículos 2's, a partir do teste qui-quadrado com nível de significância de 5%. As classes adotadas para a comparação desses *headways* (*h*) são as mesmas utilizadas na verificação durante a calibração do modelo. Os resultados obtidos nesse teste são mostrados no Gráfico 31 e no Quadro 5.

Gráfico 31 – Distribuições dos *headways* da aproximação principal no cenário de validação

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 5 – Teste qui-quadrado para a distribuição dos *headways* da via principal no cenário de validação

Variável	$h < 2,0s$	$2,0 \leq h < 3,0s$	$3,0 \leq h < 4,0s$	$4,0 \leq h < 5,0s$	$5,0 \leq h < 6,0s$	$6,0 \leq h < 8,0s$	$8,0 \leq h < 12,0s$	$12,0 \leq h < 18,0s$	$h \geq 18,0s$	$\Sigma$
Frequência (de campo)	19	18	13	8	14	8	12	11	6	109
Frequência (simulação)	19,90	11,95	19,85	9,21	5,80	11,00	13,24	10,33	7,72	109
$\chi^2$ (qui-quadrado)	0,04	2,03	3,61	0,18	4,80	1,13	0,13	0,04	0,49	12,45

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como ocorreu durante a calibração, o qui-quadrado de 12,45 obtido é inferior ao valor crítico de 15,51, e portanto a hipótese de que a amostra dos *headways* simulados possui a mesma distribuição com a amostra dos *headways* obtidos em campo não foi rejeitada. A média dessa amostra obtida pelo modelo foi de 6,73s, enquanto o valor médio de campo foi de 6,29s, correspondendo a uma diferença de 0,45s, menor do que a que foi encontrada para o cenário de calibração.

Para comparação das distribuições da medida-alvo correspondentes ao movimento de travessia a partir da aproximação 1, foram utilizadas as mesmas classes do teste qui-quadrado definidas para a fase de calibração. As observações obtidas em campo, nesse caso, totalizaram 39, sendo:

- a) 15 observações menores que 2,0s (que pararam pelo tempo mínimo);
- b) 9 observações entre 2,0 e 5,0s, com 9 observações;
- c) 9 observações entre 5,0 e 10,0s;
- d) 5 observações maiores que 10,0s.

O valor do qui-quadrado obtido foi de 0,85, bem inferior ao valor crítico de 7,81, e, portanto, a hipótese nula de que a distribuição obtida no modelo é semelhante à obtida em campo não foi rejeitada. Para reforçar a validação do modelo, foi verificado também o Intervalo de Confiança (IC) da diferença entre a média desses tempos de espera acima de 2,0s da amostra obtida no modelo, composta pelos dados de duas simulações escolhidas aleatoriamente dentre as dez executadas, e a média da amostra de campo. As informações, de ambas as amostras, que influenciam na determinação desse intervalo de confiança são apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 – Informações das amostras de tempo de viagem para a obtenção do IC (travessia) da diferença entre as médias observada e simulada

	Simulado	Observado
Média amostral (s)	7,08	7,84
N	62	24
Variância (s <sup>2</sup> )	24,69	25,07

Fonte: Elaborado pelo autor.

O intervalo de confiança obtido para a diferença dessas médias amostrais, com nível de significância de 5%, foi então de -3,2s a 1,7s. Apesar desse intervalo possuir amplitude considerável quando comparada com as médias das amostras, ele contém o valor nulo, ou seja, a hipótese nula de igualdade entre as médias também não foi rejeitada nesse teste.

Na comparação das distribuições dos tempos de espera correspondentes à conversão à direita, foi necessário alterar as classes utilizadas para o teste qui-quadrado, pois a quantidade de observações em uma das classes do número de observações esperadas não era suficiente para a sua aplicação (menor do que 5). Foram coletadas em campo 24 observações, que foram agrupadas nas três classes seguintes:

- a) Menores que 2,0s, com 9 observações;
- b) Entre 2,0 e 6,0s, com 7 observações;
- c) Maiores que 6,0s, com 8 observações.

O valor do qui-quadrado obtido para esse movimento foi de 1,29, também inferior ao valor crítico para o nível de significância de 5% e grau de liberdade igual a 2, que é de 5,99. Dessa forma, a hipótese nula não foi rejeitada pelo teste qui-quadrado realizado. As informações necessárias para o cálculo do intervalo de confiança da diferença entre a média das amostras correspondentes ao movimento 2 estão expostas no Quadro 7.

Quadro 7 – Informações das amostras de tempo de viagem para a obtenção do IC (conversão) da diferença entre as médias observada e simulada

	Simulado	Observado
Média amostral (s)	8,11	6,58
N	31	15
Variância (s <sup>2</sup> )	45,85	9,64

Fonte: Elaborado pelo autor.

O IC obtido foi de -1,4s a 4,5s, que inclui o valor nulo. Assim, a hipótese de que a amostra simulada e a amostra de campo possuem a mesma forma da distribuição e mesma média não foi rejeitada. Porém, a alta variância desses dados e a pequena quantidade de elementos de ambas as amostras resultaram em uma amplitude de valores para o IC alta. Uma possível explicação para tamanha diferença é que, como a conversão à direita conflita apenas com uma das faixas de tráfego da via principal, tais resultados dependem consideravelmente da faixa escolhida pelos veículos 2's nos momentos em que eles chegam de forma isolada, que no caso não foi controlada no modelo para corresponder à situação que ocorre em campo.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Conforme estabelecido como primeiro objetivo específico deste trabalho, foi possível aplicar a metodologia proposta para analisar o efeito dos principais parâmetros dos submodelos de aceitação de brechas na estimativa das medidas de desempenho do tráfego e da capacidade da aproximação secundária de uma interseção não semaforizada. Tal análise foi importantíssima para o entendimento do funcionamento de cada um desses submodelos dos três pacotes computacionais estudados. Apesar de esses submodelos tentarem representar o mesmo fenômeno de tráfego, alguns fatores incorporados por um(ns) e não incorporados pelos outros implicaram em uma diferença significativa no comportamento dos condutores e consequentemente nos resultados obtidos.

Uma das principais conclusões que se pode extrair dessa análise de sensibilidade é o impacto da consideração da redução do parâmetro que mais se relaciona com o conceito de brecha crítica dos condutores com o decorrer do tempo de espera na aproximação secundária, assim como da forma em que ela é incorporada pelo submodelo, no formato das curvas de estimativa das medidas de desempenho do tráfego e da capacidade dessa aproximação da interseção em estudo. No caso do microssimulador VISSIM 6, que não incorpora tal redução, pode-se notar o efeito acumulativo nas medidas de desempenho com o acréscimo do principal parâmetro em ambos os submodelos de aceitação de brechas, pois além da diminuição individual da probabilidade de encontrar uma brecha suficientemente grande, o aumento na quantidade de veículos em fila intensifica ainda mais a queda no nível de serviço da aproximação. No Aimsun 8.0, que considera essa redução a partir do momento em que o veículo começa a fazer parte da fila formada (após passar o intervalo de tempo inicial com sua margem de segurança constante), esse efeito praticamente não ocorre. Já no TransModeler 4.0, no qual o decréscimo do *headway* crítico do motorista sofre redução apenas quando ele se encontra na primeira posição da fila, esse efeito acumulativo é mais intenso para baixos valores do parâmetro, porém é amenizado conforme o *headway* crítico cresce.

Outra importante observação feita nessa primeira fase deste trabalho, particularmente sobre o simulador microscópico VISSIM 6, é que, mesmo reduzindo bastante a distância de visibilidade da INS no submodelo *áreas de conflito*, ocorreu uma diferença considerável, em alguns casos, na estimativa das medidas de desempenho e principalmente da capacidade da aproximação secundária, realizada pelos dois submodelos disponíveis pelo simulador. Isso possivelmente acontece porque no submodelo AC os veículos da aproximação

secundária não são obrigados a parar para iniciar a avaliação das brechas e o intervalo de desaceleração até atingir a velocidade nula no VISSIM é elevado.

As informações obtidas sobre a capacidade de cada microssimulador em considerar características físicas e operacionais julgadas importantes para a modelagem de interseções não semaforizadas de Fortaleza, outros critérios de comparação estabelecidos e avaliados conforme percepção do autor e o entendimento adquirido ao longo do estudo preliminar dos submodelos de aceitação de brechas auxiliaram bastante na escolha do pacote computacional (e do submodelo) utilizado na modelagem deste trabalho. Considerando mais importantes os critérios de reconhecimento na comunidade tecnocientífica, facilidade em aplicar métodos de calibração publicados, e grau de complexidade, foi decidido usar o submodelo *regras de prioridade* do simulador microscópico VISSIM 6.

Na fase de calibração do submodelo de aceitação de brechas, foram observados alguns pontos importantes a serem considerados. Um deles é que a combinação do efeito do semáforo à montante da aproximação principal com o efeito da presença de sinais de PARE e de conversões a partir de outras vias transversais implicou na necessidade de considerar a chegada dos veículos da Rua Pereira Valente como sendo aleatória, que foi verificada utilizando o teste qui-quadrado com nível de significância de 5% e o resultado foi satisfatório. Porém, foi observado que a média dos *headways* obtida no simulador foi aproximadamente 0,7s superior à média coletada em campo, mesmo inserindo as mesmas taxas horárias veiculares equivalentes.

Outra consideração necessária foi o ajuste nos dados da medida-alvo coletados no simulador, descontando uma parcela da duração excessiva do período de desaceleração dos veículos na aproximação secundária, pois ela atrasa o início da avaliação das brechas quando comparado com o que ocorre em campo. Essa consideração impactou bastante nos resultados, e, portanto, é indicado que tal ajuste seja realizado, independente do microssimulador utilizado para a modelagem, a menos que a medida-alvo escolhida para calibração não sofra influência disso.

O valor calibrado do parâmetro tempo de brecha para o movimento de travessia foi de 3,6s, enquanto o TB para a conversão à direita foi de 3,9s, ou seja, um pouco maior. Isso talvez tenha ocorrido porque a manobra de conversão é realizada com velocidades mais baixas – mesmo a trajetória sendo mais curta em relação àquela que atravessa as duas faixas de tráfego da Rua Pereira Valente –, e porque o conflito veicular se estende até que esses veículos da conversão desenvolvam uma velocidade próxima daquela da corrente principal. As médias das amostras de tempo de espera do primeiro veículo da fila da aproximação

secundária obtidas no modelo foram, em geral, inferiores à da amostra coletada em campo, possivelmente porque o volume veicular médio das dez simulações na aproximação principal foi inferior ao valor correspondente ao fluxo estabelecido como dado de entrada (já que o *headway* médio foi superior ao coletado em campo). Com base nisso, dez simulações talvez não sejam suficientes para a fase de calibração. A fim de manter o fluxo veicular médio das simulações na via principal mais próximo do valor observado em campo, recomenda-se aumentar a quantidade de simulações executadas.

Mesmo simulando cenários com o parâmetro tempo de brecha consideravelmente diferentes, todos tiveram o valor do  $\chi^2$  correspondente inferior ao valor crítico. Além disso, foi observado que a média da amostra dos dados da medida-alvo acima de 2,0s correspondente ao cenário com tempo de brecha de 3,8s foi inferior à do cenário de 3,7s, o que não deveria ocorrer. Tais notificações podem estar relacionadas ao tamanho pequeno das amostras, que corresponde a uma maior variabilidade das estatísticas a elas associadas.

Na validação do modelo, o resultado do teste qui-quadrado também não implicou na rejeição da hipótese de que a amostra dos *headways* (no fluxo principal) simulados possui a mesma população de dados da amostra dos *headways* obtidos em campo. A média dessa amostra obtida pelo modelo, assim como na fase de calibração, foi superior à coletada em campo, porém a diferença foi de 0,45s.

O valor do  $\chi^2$  obtido na validação do parâmetro calibrado para o movimento de travessia foi de 0,85, enquanto o qui-quadrado para a conversão à direita foi de 1,29, ambos inferiores aos respectivos valores críticos de 7,81 e 5,99 para o nível de significância igual a 5%. Assim, a verificação das distribuições dos tempos de espera do primeiro veículo da fila pelo teste qui-quadrado foi satisfatória. Já o intervalo de confiança (também para nível de significância de 5%) da diferença entre a média dessa amostra (apenas considerando os veículos que precisaram esperar) e a média da amostra de campo foi de -3,2s a 1,7s para o movimento de travessia e -1,4s a 4,5s para a conversão à direita. Dessa forma, a hipótese nula de igualdade das médias também não foi rejeitada, mas os valores limites desses IC estão relativamente distantes de zero, possivelmente devido à pequena quantidade de elementos das amostras. Portanto, tais resultados poderiam ter sido mais satisfatórios se não tivesse sido necessário descartar parte dos dados coletados ou se o período observado em campo fosse maior.

Diante das observações realizadas e do atual estado de desenvolvimento do assunto, são estabelecidos como sugestão para trabalhos futuros os seguintes temas:

- a) Analisar a influência dos parâmetros dos submodelos de aceitação de brechas não avaliados neste estudo, como o fator distância de segurança (aplicado apenas em casos de conversão), a distância adicional de parada e a porcentagem de motoristas do fluxo principal que evitam obstruir a área de conflito do submodelo AC e os parâmetros relacionados à colaboração desses veículos considerada no TransModeler;
- b) Aplicar o modelo supostamente calibrado para avaliar propostas de intervenção na operação de interseções não semaforizadas da cidade ou em qualquer INS calibrada conforme a metodologia proposta;
- c) Utilizar a metodologia de calibração proposta neste estudo para outra condição de tráfego ou para outra interseção não semaforizada de Fortaleza, com uma amostra maior de dados de campo, e comparar o valor do parâmetro calibrado com o tempo de brecha obtido para a INS analisada neste trabalho;
- d) Aplicar a metodologia de calibração e validação aqui empregada para interseções não semaforizadas que estejam a diferentes distâncias de interseções semaforizadas, já que quanto maior for a chegada dos veículos da aproximação principal em pelotões, menor tende a ser a importância do valor do parâmetro de aceitação de brecha;
- e) Aplicar a metodologia de calibração proposta utilizando outro submodelo de aceitação de brechas, como o de *áreas de conflito* do VISSIM ou o de outros simuladores microscópicos, como o Aimsun e o TransModeler, e, se necessário, utilizar ferramentas computacionais de otimização, como algoritmos genéticos, para viabilizar a calibração de uma maior variedade de parâmetros;
- f) Avaliar o método de calibração proposto neste trabalho a partir dos principais métodos de estimativa do parâmetro brecha crítica, presentes na literatura, aplicados aos dados de campo.

## REFERÊNCIAS

- AKÇELIK, Rahmi. **A Review of Gap-Acceptance Capacity Models**. *In*: 29th Conference of Australian Institutes of Transport Research, 2007, Adelaide.
- BARCELÓ, Jaume E. **Fundamentals of Traffic Simulation**. New York: Springer, 2010.
- BRILON, Werner; KOENIG, Ralph; TROUTBECK, Rod J. Useful estimation procedures for critical gaps. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, [S.l.], abril de 1999. Volume 33, Issues 3-4, p. 161-186.
- BUNKER, Jonathan M. Novel methods and the maximum likelihood estimation technique for estimating traffic critical gap. **Journal of Advanced Transportation**, Durham, N.C. / Washington, D.C., outubro de 2014. Volume 48, Issue 6, p. 542-555.
- CALIPER CORPORATION. **TransModeler 4.0 User's Guide**. [S.l.]: [s.n.], 2014.
- ELEFTERIADOU, Lily. **An Introduction to Traffic Flow Theory**. New York: Springer, 2014.
- GARBER, Nicholas J.; HOEL, Lester A. **Traffic and Highway Engineering**, 2nd ed. [S.l.]: RPK, 1996.
- LACERDA, Victor M.; CASTRO-NETO, Manoel M. **Considerações sobre a calibração do modelo de car-following do VISSIM para vias arteriais urbanas**. Anais do XXVIII Congresso ANPET. Curitiba, PR, 2014.
- MAY, Adolf D. **Traffic Flow Fundamentals**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1990.
- MEDEIROS, André L. **Aplicabilidade de algoritmos genéticos para calibração de redes viárias urbanas microssimuladas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- PATIL, Gopal R.; PAWAR, Digvijay S. **Temporal and Spatial Gap Acceptance for Minor Road at Uncontrolled Intersections in India**. *In*: Transportation Research Board 93<sup>rd</sup> Annual Meeting, 2014, Washington.
- PTV – PLANUNG TRANSPORT VERKEHR AG. **PTV VISSIM 6 User's Manual**. Karlsruhe: PTV AG, 2014.
- ROESS, Roger P.; PRASSAS, Elena S.; MCSHANE, William R. **Traffic Engineering**. 3rd ed. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004.
- SPIEGELMAN, Clifford H.; PARK, Eun Sug; RILETT, Laurence R. **Transportation Statistics and Microsimulation**. Boca Raton, Florida: Chapman & Hall/CRC, 2011.
- TSS – TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS. **Aimsun 8 Dynamic Simulators Users' Manual**. [S.l.]: [s.n.], 2013.

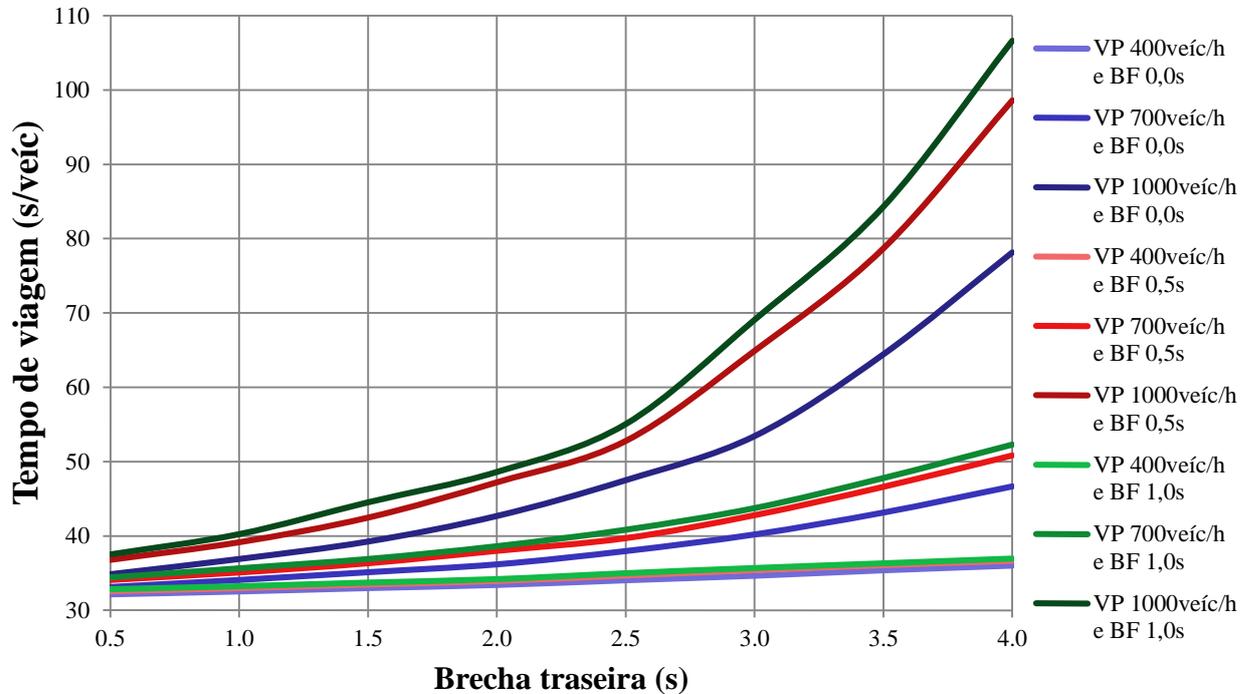
TRB – TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Highway Capacity Manual**. 5th ed. Washington: [s.n.], 2010. v. 3.

TRB – TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Traffic Flow Theory Monograph: A State-of-the-Art Report**. [S.l.]: [s.n.], 2001. Chapter 8. Organized by the Committee on Traffic Flow Theory and Characteristics of Transportation Research Board.

VITI, Francesco; WOLPUT, Bart; TAMPÈRE, Chris M.J. **Dynamic Modeling of VISSIM Critical Gap Parameter at Unsignalized Intersections**, 2013.

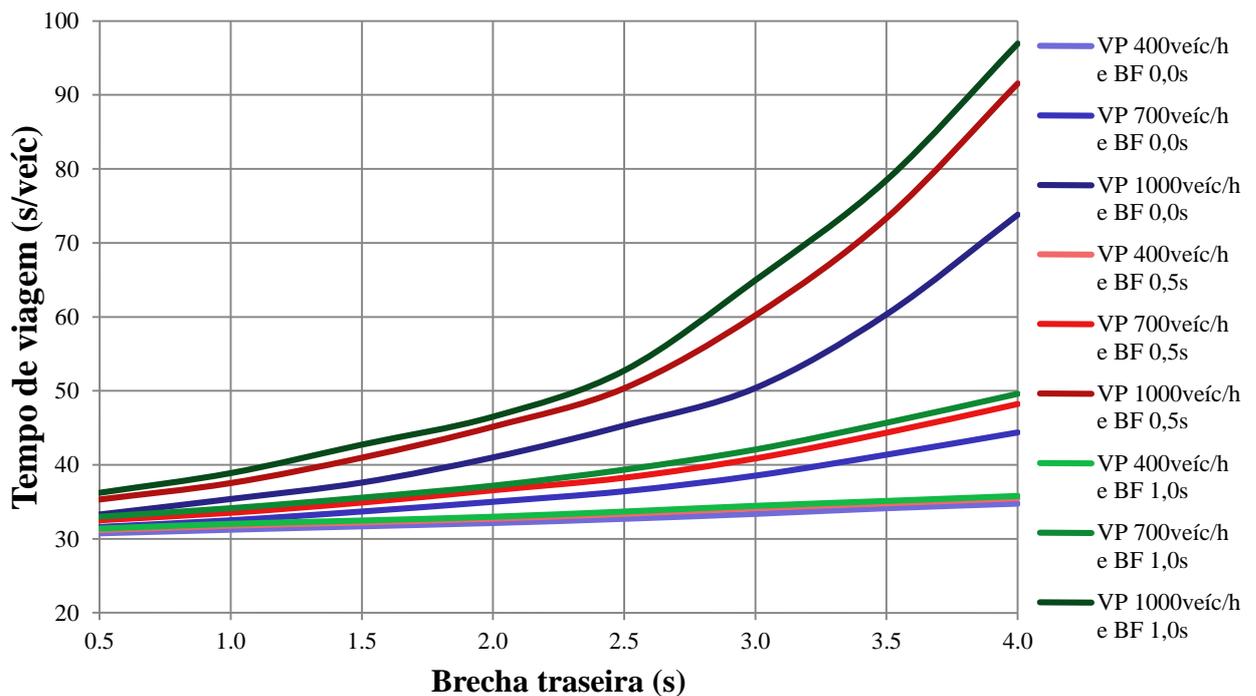
## APÊNDICE A – GRÁFICOS DOS RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DO SUBMODELO AC DO VISSIM

Tempo de viagem médio obtido no submodelo AC para visibilidade de 7m



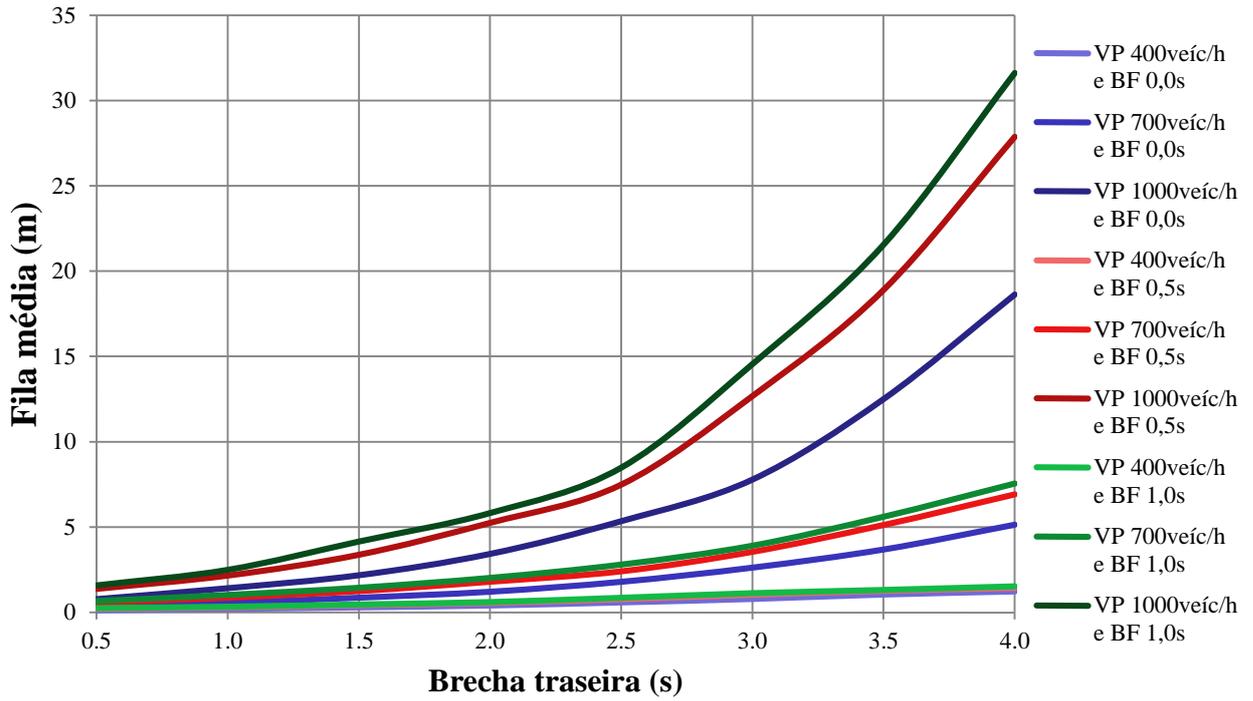
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tempo de viagem médio obtido no submodelo AC para visibilidade de 12m



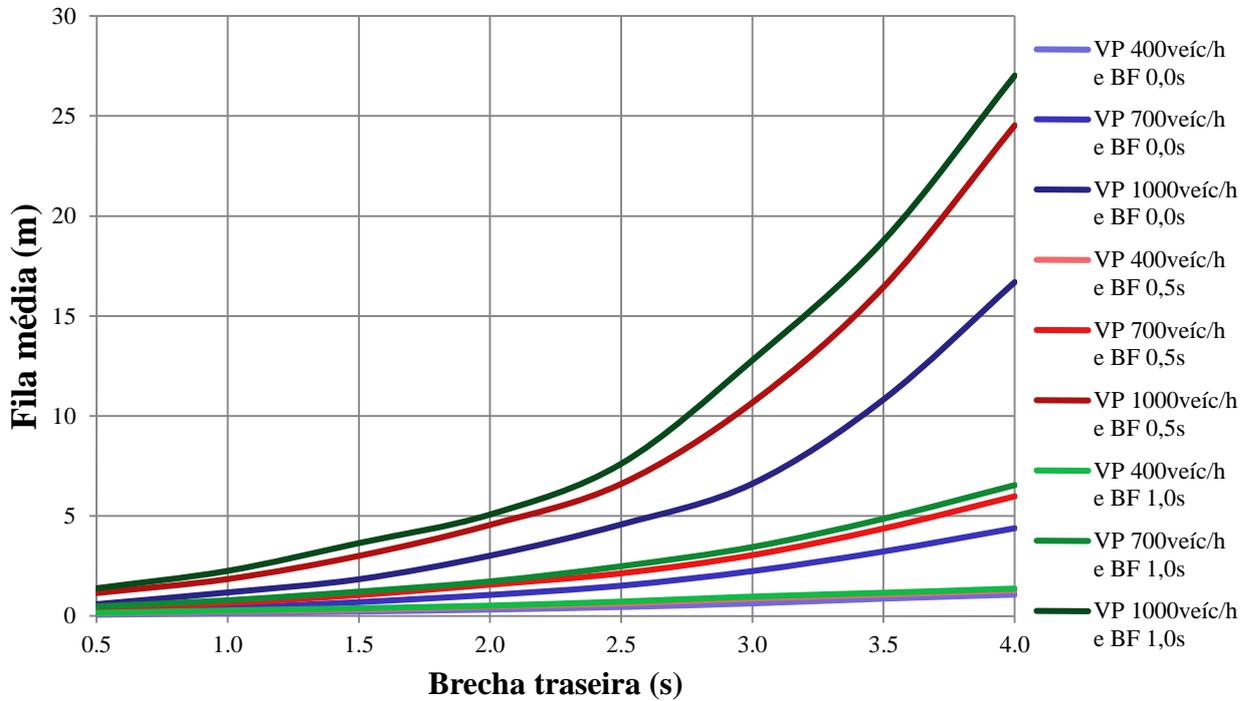
Fonte: Elaborado pelo autor.

Extensão média de fila obtida no submodelo AC para visibilidade de 7m



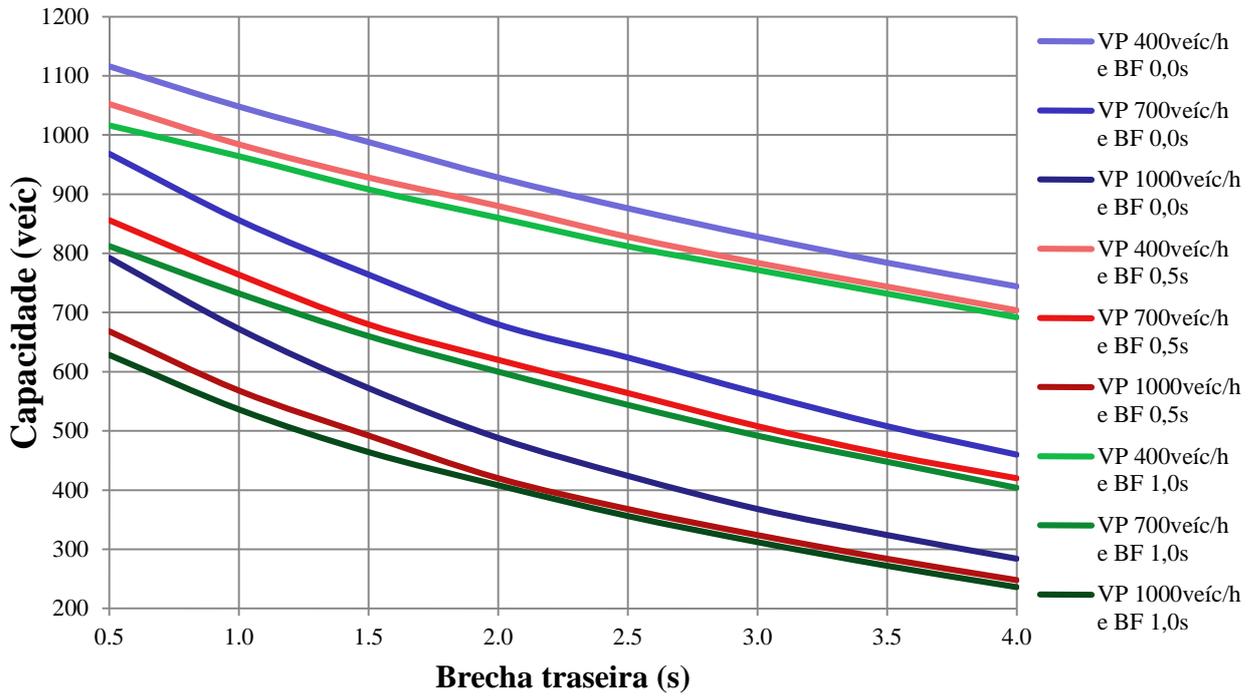
Fonte: Elaborado pelo autor.

Extensão média de fila obtida no submodelo AC para visibilidade de 12m



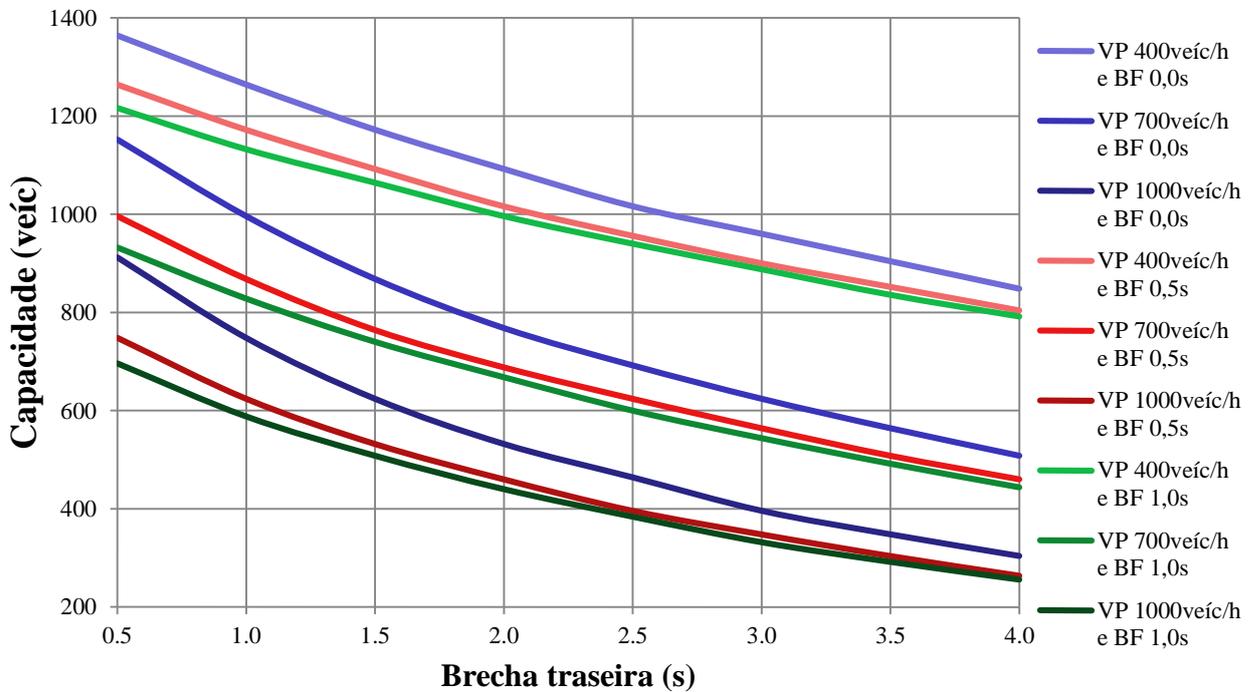
Fonte: Elaborado pelo autor.

Capacidade da aproximação secundária obtida no submodelo AC para visibilidade de 7m



Fonte: Elaborado pelo autor.

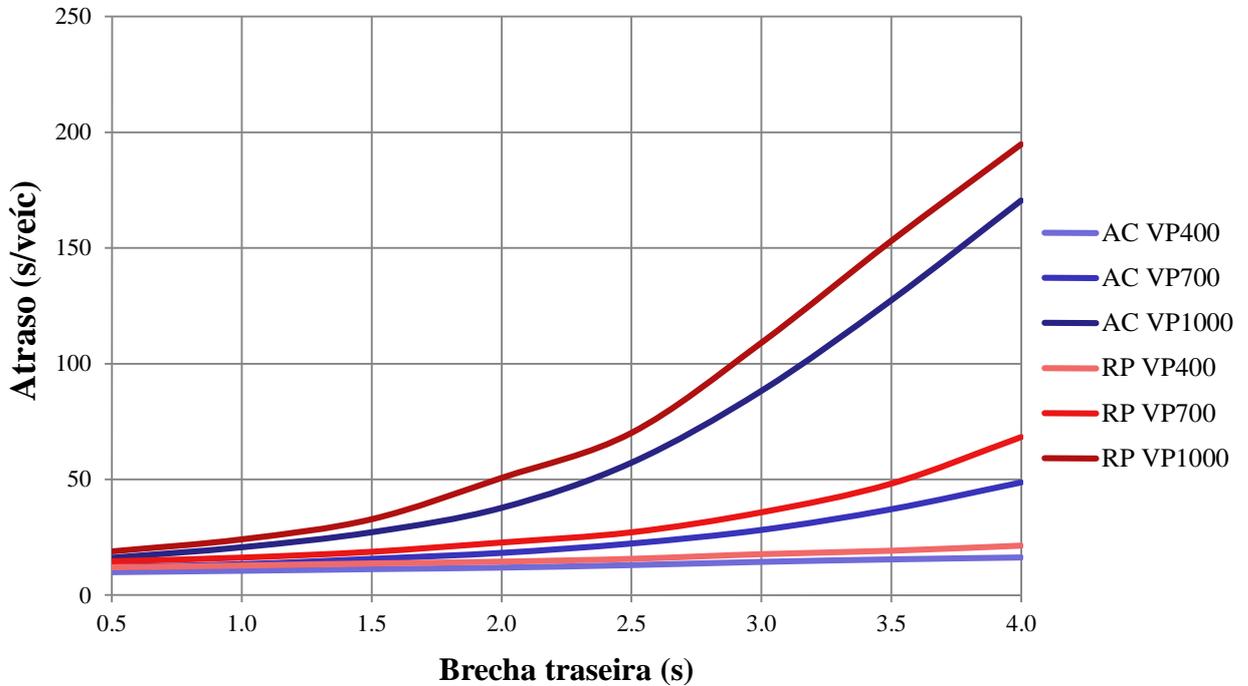
Capacidade da aproximação secundária obtida no submodelo AC para visibilidade de 12m



Fonte: Elaborado pelo autor.

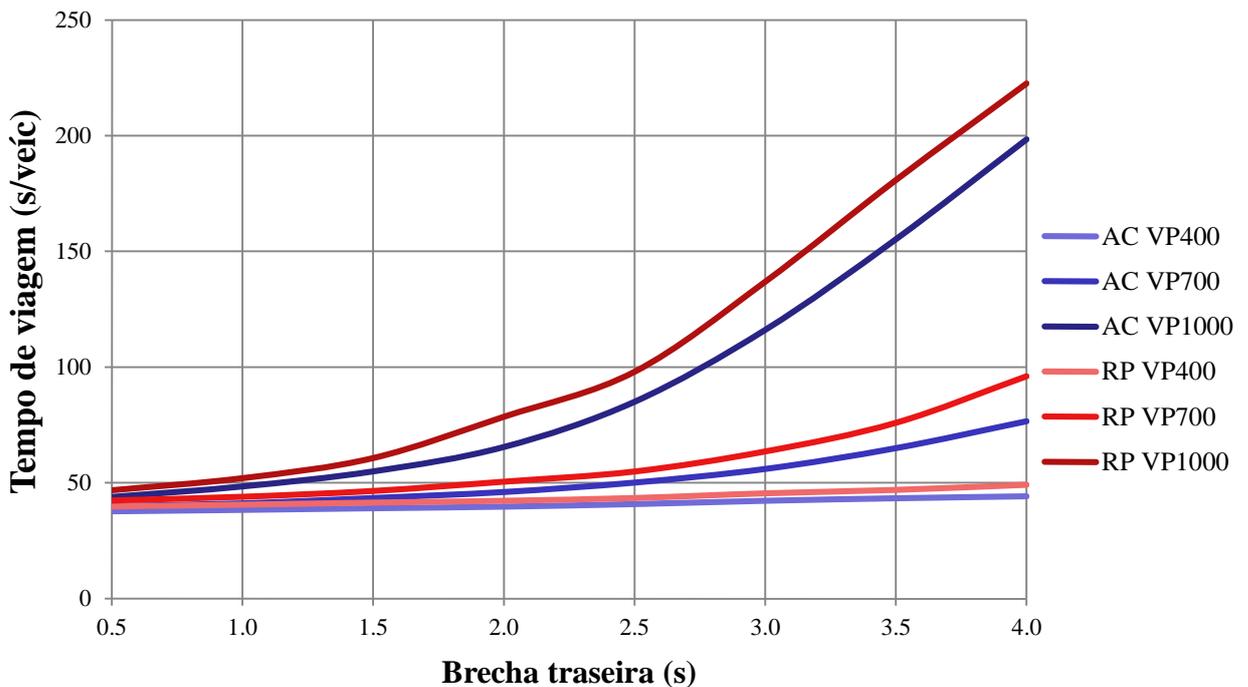
## APÊNDICE B – GRÁFICOS DOS RESULTADOS DA CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS SUBMODELOS DE ACEITAÇÃO DE BRECHAS DO VISSIM

Atraso médio obtido em ambos os submodelos (brecha frontal 0,5s)



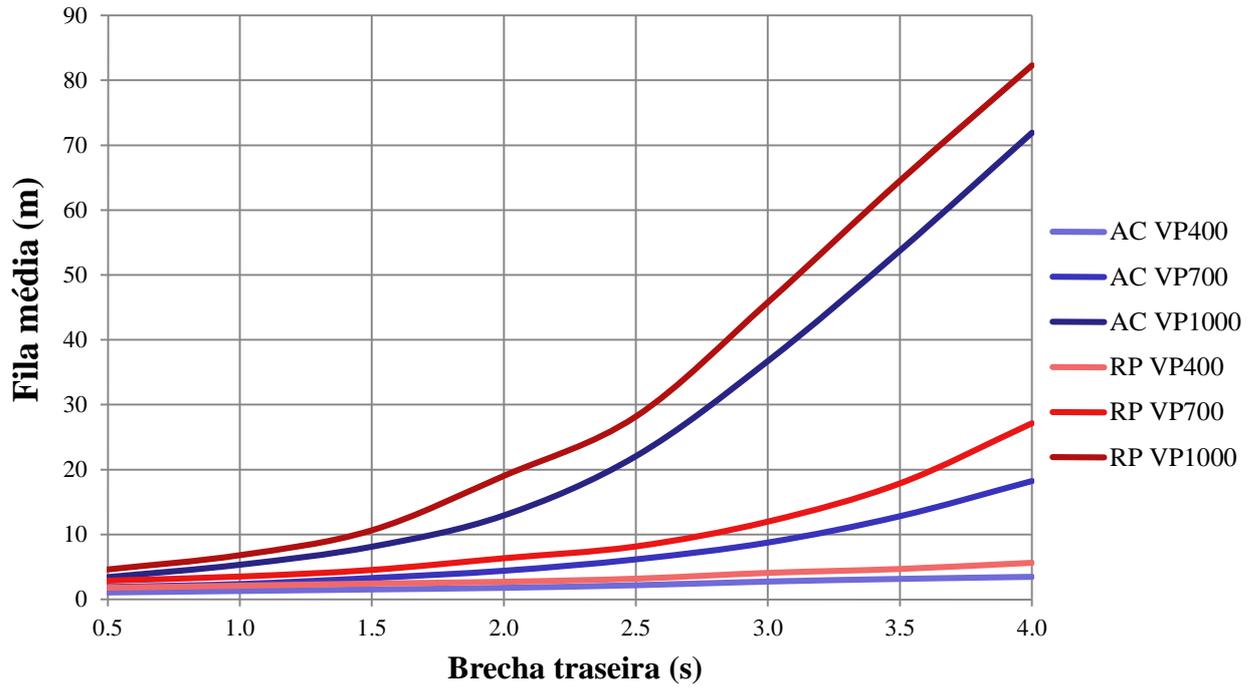
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tempo de viagem médio obtido em ambos os submodelos (brecha frontal 0,5s)



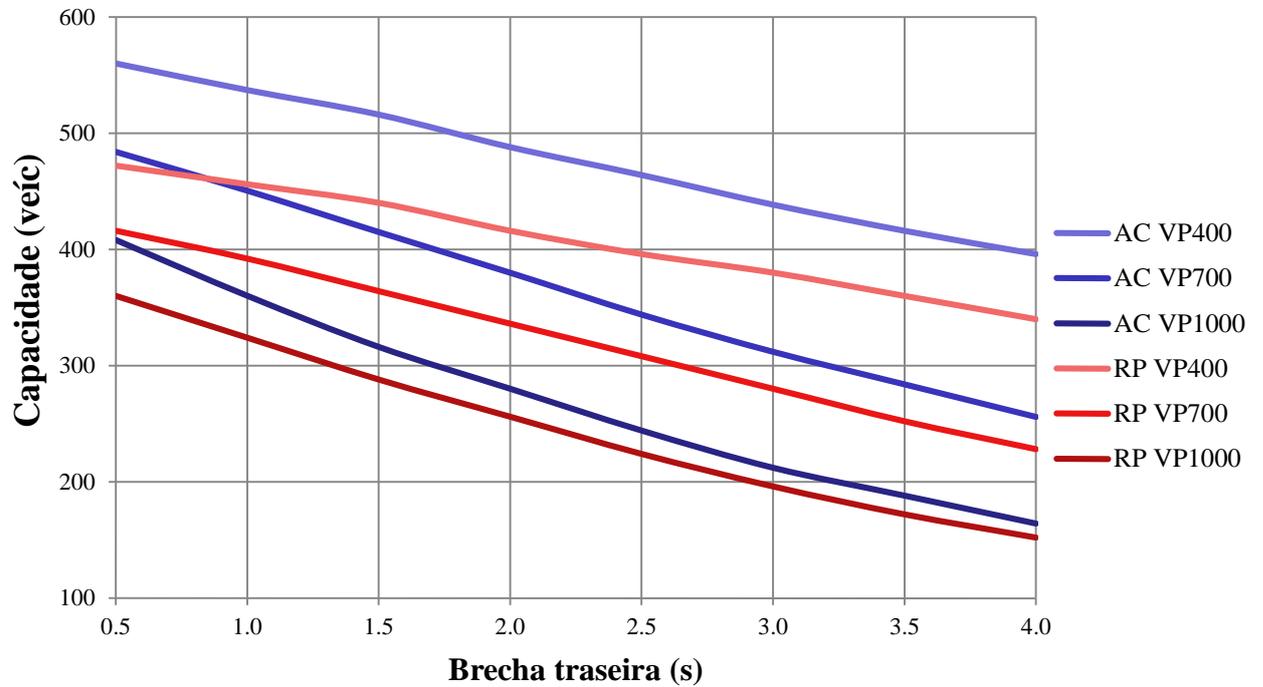
Fonte: Elaborado pelo autor.

Comprimento médio de fila obtido em ambos os submodelos (brecha frontal 0,5s)



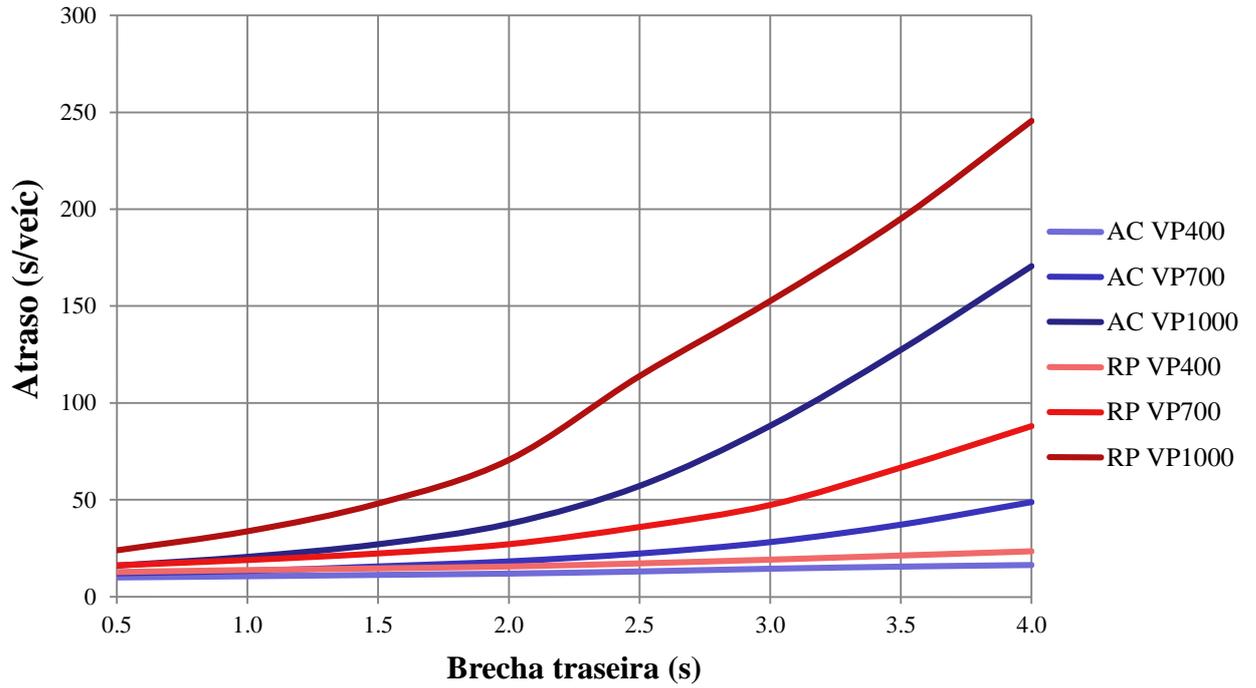
Fonte: Elaborado pelo autor.

Capacidade da aproximação secundária obtida em ambos os submodelos (brecha frontal 0,5s)



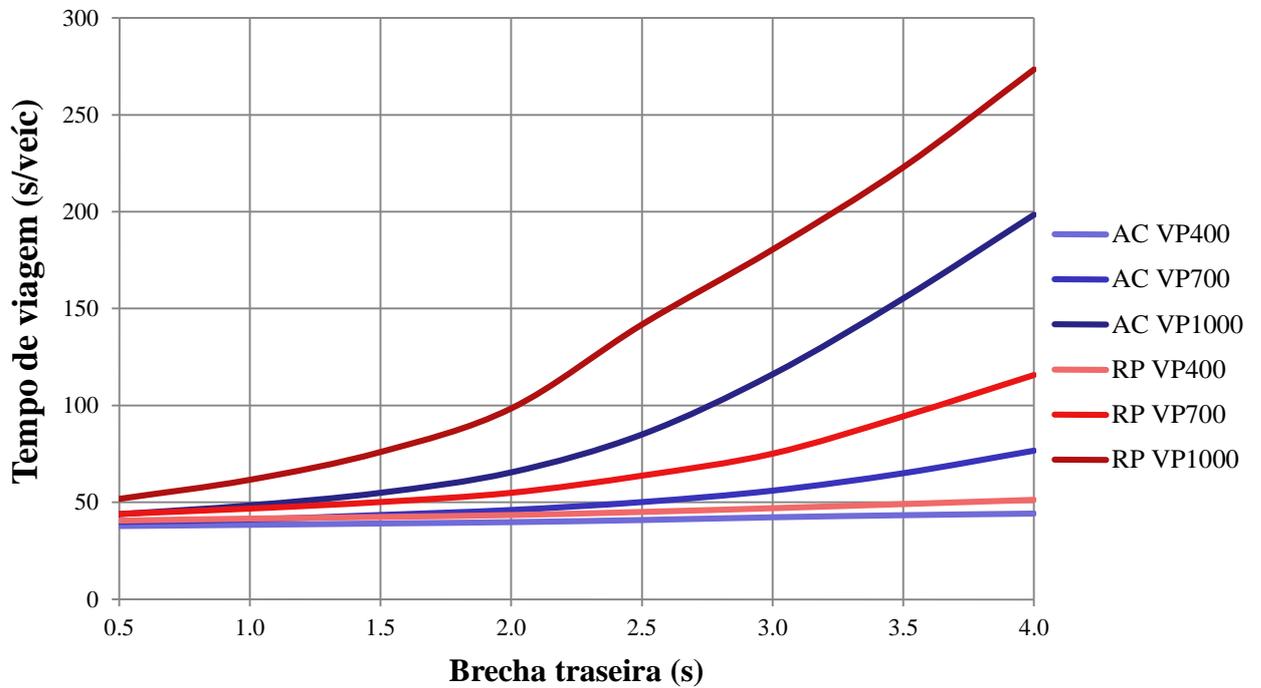
Fonte: Elaborado pelo autor.

Atraso médio obtido em ambos os submodelos (brecha frontal 1,0s)



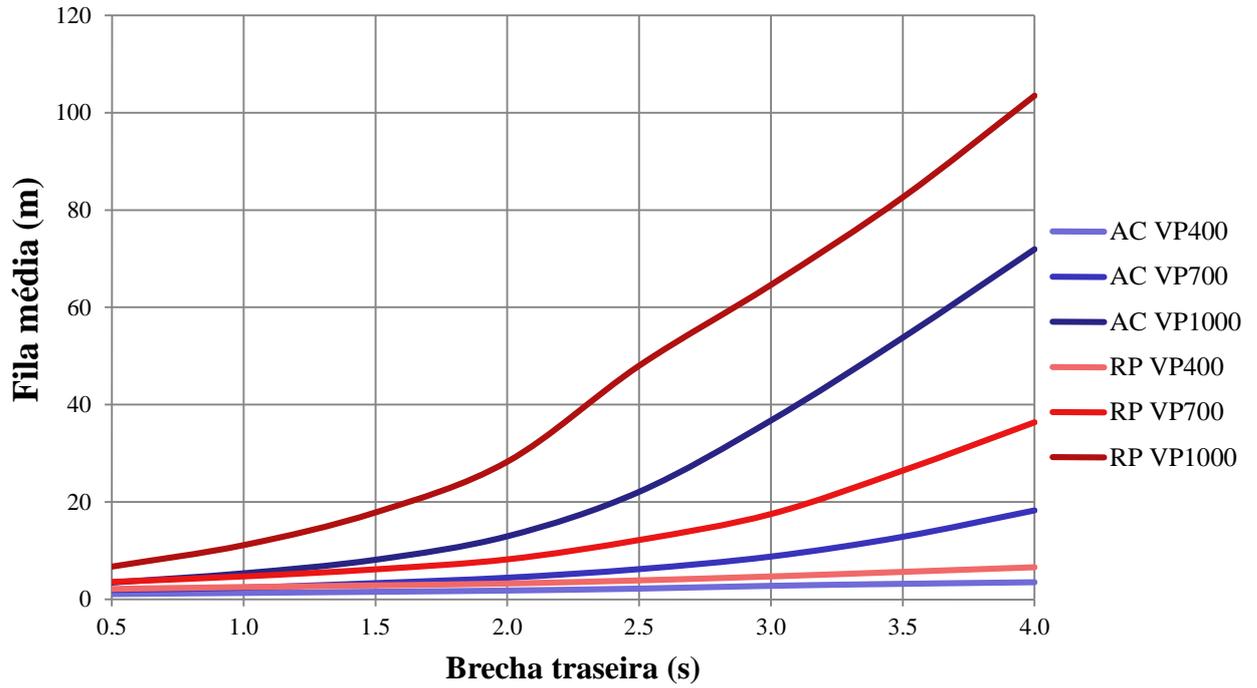
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tempo de viagem médio obtido em ambos os submodelos (brecha frontal 1,0s)



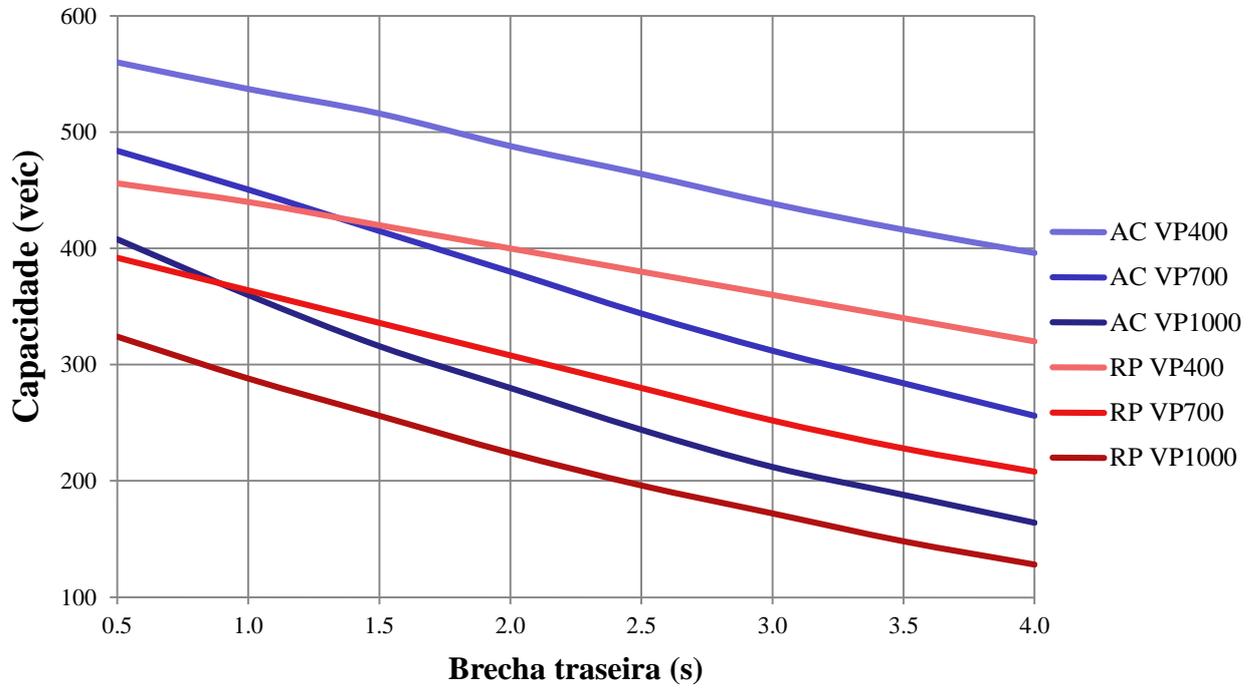
Fonte: Elaborado pelo autor.

Comprimento médio de fila obtido em ambos os submodelos (brecha frontal 1,0s)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Capacidade da aproximação secundária obtida em ambos os submodelos (brecha frontal 1,0s)



Fonte: Elaborado pelo autor.