

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES**

**Método para determinação da capacidade e de medidas de  
desempenho em segmentos de rodovias de pista simples  
com obras**

**Rafael Quintão de Andrade**

**Belo Horizonte**

**2021**

**Rafael Quintão de Andrade**

**Método para determinação da capacidade e de medidas de  
desempenho em segmentos de rodovias de pista simples  
com obras**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: Transportes

Orientador: José Elievam Bessa Júnior

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2021

A553m	<p>Andrade, Rafael Quintão de.  Métodos para determinação da capacidade e de medidas de desempenho em segmentos de rodovias de pista simples com obras [recurso eletrônico] / Rafael Quintão de Andrade. – 2021.  1 recurso online (115 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: José Elievam Bessa Júnior.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 113-115.</p> <p>Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Transportes - Teses. 2. Engenharia de tráfego – Teses.  3. Rodovias – Teses. I. Bessa Júnior, José Elievam.  II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.  III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 656(043)</p>
-------	--



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

### FOLHA DE APROVAÇÃO

**Método para determinação da capacidade e de medidas de desempenho em segmentos de rodovias de pista simples com obras**

**RAFAEL QUINTÃO DE ANDRADE**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOTECNIA E TRANSPORTES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOTECNIA E TRANSPORTES, área de concentração TRANSPORTES. Aprovada em 30 de agosto de 2021, pela banca constituída pelos membros:

Prof. José Elievam Bessa Junior (Orientador) - UFMG

Prof. José Reynaldo Anselmo Setti - EESC-USP

Prof.ª Janaina Antonino Pinto - UNIFEI

Belo Horizonte, 30 de agosto de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **José Reynaldo Anselmo Setti, Usuário Externo**, em 30/08/2021, às 11:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Janaina Antonino Pinto, Usuário Externo**, em 30/08/2021, às 12:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jose Elievam Bessa Junior, Coordenador(a) de curso**, em 30/08/2021, às 12:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0918062** e o código CRC **41DE829A**.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa, Júlia, pela compreensão, suporte nos momentos difíceis e por todo amor, companheirismo e carinho.

Ao meu filho, Miguel, minha maior motivação, pelo amor incondicional e fonte de inspiração.

Aos meus pais, Bete e Rogério, por todo o incentivo e sacrifício para minha formação profissional.

Aos meus irmãos, Arthur e Thiago, pelo exemplo de dedicação e profissionalismo.

Aos amigos da Fratar, André, Rodrigo, Elias e Priscilla, pelo incentivo e apoio para a conclusão dessa etapa. Ao Mattioli, pelas exaustivas jornadas e suporte durante as coletas de dados.

Às concessionárias Arteris ViaPaulista, Nascentes das Gerais e EixoSP, em especial aos profissionais Felipe Calsavara, Marcelo Aguiar e Tiago Torquato e equipe, que contribuíram para a coleta de dados valiosos para a execução deste trabalho.

Especial agradecimento ao meu orientador, Elievam, por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa e me manter motivado durante todo o processo. Aos professores José Reynaldo Setti e Janaína Antonino Pinto, pelas contribuições durante as bancas de qualificação e dissertação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo fomento à pesquisa no âmbito do Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da UFMG.

*"Se enxerguei mais longe foi porque  
me apoiei sobre os ombros de gigantes"*

(Isaac Newton)

## RESUMO

ANDRADE, Rafael Quintão de. **Método para determinação da capacidade e de medidas de desempenho em segmentos de rodovias de pista simples com obras**. 117f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

A execução de obras em segmentos de rodovia de pista simples requer o fechamento da via em uma direção, enquanto a faixa remanescente funciona alternadamente para ambos os sentidos de circulação. Dentre os principais efeitos dessa operação, denominada Pare e Siga, destacam-se o aumento dos tempos de viagem dos usuários e a formação de pelotões de veículos. Embora essas intervenções sejam bastante frequentes nas rodovias de pista simples, as pesquisas sobre esse assunto ainda são incipientes. Nesse sentido, o presente estudo propõe um método para determinação da capacidade e de medidas de desempenho em rodovias de pista simples em zonas de obras. Para tanto, desenvolveu-se uma formulação matemática determinística, baseada em Teoria de Filas e nas semelhanças com a dissipação de veículos que ocorre em semáforos, que permite estimar algumas medidas de desempenho como atraso e tamanho de pelotão. Também se desenvolveu equações para determinar a capacidade e o comprimento máximo de zona de obras, a partir de valores aceitáveis de medidas de desempenho. Na etapa de coleta de dados, foram realizadas filmagens nos pontos de controle de algumas intervenções, nos quais foi possível obter dados de tráfego, como fluxo, *headway*, velocidade média e tempo perdido para arranque. Além disso, foram realizadas análises dos registros de veículos de um laço indutivo durante a execução de obras para estabelecer as velocidades desejadas de acordo com a classificação de veículos. Esse conjunto de dados foi utilizado para calibrar e validar o simulador de tráfego Aimsun Next. Com o simulador calibrado, foi gerado um conjunto de dados sintéticos, a partir da simulação de diversos cenários de demanda, percentual de veículos pesados e comprimentos da zona de obras. Esses dados serviram tanto para obter algumas variáveis do problema (tais como fluxo de saturação, velocidade média e fator de equivalência de veículos pesados), quanto para validar o método proposto. Foram comparadas medidas de desempenho como ciclo, tamanho de pelotão e atraso, as quais apresentaram resultados satisfatórios na etapa de validação. O método desenvolvido, portanto, pode ser aplicado para prever os atrasos médios dos usuários e os tamanhos médios dos pelotões formados por ciclo de “PARE” e “SIGA”, em função das características do segmento em obras e de estimativas de fluxo de veículos.

Palavras-chave: Medidas de desempenho; Rodovias de pista simples; Simulação de tráfego; Zonas de obras.

## ABSTRACT

ANDRADE, Rafael Quintão de. **Method for determining capacity and measure of effectiveness in two-lane highway work zones**. 117f. Master Thesis – Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

Work execution on two-lane highway segments requires the closure of the lane in one direction, while the remaining lane operates alternately for both traffic directions. Among the main effects of this operation, called Stop and Go, the increase in travel times for users and the formation of vehicle platoons stand out. Although these interventions are quite frequent on two-lane highways, research on this subject is still incipient. Thus, the present study proposes a method for determining capacity and measures of effectiveness on two-lane highways in work zones. Therefore, a deterministic mathematical formulation was developed, based on Queue Theory and on the similarities with the queue discharge flow that occur at traffic lights, which allows for the estimation of measures of effectiveness such as delay and platoon size. Equations were also developed to determine the capacity and the maximum length of the work zones, based on acceptable values of measures of effectiveness. In the data collection step, control points of interventions were recorded, in which it was possible to obtain traffic data, such as flow, headway, average speed and lost time to start-up. In addition, the vehicle records of a loop inductive were analyzed during the execution of works to establish the desired speeds according to the class of vehicles. This dataset was used to calibrate and validate the traffic simulator Aimsun Next. With the simulator calibrated, a set of synthetic data was generated, based on the simulation of different demand scenarios, percentage of heavy vehicles and lengths of the work zones. These data served both to obtain variables of the problem (such as saturation flow, average speed and passenger car equivalents for trucks) and to validate the proposed method. Measures of effectiveness such as cycle, platoon size and delay were compared, which showed satisfactory results in the validation step. The method developed, therefore, can be applied to predict the average delays of users and the average sizes of platoons formed by cycles of “STOP” and “GO”, depending on the characteristics of the segment in workzone and the estimated vehicle flows.

Keywords: Measures of effectiveness; Two-lane highways; Traffic simulation; Work Zones.



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	19
1.2	JUSTIFICATIVA .....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>21</b>
2.1	MODELOS ANALÍTICOS.....	21
2.2	MODELOS DE SIMULAÇÃO.....	23
2.3	ANÁLISE DE CUSTOS .....	25
2.4	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DA ARTESP .....	27
2.4.1	<i>Velocidade média</i> .....	28
2.4.2	<i>Fluxo de saturação</i> .....	28
2.4.3	<i>Tempo de verde</i> .....	28
2.4.4	<i>Capacidade</i> .....	29
2.4.5	<i>Fila e Atrasos</i> .....	30
2.4.6	<i>Determinação do Nível de Serviço</i> .....	31
2.4.7	<i>Análise do método</i> .....	31
<b>3</b>	<b>MÉTODO .....</b>	<b>33</b>
3.1	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA .....	34
3.2	COLETA E ANÁLISE DE DADOS.....	34
3.3	MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO .....	35
3.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	36
<b>4</b>	<b>FORMULAÇÃO MATEMÁTICA .....</b>	<b>37</b>
4.1	TEMPO DE LIMPEZA.....	38
4.2	CICLOS E TEMPOS DE VERDE .....	38
4.3	TAMANHO DE PELOTÃO .....	40
4.4	ATRASO MÉDIO .....	41

4.5	CAPACIDADE .....	42
4.5.1	<i>Capacidade versus pelotão</i> .....	42
4.5.2	<i>Capacidade versus atraso médio</i> .....	43
4.6	COMPRIMENTO MÁXIMO DE OBRA .....	44
4.6.1	<i>Comprimento máximo versus pelotão</i> .....	44
4.6.2	<i>Comprimento máximo versus atraso</i> .....	45
<b>5</b>	<b>COLETA E ANÁLISE DE DADOS</b> .....	<b>47</b>
5.1	COLETA DE DADOS <i>IN LOCO</i> .....	47
5.1.1	<i>Localização dos pontos de pesquisa</i> .....	48
5.1.2	<i>Fluxo de tráfego</i> .....	52
5.1.3	<i>Estatísticas por ciclo de Pare e Siga</i> .....	54
5.1.4	<i>Velocidade média</i> .....	56
5.1.5	<i>Velocidade desejada</i> .....	59
5.1.6	<i>Fator de equivalência de veículos pesados</i> .....	60
5.1.7	<i>Percentual de veículos em pelotões</i> .....	62
5.2	DADOS DE SAT.....	65
5.2.1	<i>Fluxo de tráfego</i> .....	66
5.2.2	<i>Velocidade e headway</i> .....	67
<b>6</b>	<b>MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO</b> .....	<b>71</b>
6.1	MODELOS MICROSCÓPICOS .....	71
6.2	MODELAGEM DA OPERAÇÃO PARE E SIGA .....	74
6.3	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO SIMULADOR.....	75
<b>7</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>83</b>
7.1	SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS .....	83
7.2	ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DO PROBLEMA.....	84

7.2.1	<i>Determinação do fluxo equivalente</i> .....	85
7.2.2	<i>Fluxo de saturação</i> .....	88
7.2.3	<i>Velocidade média por direção</i> .....	90
7.2.4	<i>Tempo perdido para arranque</i> .....	92
7.3	VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS .....	93
7.4	COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS DO MÉTODO DA ARTESP.....	95
7.5	ANÁLISES DE SENSIBILIDADE .....	96
7.5.1	<i>Terreno Plano</i> .....	96
7.5.2	<i>Terreno Ondulado</i> .....	100
7.5.3	<i>Terreno Montanhoso</i> .....	104
<b>8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>109</b>
8.1	COLETA DE DADOS.....	109
8.2	MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO .....	110
8.3	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA .....	111
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>113</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Projeto-tipo de sinalização rodoviária de obras em segmentos de pista simples...	18
Figura 2.1: Curva de distribuição acumulada de headway de veículos.....	22
Figura 2.2: Configurações de parâmetros de veículo/motorista no FlagSim .....	24
Figura 2.3: Atraso em fila estimado <i>versus</i> simulado .....	24
Figura 2.4: Custos de usuário, de manutenção e total <i>versus</i> comprimento de zona de obra (fluxo total de 700 veículos por hora) .....	26
Figura 3.1: Fluxograma das etapas metodológicas.....	33
Figura 4.1: Exemplo de configuração do desvio de obra em segmento de pista simples .....	37
Figura 4.2: Diagrama de fila para semáforos de tempo fixo e operação Pare e Siga.....	39
Figura 4.3: Diagrama de fila da operação Pare e Siga para determinação de atraso.....	41
Figura 5.1: Croqui do posicionamento dos pontos de pesquisa .....	47
Figura 5.2: Equipamento de filmagem e exemplo de instalação no local .....	48
Figura 5.3: Pontos de pesquisa na MG-050: Obra 1 - km 149 (a); Obra 2 - km 177 (b); e Obra 3 - km 180 (c) .....	50
Figura .: Pontos de pesquisa na SP-191: Obra 4 - km 102 (a); Obra 5 - km 103 (b); e Obra 6 - km 83 (c).....	51
Figura 5.5: Fluxo de tráfego da Obra 4 (a); Obra 5 (b); e Obra 6 (c) por faixa horária .....	53
Figura 5.6: Altimetria dos trechos da Obra 1 (a); da Obra 2 (b); da Obra 3 (c); da Obra 4 (d); da Obra 5 (e) e da Obra 6 (f) .....	58
Figura 5.7: Distribuição de velocidade dos veículos de passeio (a) e dos caminhões (b) que não experimentaram fila no trecho de obras da SP-191 .....	60
Figura 5.8: Percentual de veículos em pelotão nos pontos de pesquisa da Obra 1 (a); da Obra 2 (b); da Obra 3 (c); da Obra 4 (d); da Obra 5 (e); e da Obra 6 (f).....	63

Figura 5.9: Localização do SAT de coleta de dados .....	66
Figura 5.10: Perfil horário de tráfego registrado no SAT durante a execução de obras .....	66
Figura 5.11: Altimetria do segmento de monitoramento do SAT .....	68
Figura 5.12: Distribuição da velocidade instantânea dos veículos medidos no SAT na direção 1, sem obras (a) e com obras (b); e na direção 2, sem obras (c) e com obras (d).....	70
Figura 6.1: Imagem da rede modelada no software Aimsun Next .....	74
Figura 6.2: Modelagem da rede nos desvios da Obra 1 (a); Obra 2 (b), Obra 3 (c), da Obra 4 (d), da Obra 5 (e) e da Obra 6 (f).....	76
Figura 6.3: Exemplo de dados de altimetria do segmento da Obra 1 .....	77
Figura 6.4: Distribuição de frequência acumulada de Massa (a); e Massa/Potência (b) dos caminhos .....	79
Figura 7.1: Análise de Sensibilidade do fator de equivalência de veículos pesados $E_T$ em função do percentual de veículos pesados (a); do fluxo de veículos (b); e do comprimento do trecho de obras (c).....	86
Figura 7.2: Determinação do fator de equivalência de veículos pesados $E_T$ em função do percentual de veículos pesados e do greide. ....	88
Figura 7.3: Relação entre fluxo de descarga e tamanho médio de pelotão para trechos em aclave (a) e em declive (b).....	89
Figura 7.4: Análises de regressão linear de tempo médio de ciclo (a); de tamanho médio de pelotão (b); e de atraso médio (c), obtidos através da simulação de tráfego e do método proposto .....	94
Figura 7.5: Análises de regressão linear de atraso médio obtidos através da simulação de tráfego e do método da ARTESP (2019) .....	95
Figura 7.6: Análises de sensibilidade do tempo médio de ciclo (a); do tamanho médio de pelotão (b); e do atraso médio (c) em relação ao fluxo total do trecho para diferentes cenários de comprimento de obra e trechos planos ( $i = 0\%$ ).....	97

Figura 7.7: Análises de sensibilidade da capacidade em relação ao comprimento de obra para diferentes limites de tamanho médio de pelotão (a) e de atraso médio (b) para trechos planos ( $i = 0\%$ ) .....	99
Figura 7.8: Análises de sensibilidade do comprimento máximo de obra em relação ao fluxo total para diferentes limites de tamanho médio de pelotão (a) e de atraso médio (b) .....	100
Figura 7.9: Análises de sensibilidade do tempo médio de ciclo (a); do tamanho médio de pelotão (b); e do atraso médio (c) em relação ao fluxo total do trecho para diferentes cenários de comprimento de obra e trechos ondulados ( $i = 3\%$ ) .....	101
Figura 7.10: Análises de sensibilidade da capacidade em relação ao comprimento de obra para diferentes limites de tamanho médio de pelotão (a) e de atraso médio (b) para trechos ondulados ( $i = 3\%$ ) .....	103
Figura 7.11: Análises de sensibilidade do comprimento máximo de obra em relação ao fluxo total para diferentes limites de tamanho médio de pelotão (a) e de atraso médio (b) para trechos ondulados ( $i = 3\%$ ) .....	104
Figura 7.12: Análises de sensibilidade do tempo médio de ciclo (a); do tamanho médio de pelotão (b); e do atraso médio (c) em relação ao fluxo total do trecho para diferentes cenários de comprimento de obra e trechos montanhosos ( $i = 6\%$ ) .....	105
Figura 7.13: Análises de sensibilidade da capacidade em relação ao comprimento de obra para diferentes limites de tamanho médio de pelotão (a) e de atraso médio (b) para trechos montanhosos ( $i = 6\%$ ) .....	107
Figura 7.14: Análises de sensibilidade do comprimento máximo de obra em relação ao fluxo total para diferentes limites de tamanho médio de pelotão (a) e de atraso médio (b) para trechos montanhosos ( $i = 6\%$ ) .....	108

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Estatísticas das variáveis de correlação linear para estimativa de atraso .....	25
Tabela 2.2: Determinação do nível de serviço em interseções semaforizadas.....	31
Tabela 5.1: Localização dos pontos de pesquisa na MG-050.....	49
Tabela 5.2: Localização dos pontos de pesquisa na SP-191.....	49
Tabela 5.3: Exemplo de tabulação dos dados das filmagens.....	52
Tabela 5.4: Fluxo médio de veículos observados nas obras 1, 2 e 3 por direção.....	52
Tabela 5.5: Estatísticas médias dos ciclos por obra e direção .....	55
Tabela 5.6: Estatísticas de tempo perdido por ciclo para liberação da pista em cada obra e ponto de controle .....	55
Tabela 5.7: Velocidade média por segmento e condição de tráfego .....	57
Tabela 5.8: Estatísticas de <i>headway</i> para determinação de fator de equivalência de veículos pesados e fluxo de descarga de cada segmento pesquisado .....	62
Tabela 5.9: Estatísticas de <i>headway</i> e velocidade média por tipo de veículo e direção durante a execução de obras no segmento do SAT .....	67
Tabela 5.10: Estatísticas de <i>headway</i> e velocidade média por classe de veículo e direção durante a execução de obras no segmento do SAT .....	68
Tabela 5.11: Velocidade média e percentual de veículos em pelotão por classe de veículos e direção em períodos sem e com obras no trecho do SAT .....	69
Tabela 6.1: Volume de tráfego observado nas obras da MG-050, para cada intervalo de 15 minutos .....	78
Tabela 6.2: Volume de tráfego observado nas obras da SP-191, para cada intervalo de 15 minutos .....	78
Tabela 6.3: Parâmetros do modelo de desempenho dos veículos pesados no Aimsun .....	79

Tabela 6.4: Comparação de indicadores de velocidade média por tipo de veículo obtidos na coleta de dados e através da microssimulação de tráfego .....	81
Tabela 7.1: Fator de equivalência de veículos pesados $E_T$ em função do percentual de veículos pesados $P_{HV}$ e do greide $i$ .....	88
Tabela 7.2: Velocidade média (km/h) por fluxo de caminhões (veic/h) e comprimento de obras (m) - Terreno: declive montanhoso ( $i = -6\%$ ) .....	90
Tabela 7.3: Velocidade média (km/h) por fluxo de caminhões (veic/h) e comprimento de obras (m) - Terreno: declive ondulado ( $i = -3\%$ ) .....	91
Tabela 7.4: Velocidade média (km/h) por fluxo de caminhões (veic/h) e comprimento de obras (m) - Terreno: plano ( $i = 0\%$ ) .....	91
Tabela 7.5: Velocidade média (km/h) por fluxo de caminhões (veic/h) e comprimento de obras (m) - Terreno: aclive ondulado ( $i = 3\%$ ) .....	92
Tabela 7.6: Velocidade média (km/h) por fluxo de caminhões (veic/h) e comprimento de obras (m) - Terreno: aclive montanhoso ( $i = 6\%$ ).....	92



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANTP – Agência Nacional de Transportes Públicos

ARTESP – Agência de Transporte do Estado de São Paulo

ATS – *Average Travel Speed*

CNT – Confederação Nacional de Transportes

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito

FFS – *Free Flow Speed*

HCM – Highway Capacity Manual

NCHRP – National Cooperative Highway Research Program

NS – Nível de Serviço

PHF – *Peak Hour Factor*

$P_{HV}$  – *Percent of Heavy Vehicles*

SAT – Sistema de Análise de Tráfego

TRB – Transportation Research Board of the National Academy of Sciences

USDOT – United States Department of Transportation

VDMA – Volume Diário Médio Anual



# 1 INTRODUÇÃO

As rodovias de pista simples desempenham um importante papel no sistema de rodovias brasileiras. Na última pesquisa nacional de rodovias realizada pela Confederação Nacional de Transportes (CNT), estima-se que 85,4% da extensão das rodovias federais se caracteriza como de pista simples e, apenas, 14,6% são duplicadas (CNT, 2019). Com tráfego pesado e ciclos de vida limitados do pavimento, muitas vezes são necessárias atividades de reconstrução e reabilitação (ZHU *et al.*, 2017).

A execução de obras em segmentos de pista simples requer o fechamento da via em uma direção, enquanto a faixa remanescente funciona alternadamente para ambos os sentidos de circulação. Nessa operação, denominada Pare e Siga, são instalados dispositivos de controle de tráfego em cada extremidade, bloqueando o fluxo em uma direção até que os veículos da direção oposta concluam o percurso.

O manual brasileiro de sinalização de trânsito do CONTRAN (2017) dispõe sobre as normativas da intervenção Pare e Siga. Devem ser obedecidas as seguintes orientações:

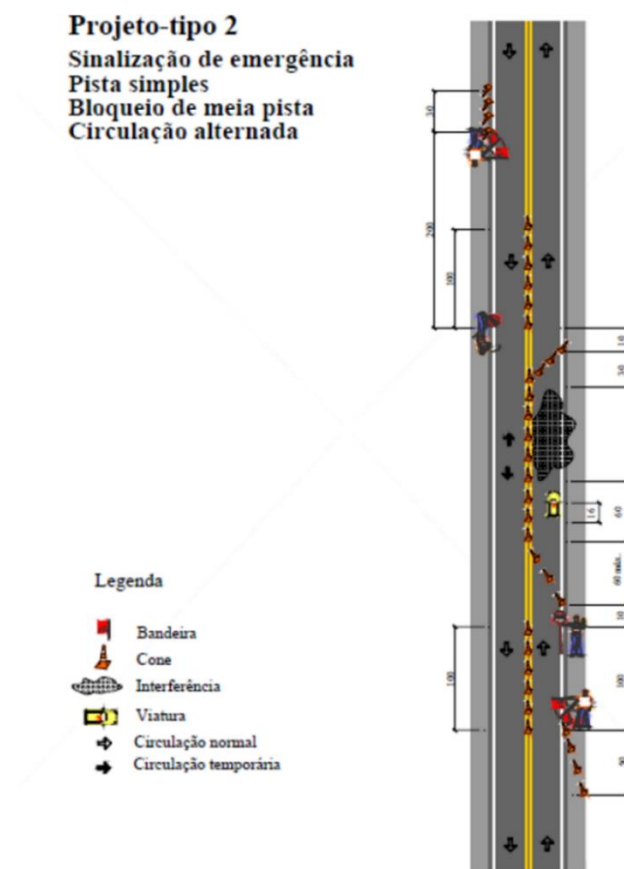
- a) Um primeiro operador, portando a bandeira sinalizadora, deve estar posicionado no mínimo a 200 metros da obra e a 100 metros do último veículo retido, de forma a indicar a interrupção do tráfego à frente;
- b) Um segundo operador, portando o suporte com os sinais “PARE” e “SIGA”, deve estar posicionado antes da área de transição, em local protegido e visível, indicando o ponto de retenção dos veículos; e
- c) Após a passagem do último veículo do fluxo contrário, o operador deve colocar-se lateralmente ao fluxo que controla, mudar o sinal de “PARE” para “SIGA” e informar, através de gestos, o início de circulação.

Quando houver acessos intermediários, eles devem ser incluídos na operação para evitar a sobreposição de fluxos. Em situações de alternância de fluxo no período noturno, deve ser utilizado o semáforo portátil, com orientações específicas indicadas no manual.

A Figura 1.1 mostra o projeto-tipo de sinalização rodoviária de obras em segmentos de pista simples da ARTESP (2019), em consonância com as características citadas acima. A zona de obras, delimitada pelo trecho entre as sinalizações de “PARE” e “SIGA”, engloba, além da área de intervenção, os afastamentos que direcionam as mudanças de faixa de entrada e saída dos veículos, e o espaço necessário para o posicionamento da viatura da concessionária ou

empresa/órgão responsável pelas obras.

Figura 1.1: Projeto-tipo de sinalização rodoviária de obras em segmentos de pista simples



Fonte: ARTESP (2019)

O CONTRAN (2017) ainda recomenda atentar-se para os tempos de interrupção do fluxo considerando o conforto e a segurança dos usuários, de modo a minimizar as filas de retenção e evitando tempos de espera superiores a 30 minutos para a alternância de fluxos. A determinação de medidas relacionadas à fila de veículos e ao tempo de espera em uma zona de obras, no entanto, é bastante complexa e depende de diversos fatores como demanda de tráfego no trecho, da extensão da intervenção e das características geométricas do segmento.

Embora as operações Pare e Siga sejam bastante frequentes nas rodovias de pista simples, as pesquisas sobre esse assunto ainda são incipientes (ZHU *et al.*, 2017). Dentre os estudos relacionados ao tema, foram encontradas diferentes abordagens para avaliação de desempenho do tráfego em intervenções desse tipo, tais como modelagem matemática determinística (CASSIDY e HAN, 1993) ou estocástica (SON, 1999) e simulação microscópica (SHIBUYA *et al.*, 1996; WASHBURN *et al.*, 2008; ZHU *et al.*, 2017; HUA *et al.*, 2019).

Entretanto, a literatura ainda carece de uma análise exploratória mais abrangente, que incorpore as especificidades inerentes ao problema e seja capaz de prever os impactos da

intervenção em diversas condições. A maioria dos estudos encontrados na literatura se limitam à avaliação de estudos de caso, sem uma abordagem mais generalista das relações matemáticas envolvidas no processo.

Alguns estudos aplicaram técnicas de simulação de tráfego (SHIBUYA *et al.*, 1996; WASHBURN *et al.*, 2008) para alimentar modelos de regressão para determinação do atraso, em função de uma série de parâmetros de entrada, como fluxo, percentual de veículos pesados, comprimento da zona de obras, entre outros. Os trabalhos de ZHU *et al.* (2017) e HUA *et al.* (2019) compararam o desempenho de operações Pare e Siga adotando tempos de verde fixos e dinâmicos. Ambos os trabalhos concluíram que a melhor estratégia é manter o fluxo liberado em cada direção apenas durante o estado de dissipação de filas.

Diante disso, tendo em vista a semelhança do regime Pare e Siga com o funcionamento de uma interseção semaforizada, o presente estudo descreve formulações matemáticas para estimativa dos tempos de verde, de limpeza e de ciclo da intervenção, em função de parâmetros como comprimento de obra, *headway* de saturação, velocidade no trecho e tempo perdido para troca de estágios. A partir do método proposto, é possível estimar alguns indicadores de desempenho, tais como atraso dos usuários e tamanho médio de pelotão.

## **1.1 Objetivos do trabalho**

O objetivo geral desta pesquisa consiste em propor um método para determinação da capacidade e de medidas de desempenho voltadas para segmentos de rodovias de pista simples durante a execução de obras. Para atingir o objetivo geral, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- determinar as medidas de desempenho mais adequadas para avaliação da capacidade e dos impactos em segmentos com intervenções;
- definir as condições de tráfego relevantes que influenciam tanto na capacidade quanto nas medidas de desempenho do trecho em obras;
- desenvolver modelo de tráfego para estimar medidas de desempenho, baseado nas características de tráfego.

## **1.2 Justificativa**

Com o avanço dos processos de concessão rodoviária no Brasil e, conseqüentemente, da regulação da operação das rodovias, aumenta a necessidade de elaborar normativas para avaliação das condições operacionais durante a execução de obras de manutenção e de

ampliação da capacidade.

Nesse sentido, a Agência de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP) desenvolveu uma Especificação Técnica denominada “Metodologia para Obtenção do Nível de Serviço no Plano Operacional” (identificação ET-DOP-GOE-C-TRA-DSV) que define as diretrizes para análise do comportamento esperado do tráfego e determinação do Nível de Serviço Operacional em trechos em obras (ARTESP, 2019). As formulações descritas nesse documento se baseiam sobretudo nos manuais do HCM - *Highway Capacity Manual*, principalmente a sexta edição, de 2016 (TRB, 2016), que incorporou pela primeira vez análises operacionais de trechos em obras. Nessa edição, o Capítulo 10, denominado *Freeway Facilities Core Methodology*, apresenta adaptações do método tradicional de análise de capacidade em rodovias de pista dupla para avaliação de trechos em obras, considerando os efeitos da redução do número de faixas em determinado sentido.

Essa extensão se baseou nos resultados do projeto NCHRP 03-107, intitulado *Work Zone Capacity Methods for the Highway Capacity Manual*, no âmbito do *National Cooperative Highway Research Program – NCHRP* (SCHOEN *et al.*, 2015). No entanto, os métodos incorporados no HCM-6 se restringiram às rodovias de pista dupla, não havendo uma abordagem para as rodovias de pista simples, onde o desvio de obra requer uma operação do tipo Pare e Siga em que, alternadamente, ocorre o bloqueio do tráfego em um sentido de circulação e a liberação no sentido contrário.

Na especificação técnica da ARTESP (2019), é descrita uma metodologia para pista simples, considerando as semelhanças entre a operação Pare e Siga e o funcionamento de um semáforo isolado, instalado em uma via urbana, por exemplo. A parametrização do nível de serviço sugerida é a mesma utilizada para interseções semaforizadas. No entanto, algumas particularidades da intervenção na rodovia não foram devidamente tratadas no modelo apresentado, tais como a influência do fluxo de tráfego e do tempo de limpeza sobre o dimensionamento dos tempos semaforicos, além da limitação da aplicação da metodologia a trechos em obras de até 500 metros de comprimento.

Dessa forma, identificou-se uma oportunidade para o desenvolvimento de um método que possibilite determinar a capacidade e medidas de desempenho em um trecho de pista simples durante a execução das obras. Entre as aplicações do método, destaca-se o dimensionamento dos horários de execução de obras e os comprimentos do canteiro de obras, observando os efeitos sobre as condições de tráfego no segmento.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

A execução de obras de manutenção e melhorias em segmentos rodoviários naturalmente interferem no desempenho operacional do trecho. Tipicamente, em trechos de pista dupla, as intervenções requerem a supressão de faixas de tráfego, provocando assim redução da capacidade ofertada. Em rodovias de pista simples, os impactos são ainda maiores, promovendo bloqueios temporários do tráfego em cada direção, de forma a permitir a circulação dos veículos apenas em um sentido.

Cassidy e Han (1993) enumeram uma série de fatores que influenciam as condições operacionais do segmento em obras, tais como demanda de tráfego, velocidade dos veículos no trecho, taxas de descarga de filas, que são parâmetros de entrada dos modelos de tráfego, e o comprimento de obra, que consiste em uma variável controlável e afeta diretamente a produtividade das atividades de manutenção e, conseqüentemente, nos custos envolvidos (SCHONFELD e CHIEN, 1999; CHIEN *et al.*, 2002).

A intervenção de Pare e Siga em rodovias de pista simples é muito similar ao funcionamento de uma interseção semaforizada de duas fases (CEDER e REGUEROS 1990; USDOT 2003). A principal diferença, no entanto, consiste nos elevados tempos de limpeza necessários para percorrer a interseção, que, nesse caso, possui a extensão da zona de obras. Nessa perspectiva, a capacidade de cada aproximação pode ser obtida a partir das relações entre os tempos de verde efetivo e de ciclo, como aqueles definidos no HCM-6 (TRB, 2016).

Os métodos para avaliação do desempenho dos segmentos em obras podem ser classificados em duas categorias: analítica e de simulação. Os modelos analíticos são aqueles que se baseiam em formulações matemáticas determinísticas, frequentemente, que são função de outras variáveis independentes (PORTUGAL, 2005). A simulação, por sua vez, procura replicar a sequência de eventos hipotéticos do sistema estudado, incorporando, na maioria das vezes, variáveis aleatórias para reproduzir a variabilidade da demanda e do comportamento das entidades. A construção de um modelo de simulação permite representar situações complexas e avaliar inúmeros cenários com baixo custo computacional.

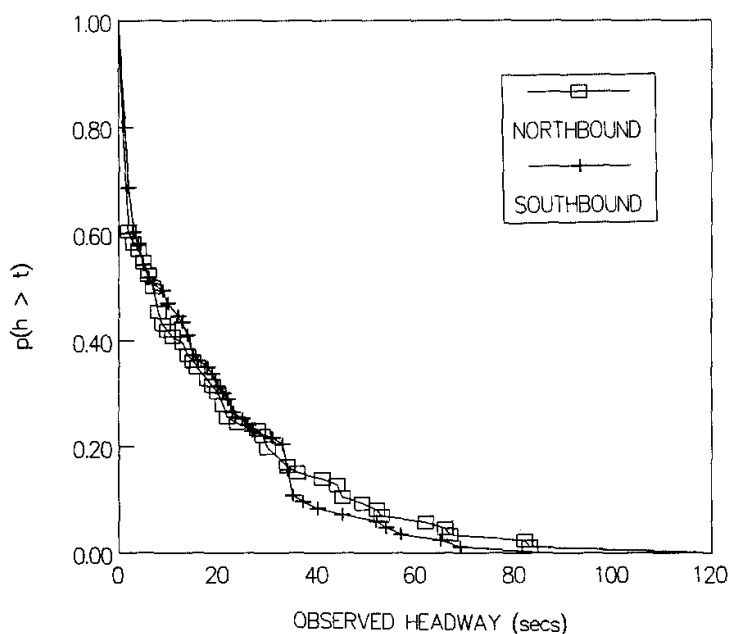
### 2.1 Modelos analíticos

O trabalho de Cassidy e Han (1993) é um dos precursores na análise de desempenho de zonas de obras em rodovias de pista simples. Eles propuseram um modelo matemático determinístico para cálculo dos atrasos médios e comprimento de filas para intervenções Pare e Siga (*one-way*

*traffic control*, na terminologia adotada pelos autores). Um estudo de caso em uma rodovia localizada no estado da Califórnia, nos Estados Unidos, foi apresentado com o objetivo de parametrizar o modelo desenvolvido.

Dentre as informações coletadas, destacam-se as velocidades médias na zona de obras, *headways* de saturação, tempos perdidos no início e final dos tempos de verde. Os autores também avaliaram a distribuição de probabilidades do *headway* de chegada dos veículos e concluíram que se assemelham a uma curva exponencial. Consequentemente, o número de veículos por intervalo de tempo segue uma distribuição de Poisson, função inversa da curva exponencial.

Figura 2.1: Curva de distribuição acumulada de headway de veículos



Fonte: Cassidy e Han (1993)

A partir desses parâmetros, foi desenvolvida uma formulação matemática para estimativa das componentes de uma programação semafórica, tais como tamanho do ciclo, tempos de verde e vermelho efetivos, fluxo de saturação ou descarga de filas, e de medidas de desempenho como atrasos dos usuários. Os resultados foram validados em apenas um estudo de caso, com índices de ajuste bastante satisfatórios. No entanto, a metodologia descrita é bastante sensível às variáveis de entrada, as quais dependem de variáveis locais obtidas apenas durante a intervenção, o que prejudica a aplicabilidade do método para casos com dados de entrada diferentes daqueles que foram coletados.

Son (1999), por sua vez, apresentou uma abordagem estocástica de filas baseada nos modelos de aproximação de fluidos para prever atrasos de motoristas em zonas de obras em



rodovias de pista simples. O trabalho descreve a dedução matemática das equações, inclusive baseando na modelagem estocástica do trabalho de Newell (1969). O método, no entanto, se restringe a realizar estimativas do atraso, adotando, como premissa, os tempos de verde, tempo perdido, taxa de descarga de filas e velocidade em trecho em obras estabelecidos do estudo de Cassidy e Han (1993). Para validação do modelo, foram comparados os atrasos médios obtidos pelo método proposto e por simulações microscópicas em 18 cenários variando volume direcional de tráfego (de 100 a 300 veículos por hora) e comprimento de obra (de 1,2 a 2,4 quilômetros), com índices de ajuste bastante favoráveis.

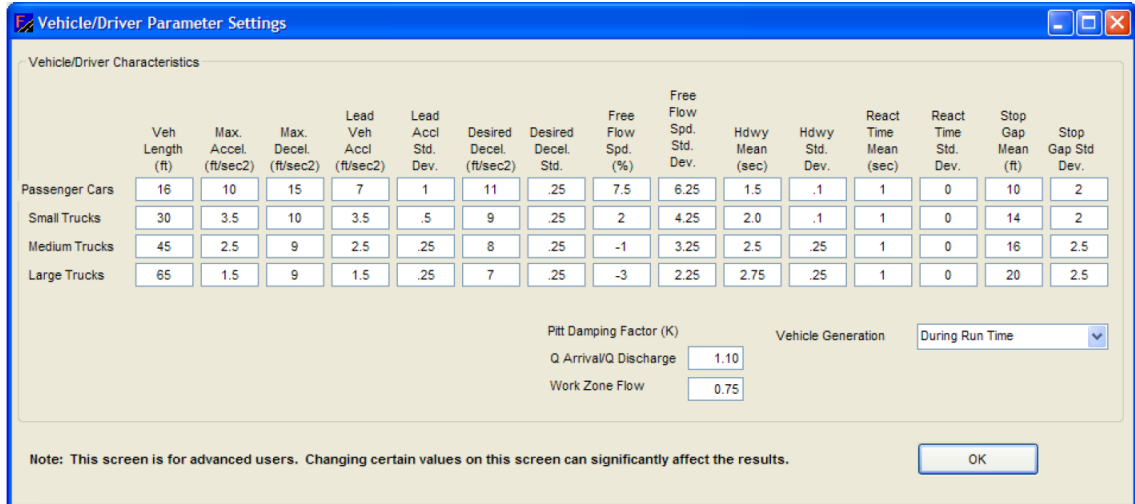
## 2.2 Modelos de simulação

Além de modelos matemáticos, alguns estudos também têm explorado técnicas de simulação para avaliar as condições de tráfego em intervenções Pare e Siga (ARGUEA, 2006). A confiabilidade dos resultados da simulação depende diretamente da qualidade dos dados de entrada (ZHU *et al.*, 2017), tais como os parâmetros de desempenho dos veículos e de comportamento dos motoristas envolvidos no modelo *car-following*, específico para simulação de veículos nas correntes de tráfego. Mesmo cientes da importância da etapa de calibração da simulação, as dificuldades na obtenção de dados em campo limitam o tamanho das amostras e de configurações de geometria e demanda abordados.

No trabalho de Shibuya *et al.* (1996), foram realizadas coletas de dados em uma zona de obra de 80 metros de extensão em Souka City, no Japão, com o objetivo de determinar parâmetros como taxas de aceleração e desaceleração, tempo de arranque e fluxos de saturação. Os autores, então, criaram um simulador microscópico de fluxos de tráfego para medir atrasos médios em cenários com comprimento de obra inferior a 200 metros. Ao final, aplicaram técnicas de regressão para obter as equações de cálculo de atrasos médios para cada cenário, em função de parâmetros pré-estabelecidos.

Washburn *et al.* (2008) desenvolveram um software específico de simulação microscópica, denominado FlagSim, para avaliar as condições de tráfego de uma intervenção Pare e Siga (“*flagging*” na nomenclatura utilizada pelos autores). Nesse simulador, os veículos foram classificados em quatro categorias: carros de passeio e caminhões leves, médios e pesados, com atributos específicos de tamanho, aceleração, desaceleração, velocidade de fluxo livre, headway, tempo de reação, entre outros. A Figura 2.2 exibe a tela de configurações de parâmetros de veículo/motorista no software.

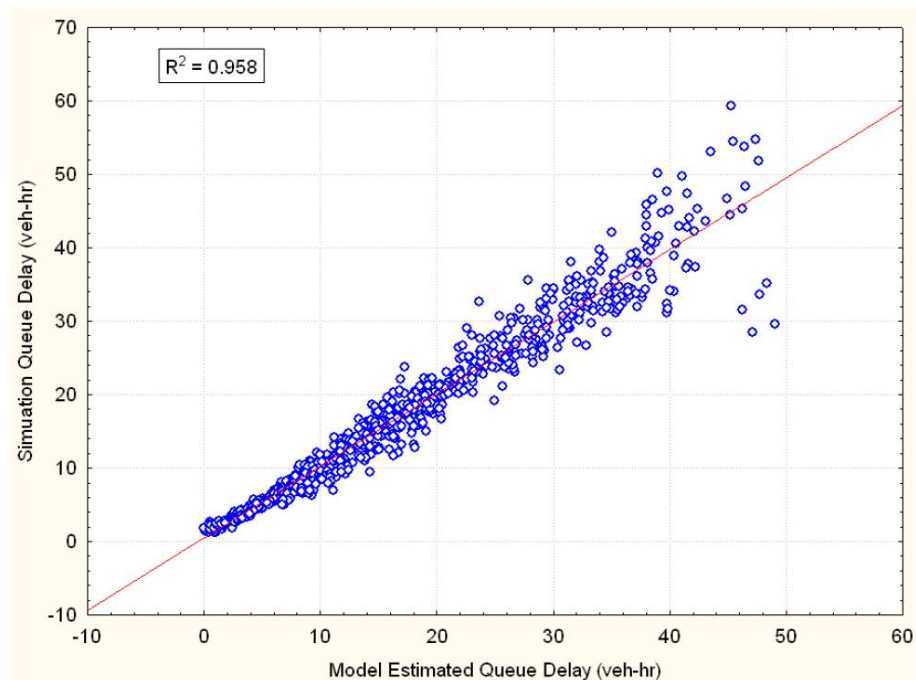
Figura 2.2: Configurações de parâmetros de veículo/motorista no FlagSim



Fonte: Washburn *et al.* (2008)

O objetivo principal da construção do simulador consiste em gerar resultados de exaustivas amostras de cenários para estabelecer funções de regressão linear que expliquem a variação de medidas de desempenho, tais como velocidade média, fluxo de saturação, atraso médio e comprimento de fila. A título de exemplo, a partir da aplicação da parametrização padrão do simulador, obteve-se indicadores de correlação linear ( $R^2$ ) de 0,96 de atraso em fila, como mostra a Figura 2.3, com as seguintes variáveis e seus respectivos coeficientes (Tabela 2.1).

Figura 2.3: Atraso em fila estimado *versus* simulado



Fonte: Washburn *et al.* (2008)

Tabela 2.1: Estatísticas das variáveis de correlação linear para estimativa de atraso

<b>Fator</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Estatística <i>t</i></b>
Tempo de Verde / Ciclo (%)	-0,276980	-8,2305
Fluxo / Saturação (%)	0,242061	6,6899
Ciclo (s)	0,003387	7,5329
Tempo de Verde (s)	0,148503	58,3398
% Veículos Pesados x Tempo de Verde	-0,001376	-18,8804

Fonte: Washburn *et al.* (2008)

Os autores ainda compararam os resultados da simulação com os modelos propostos em Cassidy e Han (1993) e Son (1999), para os quais sugeriram o aumento do fluxo de saturação teórica e redução do tempo perdido e exclusão da variável de extensão de tempo de verde, argumentando que essa variável é prejudicial ao desempenho do sistema e pode ser anulada através de capacitação dos operadores de Pare e Siga.

No trabalho de Zhu *et al.* (2017), o software de microssimulação de tráfego VISSIM foi utilizado para comparar os cenários de programações fixas e dinâmicas de semáforos para controle do tráfego em segmentos de rodovia de pista simples em obras. Como resultado, ficou evidente uma significativa redução dos indicadores de fila e de atraso, devido ao dimensionamento dos tempos de verde a cada ciclo proporcionado pelas programações dinâmicas.

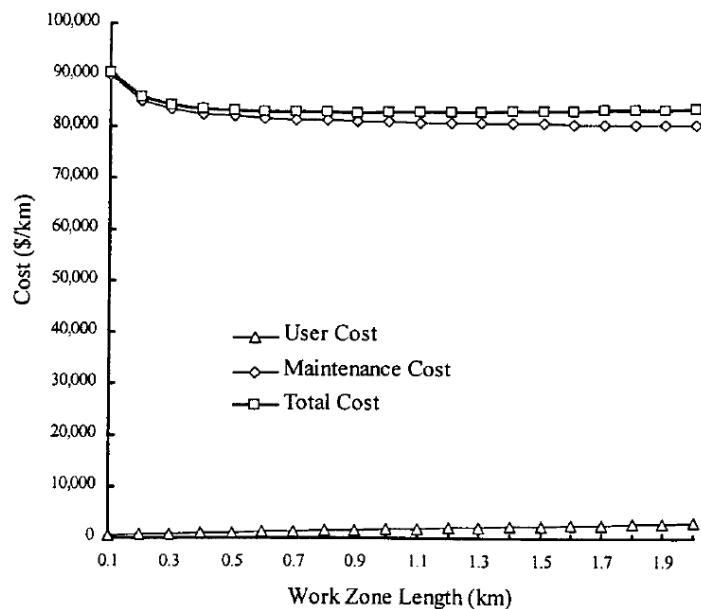
Na sequência, Hua *et al.* (2019) abordaram a mesma temática e apresentaram uma análise comparativa de métodos de controle de tráfego para bloqueio de faixa em rodovias de pista simples. Foram considerados quatro estratégias de controle: operadores Pare e Siga (*flaggers control*) seguindo as premissas definidas em Washburn *et al.* (2008), semáforos de tempo fixo proposto por Schonfeld e Chien (1999), semáforos de tempo fixo adaptado de Webster (1958) e semáforos atuados. Para simulação dos cenários com semáforos atuados, os autores analisaram a sensibilidade do posicionamento dos detectores e dos tempos de extensão de verde. Por fim, os resultados mostraram melhores desempenhos das estratégias de Pare e Siga e semáforos atuados em detrimento dos semáforos de tempo fixo, sobretudo devido ao comportamento dinâmico dos tempos de verde e, conseqüentemente, dos ciclos.

### 2.3 Análise de custos

Alguns estudos ainda exploraram as relações entre as medidas de desempenho e os custos envolvidos. Schonfeld e Chien (1999) apresentaram um método para determinar os comprimentos de zonas de obra e de tempos de ciclo que minimizem à ponderação de custos

de manutenção e de usuários. Um modelo matemático determinístico foi desenvolvido, baseando-se no processo de descarga de filas para calcular os tempos de ciclo e de atraso total. A partir da modelagem dos custos de valor do tempo dos usuários e de manutenção da obra, foi possível estimar os custos de usuário, de manutenção e total, conforme o comprimento de obra e os fluxos direcionais do segmento. A Figura 2.4 exemplifica as curvas de custo obtidas para cada cenário de comprimento de zona de obra e um fluxo direcional combinado de 700 veículos por hora. Uma característica interessante admitida diz respeito à relação entre extensão do canteiro de obras e custos de manutenção. À medida que aumenta o espaço disponível cresce a produtividade da manutenção, reduzindo os custos relacionados. Por fim, os autores calcularam uma equação derivada da função de custo total para estabelecer o comprimento ótimo de obra.

Figura 2.4: Custos de usuário, de manutenção e total *versus* comprimento de zona de obra (fluxo total de 700 veículos por hora)



Fonte: Schonfeld e Chien (1999)

Posteriormente, Chien *et al.* (2002) aprimoraram a metodologia para definir um sequenciamento ótimo, considerando a variação da demanda de tráfego ao longo do tempo. Para isso, foi necessário decompor as funções de custo de manutenção, abordando a variável tempo para prever, inclusive, os custos de paralisação da obra, quando necessário. O resultado do modelo determina os períodos de início e fim de cada fase e o respectivo comprimento da zona de obras.

O mesmo objeto de estudo ainda foi explorado em Chen e Schonfeld (2004), os quais desenvolveram dois métodos de otimização, os quais consistem em adaptações do modelo de Powell e da heurística *Simulated Annealing* para determinação do plano de trabalho ótimo,

contemplando comprimento de zona de obras, início e duração de cada etapa e tamanho do ciclo dos bloqueios de faixa. Como conclusão do estudo, o método de *Simulated Annealing* obteve resultados mais satisfatórios com tempos computacionais inferiores.

Outros trabalhos ainda podem ser encontrados na literatura abordando a questão dos custos em zonas de obras de rodovias de pista simples. Chen *et al.* (2005) avaliam os custos de intervenção variação da demanda em função da demanda e da relação fluxo/capacidade, considerando desvios de tráfego em rotas alternativas. Huang e Chi (2008) apresentam um método de tentativa e erro para determinar o comprimento ideal da zona de obras e o melhor horário para início das atividades, visando minimizar o custo de manutenção.

## **2.4 Especificação Técnica da ARTESP**

No contexto brasileiro, mais recentemente, a ARTESP desenvolveu uma especificação técnica, cujo título é “Metodologia para Obtenção Nível de Serviço no Plano Operacional” fornece diretrizes para análise do comportamento esperado do tráfego e para determinação do Nível de Serviço Operacional em trechos em obra, sob a influência de desvios provisórios que impactam na fluidez rodoviária (ARTESP, 2019). O método apresentado nesse documento consiste em uma adaptação de métodos diversos descritos no HCM-6 (TRB, 2016) e tem a finalidade de normatizar o planejamento de obras em rodovias do estado de São Paulo.

O objetivo do documento é padronizar o procedimento de análise dos segmentos em obras, de forma que todas as concessionárias executem esta atividade de modo único. São apresentados métodos específicos para desvio de obras em vias expressas ou múltiplas faixas e em pista simples. Especificamente para segmentos de pista simples, a modelagem considera os efeitos da operação Pare e Siga sobre a corrente de tráfego e o processo de mudança do tráfego ininterrupto, característico de vias rurais, para uma condição de fluxo interrompido, semelhante ao funcionamento de uma interseção semaforizada.

O método descrito depende de informações de tráfego, como demandas de tráfego, velocidade de deslocamento e porcentagem de veículos pesados), configuração geométrica (largura da pista, distância lateral, limite de velocidade) e dados da obra (incluindo o comprimento do desvio de obra, o tempo de sinal verde e o plano operacional), para calcular medidas de desempenho como atraso e tamanho da fila, passando por indicadores operacionais intermediários como a capacidade e a duração do ciclo.

#### 2.4.1 Velocidade média

Inicialmente, são estabelecidas as velocidades médias de viagem (ATS) através da seguinte formulação:

$$s_1 = 0,615s_L - f_{LS} - f_A - 3,86 \quad (2.1)$$

$$s_2 = 0,692s_L - f_{LS} - f_A - 3,86 \quad (2.2)$$

em que:  $s_1$ : velocidade na direção de pista com desvio, em km/h;  
 $s_2$ : velocidade na direção de pista livre, em km/h;  
 $s_L$ : velocidade regulamentada para o segmento, em km/h;  
 $f_{LS}$ : ajuste da velocidade para largura da faixa e distância do obstáculo, em km/h;  
 $f_A$ : ajuste da velocidade para densidade de pontos de acesso, em km/h;

#### 2.4.2 Fluxo de saturação

O fluxo de saturação ( $Q_i$ ) pode ser calculado a partir das velocidades ajustadas para o desvio de obras:

$$Q_i = \frac{3600}{h} \quad (2.3)$$

$$h = h_0 \times f_{velocidade,i} \quad (2.4)$$

$$f_{velocidade,i} = 1 - 0,0033 \times [\text{mínimo}(s_i, 70) - 70] \quad (2.5)$$

em que:  $Q_i$ : fluxo de saturação para a direção  $i$  (cp /h);  
 $h$ : tempo ajustado de *headway* para a direção  $i$  (s);  
 $h_0$ : *headway* de saturação de base (s/cp) = 3.600/1.900 = 1,89 s/cp;  
 $f_{velocidade,i}$ : ajuste da velocidade média de viagem para a direção  $i$  (decimal).

#### 2.4.3 Tempo de verde

O próximo passo consiste na determinação do “tempo de verde direcional ideal”. Essa definição, no entanto, não está clara no documento e depende exclusivamente do comprimento de obras, não incorporando sequer variáveis como fluxo e velocidade do trecho:

$$G_{opt} = \begin{cases} 20 & 0,12303 \times L < 20 \\ 0,12303 \times L & 20 \leq 0,12303 \times L < 60 \\ 60 & 0,12303 \times L \geq 60 \end{cases} \quad (2.6)$$

em que:  $G_{opt}$ : tempo de verde direcional ideal, em segundos;

$L$ : comprimento do trecho de obras, em metros.

Em seguida, os tempos de verde efetivo e de ciclo são determinados a partir das seguintes equações:

$$G_i \geq G_{i,min} = \frac{v_i}{Q_i - v_i} \times (C - G_i) \quad (2.7)$$

$$C = \frac{L}{s_1/3,6} + \frac{L}{s_2/3,6} + G_1 + G_2 + 2l_s \quad (2.8)$$

em que:  $G_i$ : tempo de verde efetivo para a direção  $i$  (s);

$G_{i,min}$ : tempo de verde mínimo para a direção  $i$  (s);

$v_i$ : fluxo de demanda para a direção  $i$  (cp/h);

$C$ : comprimento do ciclo (s);

$l_s$ : tempo perdido de arranque (s).

#### 2.4.4 Capacidade

O cálculo da capacidade direcional do Pare e Siga é semelhante ao aplicado para determinação da capacidade de uma aproximação semaforizada, descrita no HCM-6 (TRB, 2016), como mostra a equação a seguir:

$$cap_i = \frac{Q_i \times G_i}{C} \quad (2.9)$$

em que:  $cap_i$ : capacidade da direção  $i$  (cp/h).

A capacidade total da intervenção, portanto, pode ser calculada da seguinte forma:

$$cap_{total} = cap_1 + cap_2 = \frac{Q_1 \times G_1 + Q_2 \times G_2}{C} \quad (2.10)$$

em que:  $cap_{total}$ : capacidade total do trecho em obras (cp/h).

#### 2.4.5 Fila e Atrasos

Considerando um fluxo de tráfego determinístico para ambas as direções, o comprimento máximo de fila pode ser estabelecido pelo número de veículos, a cada ciclo, que chegam enquanto o acesso está bloqueado, ou seja:

$$Q_{1,max} = \frac{v_1 \times (C - G_1)}{3600} = \frac{v_1}{3600} \times \left( \frac{L}{s_1/3,6} + \frac{L}{s_2/3,6} + G_2 + 2l_s \right) \quad (2.11)$$

$$Q_{2,max} = \frac{v_2 \times (C - G_1)}{3600} = \frac{v_2}{3600} \times \left( \frac{L}{s_1/3,6} + \frac{L}{s_2/3,6} + G_1 + 2l_s \right) \quad (2.12)$$

em que:  $Q_{i,max}$ : comprimento máximo de fila, em cp.

O cálculo do atraso médio também se baseou na formulação para interseções semaforizadas, conforme descrito no HCM-6 (TRB, 2016). O atraso dos veículos em cada aproximação pode ser calculado em duas componentes, em que a primeira ( $d_{1,i}$ ) é determinística, assumindo chegadas de veículos uniformes, enquanto a segunda ( $d_{2,i}$ ) é resultante de chegadas aleatórias e saturação excessiva de filas:

$$d_{1,i} = \frac{Q_i \times (C - G_i)^2}{2(Q_i - v_i) \times C} \quad (2.13)$$

$$d_{2,i} = 900T \left[ (X_i - 1) + \sqrt{(X_i - 1)^2 + \frac{8 \times k \times I \times X_i}{cap_i \times T}} \right] \quad (2.14)$$

em que:  $d_{1,i}$ : atraso total de controle direcional uniforme por ciclo (s/cp);

$d_{2,i}$ : média incremental de atraso na direção  $i$  (s/cp);

$T$ : duração do período de análise (h);

$k$ : fator de atraso incremental (decimal), adotado = 0,50;

$I$ : fator de ajuste de filtragem a montante (decimal), adotado = 1,0;

$cap_i$ : capacidade direcional (cp/h);

$X_i$ : relação volume/capacidade direcional ou grau de saturação (adimensional).

O atraso médio por carro de passeio pode ser obtido, então, a partir da seguinte equação:



$$d = \frac{(d_{1,1} + d_{2,1})v_1 + (d_{1,2} + d_{2,2})v_2}{v_1 + v_2} \quad (2.15)$$

em que:  $d$ : atraso médio por carro de passeio (s/cp)

#### 2.4.6 Determinação do Nível de Serviço

Por último, a especificação técnica ainda indica a utilização dos mesmos parâmetros adotados para determinação de nível de serviço em interseções semaforizadas, como mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Determinação do nível de serviço em interseções semaforizadas

Nível de Serviço	Atraso por veículo (s/cp)
A	$d \leq 10$
B	$10 < d \leq 20$
C	$20 < d \leq 35$
D	$35 < d \leq 55$
E	$55 < d \leq 80$
F	$d > 80$

Fonte: Adaptado de HCM-6 (TRB, 2016)

#### 2.4.7 Análise do método

A partir de uma análise criteriosa da formulação matemática apresentada, identificou-se alguns pontos de atenção. O primeiro deles diz respeito à limitação da aplicação da metodologia para comprimentos de obra de até 500 metros, sem uma motivação explícita no corpo do texto. Ao observar atentamente as equações apresentadas, infere-se que esteja relacionado ao cálculo de tempo de verde direcional ideal, como mostra a Equação (2.6), em que o valor de 500 metros se aproxima da razão entre o limite superior do tempo de verde e o coeficiente em função do comprimento de obra (0,12303).

Ainda nessa equação, é importante observar que o cálculo do tempo de verde ótimo do Pare e Siga depende exclusivamente do comprimento de obra. A crítica a essa abordagem está relacionada à ausência de fatores como volume de tráfego e velocidade do trecho, que claramente impactam no processo de dissipação de filas (como a intervenção deve ser avaliada) e, conseqüentemente, no dimensionamento do ciclo no trecho.

Em seguida, o cálculo do tempo de verde efetivo, na equação (2.7), não considera os tempos de limpeza, os quais representam o tempo improdutivo no ciclo. Devido a essas divergências,

o próprio exemplo de aplicação da metodologia, ao final do documento, gerou resultados inconsistentes.

Primeiro, a soma das capacidades do trecho em obras nas duas direções superou os fluxos de saturação estabelecidos anteriormente, o que não reflete a perda de capacidade devido aos tempos improdutivos do ciclo. Com fluxos de saturação de 1.707 cp/h e 1.735 cp/h para as direções 1 e 2, respectivamente, os cálculos resultaram em 978 cp/h e 966 cp/h, na mesma ordem, totalizando 1.944 cp/h.

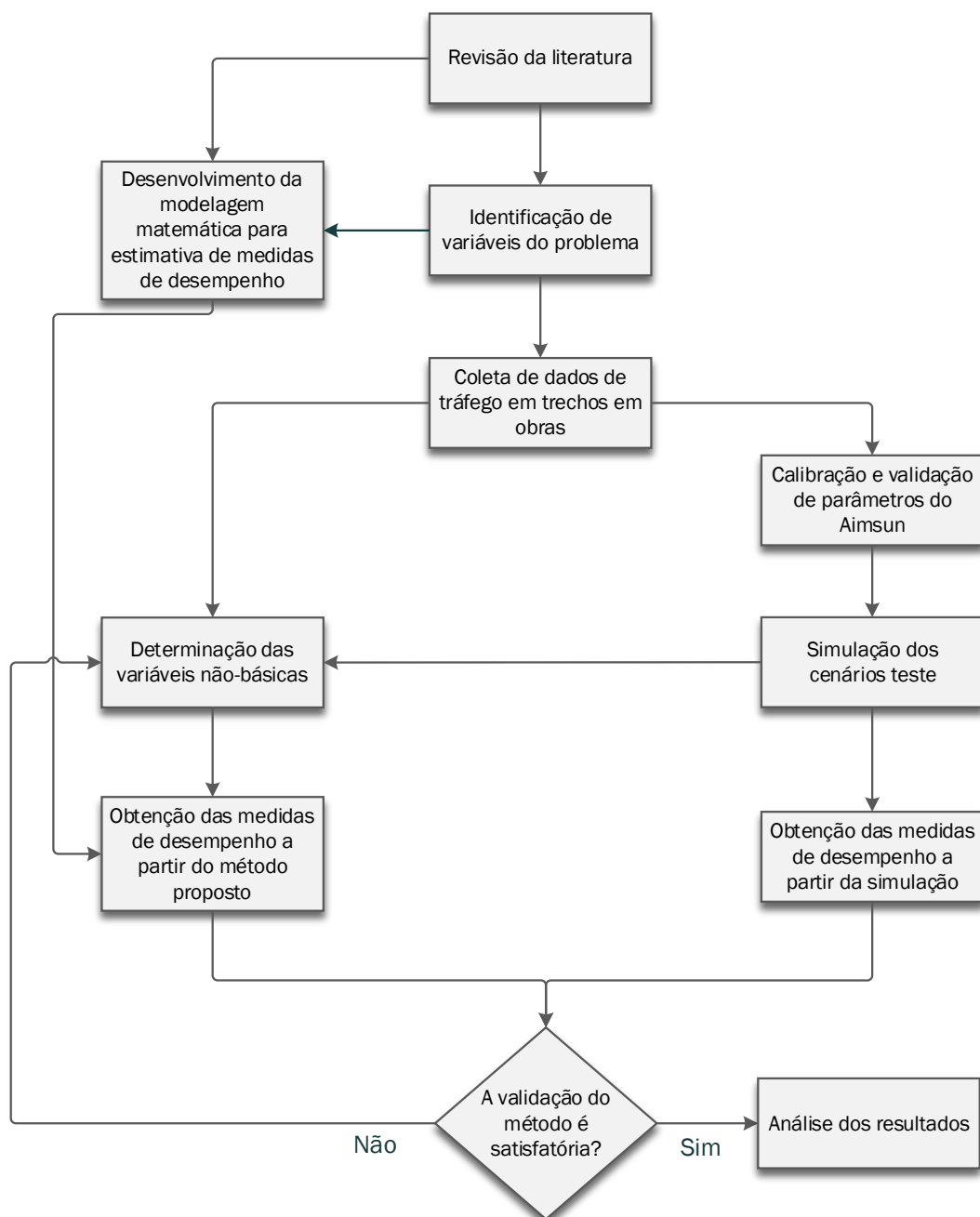
Outro ponto diz respeito ao cálculo dos tempos de atraso, que adotam o mesmo método descrito no HCM-6 (2016) para interseções semaforizadas com programações de tempo fixo. Essas interseções, no entanto, possuem comportamento distinto do procedimento padrão de intervenção Pare e Siga. Enquanto a programação fixa de semáforo deve prever uma margem de tempo de verde para minimizar os efeitos da aleatoriedade da demanda, os operadores de Pare e Siga atuam dinamicamente, dimensionando os tempos de verde somente para dissipação de filas. Assim sendo, a componente 2 do tempo de atraso ( $d_{2,i}$ ), que reflete o tempo incremental resultante de chegadas aleatórias e saturação excessiva, não faz sentido para esse tipo de intervenção.

Por último, os critérios adotados para determinação do nível de serviço são os mesmos preconizados pelo HCM-6 (2016) para interseções semaforizadas. No entanto, esse critério não observa diferenças básicas entre as duas situações. Os tempos de limpeza em zonas de obras são bem mais elevados do que em interseções semaforizadas típicas, pois devem ser suficientemente grandes para garantir o percurso completo ao longo do desvio de obras.

### 3 MÉTODO

Para o desenvolvimento do estudo, foi proposta a utilização de modelagem matemática e de microsimulação de tráfego para estabelecer parâmetros e variáveis que expliquem as condições de tráfego em segmentos de rodovia de pista simples durante a execução de obras. O objetivo é criar um método que permita determinar medidas de desempenho dos trechos submetidos a interrupção de tráfego do tipo Pare e Siga durante a intervenção. A Figura 3.1 sintetiza a sequência das etapas metodológicas cumpridas neste trabalho, que são melhor detalhadas nas seções a seguir.

Figura 3.1: Fluxograma das etapas metodológicas



O processo se iniciou pelo desenvolvimento do método, que consiste na modelagem matemática do problema para estimativa de medidas de desempenho, identificando, por meio de uma revisão da literatura, variáveis que influenciam as medidas de desempenho da intervenção. Em seguida, foram realizadas coletas de dados em segmentos de pista simples durante a execução de obras. Foram levantadas características da corrente de tráfego e do processo de descarga de fila, que serviram como base para determinação de variáveis do modelo matemático desenvolvido e para calibração e validação do modelo de microssimulação de tráfego do Aimsun. Em seguida, realizou-se diversas simulações de cenários teste definidos, cujos resultados serviram tanto para determinação das variáveis envolvidas, quanto para validar os indicadores obtidos através da aplicação do modelo matemático desenvolvido. Caso os resultados da validação das medidas de desempenho seja satisfatória, conclui-se que o modelo matemático é representativo para o problema em estudo. Caso contrário, retoma-se ao processo de identificação e determinação de variáveis não-básicas que justifiquem a diferença de resultados entre os métodos.

### **3.1 Formulação matemática**

Essa etapa visa estabelecer relações matemáticas entre as variáveis de geometria e de tráfego com as medidas de desempenho mais relevantes para caracterizar as condições de tráfego no segmento. Foi proposta uma formulação baseada em Teoria de Filas, considerando as semelhanças entre uma operação de Pare e Siga e um processo de descarga de filas em semáforos.

A modelagem matemática desenvolvida permitiu estimar medidas de desempenho, tais como atraso médio dos usuários da rodovia, tamanho de pelotão e capacidade, baseado em características como fluxo, velocidade e comprimento de obra. Como indicadores secundários, o método ainda determina o ciclo operacional da intervenção, com os respectivos tempos de verde efetivo e tempos de limpeza por direção, e analisa as relações com o comprimento de obra e a capacidade do trecho.

### **3.2 Coleta e análise de dados**

A etapa de coleta de dados foi realizada através da observação direta das condições de tráfego em zonas de obras em rodovias de pista simples, com o objetivo de caracterizar o comportamento dos motoristas nesses segmentos. Foram realizadas filmagens durante a execução de obras em duas rodovias de pista simples, com o objetivo de identificar características locais como fluxo de tráfego, tempo médio de ciclo, tamanho de pelotão,

velocidade média e fator de equivalência de veículos pesados durante o regime de Pare e Siga. Os parâmetros analisados nesse levantamento são úteis tanto para determinação de variáveis não-básicas do método proposto, tais como velocidade média, fluxo de saturação, tempo perdido e fatores de equivalência do caminhão, quanto para determinação de parâmetros dos modelos de microsimulação de tráfego. Foram observadas algumas variáveis como tempo perdido, velocidade média dos veículos, *headways* por tipos de veículos e fluxos de descarga de filas.

De forma complementar, foram obtidos registros de veículos coletados através de um SAT (Sistema de Análise de Tráfego) durante uma intervenção na pista, permitindo avaliar as variações de velocidade e *headway* nos períodos sem e com obras.

### **3.3 Microsimulação de tráfego**

Os modelos de microsimulação de tráfego simulam o comportamento individual de veículos e motoristas em uma rede viária, com o objetivo de prever os impactos relativos a mudanças nos padrões de tráfego e na circulação viária. Diante disso, trata-se de uma técnica que permite explorar diversas características geométricas, sob diferentes condições de demanda, tipos de veículo, características do motorista, entre outros (SONG *et al.*, 2012). A dificuldade em se obter informações em campo abundantes, devido às limitações financeiras, técnicas, de equipamentos ou de ambientes de tráfego (JIAN *et al.*, 2004) torna a simulação uma importante ferramenta para a obtenção de dados de forma exaustiva e experimental.

Uma vez obtidos os dados referentes às condições operacionais de zonas de obras em rodovias de pista simples, construiu-se um modelo de microsimulação de tráfego que represente, de forma adequada, o comportamento real dos fluxos de veículos. Utilizou-se, para tanto, o software Aimsun Next, atualmente na versão 20 (AIMSUN, 2020), que é um dos simuladores de tráfego mais difundidos no meio técnico-científico e possui interface e componentes adequados para a realização dos testes propostos neste estudo.

A calibração do simulador depende de ajustes de parâmetros de geometria das vias, de comportamento dos motoristas, de desempenho dos veículos, entre outros. Dentre os parâmetros dos tipos de veículo que exercem influência sobre o problema em estudo, destacam-se a velocidade máxima desejada, peso, potência, tempo de reação, aceleração e desaceleração e aceitação do limite de velocidade.

Os resultados obtidos foram confrontados com as condições operacionais observadas em campo, a fim de se obter critérios estatísticos de validação. Uma vez finalizada a calibração, considera-se o simulador de tráfego representativo das condições reais para realização de testes.

### **3.4 Análise dos resultados**

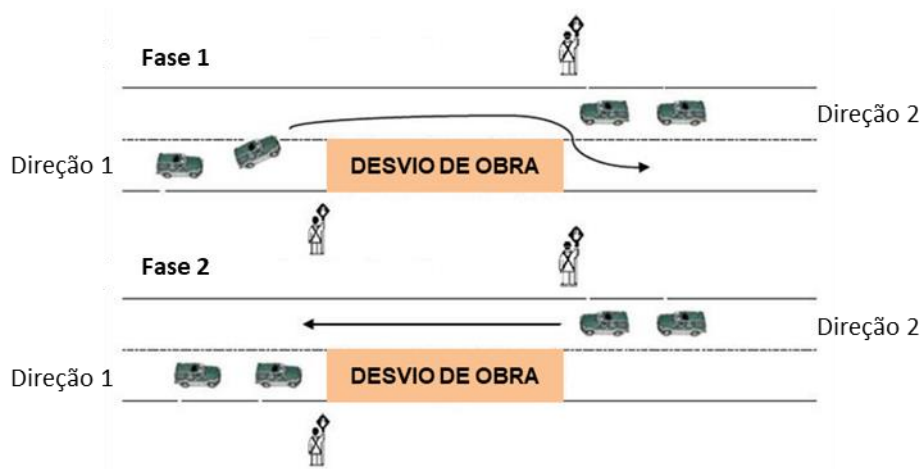
Por fim, uma vez calibrado e validado o simulador de tráfego, foram realizados diversos experimentos variando-se fluxo de tráfego, percentual de veículos pesados e comprimentos de obra, produzindo uma ampla amostragem de variáveis e indicadores operacionais. A partir desses resultados, foram analisadas variáveis que caracterizam o comportamento no desvio de obras, tais como fator de equivalência de veículos pesados, velocidade média no desvio de obras, tempo perdido e fluxos de descarga, as quais são responsáveis pela adequação do modelo teórico para as condições reais do tráfego.

Na sequência, empregou-se técnicas de regressão linear para comparar os resultados de medidas de desempenho (atraso médio e tamanho médio de pelotão) obtidas através do método desenvolvido e da simulação. Caso a validação seja satisfatória, pode-se inferir que o método é capaz de prever as condições de tráfego em intervenções Pare e Siga, durante a execução de obras em segmentos de rodovia de pista simples. Caso contrário, as variáveis não-básicas são novamente avaliadas, com a finalidade de identificar variações de comportamento ainda não inseridas no método.

## 4 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O bloqueio de uma faixa em segmentos de rodovias de pista simples converte o fluxo ininterrupto em uma condição de tráfego interrompido. A Figura 4.1 ilustra a configuração de um desvio de obra em segmento de pista simples. Nesse exemplo, o canteiro de obras está localizado na faixa de tráfego da Direção 1, cujos veículos devem efetuar o desvio pela faixa contrária. Nesse sentido, deve haver controle de acesso no trecho conflitante para evitar a colisão de veículos durante o desvio.

Figura 4.1: Exemplo de configuração do desvio de obra em segmento de pista simples



Fonte: Adaptado de ARTESP (2019)

Por meio de dispositivos de controle de tráfego (bandeiras ou sinais) localizados em cada extremidade, a operação de fechamento da via é semelhante ao funcionamento dos semáforos. Ambos servem para controlar o acesso de fluxos conflitantes a um local específico, seja uma interseção, como é o caso dos semáforos, seja um trecho em obras, que requer uma intervenção Pare e Siga. De maneira geral, são quatro as fases envolvidas nesse sistema:

- **$G_1$** : tempo de verde (*green*) da Direção 1, ou seja, período em que o trânsito está liberado no ponto de controle da Direção 1 e bloqueado na Direção 2;
- **$CT_1$** : tempo de limpeza (*clearance time*) dos veículos na Direção 1, ou seja, intervalo necessário para os veículos percorrerem o trecho. Nesse intervalo, ambos os pontos de controle estão bloqueados;
- **$G_2$** : tempo de verde da Direção 2, ou seja, período em que o trânsito está liberado no ponto de controle da Direção 2 e bloqueado na Direção 1;
- **$CT_2$** : tempo de limpeza dos veículos na Direção 2; ambos os pontos de controle estão bloqueados.

Nas seções a seguir, são apresentadas as formulações para dimensionamento das fases, bem como para cálculo de indicadores operacionais como tamanho de pelotão e atraso médio. São descritas, ainda, equações para determinação de comprimento máximo de obra e da capacidade baseado em valores limites de pelotão e atraso.

#### 4.1 Tempo de limpeza

O dimensionamento das fases  $CT_1$  e  $CT_2$  depende, exclusivamente, do comprimento do trecho em obras e da velocidade média no trecho:

$$CT_1 = \frac{L}{s_1/3,6} \quad (4.1)$$

$$CT_2 = \frac{L}{s_2/3,6} \quad (4.2)$$

em que:  $CT_1, CT_2$ : tempos de limpeza nas direções 1 e 2, em segundos;

$L$ : comprimento do trecho em obras, em metros;

$s_1, s_2$ : velocidades médias (em km/h) dos trechos nas direções 1 e 2

#### 4.2 Ciclos e tempos de verde

A determinação do tempo médio das fases  $G_1$  e  $G_2$ , por sua vez, é mais complicada, pois depende de uma série de fatores como volumes de tráfego por sentido, fluxos de saturação e tempo de ciclo. Primeiramente, deve-se entender a diferença das operações de um sistema Pare e Siga e de um semáforo tradicional de tempo fixo.

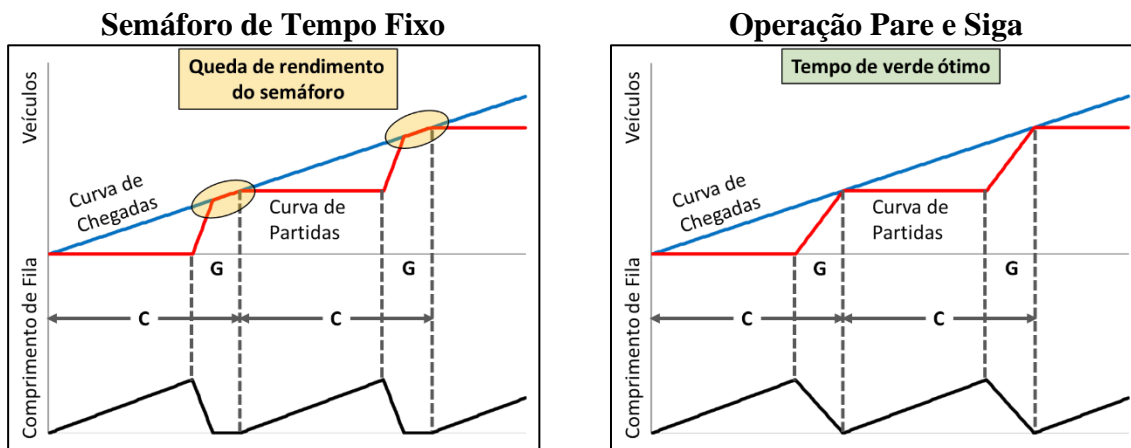
Nos semáforos de tempo fixo, o dimensionamento do tempo de verde deve prever um intervalo adicional, além dos níveis médios de saturação, para suportar a aleatoriedade da demanda de veículos por ciclo, o que promove naturalmente a queda de rendimento do semáforo. A intervenção Pare e Siga, por sua vez, tem a capacidade de adaptar o ciclo de operações de acordo com a demanda em cada sentido. Seu princípio básico consiste em liberar o tráfego até atender todos os veículos em fila em cada direção. Inclusive, esse é o procedimento de operação ótimo dessas intervenções. A Figura 4.2 ilustra as duas situações representadas em diagramas de filas, considerando-se chegadas e partidas determinísticas.

O diagrama apresentado, inclusive, orienta todos os passos seguintes da formulação. Por simplificação, os cálculos são realizados a partir de valores determinísticos. Como dito anteriormente, uma das características da operação Pare e Siga é a sua capacidade de adaptação



à variação da demanda, não havendo perda de rendimento dos tempos de verde. Isso quer dizer que, independentemente do período de análise especificado, o tempo de verde total, para cada direção, é proporcional ao fluxo de veículos do trecho, variando, a cada ciclo, de forma compensatória, em torno da média. Justamente por isso, entende-se que a determinação das medidas de desempenho baseada em valores médios seja representativa.

Figura 4.2: Diagrama de fila para semáforos de tempo fixo e operação Pare e Siga



A premissa fundamental do método consiste no dimensionamento do tempo de verde, até igualar as curvas acumuladas de chegadas e de partidas, momento no qual se inicia a inversão do sentido de circulação no trecho impedido. Em termos matemáticos, a capacidade ofertada deve ser estritamente igual à demanda de veículos em cada sentido. Dessa forma, tem-se a seguinte equação para determinação do verde efetivo para cada direção:

$$\frac{g_i}{C} = \frac{v_i}{Q_i} \Rightarrow g_i = \frac{v_i \times C}{Q_i} \quad (4.3)$$

- em que:
- $C$ : ciclo médio, em segundos;
  - $g_i$ : tempo de verde efetivo para a direção  $i$ , em segundos;
  - $v_i$ : fluxo da direção  $i$ , em cp/h (carros de passeio por hora)
  - $Q_i$ : fluxo de saturação para a direção  $i$ , em cp/h.

A componente faltante para determinação do comprimento do ciclo é denominada Tempo Perdido ( $LT$  - *Lost Time*), que abrange os tempos de limpeza para cada sentido ( $CT_1$  e  $CT_2$ ) e o tempo perdido para a liberação do tráfego ( $l_s$ ), ou seja, intervalo entre a passagem do último veículo no sentido contrário e a liberação do acesso ao segmento em obras:

$$LT = CT_1 + CT_2 + 2l_s = \frac{L}{s_1/3,6} + \frac{L}{s_2/3,6} + 2l_s \quad (4.4)$$

em que:  $LT$ : tempo perdido, correspondente à soma dos tempos de travessia do trecho nas direções 1 e 2 com os tempos de arranque, em segundos;  
 $CT_1, CT_2$ : tempos de limpeza, ou seja, tempos de travessia do trecho nas direções 1 e 2, em segundos;  
 $l_s$ : tempo perdido para a liberação do tráfego, em segundos;  
 $L$ : comprimento de obras, em metros.

As equações a seguir mostram a dedução do cálculo do Ciclo, que depende tanto do grau de saturação total do trecho ( $v/Q$ ), quanto do comprimento de obra, parâmetro para determinação do Tempo Perdido (Equação 4.4).

$$C = g_1 + g_2 + LT \quad (4.5)$$



$$C = \frac{v_1 \times C}{Q_1} + \frac{v_2 \times C}{Q_2} + LT \quad (4.6)$$



$$C = \frac{LT}{1 - \left(\frac{v_1}{Q_1} + \frac{v_2}{Q_2}\right)} \quad (4.7)$$

### 4.3 Tamanho de pelotão

A partir da determinação do Ciclo ( $C$ ) e, conseqüentemente, dos tempos de verde efetivo, é possível determinar o número médio de veículos atendidos por ciclo, em cada direção, que representa um dos principais efeitos negativos da operação Pare e Siga. Ao manter os veículos parados nos acessos do segmento em obras e, em seguida, liberá-los, formam-se pelotões que prejudicam as condições de tráfego dos usuários. Quanto maior o acúmulo de veículos nesse processo, maiores serão os efeitos dos veículos pesados no tráfego à jusante, necessitando de mais ultrapassagens e tempo para dispersão dos pelotões.

A partir do dimensionamento das fases operacionais da intervenção Pare e Siga, é possível calcular o tamanho médio de pelotão, que consiste na divisão do fluxo direcional de tráfego – que é o total de veículos que experimentaram fila em uma hora – pelo número de ciclos em uma hora, como mostra a equação a seguir:

$$P_i = \frac{v_i}{\frac{3600}{C}} = v_i \times \frac{C}{3600} \quad (4.8)$$

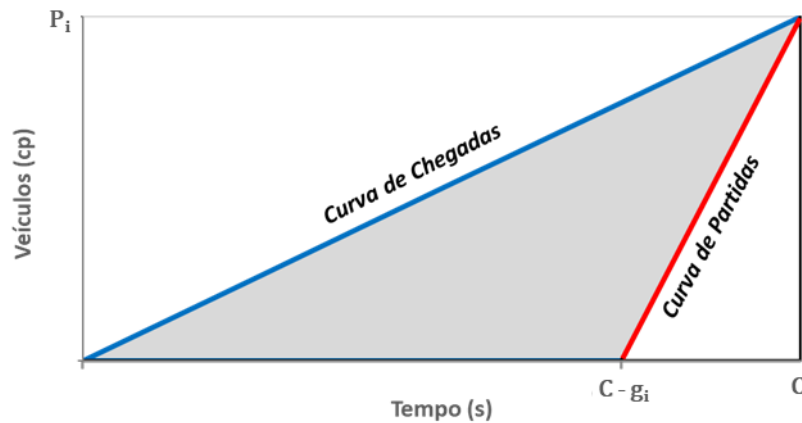
em que:  $P_i$ : tamanho médio de pelotão, em veículos, para a direção  $i$ ;

#### 4.4 Atraso médio

O cálculo do atraso médio se baseia, também, no diagrama de filas (vide Figura 4.3). Nessa imagem, são representadas as seguintes variáveis:

- $P_i$ : tamanho do pelotão ou número de veículos atendidos por ciclo na direção  $i$ ;
- $g_i$ : tempo de verde efetivo para a direção  $i$ , em segundos;
- $C$ : tempo de ciclo, em segundos.

Figura 4.3: Diagrama de fila da operação Pare e Siga para determinação de atraso



Graficamente, a área do triângulo cinza formada entre as curvas de chegadas e partidas corresponde ao atraso total dos veículos no ciclo. Tem-se, portanto, a seguinte formulação:

$$dT_i = \frac{N_i \times (C - g_i)}{2} \quad (4.9)$$

em que:  $dT$ : tempo total de atraso da direção  $i$ , em cp x s;

Isso quer dizer que o atraso médio dos veículos atendidos na direção  $i$  ( $d_i$ ) equivale à metade do tempo de vermelho efetivo dessa direção, como mostra a equação abaixo:

$$d_i = \frac{dT_i}{N_i} = \frac{(C - g_i)}{2} \quad (4.10)$$

Por sua vez, o atraso médio  $d$ , em segundos, pode ser obtido pela média ponderada dos atrasos direcionais pelos fluxos correspondentes:

$$d = \frac{d_1 \times v_1 + d_2 \times v_2}{v_1 + v_2} \quad (4.11)$$

## 4.5 Capacidade

A capacidade, especificamente no caso da operação Pare e Siga, consiste no somatório dos fluxos direcionais máximos, a partir de condições pré-estabelecidas, tais como velocidade, fluxos de saturação e comprimento de obras. Também está condicionada à definição de parâmetros operacionais aceitáveis, tais como valores limite de tamanho médio de pelotão ( $P_{lim}$ ) e de atraso médio ( $d_{lim}$ ). As seções a seguir apresentam a dedução das fórmulas para determinação de capacidade em função dessas condicionantes, separadamente.

### 4.5.1 Capacidade *versus* pelotão

O tamanho médio de pelotão em cada direção depende diretamente do fluxo direcional correspondente e do tempo de ciclo, como mostra a equação a seguir:

$$P_i = \frac{v_i \times C}{3600} \quad (4.12)$$

Considerando que o maior pelotão é formado na direção do fluxo principal, denotado como  $v_1$ , pode-se determinar o fluxo secundário da seguinte maneira:

$$v_2 = kv_1, \quad k \leq 1 \quad (4.13)$$

Assim, o ciclo pode ser calculado em função do tempo perdido total  $LT$ , dos fluxos de saturação  $Q_1$  e  $Q_2$  e do fluxo principal  $v_1$ :

$$C = \frac{LT}{1 - \left(\frac{v_1}{Q_1} + \frac{v_2}{Q_2}\right)} \Rightarrow C = \frac{LT}{1 - v_1 \left(\frac{1}{Q_1} + \frac{k}{Q_2}\right)} \quad (4.14)$$

Isso implica que a equação (4.12) toma a forma:

$$P_1 = \frac{v_1}{3600} \times \frac{LT}{1 - v_1 \left(\frac{1}{Q_1} + \frac{k}{Q_2}\right)} \Rightarrow \frac{v_1 LT}{3600} = P_1 \left(1 - v_1 \left(\frac{1}{Q_1} + \frac{k}{Q_2}\right)\right) \quad (4.15)$$

O fluxo principal pode ser, então, escrito em função do tamanho de pelotão médio:

$$\frac{v_1 LT}{3600} = P_1 - P_1 v_1 \left(\frac{1}{Q_1} + \frac{k}{Q_2}\right) \Rightarrow v_1 = \frac{P_1}{\frac{LT}{3600} + P_1 \left(\frac{1}{Q_1} + \frac{k}{Q_2}\right)} \quad (4.16)$$

Seja a capacidade definida ( $cap$ ) como o somatório dos fluxos direcionais máximos ( $v_{1,max}$  e  $v_{2,max}$ ):

$$cap = v_{1,max} + v_{2,max} = (k + 1)v_{1,max} \quad (4.17)$$

Aplicando-se essa equação sobre a (4.16) e considerando o tamanho de pelotão  $P_{lim}$  como uma condicionante para determinação da capacidade, tem-se a seguinte equação para estimar a capacidade:

$$cap = (k + 1)v_{1,max} = \frac{(k + 1)P_{lim}}{\frac{LT}{3600} + P_{lim} \left( \frac{1}{Q_1} + \frac{k}{Q_2} \right)} \quad (4.18)$$

Note que a determinação da capacidade depende de uma série de variáveis relacionadas ao problema, tais como fluxos de saturação direcionais ( $Q_1$  e  $Q_2$ ), tempo perdido ( $LT$ ) que, por sua vez, possui como parâmetros o comprimento do trecho de obras e as velocidades médias em cada direção, além da condicionante de tamanho limite do pelotão ( $P_{lim}$ ).

#### 4.5.2 Capacidade *versus* atraso médio

O atraso médio dos usuários que passam na intervenção pode ser obtido como uma média ponderada dos atrasos das aproximações pelos fluxos direcionais correspondentes:

$$d = \frac{d_1 v_1 + d_2 v_2}{v_1 + v_2} \quad (4.19)$$

Considerando, novamente, para efeitos de cálculo da capacidade, que o fluxo secundário  $v_2$  seja definido como uma proporção  $k$  do fluxo principal,  $v_1$ :

$$v_2 = k v_1, \quad k \leq 1 \quad (4.20)$$

A partir dessa formulação, a equação (4.19) pode ser descrita em função dos atrasos médios direcionais e da proporção  $k$ , como mostra a equação a seguir:

$$d = \frac{d_1 v_1 + k d_2 v_1}{v_1 + k v_1} = \frac{d_1 v_1 + k d_2 v_1}{v_1 + k v_1} = \frac{d_1 + k d_2}{k + 1} \quad (4.21)$$

Lembrando que o atraso médio direcional depende do ciclo e do tempo de verde:

$$d_i = \frac{C - g_i}{2} \quad (4.22)$$

E considerando que o tempo de verde pode ser definido da seguinte forma:

$$\frac{g_i}{C} = \frac{v_i}{Q_i} \Rightarrow g_i = \frac{C v_i}{Q_i} \quad (4.23)$$

A equação (4.22) pode ser reescrita como:

$$d_i = \frac{C - \frac{C v_i}{Q_i}}{2} = \frac{C}{2} \left(1 - \frac{v_i}{Q_i}\right) \quad (4.24)$$

Reescrevendo-se a Equação (4.21), de modo a usar as equações (4.14) e (4.24), tem-se que:

$$d = \frac{C \left[ \left(1 - \frac{v_1}{Q_1}\right) + k \left(1 - \frac{k v_1}{Q_2}\right) \right]}{2(k+1)} \Rightarrow 2d(k+1) = \frac{LT \left[ k + 1 - v_1 \left( \frac{1}{Q_1} + \frac{k^2}{Q_2} \right) \right]}{1 - v_1 \left( \frac{1}{Q_1} + \frac{k}{Q_2} \right)} \quad (4.25)$$

Isolando-se o fluxo direcional principal  $v_1$ , obtém-se a seguinte equação:

$$v_1 = \frac{1 - \frac{LT}{2d}}{\left( \frac{1}{Q_1} + \frac{k}{Q_2} \right) - \frac{v_1 LT}{2d(k+1)} \left( \frac{1}{Q_1} + \frac{k^2}{Q_2} \right)} \quad (4.26)$$

Adotando a formulação da capacidade definida em (4.17) e considerando o atraso médio limite  $d_{lim}$  como uma condicionante para determinação da capacidade, obtém-se a seguinte equação para estimar a capacidade:

$$cap = (k+1)v_{1,max} = \frac{(k+1) \left(1 - \frac{LT}{2d_{lim}}\right)}{\left( \frac{1}{Q_1} + \frac{k}{Q_2} \right) - \frac{LT}{2d_{lim}(k+1)} \left( \frac{1}{Q_1} + \frac{k^2}{Q_2} \right)} \quad (4.27)$$

## 4.6 Comprimento máximo de obra

A formulação para dimensionamento do comprimento máximo de obras é análoga aos cálculos para estimativa da capacidade, se baseando também em condicionantes como limites de tamanho médio de pelotão ( $P_{lim}$ ) e de atraso médio dos veículos ( $d_{lim}$ ). As formulações para determinação do comprimento máximo de obra em função de cada uma dessas variáveis são deduzidas nas seções a seguir.

### 4.6.1 Comprimento máximo *versus* pelotão

O tamanho médio de pelotão  $P_i$  na direção  $i$  é definido a partir da divisão entre o fluxo direcional  $v_i$  (em cp/h) e o número de ciclos durante o intervalo de uma hora. Considerando que o maior

pelotão é formado na direção do fluxo principal, denotado como  $v_1$ , e a equação (4.7) para determinação do ciclo  $C$  (em segundos), tem-se:

$$P_1 = \frac{v_1 \times C}{3600} = \frac{v_1}{3600} \times \frac{LT}{1 - \left(\frac{v_1}{Q_1} + \frac{v_2}{Q_2}\right)} \quad (4.28)$$

Isolando-se o tempo perdido  $LT$ , obtém-se a seguinte equação:

$$LT = \left(\frac{3600P_1}{v_1}\right) \left[1 - \left(\frac{v_1}{Q_1} + \frac{v_2}{Q_2}\right)\right] \quad (4.29)$$

Aplicando-se a equação (4.4), a qual dimensiona o tempo perdido total no ciclo de Pare e Siga em função do comprimento de obra  $L$ , das velocidades direcionais  $s_1$  e  $s_2$  e do tempo perdido para liberação do tráfego ( $l_s$ ), a equação toma a forma:

$$3,6L \left(\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2}\right) + 2l_s = \left(\frac{3600P_1}{v_1}\right) \left[1 - \left(\frac{v_1}{Q_1} + \frac{v_2}{Q_2}\right)\right] \quad (4.30)$$

O dimensionamento do comprimento máximo de obra  $L_{max}$ , considerando o tamanho limite de pelotão  $P_{lim}$ , pode ser obtido através da equação:

$$L_{max} = \frac{\left(\frac{1000P_{lim}}{v_1}\right) \left[1 - \left(\frac{v_1}{Q_1} + \frac{v_2}{Q_2}\right)\right] - \frac{l_s}{1,8}}{\left(\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2}\right)} = \frac{1000P_{lim} \left[1 - \left(\frac{v_1}{Q_1} + \frac{v_2}{Q_2}\right)\right] - \frac{l_s v_1}{1,8}}{v_1 \left(\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2}\right)} \quad (4.31)$$

Note que o comprimento máximo de obras depende de uma série de fatores, tais como grau de saturação do trecho, tempo perdido para liberação do tráfego, fluxo de veículos e velocidade média direcional, além da condicionante de limite de tamanho médio de pelotão.

#### 4.6.2 Comprimento máximo *versus* atraso

O atraso médio da intervenção é resultante da ponderação dos atrasos direcionais calculados pelos volumes de tráfego correspondentes. Substituindo-se os atrasos médios  $d_i$  pela equação (4.24), a equação pode ser reescrita como:

$$d = \frac{d_1 v_1 + d_2 v_2}{v_1 + v_2} = \frac{\frac{C}{2} \left[ \left(1 - \frac{v_1}{Q_1}\right) v_1 + \left(1 - \frac{v_2}{Q_2}\right) v_2 \right]}{v_1 + v_2} \quad (4.32)$$

Isolando-se o ciclo  $C$ , obtém-se:

$$C = \frac{2d(v_1 + v_2)}{\left[ \left(1 - \frac{v_1}{Q_1}\right) v_1 + \left(1 - \frac{v_2}{Q_2}\right) v_2 \right]} \quad (4.33)$$

A partir das equações (4.4) e (4.7), o ciclo também pode ser calculado como:

$$C = \frac{3,6L \left( \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} \right) + 2l_s}{1 - \left( \frac{v_1}{Q_1} + \frac{v_2}{Q_2} \right)} \quad (4.34)$$

Aplicando-se a equação (4.34) em (4.33), tem-se:

$$\frac{3,6L \left( \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} \right) + 2l_s}{1 - \left( \frac{v_1}{Q_1} + \frac{v_2}{Q_2} \right)} = \frac{2d(v_1 + v_2)}{\left[ \left(1 - \frac{v_1}{Q_1}\right) v_1 + \left(1 - \frac{v_2}{Q_2}\right) v_2 \right]} \quad (4.35)$$

O comprimento máximo de obras  $L_{max}$ , considerando o tempo limite de atraso médio  $d_{lim}$ , pode ser calculado da seguinte forma:

$$L_{max} = \left\{ \frac{2d_{lim}(v_1 + v_2) \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{Q_1} + \frac{v_2}{Q_2} \right) \right]}{\left[ \left(1 - \frac{v_1}{Q_1}\right) v_1 + \left(1 - \frac{v_2}{Q_2}\right) v_2 \right]} - 2l_s \right\} \times \frac{1}{3,6 \left( \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} \right)} \quad (4.36)$$



## 5 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

Esta etapa visa coletar e analisar informações relacionadas às condições operacionais de intervenções Pare e Siga em rodovias de pista simples. Dentre as variáveis avaliadas, destacam-se a velocidade média dos veículos no trecho de obras, os *headways* de descarga de fila e de fluxo em trechos à montante e jusante da obra, o tempo perdido para inversão de sentido de circulação do trecho e arranque dos veículos, além, de características locais do tráfego como contagem classificada de veículos. As análises realizadas possibilitam um melhor entendimento dos impactos das obras sobre a fluidez da corrente de tráfego e subsidiaram as etapas subsequentes de calibração do simulador de tráfego e da formulação matemática proposta.

Neste estudo, a coleta de dados foi realizada de duas formas distintas. A primeira, *in loco*, contou com a utilização de câmeras posicionadas nas proximidades de intervenções Pare e Siga para registrar os instantes de passagem de cada veículo tanto nas extremidades da intervenção, quanto em trechos à montante e jusante. A segunda considera os registros individuais de veículos coletados através de um SAT (sistema de análise de tráfego) durante a execução de obras no trecho para identificação dos impactos da obra sobre os indicadores operacionais.

### 5.1 Coleta de dados *in loco*

A coleta de dados *in loco* consistiu em acompanhar as equipes de manutenção terceirizadas das concessionárias, instalando câmeras para registro nas extremidades das intervenções, onde são controlados os acessos de veículos nos trechos em obra, e em trechos anteriores e posteriores. Esta coleta foi realizada em duas oportunidades, nas rodovias MG-050 e SP-191, com o apoio das concessionárias Nascentes das Gerais e EixoSP, respectivamente.

Para cada obra, foram instaladas 6 câmeras, sendo uma em cada ponto de controle de acesso (2) e as demais distantes até km do trecho de obra em cada direção. De forma a padronizar as análises, a nomenclatura e a ordem dos pontos de pesquisa para todas as obras foram determinadas conforme o croqui apresentado na Figura 5.1. Como referência, os pontos P3 e P4 designam os pontos de controle do Pare e Siga em todas as coletas.

Figura 5.1: Croqui do posicionamento dos pontos de pesquisa



As filmagens foram realizadas por meio de *CountCams*, que consistem em unidades de coletas de vídeo próprias para realização de contagens de tráfego desenvolvidas pela empresa *CountingCars* (vide Figura 5.2).

Figura 5.2: Equipamento de filmagem e exemplo de instalação no local



Por meio desse equipamento, as características da corrente de tráfego são registradas através da filmagem do fluxo de veículos para posterior processamento e tabulação. As câmeras são instaladas às margens da rodovia, geralmente em placas de sinalização, postes ou árvores.

#### 5.1.1 Localização dos pontos de pesquisa

O primeiro levantamento ocorreu na rodovia MG-050, sob concessão da Nascentes das Gerais, no dia 23 de abril de 2021, sexta-feira, de 08 às 17 horas, data em que a equipe de manutenção atuou em 3 locais compreendidos entre os municípios de Formiga e Divinópolis:

- Obra 1: MG-050, km 149, dia 23 de abril de 2021, das 8 h às 10:30 h;
- Obra 2: MG-050, km 177, dia 23 de abril de 2021, das 12:20 h às 14:20 h;
- Obra 3: MG-050, km 180, dia 23 de abril de 2021, das 15:45 h às 17:30 h.

A detalha a localização dos pontos de pesquisa em cada obra acompanhada na rodovia MG-050, definidos conforme o croqui apresentado anteriormente. É importante registrar que o ponto P6 da Obra 3 não consta na lista de pontos pesquisados, devido problemas técnicos durante a instalação da câmera.

Tabela 5.1: Localização dos pontos de pesquisa na MG-050

Ponto	Obra 1		Obra 2		Obra 3	
	km	Referência	Km	Referência	km	Referência
P1	145+300	P3 - 4,1 km	180+500	P3 + 2,4 km	183+800	P3 + 2,7 km
P2	146+900	P3 - 2,5 km	178+500	P3 + 0,4 km	181+800	P3 + 0,7 km
P3	149+400	P3	178+100	P3	181+100	P3
P4	149+800	P4	177+300	P4	180+500	P4
P5	150+800	P4 + 1,0 km	176+000	P4 - 1,3 km	178+400	P4 - 2,1 km
P6	152+800	P4 + 3,0 km	175+100	P4 - 2,2 km		

O segundo levantamento, realizado na rodovia SP-191, ocorreu nos dias 22 e 23 de julho de 2021, quinta e sexta-feira, de 08 às 18 horas, abrangendo também 3 obras em locais distintos na rodovia, nas proximidades dos municípios de Charqueada (obras 4 e 5) e Ipeúna (obra 6).

- Obra 4: SP-191, km 102, dia 22 de julho de 2021, das 7 h às 18 h;
- Obra 5: SP-191, km 103, dia 23 de julho de 2021, das 7 h às 17:20 h;
- Obra 6: SP-191, km 83, dia 23 de julho de 2021, das 7 h às 18:20 h.

A Tabela 5.2 detalha a localização dos pontos de pesquisa para as obras observadas na SP-191. É importante registrar que o planejamento inicial dessa coleta de dados previa somente observar as obras 4 e 5, com seis câmeras alocadas para cada uma. No entanto, com a possibilidade de acompanhar mais uma intervenção simultaneamente, deslocou-se duas câmeras da obra 5 para a obra 6, priorizando-se a filmagem dos pontos de controle do Pare e Siga.

Tabela 5.2: Localização dos pontos de pesquisa na SP-191

Ponto	Obra 4		Obra 5		Obra 6	
	km	Referência	km	Referência	km	Referência
P1	106+500	P3 + 3,6 km	-	-	-	-
P2	105+200	P3 + 2,3 km	99+100	P3 - 3,6 km	-	-
P3	102+900	P3	102+700	P3	83+000	P3
P4	102+200	P4	103+400	P4	81+700	P4
P5	99+000	P4 - 3,2 km	106+600	P4 + 3,2 km	-	-
P6	97+100	P4 - 5,1 km			-	-

As figuras a seguir mostram os mapas com a localização dos pontos de pesquisa. Os pontos P3 e P4 delimitam os trechos de obras.



Figura 5.3: Pontos de pesquisa na MG-050: Obra 1 - km 149 (a); Obra 2 - km 177 (b); e Obra 3 - km 180 (c)

(a)



(b)



(c)

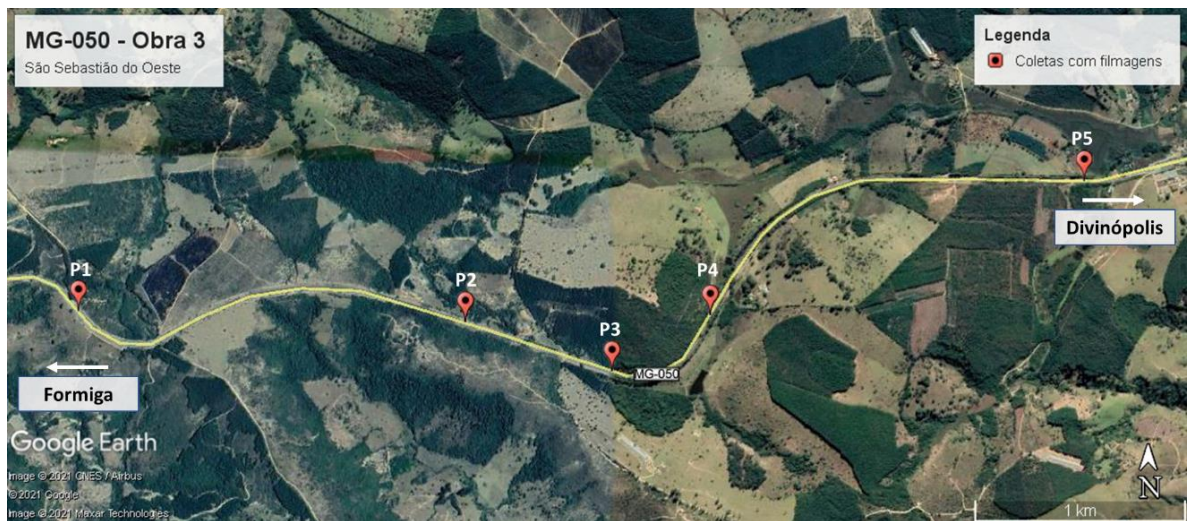
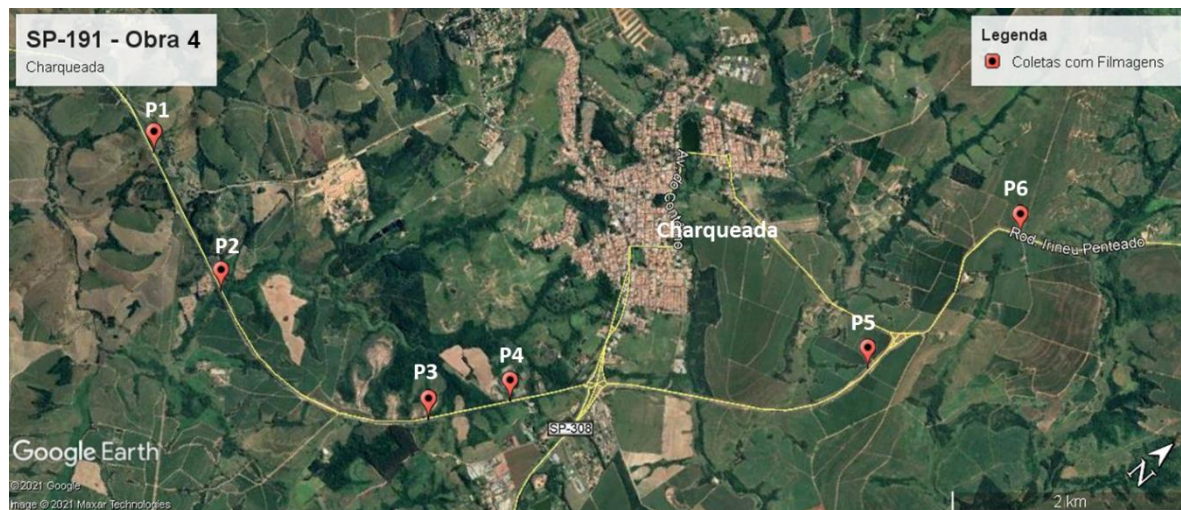




Figura 5.4: Pontos de pesquisa na SP-191: Obra 4 - km 102 (a); Obra 5 - km 103 (b); e Obra 6 - km 83 (c)

(a)



(b)



(c)



O processamento das filmagens e a tabulação das pesquisas consistiram nos registros individuais de veículos que passaram em cada trecho, em ambos os sentidos de circulação, identificando a direção, horário e tipo de veículo (vide Tabela 5.3).

Tabela 5.3: Exemplo de tabulação dos dados das filmagens

Obra	Ponto	Direção	Horário	Tipo de Veículo
Obra 1	P3	1	08:53:24	Carro
Obra 1	P3	1	08:53:26	Carro
Obra 1	P3	1	08:53:30	Caminhão
Obra 1	P3	2	08:55:17	Carro
Obra 1	P3	2	08:55:23	Caminhão

A partir desses dados, foi possível estabelecer uma série de informações, tais como fluxo de tráfego, percentual de caminhões, dados por ciclo de bloqueio e liberação de pista (ciclo, tempo de verde, descarga de fila), velocidade média e percentual de veículos em pelotão. As análises dessas informações são apresentadas nas seções a seguir.

### 5.1.2 Fluxo de tráfego

Como as obras acompanhadas na MG-050 ocorreram em horários distintos, é importante observar as condições de demanda de tráfego que estavam sujeitas. Dessa forma, a Tabela 5.4 sintetiza as informações de início e fim de coleta de filmagens e os valores de fluxo médio de veículos ( $v$ ), segregados em carros de passeio ( $P$ ) e comerciais ( $T$ ), e de percentual de veículos pesados ( $P_{HV}$  – *Percent of Heavy Vehicles*) por obra e direção.

Tabela 5.4: Fluxo médio de veículos observados nas obras 1, 2 e 3 por direção

Obra	Horário	Direção	Fluxo (veíc/h)			$P_{HV}$	
			$v_P$	$v_T$	$v$		
Obra 1 (420 m)	Início	08:40 h	1	130	77	207	0,37
	Fim	10:31 h	2	140	57	196	0,29
	Duração	01:51 h	1+2	269	134	403	0,33
Obra 2 (500m)	Início	12:25 h	1	148	81	229	0,35
	Fim	14:20 h	2	112	56	168	0,33
	Duração	01:55 h	1+2	261	137	398	0,35
Obra 3 (640m)	Início	15:46 h	1	139	72	211	0,34
	Fim	17:18 h	2	188	71	259	0,27
	Duração	01:32 h	1+2	327	143	470	0,30

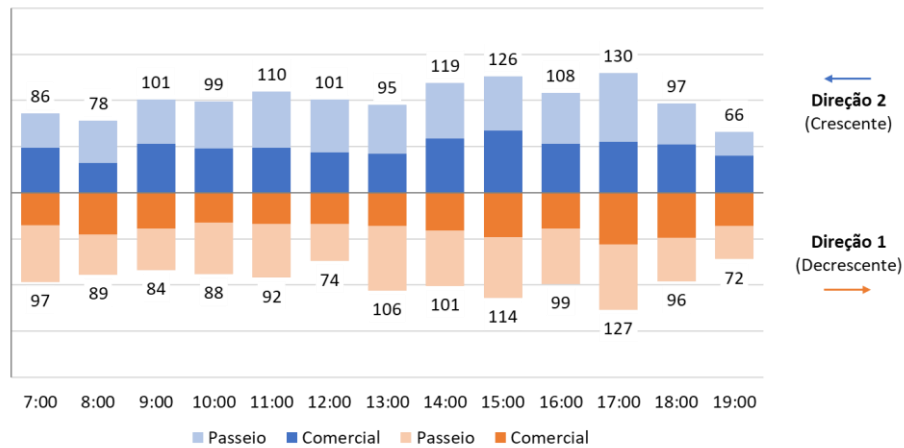
O fluxo médio de veículos durante a coleta de dados variou entre 400 e 500 veículos por hora, com cerca de 30% a 35% de veículos pesados na corrente de tráfego. A maior demanda foi observada na Obra 3, que ocorreu no final da tarde, quando houve um aumento de cerca de

20% dos carros de passeio ( $v_P$ ), em relação aos demais horários. O volume de veículos comerciais ( $v_T$ ) permanece mais estável, com pouca variação em relação aos demais horários.

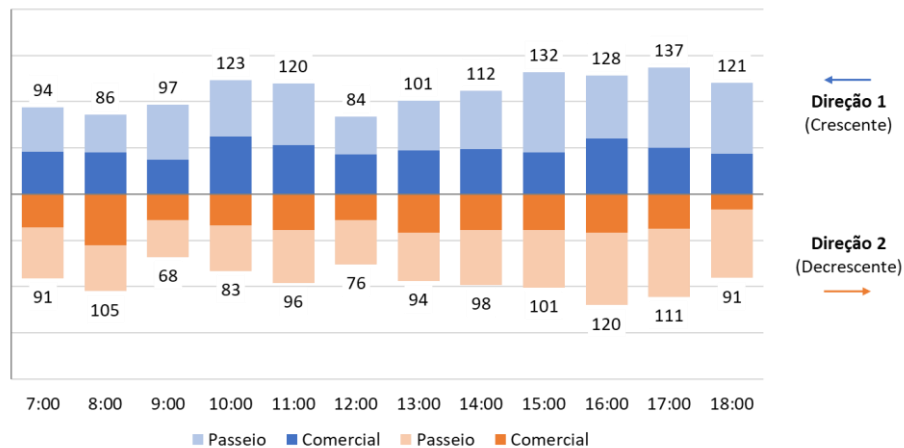
Com relação às obras acompanhadas na SP-191, as quais ocorreram durante um período mais extenso (de 10 a 11 horas), foi possível estabelecer o fluxo de veículos, segregados em passeio e comercial, por faixa horária, obra e direção, como mostra a Figura 5.5.

Figura 5.5: Fluxo de tráfego da Obra 4 (a); Obra 5 (b); e Obra 6 (c) por faixa horária

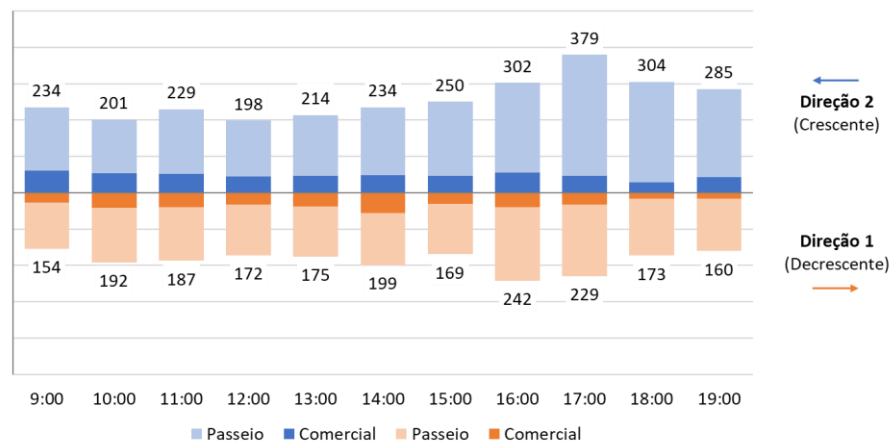
(a)



(b)



(c)



A maior demanda foi observada na Obra 6, na qual a hora mais carregada apresentou volume total de cerca de 600 veículos por hora, com predominância de carros de passeio. Nas obras 4 e 5, a hora mais carregada apresentou fluxo máximo próximo de 250 veículos por hora e a presença de veículos comerciais varia de 40% a 60% ao longo do dia. Em todas as obras, o pico foi registrado no final da tarde, entre 17 h e 18 h.

### 5.1.3 Estatísticas por ciclo de Pare e Siga

As filmagens também foram importantes para registrar os horários de liberação e bloqueio da pista para cada direção e identificar veículos que experimentaram fila no processo. Em geral, a boa prática da operação de um Pare e Siga orienta que a pista deve estar liberada somente enquanto houver veículos em fila naquele sentido. No entanto, os operadores da intervenção, por vezes, prolongam o tempo de verde de determinado acesso, principalmente em horários com baixo fluxo de veículos, reduzindo o dinamismo de circulação na intervenção. Na prática, essa ação promove aumento dos atrasos da direção contrária, tornando inviável a comparação de alguns indicadores como ciclo, tempos de verde e atrasos médios, tanto em relação aos modelos de simulação, quanto analíticos.

A Tabela 5.5 consolida algumas informações obtidas por ciclos de operação por obra e direção. No caso das obras da MG-050, uma vez que foram realizadas em intervalos reduzidos, os resultados referem-se a todo período de levantamento, enquanto para as obras da SP-191 considera-se somente as duas últimas horas da intervenção, que coincidem com o período de maior demanda de tráfego.

Na tabela, são indicados valores médios de ciclo ( $C$ ), tempo de verde ( $g$ ) e de descarga de fila ( $t_{QD,i}$ ) por direção, além do número de veículos que passaram em cada intervenção considerando tanto o tempo de verde total, quanto somente o período de descarga de fila. A diferença dos dados obtidos durante o tempo de verde e a descarga de fila correspondem ao tempo extra de verde praticado pelos operadores. É importante distinguir esses resultados para a correta interpretação e utilização à *posteriori*.

De acordo com os dados obtidos, os maiores ciclos e tempos de descarga de filas foram observados na Obra 6 que, além de ser realizada em horário de maior demanda de tráfego, também possui a maior extensão de bloqueio. Essa obra apresentou ciclo médio de quase 10 minutos, com fluxo médio de 88 veículos por ciclo, com concentração mais elevada na direção 2, que representa cerca de 60% da demanda no trecho. Os veículos que experimentaram fila correspondem a cerca de 83% da demanda total do trecho.



Tabela 5.5: Estatísticas médias dos ciclos por obra e direção

Obra	Direção	# Ciclos	C (s)	g <sub>i</sub> (s)	t <sub>QD,i</sub> (s)	veíc/ciclo – Tempo de Verde			veíc/ciclo – Descarga de Fila		
						v <sub>P,g</sub>	v <sub>T,g</sub>	v <sub>g</sub>	v <sub>P,QD</sub>	v <sub>T,QD</sub>	v <sub>QD</sub>
Obra 1 (420m)	1	32	216	90	27	8	5	12	5	2	6
	2	32	216	82	28	8	3	11	5	2	7
	1+2	32	216	172	55	16	8	24	10	4	14
Obra 2 (500m)	1	21	340	111	74	14	8	22	11	6	17
	2	21	340	119	45	11	5	16	7	3	10
	1+2	21	340	231	119	25	13	38	18	9	27
Obra 3 (640m)	1	16	350	122	60	14	7	21	11	5	16
	2	16	350	125	98	18	7	25	16	6	23
	1+2	16	350	247	158	32	14	46	27	11	38
Obra 4 (700m)	1	27	230	48	17	4	3	7	3	2	5
	2	27	230	62	25	4	4	8	3	3	6
	1+2	27	230	110	42	8	7	15	6	5	11
Obra 5 (620m)	1	37	223	58	18	5	3	8	3	2	5
	2	37	223	42	13	5	2	7	3	1	4
	1+2	37	223	100	35	10	5	15	6	3	9
Obra 6 (1.300m)	1	13	559	153	95	30	5	35	24	4	28
	2	13	559	203	137	45	8	53	39	6	45
	1+2	13	559	356	232	75	13	88	63	10	73

Outra medida que pode ser extraída por meio da coleta de dados consiste no tempo perdido por ciclo para liberação da pista. Esse parâmetro pode ser calculado nos pontos de controle da intervenção através da diferença entre os horários de passagem do último veículo na direção contrária e o arranque do primeiro veículo em fila. Os resultados obtidos para cada obra são indicados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Estatísticas de tempo perdido por ciclo para liberação da pista em cada obra e ponto de controle

Descrição	Obra 1		Obra 2		Obra 3		Obra 4		Obra 5		Obra 6	
	P3	P4	P3	P4	P3	P4	P3	P4	P3	P4	P3	P4
Média	15	10	5	9	17	17	8	6	8	9	17	3
Mínimo	5	3	4	2	7	7	0	0	0	0	1	0
Quartil 1 (Q1)	7	6	5	7	12	12	5	1	2	4	7	2
Mediana (Q2)	9	9	5	10	14	17	8	3	7	8	13	3
Quartil 3 (Q3)	23	15	6	10	21	22	11	8	11	13	24	4
Máximo	35	19	6	13	30	30	24	29	34	29	55	10

Nota-se que os maiores tempos perdidos para liberação da pista foram obtidos na Obra 3. Durante a execução das obras nesse trecho, houve algumas ocorrências de falha de comunicação

por rádio, o que acabou prejudicando a agilidade do processo, uma vez que a intervenção foi realizada em uma curva e não havia visibilidade suficiente para se orientar visualmente. Ao avaliar os valores médios e medianos obtidos para as demais obras, pode-se inferir que um intervalo entre 5 e 9 segundos é suficiente para o processo de liberação da pista.

#### 5.1.4 Velocidade média

Também foram calculados os tempos de viagem individuais no trecho de obras, a partir da diferença entre os horários de registro dos pontos P3 e P4. Como, em geral, não é permitido realizar ultrapassagens no trecho, a sequência de veículos é mantida nos dois pontos. Algumas exceções podem ocorrer em função da circulação de veículos da obra ou com origem ou destino em pontos de parada intermediários, viabilizando, portanto, a análise de indicadores individuais, mesmo sem utilizar informações específicas para identificação dos veículos, como números de placas ou modelo de veículos, por exemplo.

As estatísticas de velocidade média foram segmentadas em quatro classes de acordo com as condições de tráfego enfrentadas pelo usuário: livre, obra, descarga de fila e fora da fila. Os critérios adotados para classificação se baseiam nos horários de registro dos veículos nos pontos de controle, de acordo com as seguintes premissas:

- Livre: horário sem intervenção;
- Obra: horário com intervenção;
- Descarga de Fila: veículos em descarga de fila, durante a intervenção;
- Fora da Fila: veículos que não experimentaram fila e possuem um *headway*, em relação ao veículo anterior, acima de 5 segundos.

A Tabela 5.7 mostra os indicadores de velocidade média ( $s$ ) por direção e tipo de veículo ( $P$  para passeio e  $T$  para comercial) para cada obra e condição de tráfego. É importante destacar que as filmagens dos pontos de controle (P3 e P4) foram estendidas após o término da intervenção para determinação das velocidades médias em condições normais (livre).

Como esperado, as velocidades em períodos de circulação livre são superiores ao observado em período de obras. O impacto das obras e da retenção de veículos são mais representativos em trechos com maiores velocidades médias praticadas normalmente, em que o atraso decorrente da aceleração e da formação de pelotão tende a influenciar mais significativamente o desempenho.

Tabela 5.7: Velocidade média por segmento e condição de tráfego

Condição de Tráfego	Obra 1			Obra 2			Obra 3			Obra 4			Obra 5			Obra 6		
	<i>SP</i>	<i>ST</i>	<i>s</i>	<i>SP</i>	<i>ST</i>	<i>s</i>	<i>SP</i>	<i>ST</i>	<i>s</i>	<i>SP</i>	<i>ST</i>	<i>s</i>	<i>SP</i>	<i>ST</i>	<i>s</i>	<i>SP</i>	<i>ST</i>	<i>s</i>
<b>Direção 1</b>																		
Livre	92	81	87	34	30	32	92	80	88	59	55	57	73	68	72	60	59	60
Obra	51	45	49	29	26	28	67	61	65	44	40	43	50	47	49	48	43	47
- Descarga de Fila	45	38	43	29	27	28	65	58	63	43	39	41	47	41	44	47	41	46
- Fora da Fila	65	56	60	30	26	28	82	74	77	50	45	47	59	55	57	52	49	51
<b>Direção 2</b>																		
Livre	94	82	91	28	25	27	60	55	59	74	70	72	59	64	61	60	57	59
Obra	66	62	65	28	24	27	40	35	39	59	58	59	56	53	55	46	44	46
- Descarga de Fila	62	58	61	28	25	27	39	34	38	57	54	56	56	51	54	46	44	46
- Fora da Fila	74	72	73	28	24	26	42	38	40	65	63	64	60	56	58	49	45	47

Outro ponto relevante identificado nessa análise diz respeito às características geométricas do segmento em obras e de retenção. A obra 2, por exemplo, foi executada em um trecho com presença de lombadas, o que, naturalmente, promove a redução das velocidades dos veículos e retomada da velocidade independente da presença ou não de desvios no trecho. Assim sendo, as diferenças de velocidade para cada condição de tráfego são mínimas, com valores bem baixos no trecho (entre 27 e 32 km/h).

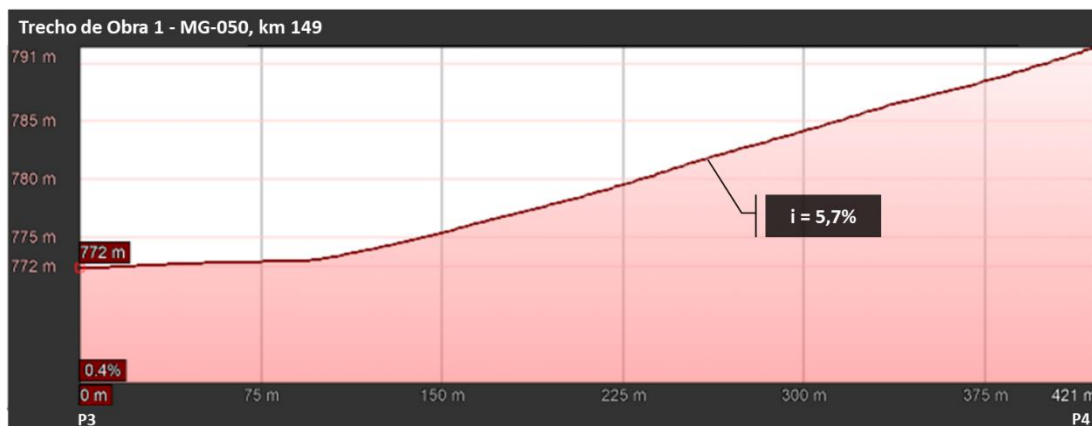
Nas demais obras, percebe-se o impacto do relevo sobre o desempenho dos veículos. A aceleração dos veículos, sobretudo pesados, em aclives é prejudicada limitando as velocidades da corrente de tráfego como um todo. Nesse sentido, é importante avaliar, em paralelo, o perfil altimétrico dos trechos de obra analisados, como mostra a Figura 5.6.

Os resultados obtidos em campo são condizentes com o perfil altimétrico dos trechos. Como esperado, direções em aclive possuem índices de velocidade média inferiores às direções contrárias. Essa diferença é ainda mais acentuada para os veículos em fluxo de descarga, refletindo os impactos do relevo no processo de aceleração dos veículos.

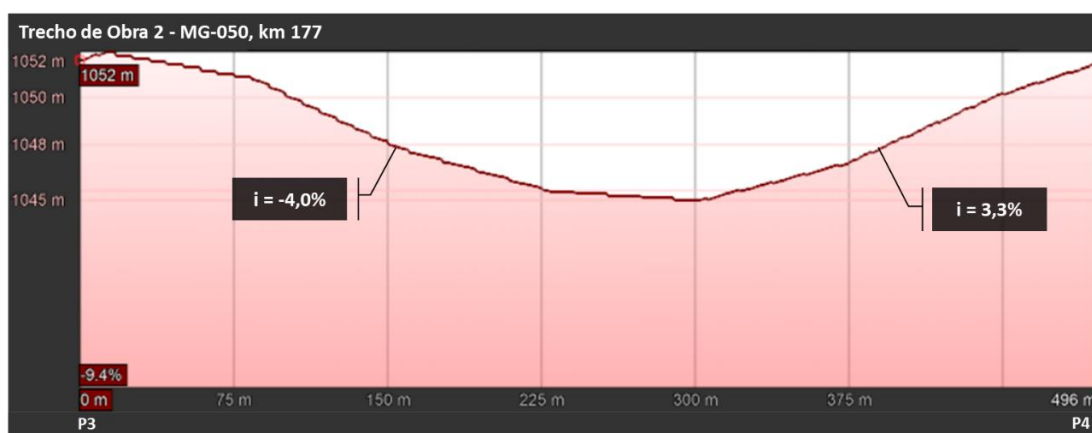
Outro ponto que é importante destacar diz respeito aos níveis mais baixos das velocidades na Obra 6, que se devem às características mais urbanas do trecho, com presença de ocupação lindeira e dispositivos viários (rótula alongada) para controle do tráfego.

Figura 5.6: Altimetria dos trechos da Obra 1 (a); da Obra 2 (b); da Obra 3 (c); da Obra 4 (d); da Obra 5 (e) e da Obra 6 (f)

(a)



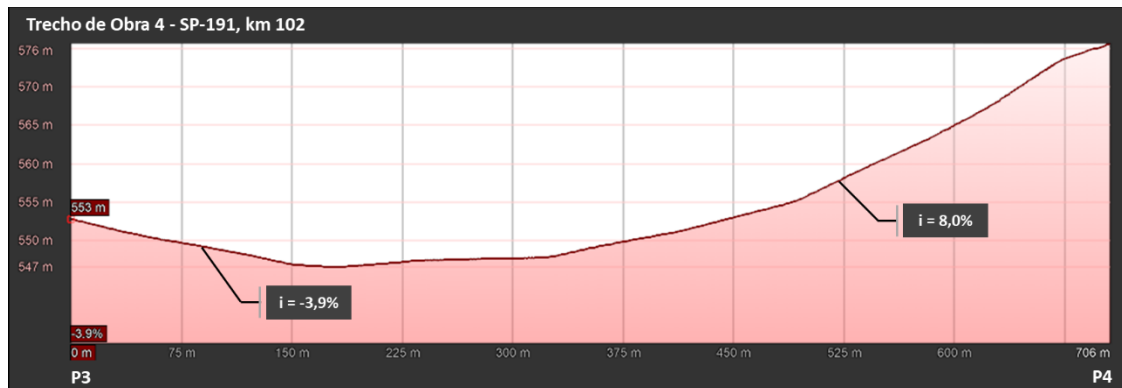
(b)



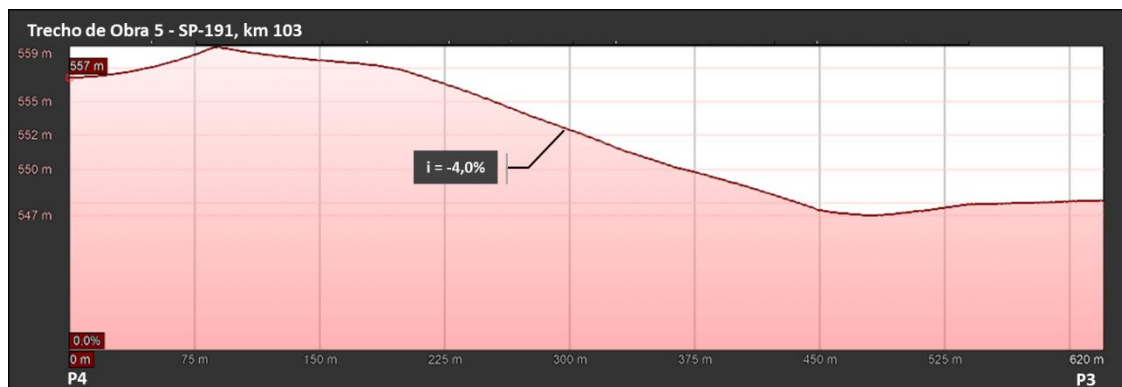
(c)



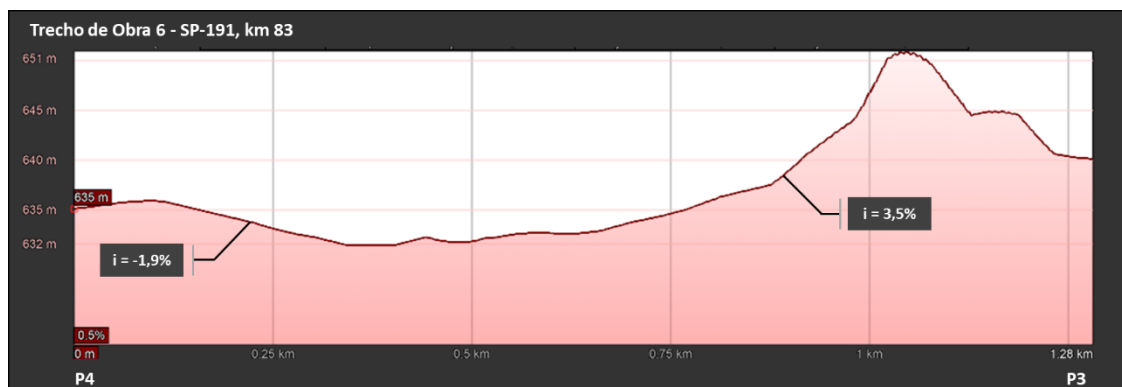
(d)



(e)



(f)

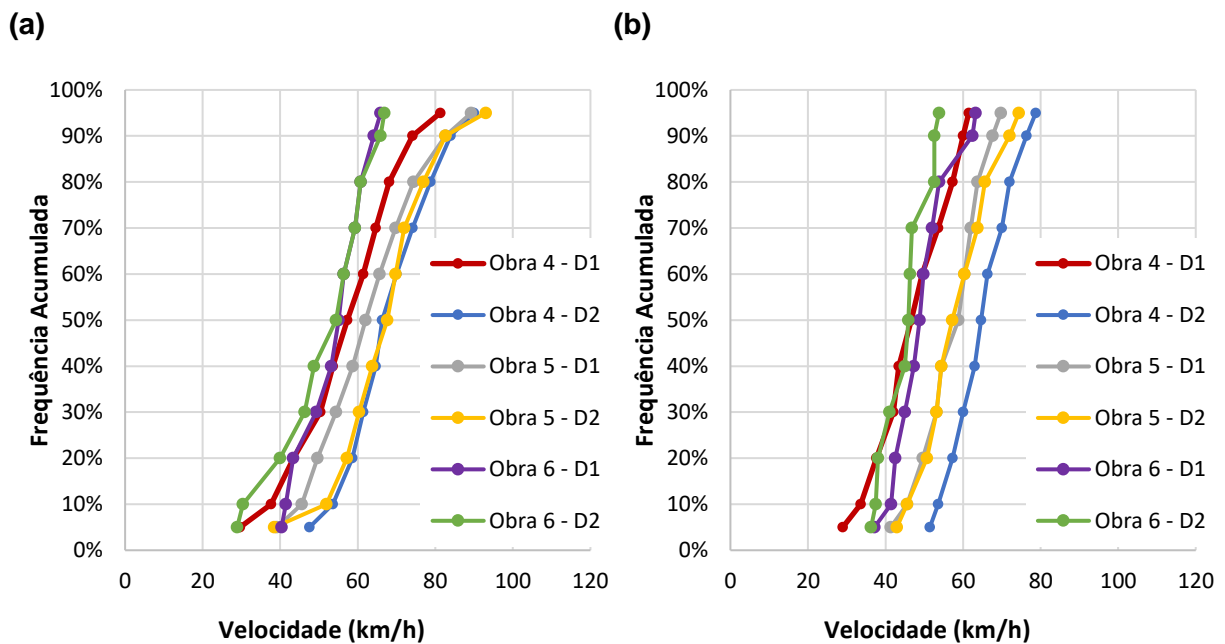


Fonte: Adaptado de Google Earth

### 5.1.5 Velocidade desejada

Para determinação da velocidade desejada dos veículos em trecho de obras, avaliou-se as curvas de distribuição de frequência acumulada da velocidade dos veículos que não experimentaram fila (vide Figura 5.7), os quais são capazes em atingir as velocidades desejadas, considerando todas as características presentes na obra. Esta análise abrangeu somente as obras da rodovia SP-191, devido à maior amostragem de veículos nessas condições, uma vez que as filmagens contemplaram pelo menos 8 horas de intervenção, em todos os trechos.

Figura 5.7: Distribuição de velocidade dos veículos de passeio (a) e dos caminhões (b) que não experimentaram fila no trecho de obras da SP-191



Como dito anteriormente, a obra 6 apresentou níveis mais baixos de velocidade em decorrência de características mais urbanizadas no trecho, tais como presença de ocupação lindeira e dispositivos viários (rótula alongada) para controle do tráfego. Observa-se, portanto, que a curva de distribuição de velocidade nessa obra é inferior às demais.

Dito isso, para determinação dos valores de referência de velocidade desejada em trechos de obras em rodovias de pista simples, considerou-se somente os valores obtidos nas obras 4 e 5. Adotando-se como premissa o percentil 80 como representativo da velocidade máxima desejada dos veículos, tem-se os seguintes valores:

- Passeio: 75 km/h;
- Comercial: 65 km/h.

#### 5.1.6 Fator de equivalência de veículos pesados

O fator de equivalência veicular tem o objetivo de transformar uma corrente de tráfego formada por diferentes tipos de veículos em uma corrente de tráfego composta apenas por veículos padrão, baseando-se nos impactos individuais de cada categoria sobre determinada medida de tráfego.

No processo de descarga de fila, especificamente, a presença de veículos pesados promove perturbações significativas no espaçamento entre os veículos, impactando diretamente o *headway* da corrente de tráfego. O efeito causado pelos caminhões decorre tanto da diferença

de características físicas (comprimento, largura) e de desempenho operacional (peso/potência, aceleração e desaceleração) em relação aos automóveis, quanto da mudança de comportamento dos veículos próximos (KRAMMES & CROWLEY, 1986).

Diante disso, sugere-se que os impactos dos caminhões podem ser observados tanto no espaçamento em relação aos veículos antecedentes, quanto aos sucessores na corrente de tráfego. Nesse sentido, o cálculo do fator de equivalência veicular ( $E_T$ ) considera os *headways* observados para as diferentes combinações de sequência de veículos, como mostra a equação abaixo (KRAMMES & CROWLEY, 1986), a qual foi empregada neste estudo:

$$E_T = \frac{(1 - P_{HV})(\bar{h}_{PT} + \bar{h}_{TP} - \bar{h}_{PP}) + P_{HV} \times \bar{h}_{TT}}{\bar{h}_{PP}} \quad (5.1)$$

em que:  $E_T$ : fator de equivalência veicular para determinação de *headway*;

$P_{HV}$ : percentual de veículos pesados;

$\bar{h}_{jk}$ : *headway* para cada combinação de veículos, sendo  $j$  o veículo seguidor e  $k$  o veículo líder ( $P$  para carro de passeio e  $T$  para caminhão).

Especificamente para a análise de intervenções Pare e Siga, é importante determinar as relações de *headway* no processo de descarga de fila. Diante disso, a coleta de dados dessa medida se restringiu aos veículos que experimentaram fila nos acessos do trecho de obras, desconsiderando os três veículos iniciais da fila. Em seguida, alguns tratamentos específicos, baseados no diagrama de caixa (*boxplot*), foram realizados para identificar e remover *outliers* da análise.

De acordo com as informações coletadas, também foi possível determinar o fluxo de descarga em cada segmento pesquisado. Considerando que os fatores de equivalência veicular servem para converter caminhões em veículos padrão, tipicamente de passeio, o cálculo de fluxo de descarga depende, portanto, apenas do *headway* de descarga de fila da sequência de veículos de passeio, como mostra a equação a seguir:

$$Q = \frac{3600}{\bar{h}_{PP}} \quad (5.2)$$

A Tabela 5.8 indica os fatores de equivalência de veículos pesados e fluxos de descarga obtidos para cada segmento, bem como as estatísticas de *headway* e percentual de veículos pesados coletadas.

Tabela 5.8: Estatísticas de *headway* para determinação de fator de equivalência de veículos pesados e fluxo de descarga de cada segmento pesquisado

Medida	Obra 1		Obra 2		Obra 3		Obra 4		Obra 5		Obra 6	
	P3	P4	P3	P4	P3	P4	P3	P4	P3	P4	P3	P4
$P_{HV}(s)$	37%	26%	36%	28%	32%	26%	43%	49%	44%	39%	19%	19%
$\bar{h}_{PP}(s)$	2,33	2,23	2,98	2,96	2,02	2,32	2,97	2,48	2,52	2,84	2,46	2,36
$\bar{h}_{PT}(s)$	3,24	2,65	3,98	4,18	2,88	3,21	3,51	3,76	3,66	3,42	3,16	3,31
$\bar{h}_{TP}(s)$	3,91	4,64	5,68	6,29	4,31	4,89	5,61	6,21	4,58	6,07	6,21	5,62
$\bar{h}_{TT}(s)$	5,13	4,43	6,95	6,39	4,79	5,48	5,63	6,45	5,68	5,43	6,43	5,75
$E_T$	2,11	2,20	2,27	2,43	2,50	2,46	2,00	2,82	2,26	2,17	2,77	2,72
$Q$ (cp/h)	1.540	1.620	1.210	1.220	1.780	1.550	1.212	1.453	1.429	1.266	1.462	1.528

Ao avaliar os *headways* médios obtidos para cada combinação de veículos, observa-se que o espaçamento entre dois automóveis é menor do que as demais sequências, enquanto os intervalos entre caminhões são os mais elevados. Além disso, veículos de passeio que seguem caminhões possuem espaçamento inferior do que a situação contrária.

Os fatores de equivalência para caminhões variaram entre 2,00 e 2,80 nos segmentos pesquisados. Uma série de fatores influenciaram para a ocorrência desses resultados, tais como relevo, geometria, número de veículos em fila e percentual de veículos pesados. As obras 1 e 5, por exemplo, que foram realizadas em trechos com geometria mais favorável (plano, sem quebra-molas e com visibilidade), os impactos dos caminhões são inferiores aos demais. A Obra 6, por sua vez, foi realizada em um trecho mais longo e sob demanda de tráfego mais elevada e, por isso, os impactos dos caminhões foram mais significativos, com índices mais elevados.

Com relação ao fluxo de descarga, os baixos valores observados na Obra 2 decorrem da presença de lombadas no trecho em obras e na faixa de acumulação dos acessos, o que, naturalmente, promove o aumento do espaçamento dos veículos. Com relação à Obra 3, que obteve maiores índices de fluxos de descarga aferidos no ponto P3 (1.780 cp/h), é importante lembrar que a fila estava posicionada em um descida e que a quantidade de veículos em fila por ciclo era mais elevado do que as demais (com exceção da Obra 6), o que pode justificar o aumento do fluxo de descarga. Além disso, observou-se também uma diferença significativa de fluxos de descarga entre os sentidos de circulação (de 1.780 para 1.550 cp/h), justificada principalmente pela diferença de relevo (declive x alicive), o que impacta a aceleração de todos os veículos, inclusive automóveis, no processo de dissipação de fila.

### 5.1.7 Percentual de veículos em pelotões

Foram realizadas também análises relacionadas ao impacto das obras sobre a proporção de

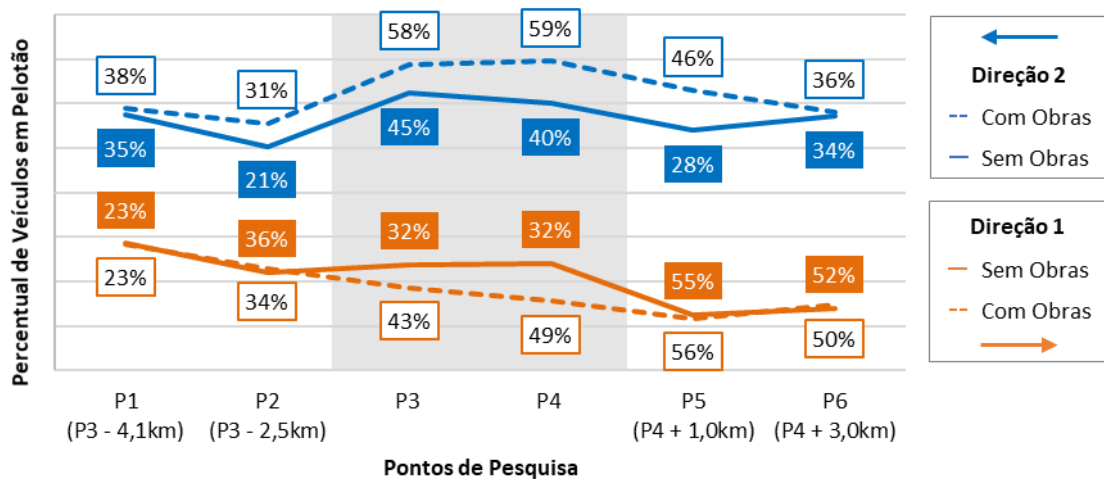


veículos em pelotões (*PF*) nos segmentos. Como premissa, adotou-se o *headway* inferior ou igual a 3 segundos como critério para identificação de veículos nesse status, conforme preconiza o HCM-6 (TRB, 2016). Uma série de fatores são determinantes para formação e dissipação de pelotões em rodovias de pista simples, tais como fluxo de veículos, percentual de veículos pesados, declividade, faixas adicionais para ultrapassagem, visibilidade e extensão de trecho com permissão de ultrapassagem, entre outros.

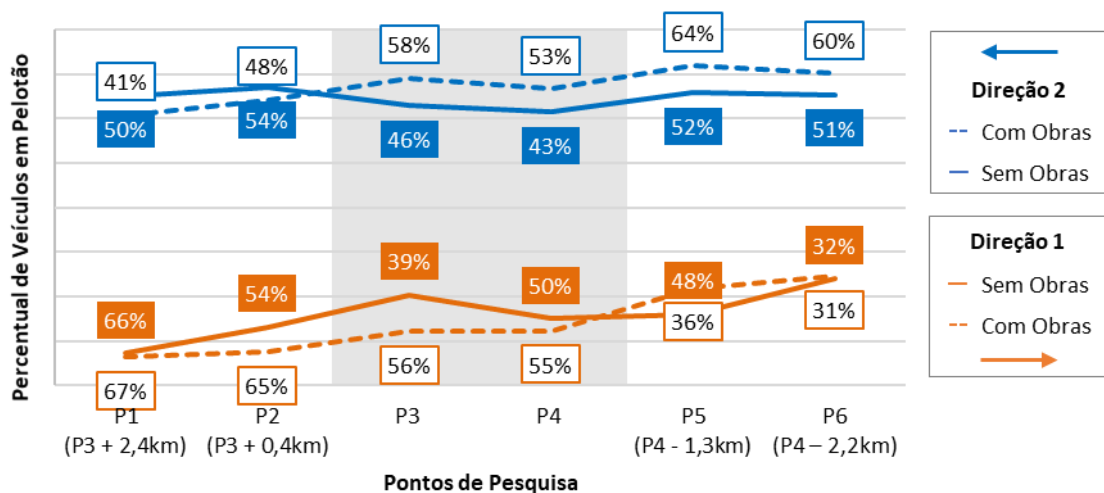
Com o objetivo de analisar a influência das intervenções Pare e Siga sobre a *PF*, os horários de coleta de dados foram estendidos de forma a abranger períodos em que não havia obras no trecho. Dessa forma, obteve-se valores de referência para cada trecho, possibilitando a comparação com os valores obtidos durante a execução de obras (Figura 5.8).

Figura 5.8: Percentual de veículos em pelotão nos pontos de pesquisa da Obra 1 (a); da Obra 2 (b); da Obra 3 (c); da Obra 4 (d); da Obra 5 (e); e da Obra 6 (f)

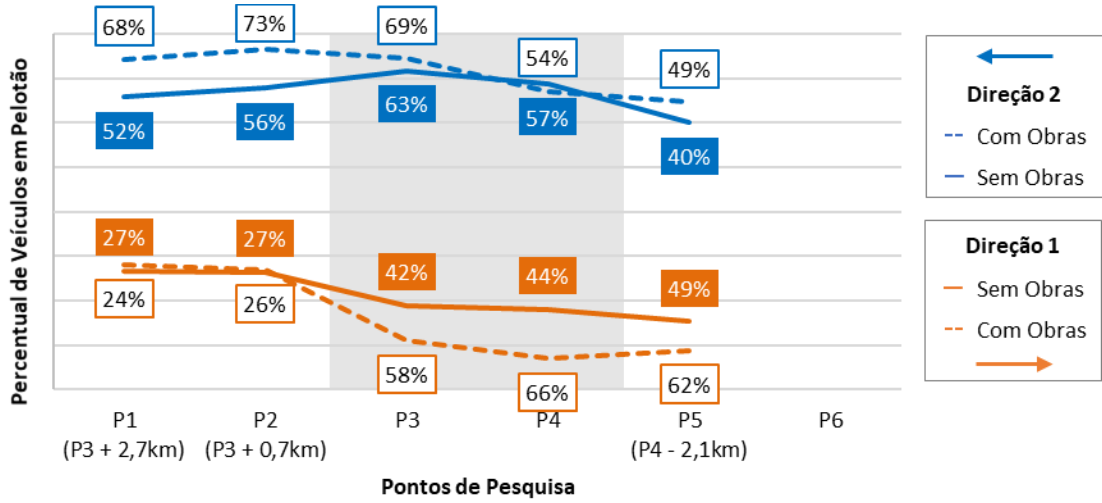
(a)



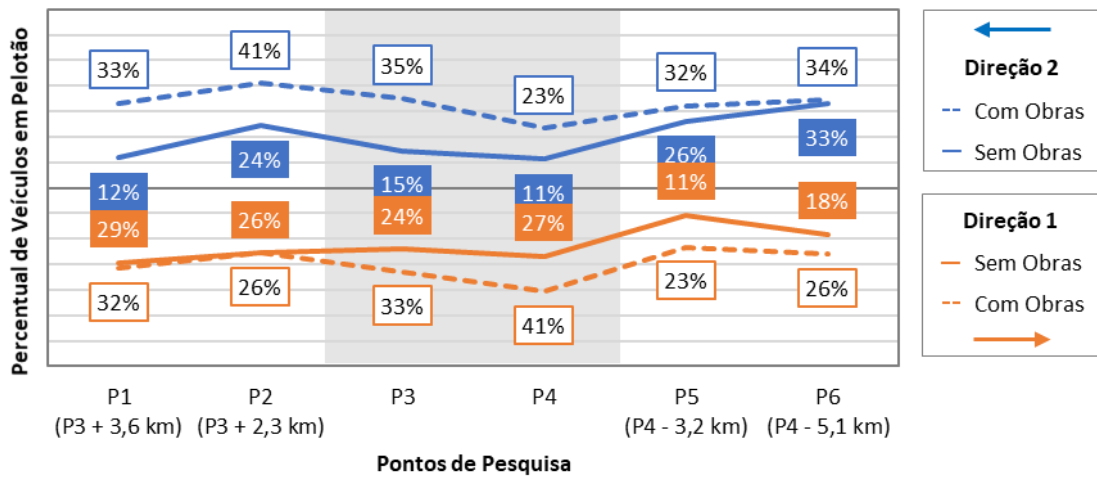
(b)



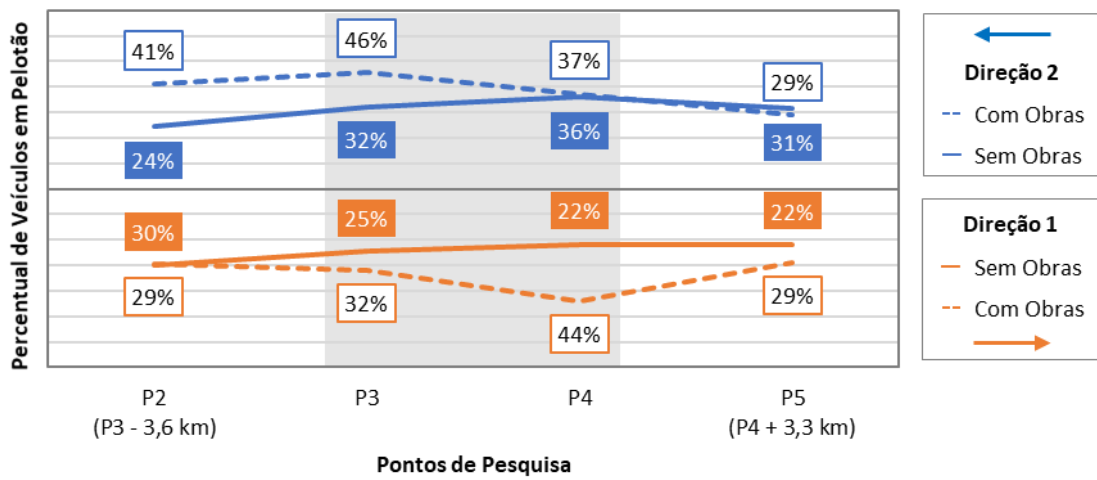
(c)



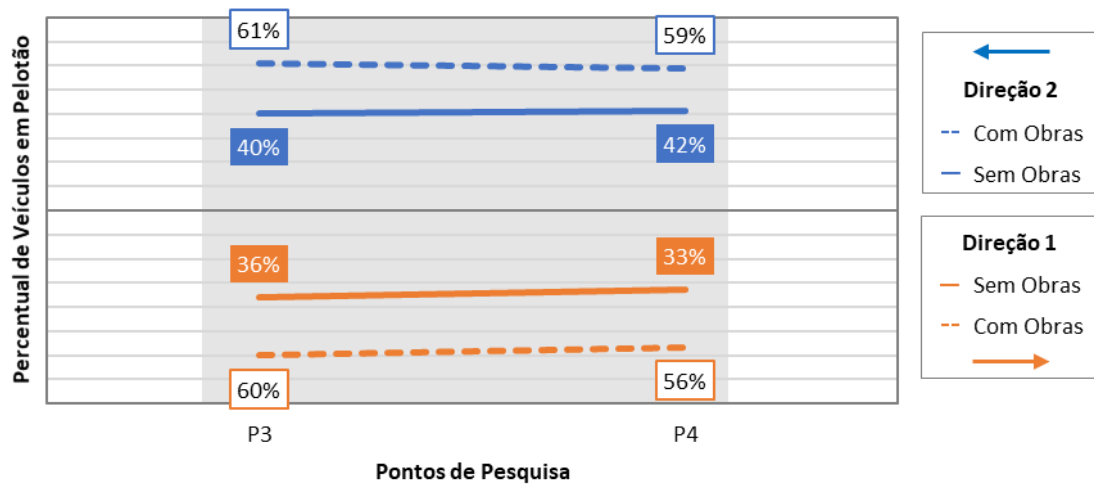
(d)



(e)



(f)



Em geral, os índices observados nos acessos do trecho de obras, pontos de pesquisa P3 e P4, são superiores às condições normais da rodovia, em decorrência da retenção de veículos nesses locais. Ademais, os segmentos que estavam posicionados à jusante do canteiro de obras (P5 e P6 na direção 1 e P2 e P1 na direção 2) também foram impactados pela intervenção, com percentuais de veículos em pelotão superiores às condições normais analisadas. Nos trechos anteriores às obras, não foram observadas mudanças significativas desses índices.

Com relação aos resultados obtidos em segmentos à jusante das intervenções, observou-se uma grande variabilidade das diferenças de percentuais de veículos em pelotão. Diante dessa heterogeneidade de cenários vivenciados, fica evidente que a análise de desempenho em trechos posteriores à operação Pare e Siga requer um aprofundamento das condições viárias ofertadas e da sua relação com a demanda de tráfego observada.

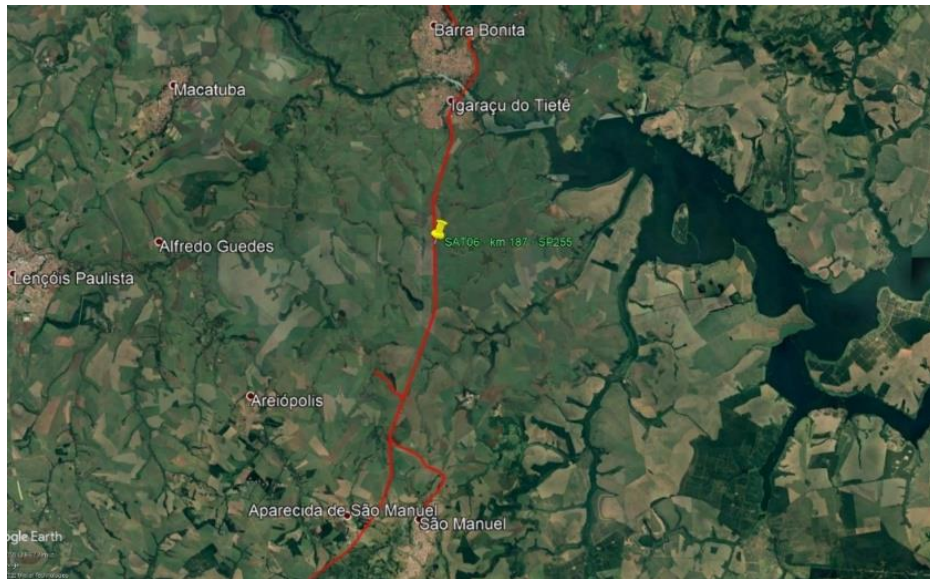
## 5.2 Dados de SAT

De forma complementar, foram obtidos, junto à concessionária Arteris ViaPaulista, dados de um Sistema de Análise de Tráfego (SAT) durante a execução de obras na rodovia SP-255, km 187 (Figura 5.9), no trecho entre Igarapu do Tietê e Aparecida de São Manuel. Trata-se de um segmento de pista simples, no qual foram executadas obras de manutenção do pavimento no dia 30 de março de 2020, com intervenção Pare e Siga no intervalo entre 07:40 h e 17:10 h.

O SAT registra individualmente a passagem dos veículos, detalhando características como categoria, número de eixos, peso, velocidade e direção. Para identificação do período de operação do trecho em regime de Pare e Siga, verificou-se os intervalos em que, alternadamente, constam veículos em somente uma direção, indicando os ciclos de bloqueio e liberação de cada pista. Não foi possível, no entanto, estabelecer exatamente os pontos de início

e fim da intervenção.

Figura 5.9: Localização do SAT de coleta de dados

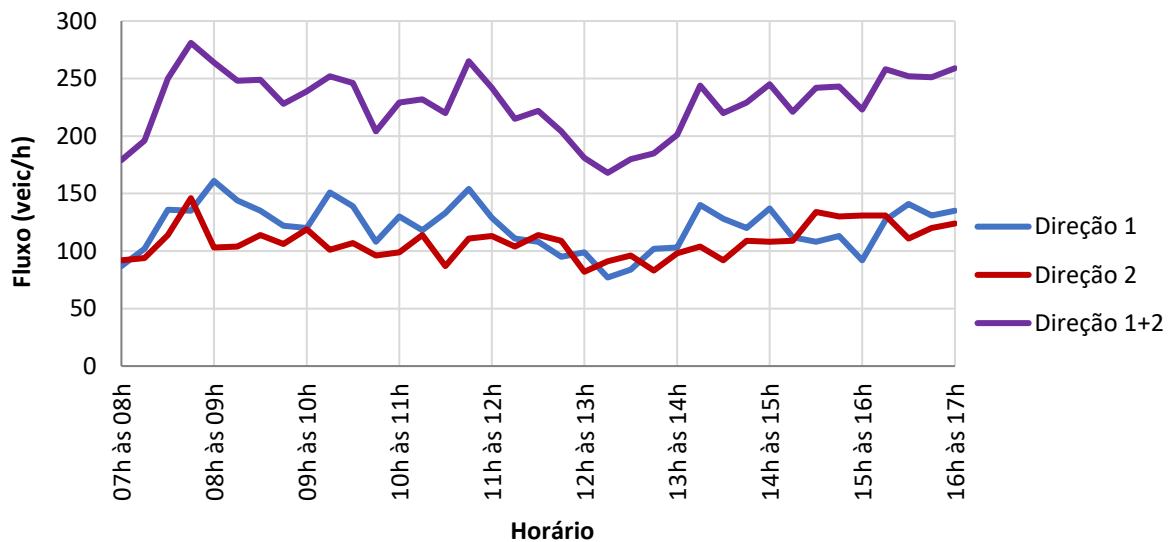


Fonte: Adaptado de Google Earth

### 5.2.1 Fluxo de tráfego

As primeiras informações extraídas dos registros do SAT consistem no fluxo de veículos por faixa horária durante o dia de execução de obras, como mostra a Figura 5.10.

Figura 5.10: Perfil horário de tráfego registrado no SAT durante a execução de obras



Em geral, o volume de tráfego total no segmento girou em torno de 300 veículos por hora, bem distribuído entre as duas direções. O percentual de veículos pesados ( $P_{HV}$ ) foi de cerca de 40% da demanda total no trecho.

### 5.2.2 Velocidade e *headway*

A partir da caracterização e do registro individual dos veículos que passam pelo SAT, é possível estratificar alguns indicadores segregados conforme o tipo de veículo e sentido de circulação. Estatísticas de *headway* ( $h$ ) e velocidade média ( $s_v$ ) por categoria de veículo e direção (Tabela 5.9) foram levantados com o objetivo de melhor caracterizar o comportamento do tráfego na zona de obras. Para cada tipo de veículo, os valores de *headway* foram seccionados conforme a categoria de veículo que o antecede na corrente de tráfego. Assim,  $h_P$  e  $h_T$  representam os *headways* médios que sucedem veículos de passeio e comerciais, respectivamente.

Tabela 5.9: Estatísticas de *headway* e velocidade média por tipo de veículo e direção durante a execução de obras no segmento do SAT

Tipo de Veículo	Direção 1					Direção 2				
	Amostra	$s_{v,1}$ (km/h)	<i>headway</i> (s)			Amostra	$s_{v,2}$ (km/h)	<i>headway</i> (s)		
			$h$	$h_P$	$h_T$			$h$	$h_P$	$h_T$
Automóveis	676	67	1,9	2,1	1,7	635	67	2,3	2,5	1,9
Comercial 2 eixos	155	64	3,6	3,9	3,1	118	64	4,4	4,5	4,2
Comercial 3 eixos	121	65	6,4	6,1	6,8	147	62	5,6	7,0	3,8
Comercial 4 eixos	54	64	6,3	5,2	7,6	61	64	5,5	6,3	4,6
Comercial 5 eixos	18	63	14,6	24,0	5,3	26	65	8,6	10,2	7,1
Comercial 6 eixos	54	62	16,7	17,8	14,6	58	60	8,2	10,2	5,0
Comercial 7 eixos	40	61	17,4	16,8	17,7	16	61	7,0	6,5	7,4
Comercial 9 eixos	36	57	20,6	32,1	11,5	7	63	9,7	7,5	12,7

É possível observar que as velocidades médias para todas as categorias de veículos são bastante próximas, devido às formações de pelotão guiados por veículos mais lentos na corrente de tráfego, limitando, assim, a velocidade dos demais. Essa é uma característica inerente ao processo de dissipação de filas de intervenções Pare e Siga. A simples presença de veículos lentos na corrente de tráfego afeta o tempo de viagem de todos os veículos que o seguem.

Os indicadores de *headway*, por sua vez, indicam uma elevada disparidade de desempenho entre os diferentes tipos de veículos e, sobretudo, comerciais. Como os fluxos de tráfego são interrompidos nos pontos de controle da intervenção, a retomada de velocidade tende a ser mais lenta para os caminhões mais pesados, distanciando-os dos veículos anteriores e limitando a evolução dos demais. Diante da variação observada para cada categoria pesquisada, propôs-se a seguinte classificação de veículos:

- Passeio: automóveis;
- Comercial Leve: 2 eixos;
- Comercial Médio: 3 e 4 eixos;

- Comercial Pesado: 5 e 6 eixos;
- Comercial Extrapesado: 7 e 9 eixos.

A Tabela 5.10 consolida os resultados descritos anteriormente para cada classe definida.

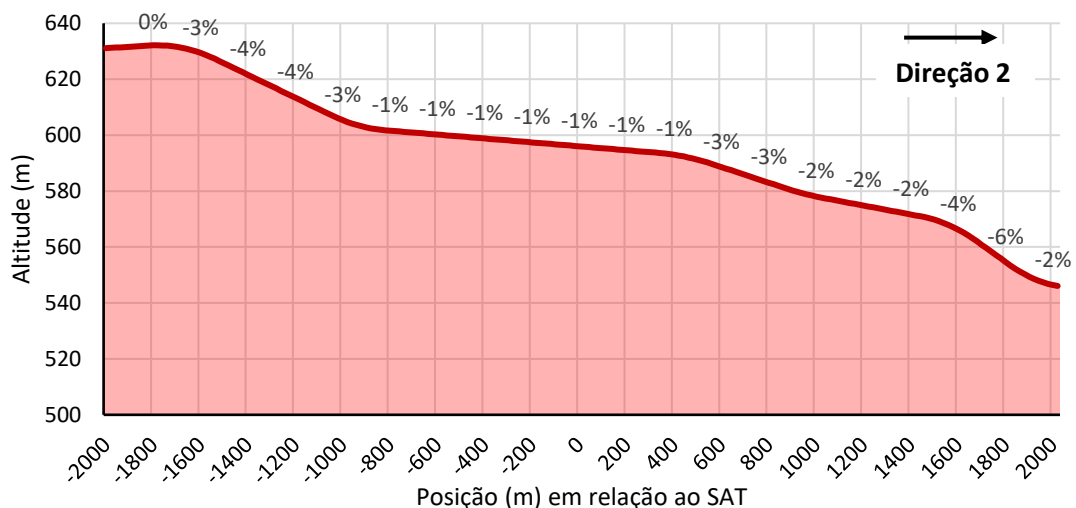
Tabela 5.10: Estatísticas de *headway* e velocidade média por classe de veículo e direção durante a execução de obras no segmento do SAT

Descrição	Direção 1					Direção 2				
	Amostra	$s_v$ (km/h)	<i>headway</i> (s)			Amostra	$s_v$ (km/h)	<i>headway</i> (s)		
			$h$	$h_P$	$h_T$			$h$	$h_P$	$h_T$
Passeio	676	67	1,9	2,1	1,7	635	67	2,3	2,5	1,9
Com. Leve	155	64	3,6	3,9	3,1	118	64	4,4	4,5	4,2
Com. Médio	175	65	6,4	5,8	7,0	208	62	5,6	6,8	4,0
Com. Pesado	72	62	16,2	19,4	12,3	84	62	8,3	10,2	5,6
Com. Extrapesado	76	59	18,9	24,1	14,8	23	62	7,8	6,8	9,0

Nesse processo de formação de pelotões, o *headway* observado após veículos comerciais ( $h_T$ ), em geral, é superior àqueles obtidos quando seguem carros de passeio ( $h_P$ ). Os veículos pesados limitam o desempenho dos demais, formando pelotões com menores intervalos entre veículos.

Outro resultado que chama a atenção diz respeito à diferença de valores de *headway* entre os sentidos de circulação, mesmo não havendo variações significativas de velocidade. Características do relevo no segmento influenciam diretamente na aceleração dos veículos, sobretudo caminhões pesados. Diante do levantamento altimétrico do trecho (vide Figura 5.11), nota-se, portanto, que a Direção 1, por representar um segmento em acive, apresenta maior espaçamento dos veículos em relação à direção oposta.

Figura 5.11: Altimetria do segmento de monitoramento do SAT



Realizou-se, ainda, análises comparativas da velocidade média para cada situação (com e sem obras) e de percentual de veículos em pelotão, como mostra a .

Tabela 5.11: Velocidade média e percentual de veículos em pelotão por classe de veículos e direção em períodos sem e com obras no trecho do SAT

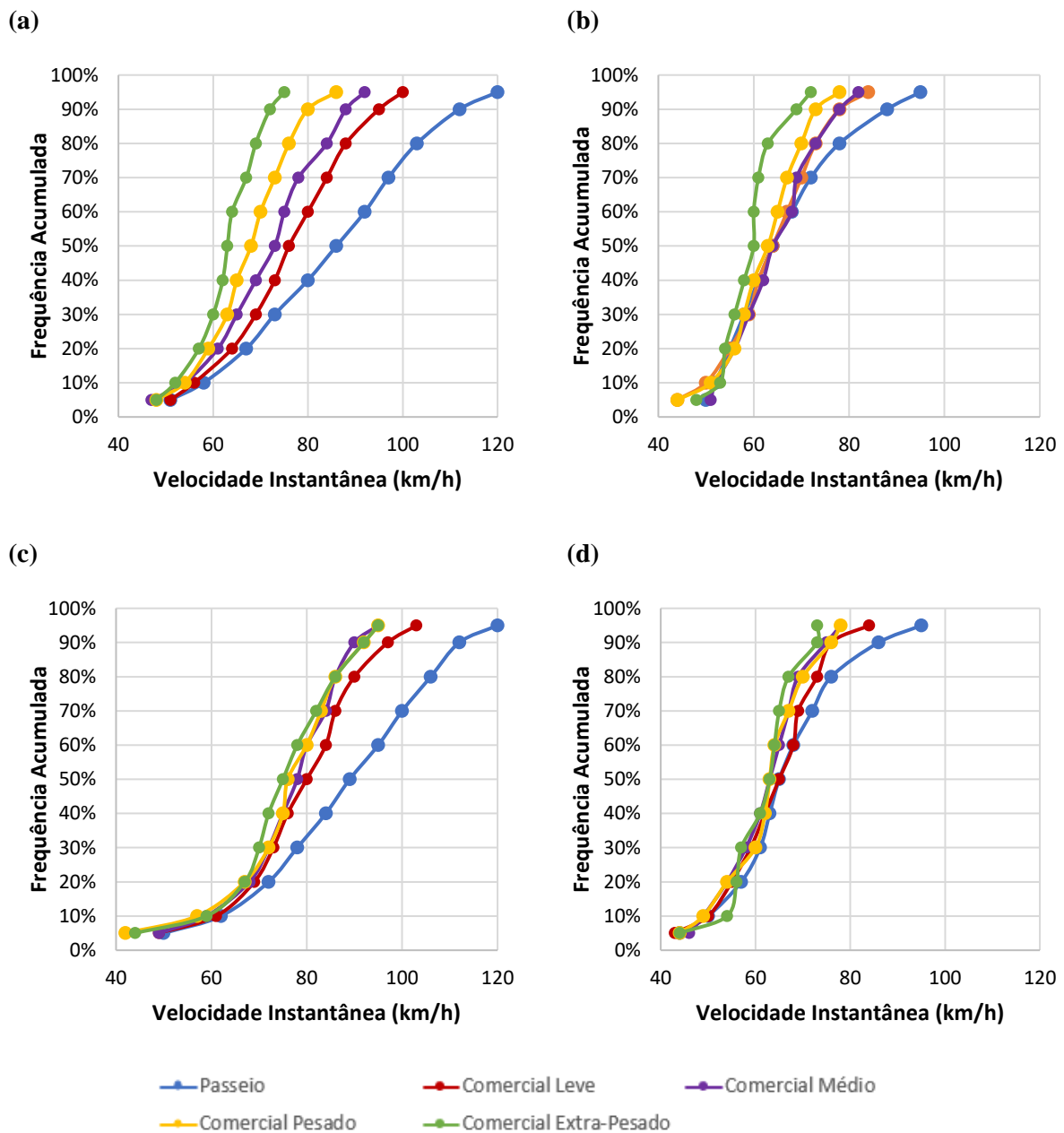
Direção	Classe	Velocidade Média (km/h)			Percentual de Veículos em Pelotão		
		Sem Obras	Com Obras	Var. (%)	Sem Obras	Com Obras	Var. (%)
<b>Direção 1</b>	Passeio	85	67	-21%	53%	80%	51%
	Com. Leve	76	64	-16%	43%	54%	24%
	Com. Médio	71	65	-9%	33%	31%	-8%
	Com. Pesado	67	62	-8%	23%	14%	-40%
	Com. Extrapesado	62	59	-5%	14%	9%	-33%
	<b>Total</b>		80	65	-18%	46%	60%
<b>Direção 2</b>	Passeio	88	67	-24%	44%	72%	64%
	Com. Leve	79	64	-19%	29%	46%	55%
	Com. Médio	76	62	-18%	23%	36%	56%
	Com. Pesado	75	62	-18%	16%	8%	-49%
	Com. Extrapesado	75	62	-18%	15%	13%	-11%
	<b>Total</b>		84	65	-22%	36%	56%

Os automóveis, que geralmente são mais velozes em condições normais, são os mais impactados pelas intervenções. As velocidades médias de 85 e 88 km/h nas direções 1 e 2, respectivamente, reduzem para 67 km/h em ambos os casos, o que representa uma queda de 21% e 24%, na mesma ordem. Houve aumentos do percentual de carros de passeio em pelotão na ordem de 51% para a Direção 1 e 64% para a Direção 2.

Ao avaliar o desempenho geral do tráfego, observa-se reduções de velocidade entre 15 km/h e 20 km/h devido à presença de obras. O percentual de veículos em pelotão sobe de 46% para 60%, na Direção 1, e de 36% para 56%, na Direção 2.

Por último, avaliou-se a distribuição da velocidade instantânea medida no SAT para cada direção, em períodos sem e com obras no trecho (vide Figura 5.12). Na ausência de intervenções no trecho, observa-se curvas de velocidade instantânea distintas para cada classe de veículos na Direção 1, devido à diferença de desempenho das categorias em trechos em aclave. Na direção oposta, as classes de veículos comerciais possuem comportamentos semelhantes, com sobreposição das curvas de velocidade. Ambos os gráficos evidenciam velocidades mais elevadas dos carros de passeio. Na hipótese de execução de obras no trecho, as velocidades são niveladas de acordo com o desempenho dos veículos mais lentos (comerciais pesados e extrapesados), com variações bem reduzidas entre as classes.

Figura 5.12: Distribuição da velocidade instantânea dos veículos medidos no SAT na direção 1, sem obras (a) e com obras (b); e na direção 2, sem obras (c) e com obras (d).



Para estabelecer as velocidades desejadas para cada classe no trecho, admitiu-se os valores do percentil 80 da distribuição de frequência acumulada da velocidade instantânea com presença de obras, arredondados em múltiplos de 5:

- Automóvel: 80 km/h;
- Caminhão Leve: 75 km/h;
- Caminhão Médio: 70 km/h;
- Caminhão Pesado: 70 km/h;
- Caminhão Extrapesado: 65 km/h.



## 6 MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Neste capítulo, o objetivo é apresentar como a microsimulação de tráfego foi empregada neste estudo para simulação de cenários de intervenção Pare e Siga. Primeiramente, são apresentados os principais conceitos relacionados aos submodelos comportamentais incorporados ao Aimsun Next, versão 20, que é o software de microsimulação de tráfego utilizado. Na sequência, são descritos os processos de modelagem da rede, que tem o objetivo de reproduzir o funcionamento da operação Pare e Siga. Ainda é descrito o processo de calibração do simulador, que consiste em ajustar os parâmetros do modelo para representar as condições reais observadas em campo.

### 6.1 Modelos microscópicos

Os modelos de microsimulação de tráfego analisam a conduta individual de cada motorista, de forma contínua, adotando distribuições probabilísticas de características comportamentais do condutor e dos diferentes tipos de veículos com suas peculiaridades, como potência, peso, aceleração, entre outros (BARCELÓ *et al.*, 1995). Os simuladores microscópicos de tráfego, geralmente, se baseiam em três submodelos comportamentais: *car-following*, *lane-changing* e *gap-acceptance* (USDOT, 2005). A associação desses algoritmos em um *software* de microsimulação permite simular o desempenho de correntes de tráfego mediante diferentes situações de fluxo, geometria e sinalização.

Especificamente para locais com operação Pare e Siga, os modelos *lane-changing* e *gap-acceptance* exercem pouca influência na simulação. O modelo *lane-changing* (GIPPS, 1986) simula o processo de decisão do motorista para mudança de faixa. De acordo com Gomes (2015), esse processo envolve três verificações, relacionadas à necessidade da manobra (seja para ultrapassagem ou para conversão), à conveniência (para atingir a velocidade desejada) e à viabilidade (que avalia as brechas ou *gaps* entre veículos em faixas adjacentes).

O modelo *gap-acceptance*, ou aceitação de brecha, busca representar o comportamento dos motoristas ao aproximarem das interseções. É responsável pela ordenação das prioridades de tráfego nas interseções, determinando quando o veículo pode ou não cruzar uma via, observando parâmetros como distância dos veículos ao ponto de colisão, velocidade e taxa de aceleração necessária para atravessar a interseção sem provocar uma colisão e/ou respeitando um tempo de segurança determinado (AIMSUN, 2020).

O modelo de *car-following*, por sua vez, é responsável por orientar o comportamento dos

veículos em uma corrente de tráfego, avaliando, simultaneamente, a intenção em atingir uma certa velocidade desejada e as limitações impostas pelo veículo à frente (GIPPS, 1981). Ele sofre influência de parâmetros locais, tais como tipo de motorista (do ponto de vista de aceitação do limite de velocidade do veículo), geometria da seção (velocidade regulamentar no segmento) e presença de veículos em faixas adjacentes.

O modelo de *car-following* implementado no Aimsun Next é baseado no modelo de Gipps (1981). A velocidade de cada veículo, a cada instante, é determinada a partir da avaliação de duas componentes: aceleração e desaceleração (AIMSUN, 2020). A componente de aceleração ( $V_a$ ) representa a intenção do veículo em atingir a velocidade desejada, o qual pode ser obtido através da seguinte equação:

$$V_a(n, t + dt) = V(n, t) + 2,5a(n)dt \left( 1 - \frac{V(n, t)}{V^*(n)} \right) \sqrt{0,025 + \frac{V(n, t)}{V^*(n)}} \quad (6.1)$$

em que:  $V(n, t)$ : velocidade do veículo  $n$  no instante  $t$ ;

$V^*(n)$ : velocidade desejada do veículo  $n$  no instante  $t$ ;

$a(n)$ : aceleração máxima do veículo  $n$ ;

$dt$ : ciclo da simulação.

A segunda componente, de desaceleração ( $V_b$ ), por sua vez, reproduz as limitações impostas pelo veículo anterior (líder), ao tentar dirigir na velocidade desejada.

$$V_b(n, t + T) = d(n)T + \sqrt{d(n)^2 T^2 - d(n) \left[ 2(x(n-1, t) - s(n-1) - x(n, t) - V(n, t)T - \frac{V(n-1, t)^2}{d'(n-1)}) \right]} \quad (6.2)$$

em que:  $d(n)$ : máxima desaceleração desejada pelo veículo  $n$ ;

$x(n, t)$ : posição do veículo  $n$  no instante  $t$ ;

$x(n-1, t)$ : posição do veículo predecessor  $n-1$  no instante  $t$ ;

$s(n-1)$ : comprimento efetivo do veículo predecessor  $n-1$ ;

$d'(n-1)$ : estimativa da desaceleração desejada do veículo  $n-1$ ;

$T$ : tempo de reação.

A estimativa da desaceleração do veículo líder depende do fator de sensibilidade  $\alpha$  definido para cada tipo de veículo:

$$d'(n-1) = d(n-1) \cdot \alpha \quad (6.3)$$

A velocidade resultante consiste no menor valor dentre as componentes descritas:

$$V(n, t + dt) = \text{mín}(V_b(n, t + dt) + V_b(n, t + dt)) \quad (6.4)$$

A determinação da posição do veículo a cada instante adota métodos distintos considerando o status do veículo (acelerando ou desacelerando). A fase de aceleração é integrada usando o método retangular, enquanto a fase de desaceleração adota o método trapezoidal. Matematicamente, a posição do veículo  $n$  no instante  $t + dt$  é dada por:

$$x(n, t + dt) = x(n, t) + \begin{cases} V(n, t + dt)dt & , \text{ em aceleração} \\ 0,5(V(n, t) + V(n, t + dt)) \times dt & , \text{ em desaceleração} \end{cases} \quad (6.5)$$

Por último, o modelo verifica se a restrição do headway mínimo entre os veículos líder e seguidor é atendida e atualiza a estatística de velocidade, caso necessário, como mostra as equações a seguir:

$$\text{se, } x(n-1, t+T) - x(n, t) < V(n, t+T) \times (\text{MinHW}(n) + T) \quad (6.6)$$

$$\text{então, } V(n, t+T) = \frac{x(n-1, t+T) - x(n, t)}{\text{MinHW}(n) + T} \quad (6.7)$$

Além dos modelos descritos, o simulador do Aimsun Next também incorpora o modelo do simulador TWOPAS (ALLEN *et al.*, 2000) para simular os efeitos do relevo sobre a corrente de tráfego. Desenvolvido inicialmente para vias de pista única com uma faixa por sentido, este modelo permite avaliar o comportamento dos veículos mediante diferentes condições de rampa, incorporando a influência dos aclives e declives, em especial, sobre a aceleração e velocidade de cruzeiro dos caminhões pesados.

As formulações para determinação da aceleração em aclives e da velocidade máxima em declives, conforme descrito em Aimsun (2020), são apresentados a seguir:

$$\alpha = \frac{-0,2445 - 0,0004V - \frac{0,021V^2}{W/A} + \frac{15145,4}{W/P \times V} - 32,17G}{1 + \frac{14080}{W/P \times V^2}} \quad (6.8)$$

em que:  $\alpha$ : aceleração dos veículos em aclive;  
 $V$ : velocidade atual do veículo, em pés/segundo;  
 $G$ : grau de inclinação, em percentual;

$W/P$ : razão entre massa e potência, em lb/hp;

$W/A$ : razão entre massa e área frontal, em lb/pés<sup>2</sup>.

Para determinação da velocidade de cruzeiro, basta admitir aceleração igual a 0 e calcular o valor correspondente. Em trechos em declividade, veículos pesados utilizam marcha reduzida e reduzem sua velocidade para evitar o superaquecimento dos freios. A velocidade máxima dos veículos nesses trechos é obtida a partir da equação a seguir.

$$V_{max} = \frac{837,5}{55,4 - 0,0367WG + 275/L} \quad (6.9)$$

em que:  $V_{max}$ : velocidade máxima, em milhas por hora;

$W$ : massa do veículo, em libras;

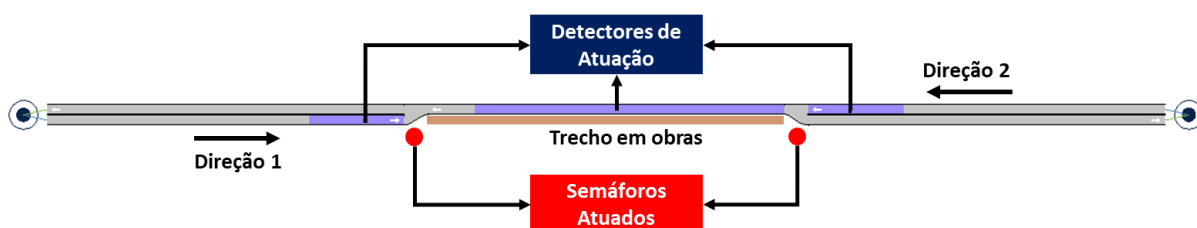
$G$ : grau de inclinação (negativa), em percentual;

$L$ : comprimento do trecho, em milhas;

## 6.2 Modelagem da operação Pare e Siga

Com o objetivo de reproduzir o funcionamento de uma intervenção Pare e Siga no simulador, utilizou-se a ferramenta de programação de semáforo atuado por presença de veículos em detectores nos segmentos viários observados. Dessa maneira, foram inseridos semáforos em cada ponto de controle do trecho em obras, com detectores de veículos em cada aproximação e no desvio, como ilustra a Figura 6.1.

Figura 6.1: Imagem da rede modelada no software Aimsun Next



A programação dos semáforos foi organizada em quatro estágios distintos:

1. O tráfego na Direção 1 é liberado e o semáforo permanece aberto enquanto houver detecção de veículos na aproximação correspondente;
2. Quando não houver mais detecção de veículos na aproximação liberada, o semáforo da Direção 1 é fechado, mas ainda existem veículos percorrendo o desvio de obras;
3. Quando não há mais detecção de veículos no desvio da obra, a Direção 2 é liberada

e permanece aberta enquanto houver detecção de veículos na aproximação correspondente.

4. Analogamente ao estágio 2, essa fase inicia com o fechamento do semáforo na Direção 2 e possui duração suficiente para os veículos terminarem de percorrer o desvio de obras. Quando não houver mais detecção de veículos no trecho, inicia novamente o ciclo a partir do estágio 1.

Os estágios 1 e 3 representam os períodos de dissipação de fila nas aproximações da intervenção, enquanto os estágios 2 e 4 referem-se aos tempos de limpeza, ou seja, tempo necessário para os veículos percorrerem o trecho. Na microsimulação, esses processos são orientados pelos modelos de comportamento *car-following*, cujos principais parâmetros correspondem às velocidades desejadas dos veículos e tempos de reação, e de desempenho *TWOPAS*, o qual depende de variáveis como massa, potência e área frontal.

### **6.3 Calibração e validação do simulador**

Para a calibração do simulador de tráfego, buscou-se reproduzir as mesmas condições observadas na coleta de dados *in loco* da MG-050 e da SP-191, nas quais foram acompanhadas um total de seis obras em locais e horários distintos:

- Obra 1: MG-050, km 149, dia 23 de abril de 2021, das 8 h às 10:30 h;
- Obra 2: MG-050, km 177, dia 23 de abril de 2021, das 12:20 h às 14:20 h;
- Obra 3: MG-050, km 180, dia 23 de abril de 2021, das 15:45 h às 17:30 h;
- Obra 4: SP-191, km 102, dia 22 de julho de 2021, das 7 h às 18 h;
- Obra 5: SP-191, km 103, dia 23 de julho de 2021, das 7 h às 17:20 h;
- Obra 6: SP-191, km 83, dia 23 de julho de 2021, das 7 h às 18:20 h.

Para isso, foram construídas redes representativas das características físicas e operacionais do sistema viário existente, com destaque para as configurações geométricas do desvio de obras, número de faixas por segmento, faixas de ultrapassagem, sinalização vertical e horizontal, entre outros. A Figura 6.2 mostra o detalhamento da modelagem em cada desvio de obras. É possível perceber que as obras 2 e 6 foram executadas em trechos urbanizados, com presença de lombadas, como é o caso da Obra 2, e de trevo em rótula alongada, na Obra 6. A Obra 3, por sua vez, foi realizada em uma curva, o que prejudica a visibilidade dos veículos e operadores das placas de controle de acesso.

Figura 6.2: Modelagem da rede nos desvios da Obra 1 (a); Obra 2 (b), Obra 3 (c), da Obra 4 (d), da Obra 5 (e) e da Obra 6 (f)

(a)



(b)



(c)



(d)





(e)

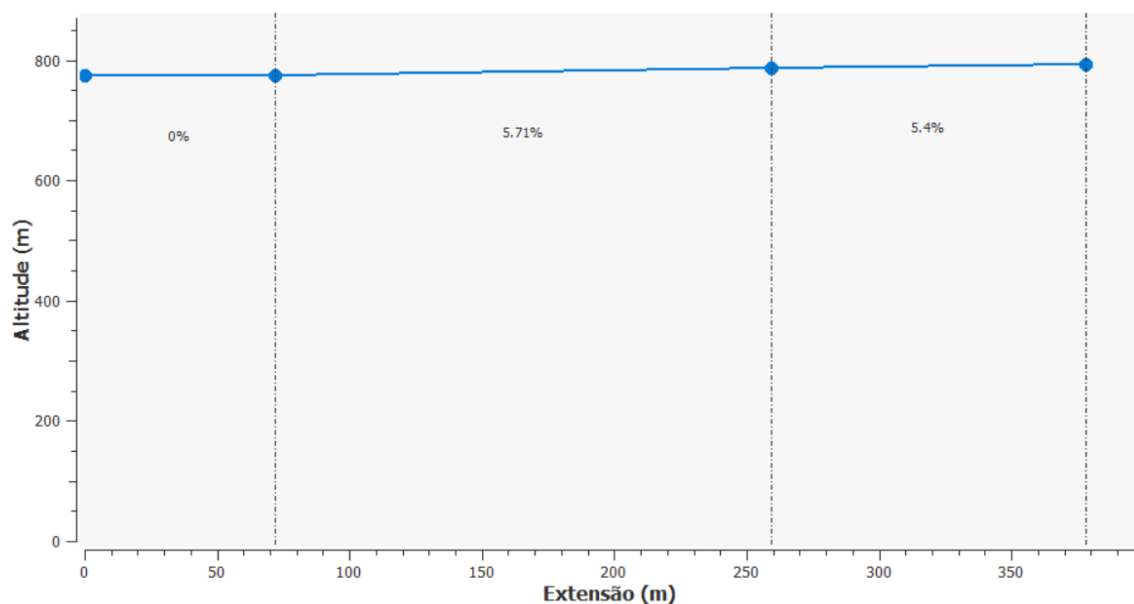


(f)



A modelagem da rede também considerou os dados de altimetria dos segmentos, os quais foram obtidos através da *Elevation API*, ferramenta específica do *Google Maps Platform* para busca de dados de altitudes.

Figura 6.3: Exemplo de dados de altimetria do segmento da Obra 1



Os volumes de tráfego ( $v$ ) pesquisados na etapa de coleta de dados foram inseridos no simulador através de matrizes origem-destino de viagens para cada intervalo de 15 minutos, segregados por categoria, passeio ( $P$ ) e comercial ( $T$ ), e por sentido, crescente ( $C$ ) e decrescente ( $D$ ). A Tabela 6.1 e a Tabela 6.2 sintetizam os resultados das contagens de tráfego. É importante registrar que, para as obras 4 a 6, que abrangeram diferentes períodos do dia, foram simulados os horários mais carregados, entre 16 e 18 horas.

Tabela 6.1: Volume de tráfego observado nas obras da MG-050, para cada intervalo de 15 minutos

Obra 1					Obra 2					Obra 3				
Hora	$v_{P,C}$	$v_{T,C}$	$v_{P,D}$	$v_{T,D}$	Hora	$v_{P,C}$	$v_{T,C}$	$v_{P,D}$	$v_{T,D}$	Hora	$v_{P,C}$	$v_{T,C}$	$v_{P,D}$	$v_{T,D}$
08:45	35	15	32	13	12:15	26	18	36	7	15:15	41	18	32	13
09:00	28	26	38	10	12:30	29	13	42	22	15:30	41	18	48	23
09:15	39	16	23	7	12:45	24	6	42	15	15:45	46	13	57	33
09:30	43	18	27	21	13:00	26	16	19	16	16:00	54	20	59	17
09:45	29	17	43	18	13:15	35	19	34	18	16:15	45	18	26	18
10:00	38	17	41	16	13:30	14	12	43	25	16:30	48	22	26	19
10:15	30	23	26	11	13:45	48	17	26	18	16:45	49	14	34	16
10:30	39	29	42	18	14:00	29	17	48	27	17:00	53	20	32	13
10:45	49	29	36	11	14:15	24	15	39	20	17:15	54	17	30	14

Tabela 6.2: Volume de tráfego observado nas obras da SP-191, para cada intervalo de 15 minutos

Obra 4					Obra 5					Obra 6				
Hora	$v_{P,C}$	$v_{T,C}$	$v_{P,D}$	$v_{T,D}$	Hora	$v_{P,C}$	$v_{T,C}$	$v_{P,D}$	$v_{T,D}$	Hora	$v_{P,C}$	$v_{T,C}$	$v_{P,D}$	$v_{T,D}$
16:00	7	12	15	14	16:00	14	11	15	9	16:00	56	11	60	11
16:15	19	16	17	11	16:15	20	28	24	10	16:15	27	9	57	11
16:30	15	14	12	6	16:30	25	9	17	5	16:30	72	16	63	20
16:45	14	11	16	8	16:45	10	11	22	18	16:45	47	4	66	13
17:00	19	20	14	13	17:00	18	18	17	6	17:00	29	4	68	12
17:15	16	12	23	16	17:15	25	10	18	8	17:15	72	9	66	9
17:30	23	18	12	14	17:30	17	12	22	13	17:30	42	8	118	16
17:45	17	5	22	13	17:45	27	10	17	10	17:45	54	11	81	9

Os veículos comerciais foram, ainda, subdivididos em quatro classes, cujas proporções foram definidas conforme o perfil de veículos pesados observados nas praças de pedágio Piracicaba (P6) e São Pedro I (P7), nas rodovias SP-304 e SP-308, respectivamente, nas proximidades das obras 4 a 6. As classes de veículos definidas e suas respectivas proporções são:

- Comercial Leve (2 eixos): 42%;
- Comercial Médio (3 ou 4 eixos): 33%;
- Comercial Pesado (5 ou 6 eixos): 17%;
- Comercial Extrapesado (7 ou 9 eixos): 8%.

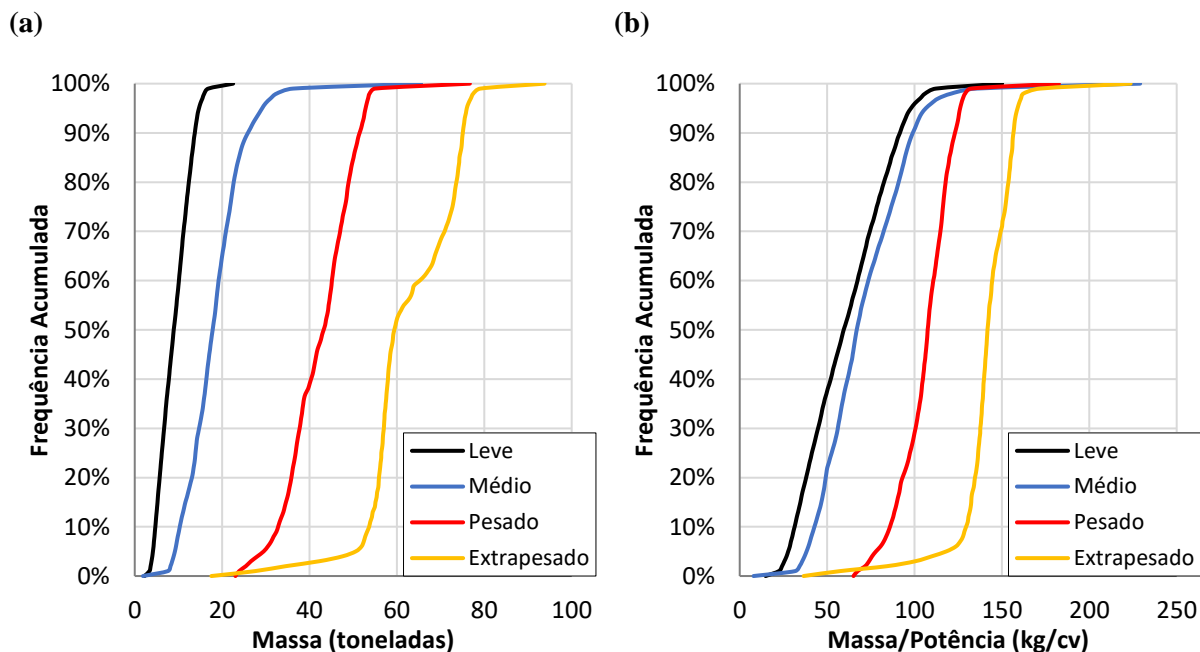
Para cada classe de veículo, foram definidas curvas de distribuição acumulada de massa e massa/potência de acordo com os valores apresentados no trabalho de Lima *et. al.* (2018). Esses valores foram obtidos a partir de uma base de dados de pesagem de caminhões em balanças móveis em uma rodovia federal, especificamente a BR-040, no trecho compreendido em Minas Gerais (entre o km 47 e o km 767), e das características do modelo dos veículos, como potência



e área frontal, que passaram em um posto da Polícia Rodoviária Federal da mesma rodovia.

Para cada classe, foram designadas curvas de distribuição de frequência acumulada de massa e massa/potência (Figura 6.4), de forma a representar as diferenças de desempenho.

Figura 6.4: Distribuição de frequência acumulada de Massa (a); e Massa/Potência (b) dos caminhões



Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2018)

A partir dessas informações, portanto, definiu-se os parâmetros do modelo de desempenho dos caminhões para cada classe, os quais são indicados na Tabela 6.3. Nessa análise, os valores mínimos e máximos referem-se aos percentis 2,5 e 97,5, desconsiderando-se os valores mais extremos.

Tabela 6.3: Parâmetros do modelo de desempenho dos veículos pesados no Aimsun

Classe	Massa (kg)				Massa/Potência (kg/cv)				Massa/Área Frontal (kg/m <sup>2</sup> )			
	Méd.	Desv.	Mín.	Máx.	Méd.	Desv.	Mín.	Máx.	Méd.	Desv.	Mín.	Máx.
Leve	9.242	4.102	4.160	15.920	62	26	28	106	1.715	761	772	2.954
Médio	18.349	7.320	9.190	32.510	71	27	38	121	2.797	1.116	1.401	4.956
Pesado	42.786	7.368	29.500	53.760	107	19	78	129	5.943	1.023	4.097	7.467
Extrapesado	63.627	10.150	50.570	77.500	144	23	118	162	7.993	1.275	6.353	9.736

De forma complementar, foram definidas também as velocidades desejadas dos veículos em condições de obras, baseado nos valores obtidos na etapa de coleta de dados. Considerou-se, para tanto, os valores das velocidades desejadas observadas nas obras da SP-191, variando-se,

entre as classes comerciais, de acordo com as diferenças de velocidade observadas no SAT da ViaPaulista. A seguir, são detalhados os valores adotados na microssimulação:

- Passeio: 75 km/h;
- Comercial Leve: 65 km/h;
- Comercial Médio: 60 km/h;
- Comercial Pesado: 60 km/h;
- Comercial Extrapesado: 55 km/h.

Além disso, dentre os parâmetros do modelo de *car-following* que influenciam no processo de dissipação de filas, houve necessidade de alteração apenas da variável “tempo de reação quando parado”, que consiste no tempo que um veículo leva para reagir à aceleração do veículo da frente (AIMSUN, 2020). Esse parâmetro influencia diretamente no processo de dissipação de fila e o valor *default* do simulador é muito permissivo (1,3 segundo), resultando em fluxos de descarga muito elevados, acima de 2.100 veículos por hora. Na literatura, o trabalho de Sousa *et. al.* (2019), que se propôs a determinar parâmetros, a partir de um algoritmo genético, para calibração da simulação de uma rotatória urbana, resultou em 1,6 segundo para essa variável, corroborando com a necessidade de alteração desse parâmetro. Adotou-se, portanto, o valor indicado nesse estudo.

Uma vez calibrados os parâmetros, o próximo passo consistiu na simulação dos cenários das obras 1 a 6, mencionadas anteriormente, visando alcançar indicadores de desempenho semelhantes aos coletados e campo. Foram executadas cinco replicações para cada cenário, durante o intervalo de execução de obras.

A Tabela 6.4 mostra a comparação de dados de velocidade média por tipo de veículo obtidos através da coleta de dados e da microssimulação de tráfego. É importante mencionar que não houve distinção de classes de veículos comerciais nas estatísticas coletadas nas obras simuladas e, por isso, a comparação de resultados diferencia apenas veículos de passeio e comerciais. No entanto, a inserção de diferentes classes de caminhões é importante para reproduzir os diferentes comportamentos na corrente de tráfego. Os resultados revelam valores bastante próximos entre as diferentes abordagens, o que indica que a simulação conseguiu reproduzir bem as diferentes condições de tráfego observadas.

Tabela 6.4: Comparação de indicadores de velocidade média por tipo de veículo obtidos na coleta de dados e através da microsimulação de tráfego

Obra	Direção	Passeio (km/h)			Comercial (km/h)		
		Campo	Simulação	Variação	Campo	Simulação	Variação
Obra 1	1	45,5	45,3	0%	38,1	37,5	-2%
	2	62,1	64,2	3%	58,4	58,9	1%
Obra 2	1	29,1	27,8	-4%	26,6	26,8	1%
	2	28,3	26,3	-7%	24,6	24,7	1%
Obra 3	1	65,0	65,2	0%	58,1	62,2	7%
	2	39,0	37,8	-3%	34,0	35,2	3%
Obra 4	1	42,9	43,9	2%	38,8	39,7	2%
	2	56,5	58,0	3%	54,5	54,6	0%
Obra 5	1	47,0	48,1	2%	41,3	44,4	8%
	2	56,1	58,0	3%	50,8	51,2	1%
Obra 6	1	47,4	47,5	0%	41,4	44,3	7%
	2	46,4	49,5	7%	44,5	47,5	7%

É importante lembrar que os operadores de Pare e Siga das intervenções observadas em campo, frequentemente, estendem o tempo de verde para liberação dos acessos além dos períodos de fila. Na prática, esse comportamento gera perturbações nas demais variáveis coletadas, tais como ciclo, tempos de verde e atrasos médios, e, por essa razão, não foram comparadas com o desempenho da simulação.



## 7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A etapa de análise dos resultados tem objetivo tanto de avaliar o comportamento das variáveis do problema, quanto de validar os resultados obtidos através do método proposto. Para tanto, construiu-se um modelo de simulação de tráfego que permitiu determinar medidas de desempenho para diferentes configurações de demanda e comprimentos de obra. A utilização de técnicas de simulação para obtenção de dados experimentais tem sido cada vez mais frequente na literatura (WASHBURN *et al.*, 2008; JIAN *et al.*, 2004) e possibilita explorar as diferentes combinações de cenários para análise sobre os resultados.

Essa etapa iniciou-se pela definição dos cenários teste, os quais foram simulados, a partir do Aimsun Next devidamente calibrado, conforme descrito na seção anterior, para obtenção de medidas de desempenho e de outras variáveis operacionais. Na sequência, analisou-se algumas variáveis relevantes para aplicação do método proposto, tais como determinação do fluxo equivalente, fluxo de saturação, velocidade média e tempos perdidos. Por último, alguns resultados calculados através do modelo matemático, tais como tempos de ciclo, tamanho de pelotão e atrasos, foram comparados aos valores obtidos pela simulação.

### 7.1 Simulação de cenários

Para simulação de cenários, foram executados experimentos de simulação com o Aimsun Next calibrado. Com o objetivo de uniformizar as análises, algumas premissas foram adotadas, tais como:

- Velocidade desejada dos veículos no desvio de obras:
  - Automóvel: 75 km/h;
  - Caminhão Leve: 65 km/h;
  - Caminhão Médio: 60 km/h;
  - Caminhão Pesado: 60 km/h;
  - Caminhão Extrapesado: 55 km/h;
- Extensão de trecho anterior e posterior ao trecho de obras: 1.000 metros;
- Tempo perdido para liberação da pista no controle de acesso: 5 segundos;
- Velocidade para mudança de faixa no desvio de obras: 50 km/h;
- Chegada de veículos: distribuição exponencial;
- Período de simulação: 1 hora, com *warm-up* de 1 hora;
- Número de replicações: 5, por cenário.

É importante ressaltar que os valores definidos de velocidade desejada para cada tipo de veículo foram definidos baseado nas condições observadas no SAT da rodovia SP-291, sob concessão da Arteris ViaPaulista. O tempo perdido para liberação da pista foi observado durante o acompanhamento das obras na MG-050, no trecho sob concessão da Nascentes das Gerais.

Com relação aos cenários, foram simulados um total de 28.350 simulações, resultado da variação de parâmetros como comprimento de obra (de 500 a 5.000 metros), fluxo total (de 200 a 1.000 veículos por hora), percentual de caminhões (de 20% a 50%), percentual do fluxo direcional principal (de 50% a 70%) e greide da direção principal (de 0% a 6%), replicados cinco vezes cada combinação com diferentes sementes de números aleatórios.

- Comprimento de Obra (m): [500, 1.000, 1.500, 2.000, 2.500, 3.000, 3.500, 4.000, 4.500, 5.000];
- Fluxo Total (veic/h): [200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1.000, 1.100, 1.200];
- Percentual de Caminhões: [20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%];
- Percentual do fluxo direcional principal: [50%, 60%, 70%];
- Greide: [0%, 3%, 6%].

Diversos resultados foram extraídos das simulações, tais como tamanho de pelotão, atraso, tempos de ciclo e de verde, velocidade média no trecho de obras, *headways*, fator de equivalência de caminhões pesados e fluxo de saturação.

## **7.2 Análise das variáveis do problema**

Um dos passos fundamentais para a modelagem de avaliação da capacidade e de medidas de desempenho em trechos em obras consiste em avaliar o comportamento das variáveis do problema, as quais são responsáveis pela adequação do modelo teórico para as condições reais do comportamento do tráfego.

Nessa linha de raciocínio, esta seção apresenta algumas análises para determinação de parâmetros definidos na formulação matemática desenvolvida. Esse processo se baseou tanto nas informações coletadas em campo, quanto nos resultados da microsimulação de tráfego dos cenários avaliados. Contou-se, ainda, com o arcabouço teórico descrito no manual HCM-6 (TRB, 2016) e na especificação técnica da ARTESP (2019) para delimitar as variáveis e os respectivos métodos para aplicação.

É importante mencionar que, ao utilizar dados e modelos calibrados para condições observadas em campo, os resultados obtidos por meio da simulação tendem a melhor

representar a realidade brasileira.

### 7.2.1 Determinação do fluxo equivalente

No manual HCM-6 (TRB, 2016), o cálculo do fluxo equivalente, que é aplicado neste trabalho, se baseia nas equações para determinação da velocidade média de viagem (ATS - *Average Travel Speed*) e do percentual do tempo em pelotão (PTSF – *Percent of Time Spent Following*) em rodovias de pista simples. Da mesma forma, são aplicados fatores de ajuste de hora pico, de greide e de veículos pesados para conversão do fluxo de veículos em unidades de carros de passeio.

$$v_i = \frac{V_i}{PHF \times f_g \times f_{HV}} \quad (7.1)$$

em que:  $v_i$ : fluxo equivalente para a direção  $i$ , em carros de passeio por hora;

$V_i$ : volume de tráfego da direção  $i$ , em veículos por hora;

$PHF$ : fator de hora pico;

$f_g$ : fator de ajuste em relação às rampas;

$f_{HV}$ : fator de ajuste para veículos pesados.

O fator de hora pico representa a variação do tráfego dentro de uma hora e tem o objetivo de captar o intervalo de 15 minutos mais carregado do trecho. O fator  $f_{HV}$  representa a influência dos veículos pesados sobre as correntes de tráfego no segmento. A formulação matemática do cálculo desse fator está mostrada na equação abaixo:

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)} \quad (7.2)$$

em que:  $f_{HV}$ : fator de ajuste para veículos pesados;

$P_T$ : proporção de caminhões na corrente de tráfego;

$P_R$ : proporção de veículos recreacionais (VRs) na corrente de tráfego;

$E_T$ : fator de equivalência veicular para caminhões;

$E_R$ : fator de equivalência veicular para veículos recreacionais (VRs).

Os parâmetros  $E_T$  e  $E_R$  indicam os fatores de conversão de caminhões e veículos recreacionais, respectivamente, em carros de passeio na corrente de tráfego. Os graus de influência desses veículos na corrente de tráfego variam de acordo com a variável analisada (velocidade média, percentual de tempo em pelotão e *headway*, por exemplo) e de algumas características locais, como volume de tráfego e classificação do relevo.

Na ausência de valores recomendados para  $E_T$  específicos para cálculo do *headway* de descarga de fila em trechos de pista simples sob regime Pare e Siga, foram adotados os resultados da microssimulação para determinação destes valores, mediante diferentes cenários de demanda e comprimento de obras avaliados. O cálculo do fator de equivalência veicular seguiu o mesmo procedimento descrito na etapa de coleta de dados adotando a seguinte equação (KRAMMES & CROWLEY, 1986):

$$E_T = \frac{(1 - P_{HV})(\bar{h}_{PT} + \bar{h}_{TP} - \bar{h}_{PP}) + P_{HV} \times \bar{h}_{TT}}{\bar{h}_{PP}} \quad (7.3)$$

em que:  $E_T$ : fator de equivalência veicular para caminhões;

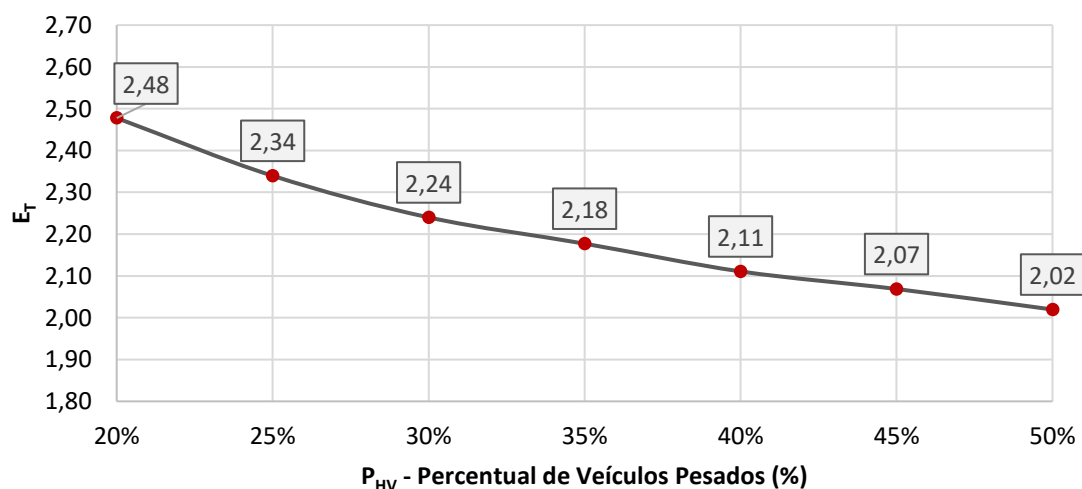
$P_{HV}$ : percentual de veículos pesados;

$\bar{h}_{jk}$ : *headway* para cada combinação de veículos, sendo  $j$  o veículo seguidor e  $k$  o veículo líder ( $P$  para carro de passeio e  $T$  para caminhão).

Os valores obtidos de  $E_T$  foram avaliados a partir de variáveis como fluxo de veículos, percentual de veículos pesados e comprimento do trecho de obras, como mostra a Figura 7.1. De acordo com os resultados obtidos, é possível inferir que o percentual de veículos pesados ( $P_{HV}$ ) é a principal variável de influência sobre o fator de equivalência veicular ( $E_T$ ). Quanto menor o  $P_{HV}$ , maior os impactos individuais dos veículos pesados sobre o *headway* de descarga de fila.

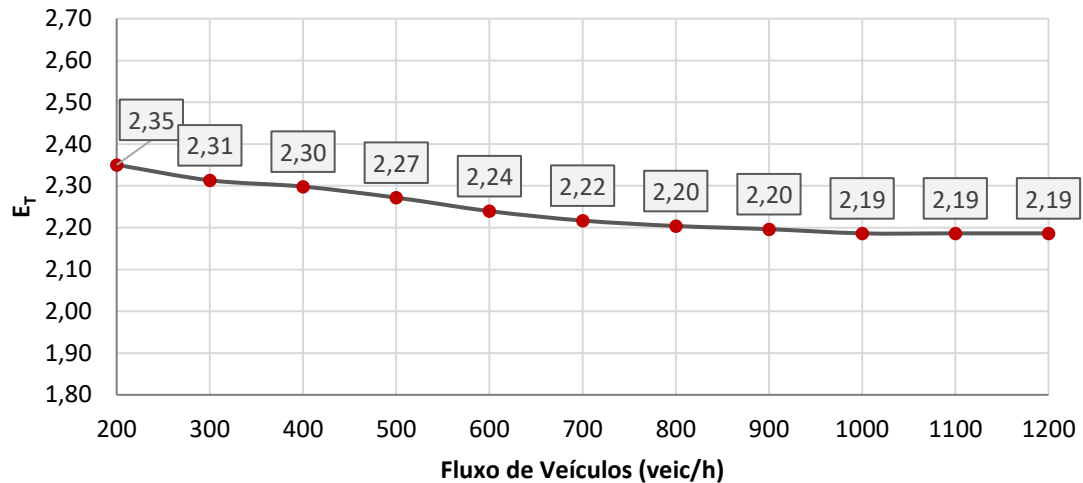
Figura 7.1: Análise de Sensibilidade do fator de equivalência de veículos pesados  $E_T$  em função do percentual de veículos pesados (a); do fluxo de veículos (b); e do comprimento do trecho de obras (c).

(a)

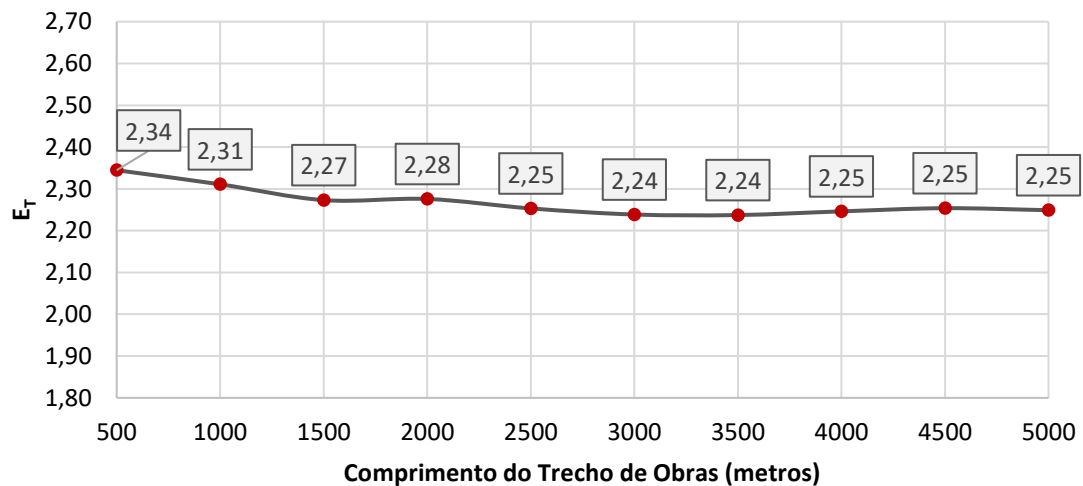




(b)



(c)



Em seguida, incorporou-se, na análise, os impactos dos greides (positivos ou negativos) para cada combinação de  $E_T$  e  $P_{HV}$ , como mostram a Figura 7.1 e a Tabela 7.1. Os greides simulados representam valores de referência para terrenos planos, ondulados e montanhosos, considerando a cota e declive, os quais estão descritos a seguir:

- $i = -6\%$ : declive, terreno montanhoso;
- $i = -3\%$ : declive, terreno ondulado;
- $i = 0\%$ : terreno plano;
- $i = 3\%$ : a cota, terreno ondulado;
- $i = 6\%$ : a cota, terreno montanhoso.

Figura 7.2: Determinação do fator de equivalência de veículos pesados  $E_T$  em função do percentual de veículos pesados e do greide.

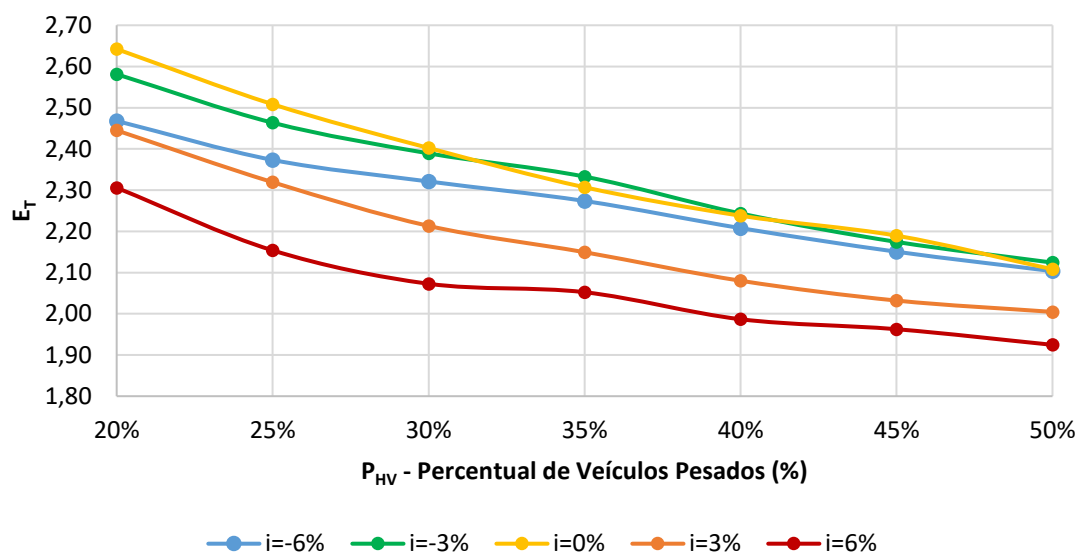


Tabela 7.1: Fator de equivalência de veículos pesados  $E_T$  em função do percentual de veículos pesados  $P_{HV}$  e do greide  $i$

$P_{HV}$	$i = -6\%$	$i = -3\%$	$i = 0\%$	$i = 3\%$	$i = 6\%$
20%	2,47	2,58	2,64	2,45	2,31
25%	2,37	2,46	2,51	2,32	2,15
30%	2,32	2,39	2,40	2,21	2,07
35%	2,27	2,33	2,31	2,15	2,05
40%	2,21	2,24	2,24	2,08	1,99
45%	2,15	2,17	2,19	2,03	1,96
50%	2,10	2,12	2,11	2,01	1,92

É importante destacar que o fator de ajuste em função da rampa ( $f_g$ ) não será empregado nesta modelagem. Os impactos das rampas serão representados individualmente nas variáveis de fator de equivalência dos caminhões ( $E_T$ ), conforme descrito anteriormente, de velocidade e de fluxo de saturação, que serão detalhados a seguir.

### 7.2.2 Fluxo de saturação

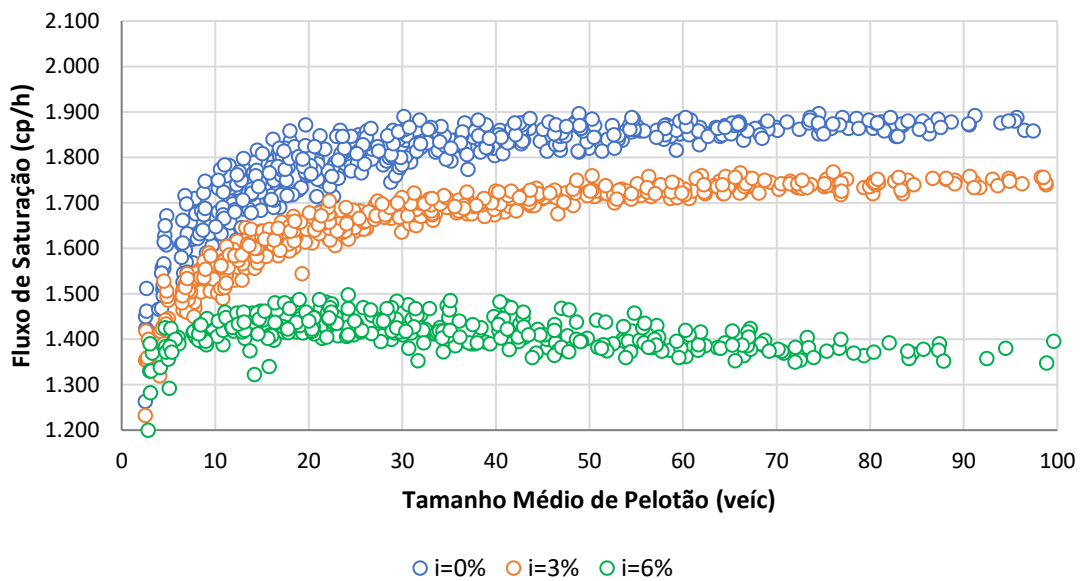
No caso de intervenções Pare e Siga, o fluxo de saturação pode ser entendido como o fluxo de descarga de fila, nos pontos de controle de acessos ao trecho de obras. Uma vez já estabelecidos os fatores de equivalência para caminhões, o cálculo do fluxo de saturação depende, portanto, apenas do *headway* de descarga de fila da sequência de veículos de passeio, como mostra a equação a seguir:

$$Q = \frac{3600}{\bar{h}_{pp}} \quad (7.4)$$

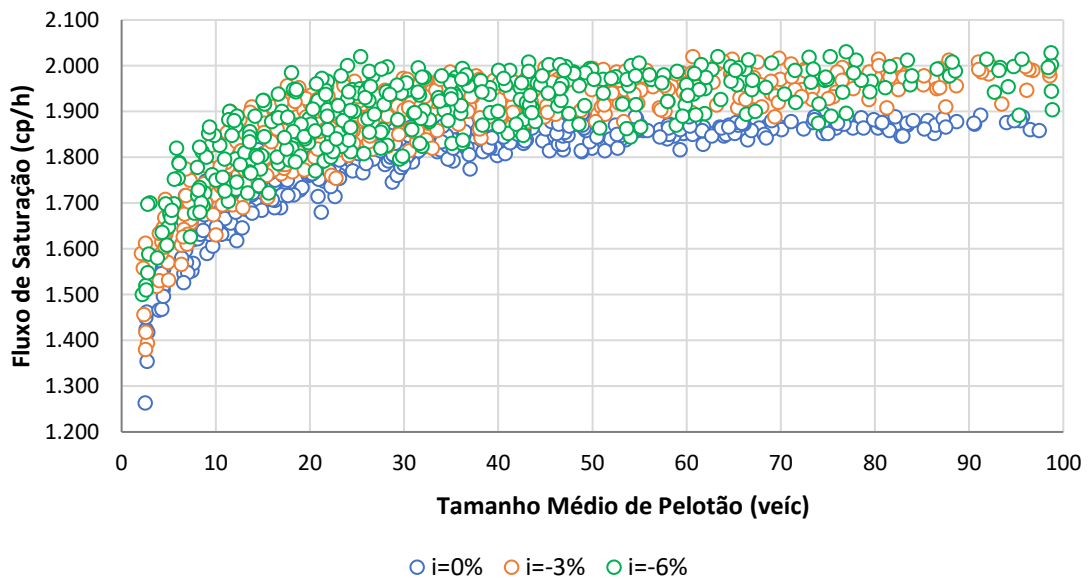
Ao confrontar os valores obtidos de  $Q$  com as variáveis do modelo, observou-se uma forte relação com o tamanho médio de pelotão. A Figura 7.3 mostra as relações entre fluxo de descarga e tamanho médio de pelotão, separados por inclinação do segmento de partida dos veículos.

Figura 7.3: Relação entre fluxo de descarga e tamanho médio de pelotão para trechos em a) a) e em declive (b)

(a)



(b)



Em geral, as curvas de fluxo de descarga por tamanho médio de pelotão possuem formato logarítmico, convergindo para seus respectivos valores de fluxo de saturação, a saber:

- Declive Montanhoso ( $i = -6\%$ ): 1.900 cp/h;
- Declive Ondulado ( $i = -3\%$ ): 1.900 cp/h
- Terreno Plano ( $i = 0\%$ ): 1.850 cp/h
- Aclive Ondulado ( $i = 3\%$ ): 1.700 cp/h
- Aclive Montanhoso ( $i = 6\%$ ): 1.450 cp/h

### 7.2.3 Velocidade média por direção

Uma característica importante que se percebeu durante a coleta de dados consiste no nivelamento das velocidades no desvio de obras provocado pela presença e pelo desempenho dos veículos mais lentos na corrente de tráfego. Como a operação Pare e Siga requer o “represamento” de veículos nos pontos de controle da intervenção e não é permitida a ultrapassagem durante o desvio de obras, os veículos mais lentos necessariamente limitam a velocidade de todos os demais do pelotão que o seguem.

A partir dos resultados dos cenários da simulação, identificou-se uma forte relação entre a velocidade média do trecho de obras e as variáveis de comprimento de obras e fluxo direcional de caminhões. É possível inferir que obras mais extensas tendem a apresentar elevados tamanhos de pelotão e, conseqüentemente, mais veículos são afetados pela presença de veículos lentos à frente na corrente de tráfego. Da mesma forma, quanto maior o fluxo de caminhões no trecho, maior a probabilidade desses veículos limitarem os demais. As tabelas a seguir indicam os valores resultantes dessa análise.

Tabela 7.2: Velocidade média (km/h) por fluxo de caminhões (veic/h) e comprimento de obras (m) - Terreno: declive montanhoso ( $i = -6\%$ )

Greide (%)	Fluxo de Caminhões	Comprimento de Obras (m)									
		500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000
$i = -6\%$	25	59	60	59	59	59	58	58	57	57	57
	50	57	57	57	57	56	56	56	55	55	55
	75	56	56	56	56	55	55	54	54	54	54
	100	55	55	55	55	54	54	54	53	53	53
	125	55	55	54	54	53	52	52	52	52	52
	150	54	54	53	53	52	52	51	51	51	51
	175	54	53	52	51	51	50	50	50	50	50
	200	53	52	52	51	50	50	50	50	50	50
	225	53	52	50	49	48	48	48	48	48	49
	250	52	50	48	49	47	49	49	48	48	48
	275	52	50	48	49	47	49	49	48	48	48
	300	52	50	48	49	47	49	49	48	48	48

Tabela 7.3: Velocidade média (km/h) por fluxo de caminhões (veic/h) e comprimento de obras (m) - Terreno: declive ondulado ( $i = -3\%$ )

Greide (%)	Fluxo de Caminhões	Comprimento de Obras (m)									
		500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000
$i = -3\%$	25	59	60	60	60	59	59	59	58	58	57
	50	57	58	58	57	57	57	56	56	56	54
	75	56	57	57	56	56	56	55	55	54	51
	100	55	56	56	55	55	55	54	54	53	49
	125	55	55	55	55	54	54	54	53	51	47
	150	54	55	55	54	54	53	53	53	50	45
	175	54	54	54	53	53	53	52	52	50	45
	200	54	54	54	53	53	52	52	52	50	45
	225	54	54	53	52	52	51	51	50	48	44
	250	53	53	53	52	52	51	51	50	48	50
	275	53	53	53	52	52	51	51	50	48	50
	300	53	53	53	52	52	51	51	50	48	50

Tabela 7.4: Velocidade média (km/h) por fluxo de caminhões (veic/h) e comprimento de obras (m) - Terreno: plano ( $i = 0\%$ )

Greide (%)	Fluxo de Caminhões	Comprimento de Obras (m)									
		500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000
$i = 0\%$	25	58	59	59	59	59	59	58	58	58	58
	50	56	58	58	58	58	58	57	57	57	57
	75	55	57	57	57	56	56	56	56	55	55
	100	54	56	56	56	55	55	55	55	54	54
	125	54	55	55	55	55	55	54	54	54	54
	150	53	55	55	55	54	54	54	53	53	53
	175	53	55	55	54	54	54	53	53	53	53
	200	53	54	54	54	54	53	53	53	52	52
	225	53	54	54	54	54	53	53	53	52	52
	250	53	54	54	54	53	53	52	52	52	52
	275	53	54	53	53	53	52	52	52	51	51
	300	52	53	53	53	52	52	52	51	51	51

Tabela 7.5: Velocidade média (km/h) por fluxo de caminhões (veic/h) e comprimento de obras (m) - Terreno: aclave ondulado ( $i = 3\%$ )

Greide (%)	Fluxo de Caminhões	Comprimento de Obras (m)									
		500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000
<b><math>i = 3\%</math></b>	25	54	55	55	54	54	54	54	53	53	52
	50	51	52	53	52	52	52	52	52	51	51
	75	48	49	49	49	49	48	47	47	47	46
	100	47	48	48	48	47	46	46	45	45	44
	125	46	47	47	47	46	46	45	45	44	44
	150	45	46	46	46	45	45	44	44	43	43
	175	45	45	45	45	44	44	44	43	43	43
	200	44	45	45	45	44	44	43	43	43	42
	225	44	45	45	44	44	44	43	43	42	41
	250	44	45	45	44	44	43	43	43	42	41
	275	44	45	44	44	43	43	43	42	42	42
	300	44	44	43	43	42	42	42	42	41	41

Tabela 7.6: Velocidade média (km/h) por fluxo de caminhões (veic/h) e comprimento de obras (m) - Terreno: aclave montanhoso ( $i = 6\%$ )

Greide (%)	Fluxo de Caminhões	Comprimento de Obras (m)									
		500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000
<b><math>i = 6\%</math></b>	25	42	40	38	37	35	35	34	34	34	32
	50	38	36	34	33	32	31	31	30	30	30
	75	33	31	30	29	28	27	27	26	26	26
	100	31	29	28	27	26	26	25	25	25	25
	125	29	28	27	27	26	25	25	25	25	24
	150	28	27	26	26	26	25	25	24	25	25
	175	27	26	26	25	25	25	24	24	24	24
	200	27	26	26	25	25	24	24	24	24	24
	225	27	26	25	25	25	24	24	24	24	23
	250	26	25	25	25	24	24	24	24	24	23
	275	26	25	25	24	24	24	24	24	23	23
	300	25	25	24	24	24	24	24	24	23	23

#### 7.2.4 Tempo perdido para arranque

O tempo perdido para arranque ( $l_s$ ) no ciclo de Pare e Siga pode ser dividido em duas componentes. A primeira ( $l_{s,1}$ ) corresponde ao intervalo necessário para alternância de fluxos no desvio, enquanto a segunda ( $l_{s,2}$ ) equivale ao tempo médio de viagem incremental para

aceleração até a retomada da velocidade do trecho.

A primeira componente foi analisada durante a etapa de coleta e análise de dados. Estimou-se que, em condições normais de operação, um intervalo de 5 segundos é suficiente para o processo de liberação da pista e arranque do primeiro veículo em fila. Já o tempo perdido no processo de aceleração no desvio de obras, adotou-se como valor de referência 3 segundos, valor que é comumente utilizado para calcular tempo perdido em interseções semaforizadas.

Assim sendo, estima-se que o parâmetro  $l_s$  seja de 8 segundos por direção, como mostra o cálculo a seguir:

$$l_s = l_{s,1} + l_{s,2} = 5 \text{ s} + 3 \text{ s} = 8 \text{ s} \quad (7.5)$$

### 7.3 Validação dos resultados

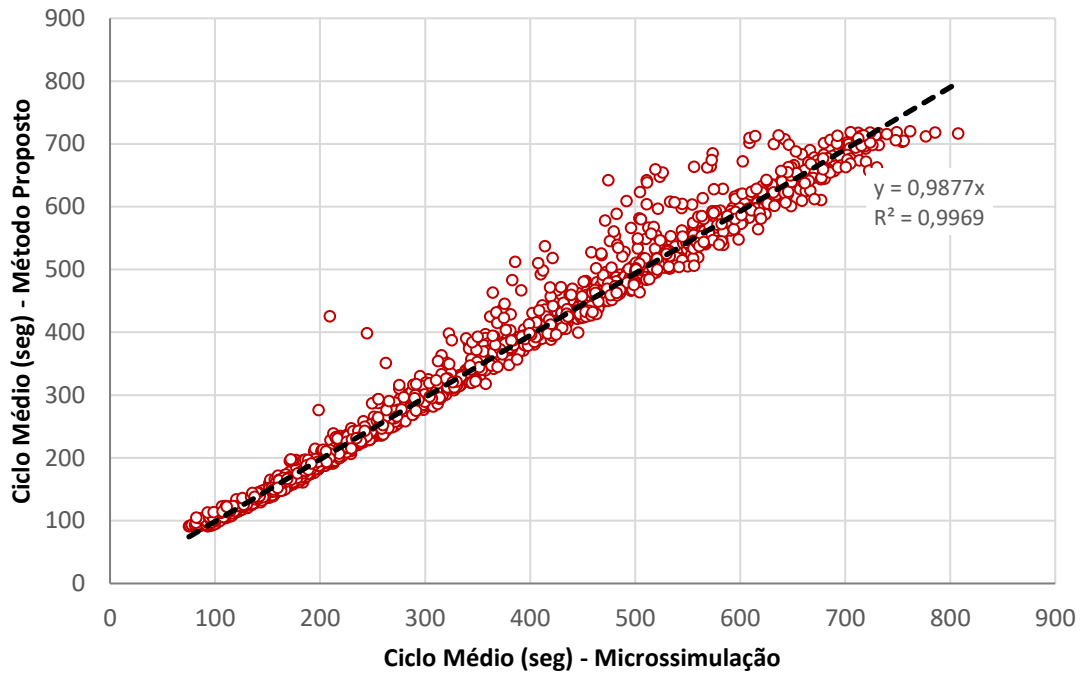
Os resultados das simulações para cada combinação de comprimento de obra, fluxo, percentual de veículos pesados e percentual do fluxo direcional principal foram comparados com os valores obtidos a partir da aplicação da formulação matemática descrita neste trabalho. Foram aplicadas técnicas de regressão linear para validar indicadores como ciclos, atrasos e tamanhos de pelotão médios, como mostra a Figura 7.4.

A comparação do tempo médio de ciclo visa verificar se a formulação matemática gera resultados compatíveis e bem aderentes ao modelo de simulação de tráfego. Nessa análise, o coeficiente de correlação linear ( $R^2$ ) foi de 99,7%, com desvios médios de somente 1,2%.

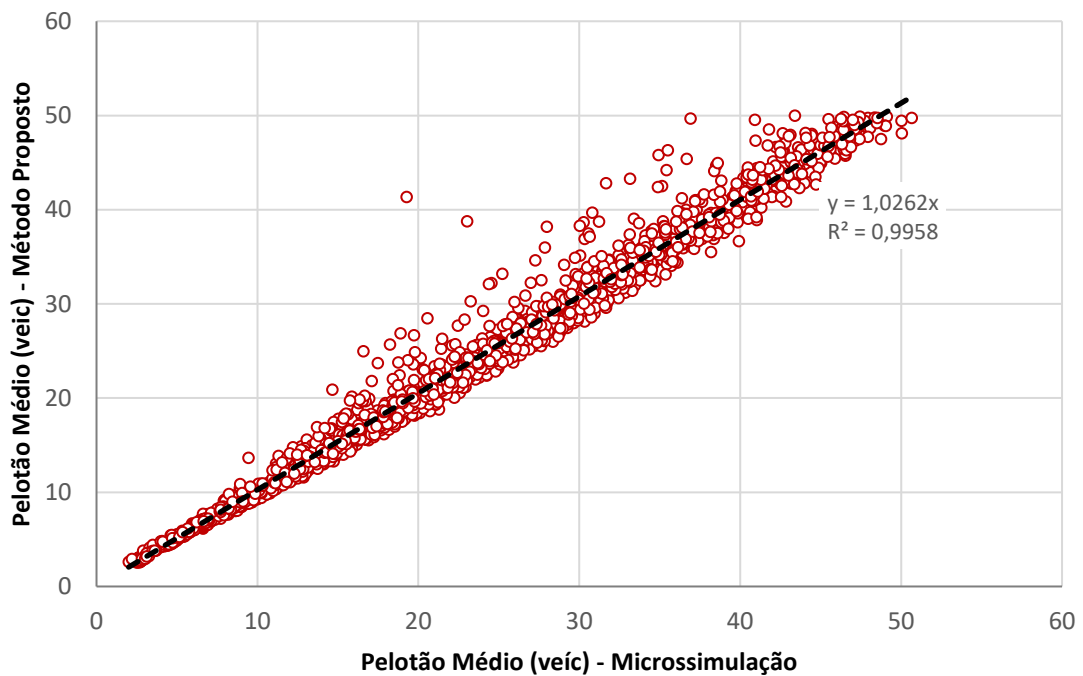
Analogamente, as avaliações das medidas de desempenho também mostraram resultados bastante satisfatórios. Os coeficientes de correlação linear foram superiores a 99% em ambos os casos. Os desvios médios foram de apenas 2,6% para o tamanho médio de pelotão e -3,8% para atraso médio.

Figura 7.4: Análises de regressão linear de tempo médio de ciclo (a); de tamanho médio de pelotão (b); e de atraso médio (c), obtidos através da simulação de tráfego e do método proposto

(a)

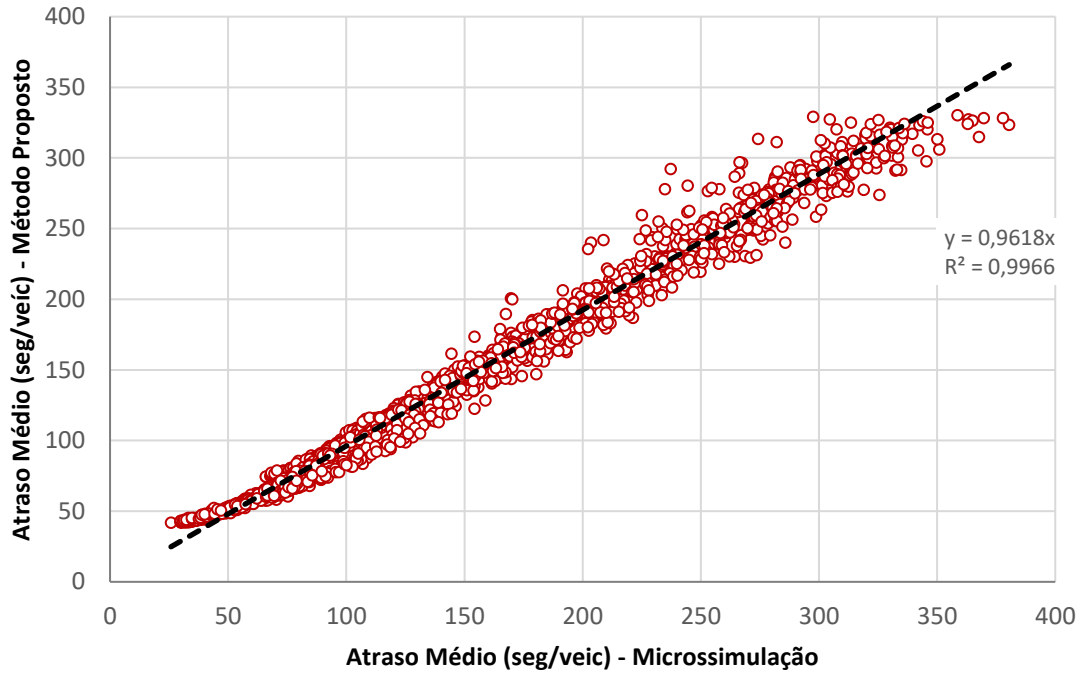


(b)





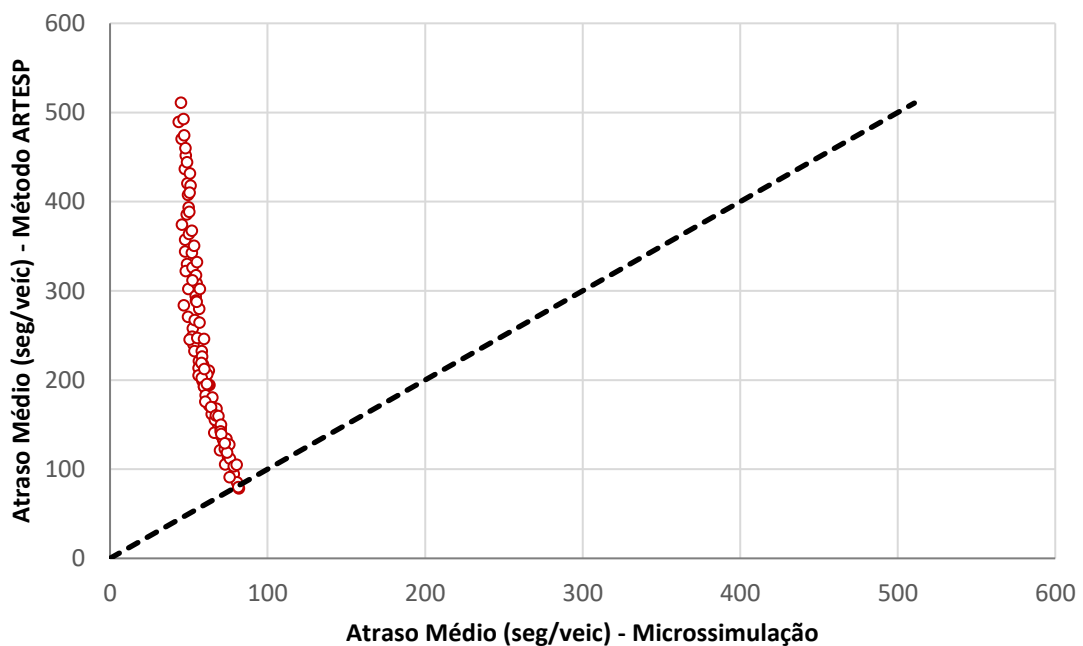
(c)



#### 7.4 Comparação com os resultados do método da ARTESP

O mesmo procedimento foi adotado também para o método descrito em ARTESP (2019), comparando-se os resultados de atraso médio obtidos na simulação de tráfego e na formulação matemática descrita no documento. A Figura 7.5 mostra os resultados da regressão linear dessa análise.

Figura 7.5: Análises de regressão linear de atraso médio obtidos através da simulação de tráfego e do método da ARTESP (2019)



É importante destacar que essa comparação foi realizada considerando somente trechos de obra de 500 metros, devido à limitação do método da ARTESP, e com velocidade de fluxo livre de 100 km/h, gerando velocidades em desvio de obras mais próximas do obtido através da microssimulação (57,6 e 65,3 km/h, respectivamente).

Os resultados obtidos evidenciam a presença de inconsistências na formulação matemática descrita no documento. Como citado anteriormente, nesse processo, a determinação do tempo de verde gera resultados absurdos, indicando capacidades no trecho, mesmo durante a intervenção Pare e Siga, acima dos fluxos de saturação especificados. A reta de regressão decrescente disposta no gráfico mostra que os resultados do método seguem uma lógica inversa à esperada. Diante disso, pode-se concluir que a formulação descrita em ARTESP (2019) não reproduz os resultados esperados e requer adequações.

## 7.5 Análises de sensibilidade

Esta seção apresenta os resultados da aplicação do método proposto para análises de sensibilidade de algumas medidas operacionais e de desempenho, em função da variação do fluxo de veículos e do comprimento do trecho de obras em segmentos planos. As análises foram realizadas para cada tipo de terreno descrito no método: plano ( $i = 0\%$ ), ondulado ( $i = 3\%$ ) e montanhoso ( $i = 6\%$ ), cujos resultados são descritos nos capítulos a seguir.

Para essas avaliações, adotou-se as seguintes premissas:

- Divisão do tráfego direcional: 50%/50% ( $k = 1$ );
- Percentual de veículos pesados: 30%;
- Tempo perdido para arranque: 8 segundos ( $l_s$ ).

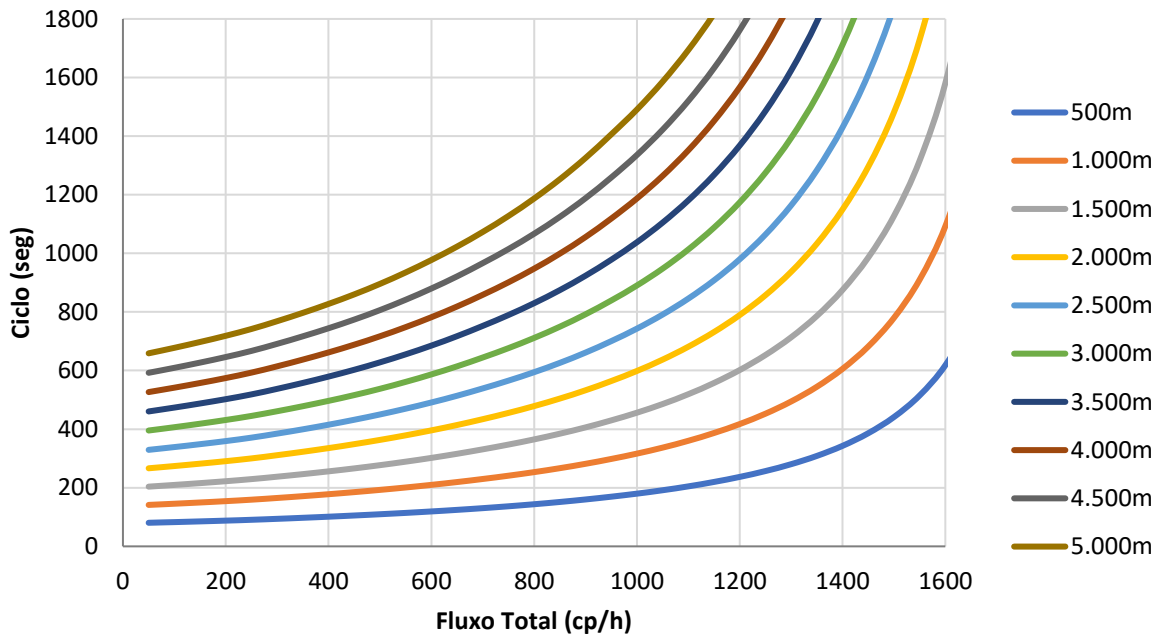
### 7.5.1 Terreno Plano

Esta seção apresenta os resultados da aplicação do método proposto para análises de sensibilidade de algumas medidas operacionais e de desempenho em terreno plano, em função da variação do fluxo de veículos e do comprimento do trecho de obras. A Figura 7.6 indica as variações do ciclo  $C$ , do tamanho médio de pelotão  $P$  e do atraso médio  $d$  em função do fluxo total do trecho, para diferentes cenários de comprimento de obras. É possível observar que as curvas de todas essas medidas apresentam um crescimento exponencial à medida que se aumenta o volume de tráfego no trecho. Além disso, trechos de obras mais extensos necessitam de ciclos maiores de operação, devido ao aumento dos tempos de limpeza. Consequentemente, os pelotões e os atrasos nas aproximações são mais elevados. Para um fluxo de 1.000 cp/h, por

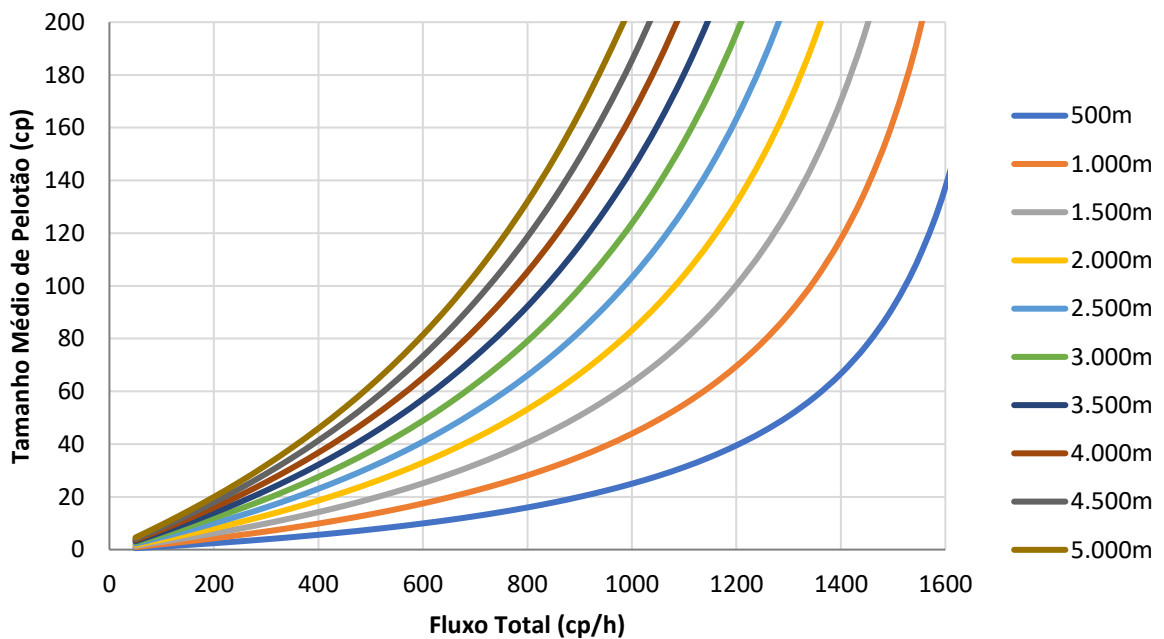
exemplo, considerando cenários de 500 e 1.000 metros de comprimento de obras, o tempo de ciclo sobe de 179 para 317 segundos (+77%), o tamanho de pelotão varia de 25 para 44 cp/ciclo (+76%) e o atraso médio aumenta de 65 para 115 segundos (+77%).

Figura 7.6: Análises de sensibilidade do tempo médio de ciclo (a); do tamanho médio de pelotão (b); e do atraso médio (c) em relação ao fluxo total do trecho para diferentes cenários de comprimento de obra e trechos planos ( $i = 0\%$ )

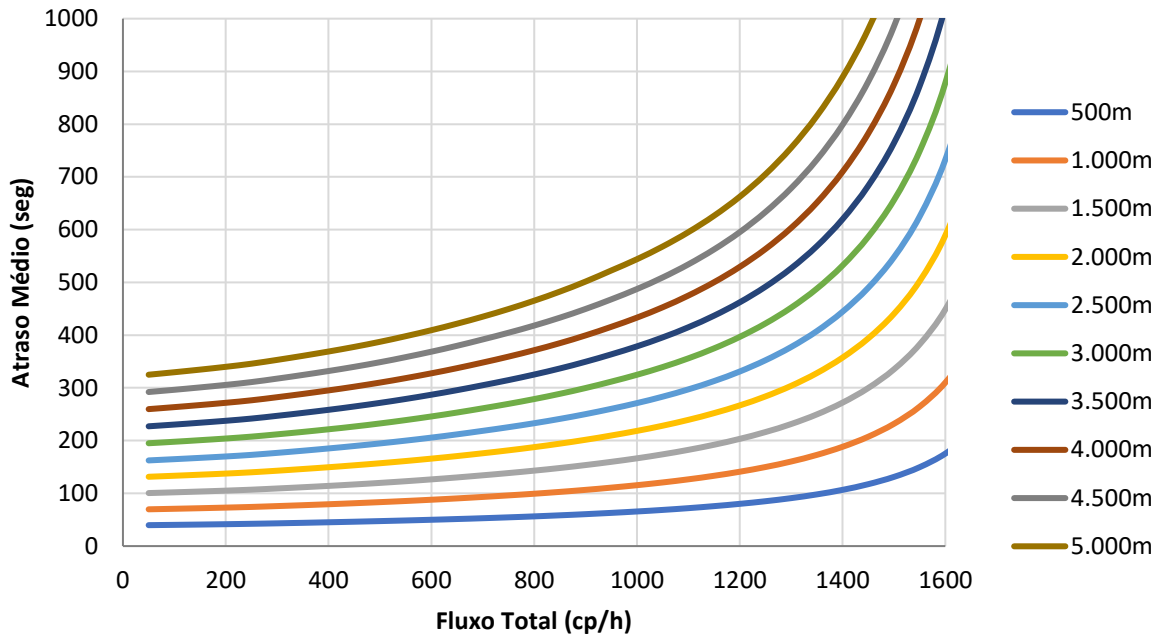
(a)



(b)



(c)

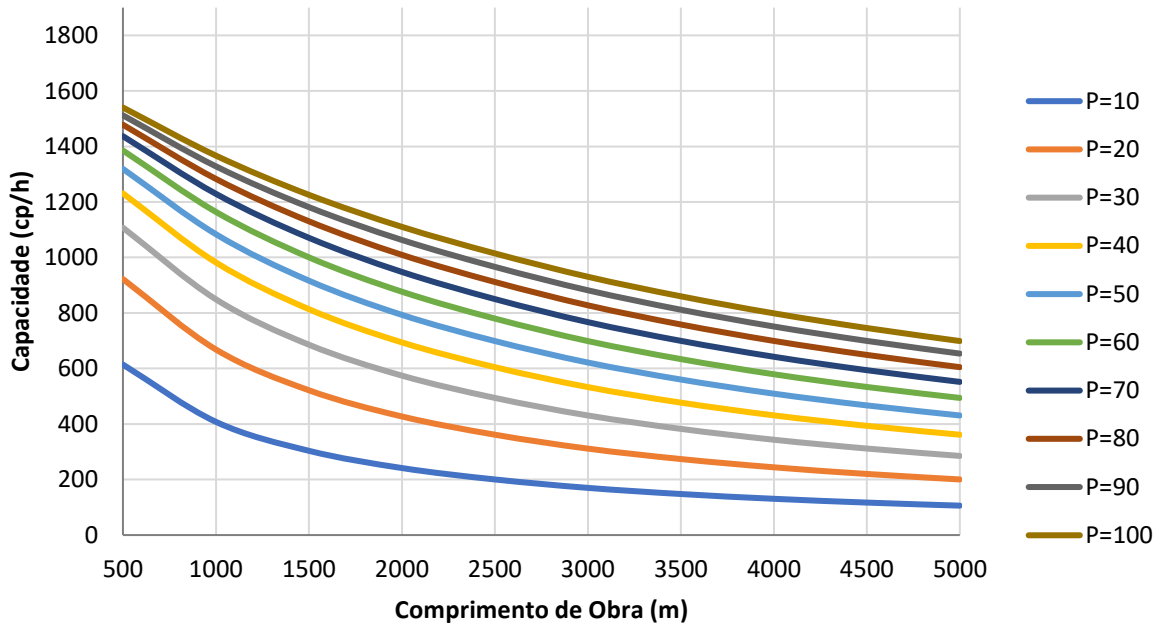


De forma complementar, realizou-se também análises de sensibilidade de medidas como capacidade e comprimento máximo do trecho de obras. A Figura 7.7 mostra as curvas de capacidade *versus* comprimento de obra para cada cenário de valores limites de tamanho médio de pelotão (entre 10 e 100 cp/ciclos) e de atraso médio (entre 1 e 10 minutos), separadamente. Note que, quanto maior os valores limites admitidos, maiores são as capacidades operacionais do trecho. Para obras de extensão de 2.000 metros, por exemplo, a intervenção tem capacidade para atender somente 241 cp/h para  $P_{lim}$  igual a 10 cp. Na hipótese de admitir pelotões médios de até 30 cp ( $P_{lim} = 30$  cp), o fluxo máximo aceitável no trecho sobe para 574 cp/h. O mesmo comportamento ocorre para condicionantes de tempo de atraso. Considerando o mesmo valor de comprimento de obras (2.000 metros), a variação do valor limite de atraso médio  $d_{lim}$  de 3 para 5 minutos, por exemplo, promove o aumento da capacidade do trecho de 809 para 1.340 cp/h.

A última análise (Figura 7.8) consiste na avaliação da curva de comprimento máximo de obras em função da variação do fluxo total, para os valores limite  $P_{lim}$  e  $d_{lim}$ . Em ambos os gráficos, quanto menores os valores limites aceitáveis, menores os comprimentos de obras permitidos. Para uma demanda de tráfego de 800 cp/h no trecho, por exemplo, a extensão máxima admitida é de 269 metros, para pelotões médios  $P_{lim}$  de até 10 cp. Ao aumentar o valor de  $P_{lim}$  para 30 cp, permite-se a execução de obras em trechos de até 1.054 metros. De forma análoga, considerando ainda fluxo total de 800 cp/h, a variação de  $d_{lim}$  de 3 para 5 minutos resulta no aumento do comprimento máximo de obras de 1.879 para 3.214 metros.

Figura 7.7: Análises de sensibilidade da capacidade em relação ao comprimento de obra para diferentes limites de tamanho médio de pelotão (a) e de atraso médio (b) para trechos planos ( $i = 0\%$ )

(a)



(b)

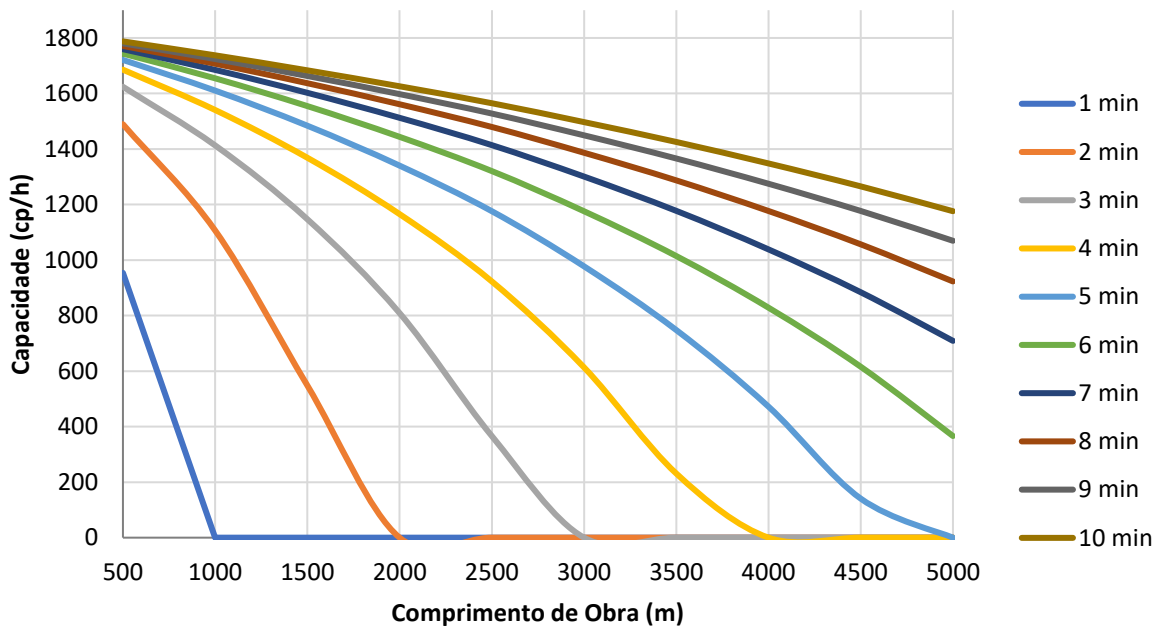
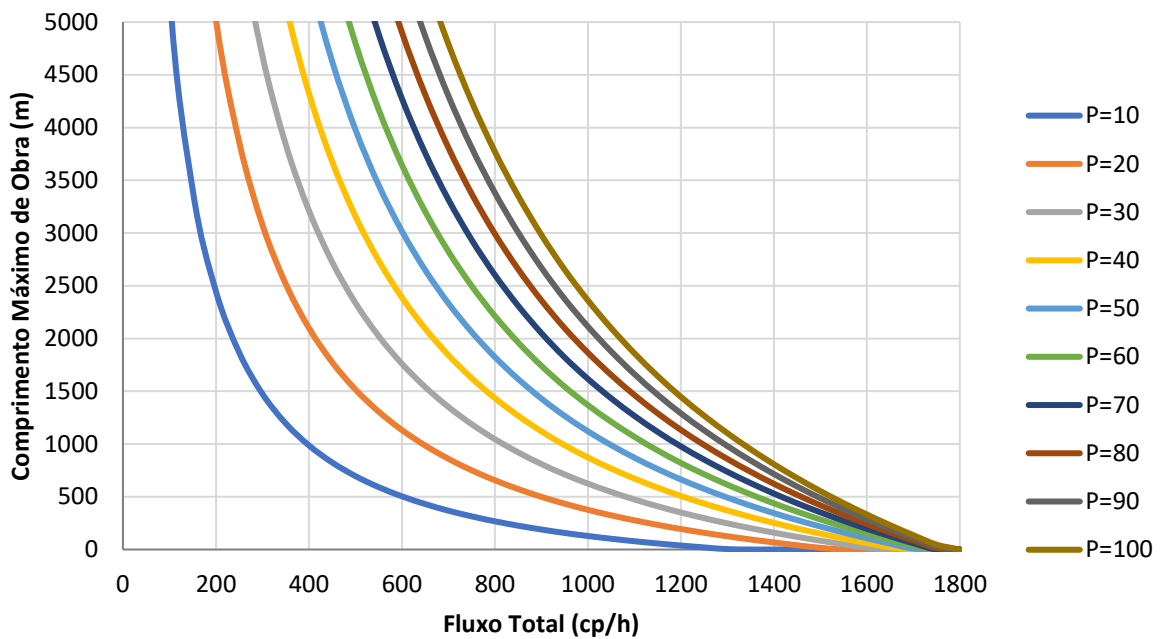
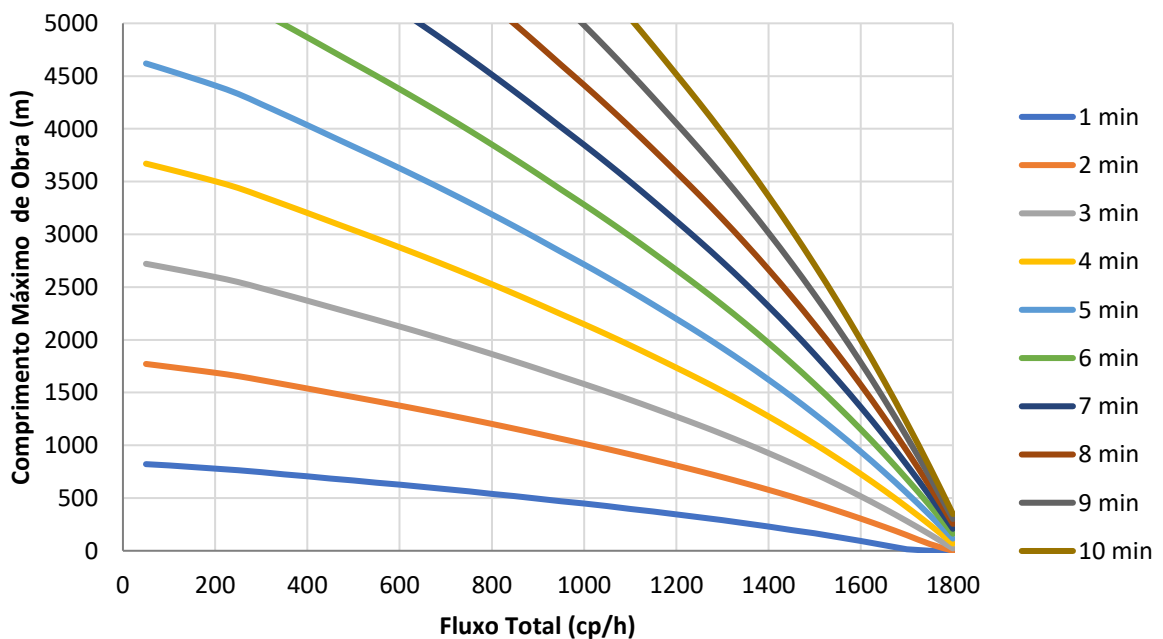


Figura 7.8: Análises de sensibilidade do comprimento máximo de obra em relação ao fluxo total para diferentes limites de tamanho médio de pelotão (a) e de atraso médio (b)

(a)



(b)

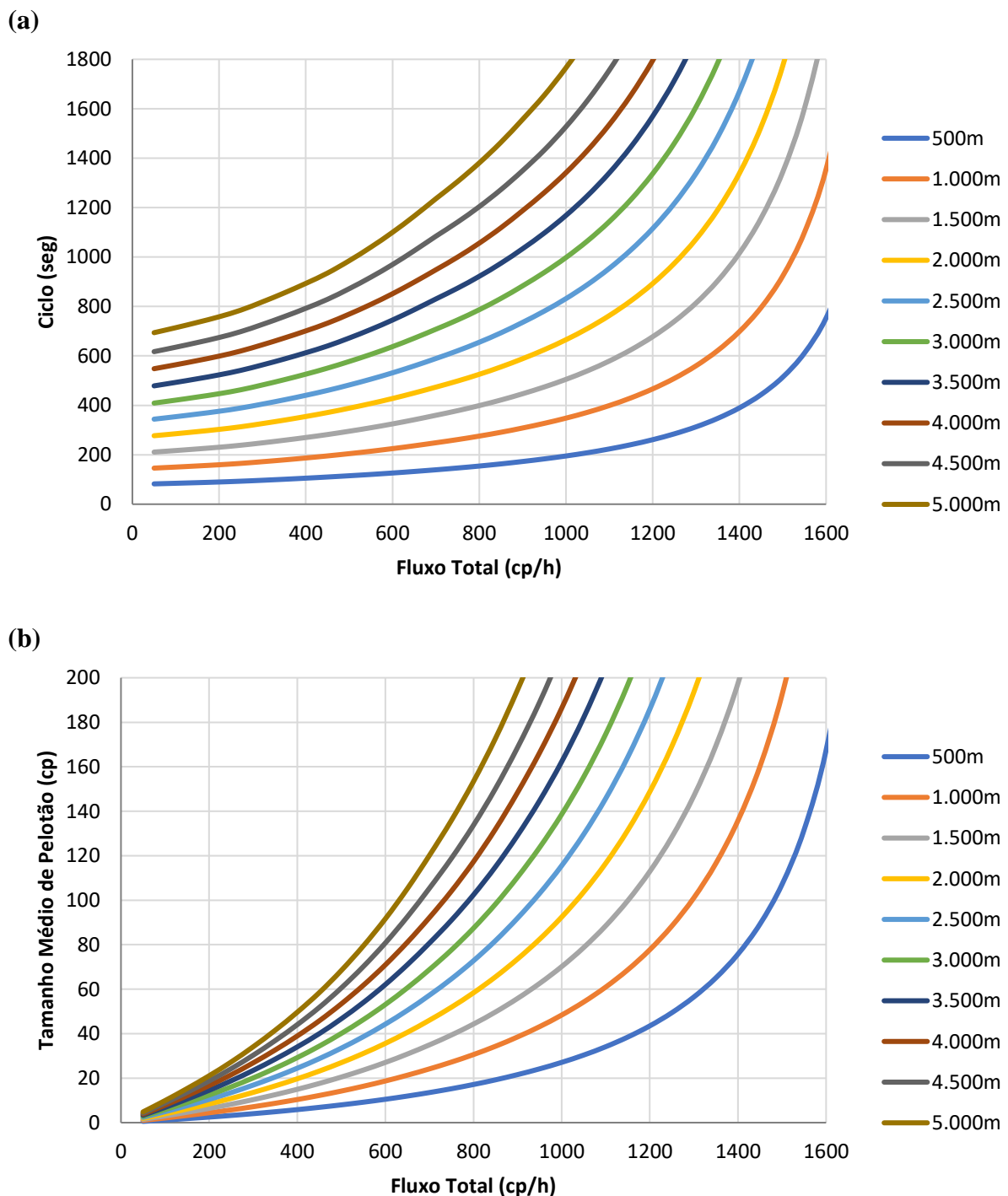


### 7.5.2 Terreno Ondulado

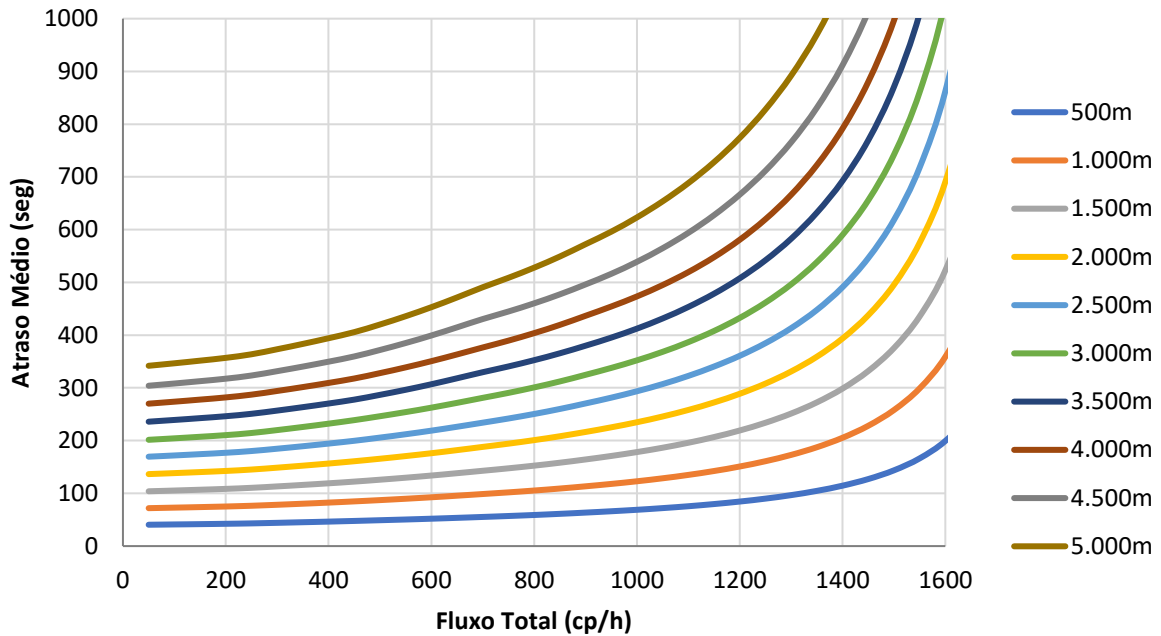
Esta seção apresenta os resultados das análises de sensibilidade de algumas medidas operacionais e de desempenho em terreno ondulado, em função da variação do fluxo de veículos e do comprimento do trecho de obras. A Figura 7.9 mostra as variações do ciclo  $C$ , do tamanho médio de pelotão  $P$  e do atraso médio  $d$  em função do fluxo total do trecho, para diferentes

comprimentos de obras. Adotando-se como referência os mesmos exemplos citados para terreno plano, para obras com extensão de 1.000 metros e fluxo total de 1.000 cp/h, há um aumento de cerca de 10% nos índices de tempo de ciclo (de 316 para 348 segundos) e tamanho de pelotão (de 44 para 48 cp/ciclo) em terrenos ondulados. O atraso médio, por sua vez, foi menos impactado, com variação de +6% (de 115 para 123 segundos).

Figura 7.9: Análises de sensibilidade do tempo médio de ciclo (a); do tamanho médio de pelotão (b); e do atraso médio (c) em relação ao fluxo total do trecho para diferentes cenários de comprimento de obra e trechos ondulados ( $i = 3\%$ )



(c)



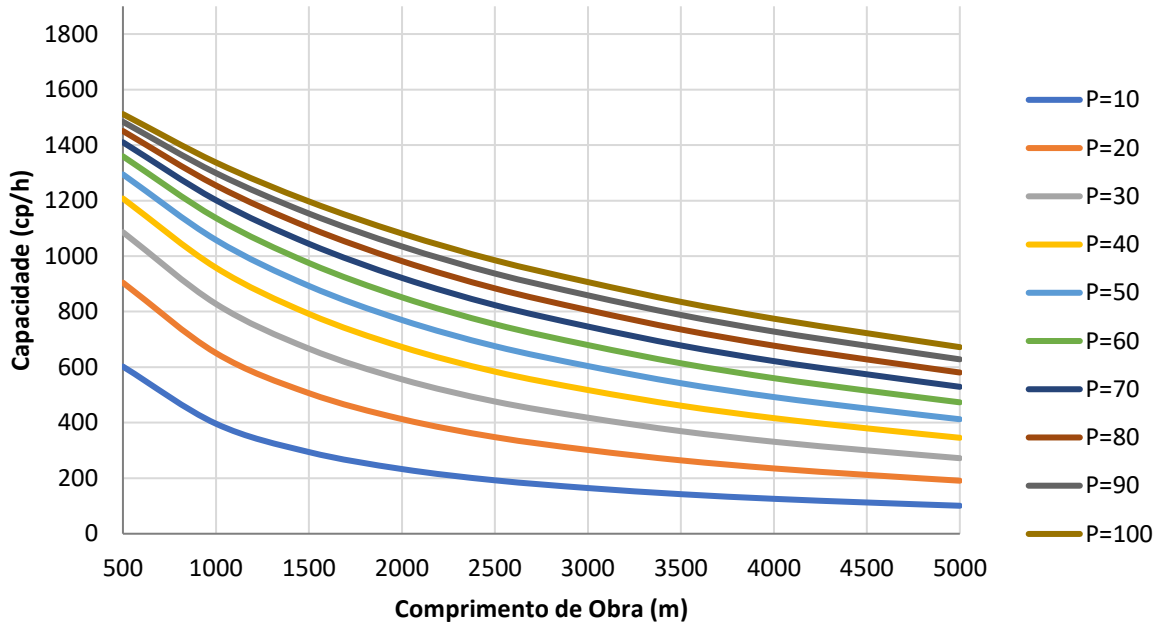
A Figura 7.10 mostra as curvas de capacidade *versus* comprimento de obra para cada cenário de valores limites de tamanho médio de pelotão (entre 10 e 100 cp/ciclo) e de atraso médio (entre 1 e 10 minutos), para terreno ondulado. Ao comparar com as curvas obtidas para o terreno plano, observou-se variações pouco significativas da capacidade em decorrência das características do relevo ondulado. Para obras de extensão de 2.000 metros, por exemplo, admitindo pelotões médios de até 30 cp ( $P_{lim} = 30$  cp), o fluxo máximo aceitável cai de 574 para 556, o que implica em uma variação de apenas -3%. Da mesma forma, considerando o valor limite de atraso de 5 minutos, a capacidade da intervenção reduz de 1.340 para 1.291 cp/h, que representa uma queda de 4%.

A Figura 7.11, por sua vez, mostra as curvas de comprimento máximo de obras em função da variação do fluxo total e dos valores limite  $P_{lim}$  e  $d_{lim}$ . Nesse caso, observa-se que os impactos decorrentes das características de relevo ondulado sobre o comprimento máximo de obras são mais significativos. Ao comparar com os resultados obtidos para terreno plano, considerando-se trechos com fluxo de 800 cp/h, por exemplo, a extensão máxima admitida para pelotões de até 30 cp ( $P_{lim} = 30$  cp), cai de 1.054 para 960 metros, que consiste em uma queda de 9%. De forma análoga, considerando tempo limite de atraso  $d_{lim}$  igual a 5 minutos, comprimento máximo de obras reduz de 3.214 para 2.946 metros, o que representa uma variação de -8%.



Figura 7.10: Análises de sensibilidade da capacidade em relação ao comprimento de obra para diferentes limites de tamanho médio de pelotão (a) e de atraso médio (b) para trechos ondulados ( $i = 3\%$ )

(a)



(b)

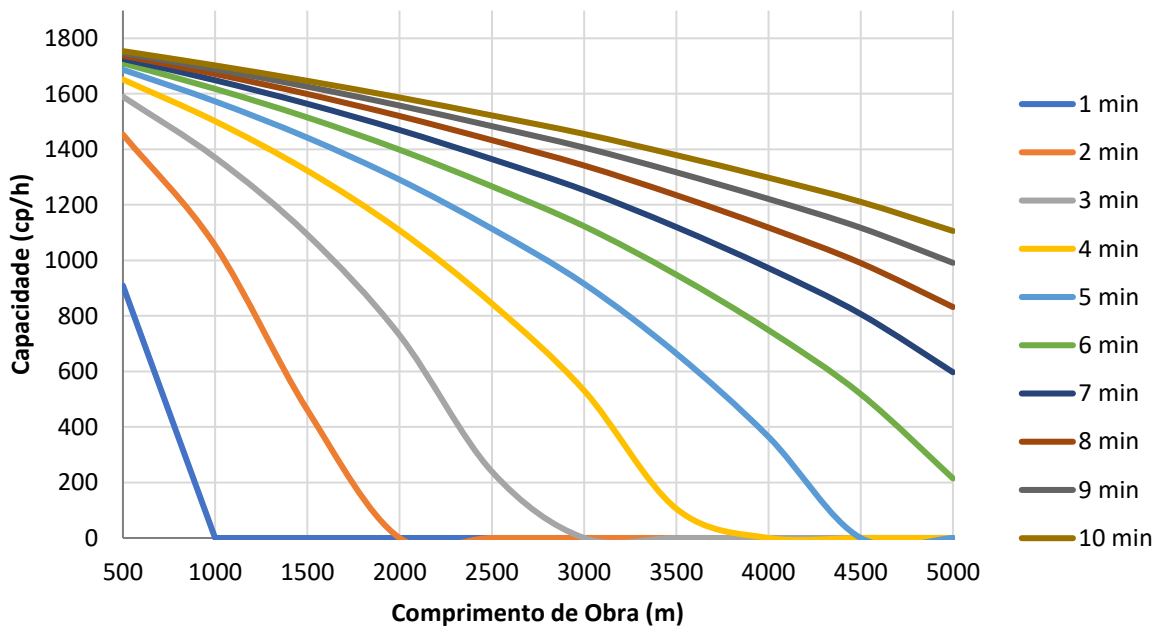
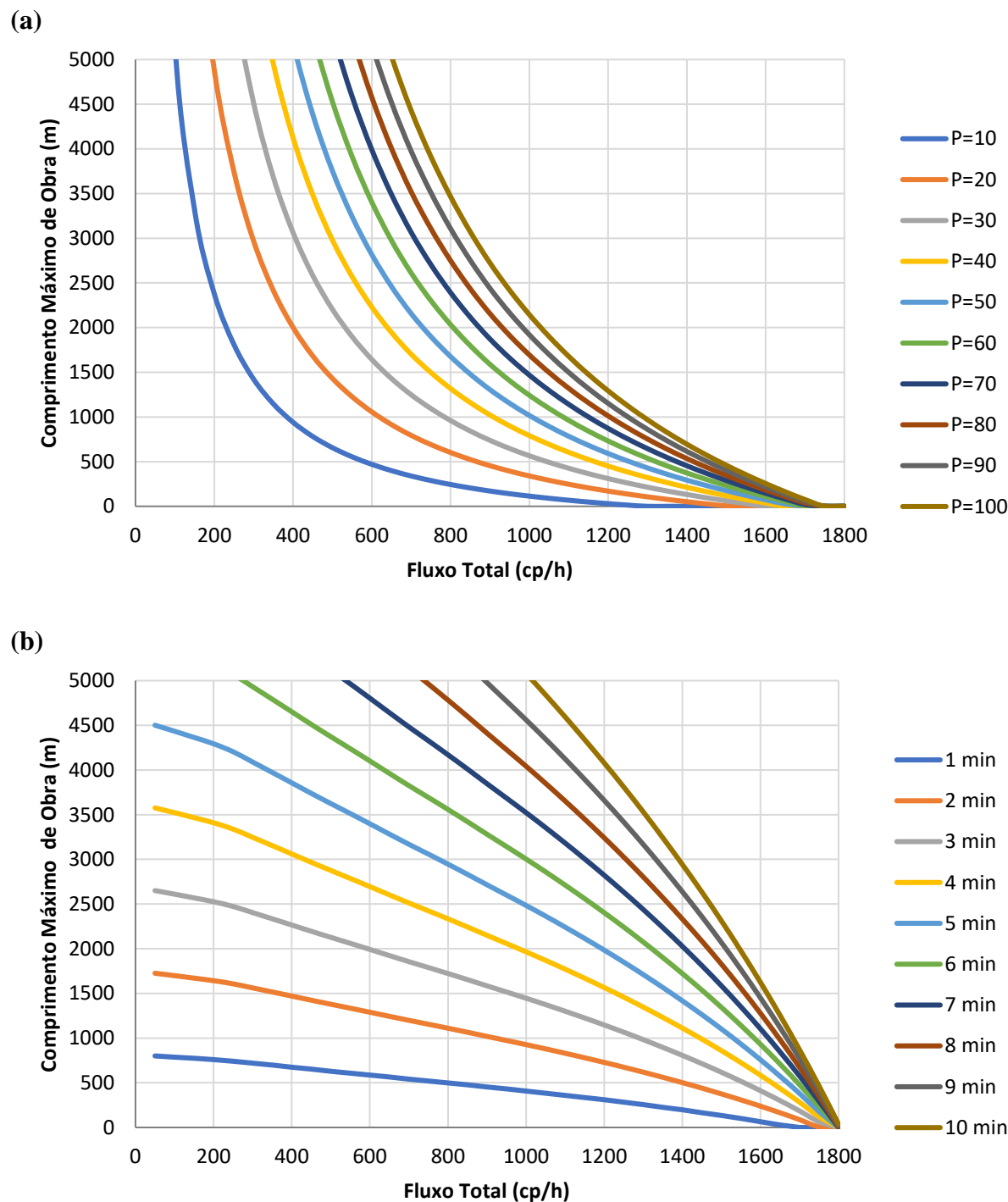


Figura 7.11: Análises de sensibilidade do comprimento máximo de obra em relação ao fluxo total para diferentes limites de tamanho médio de pelotão (a) e de atraso médio (b) para trechos ondulados ( $i = 3\%$ )

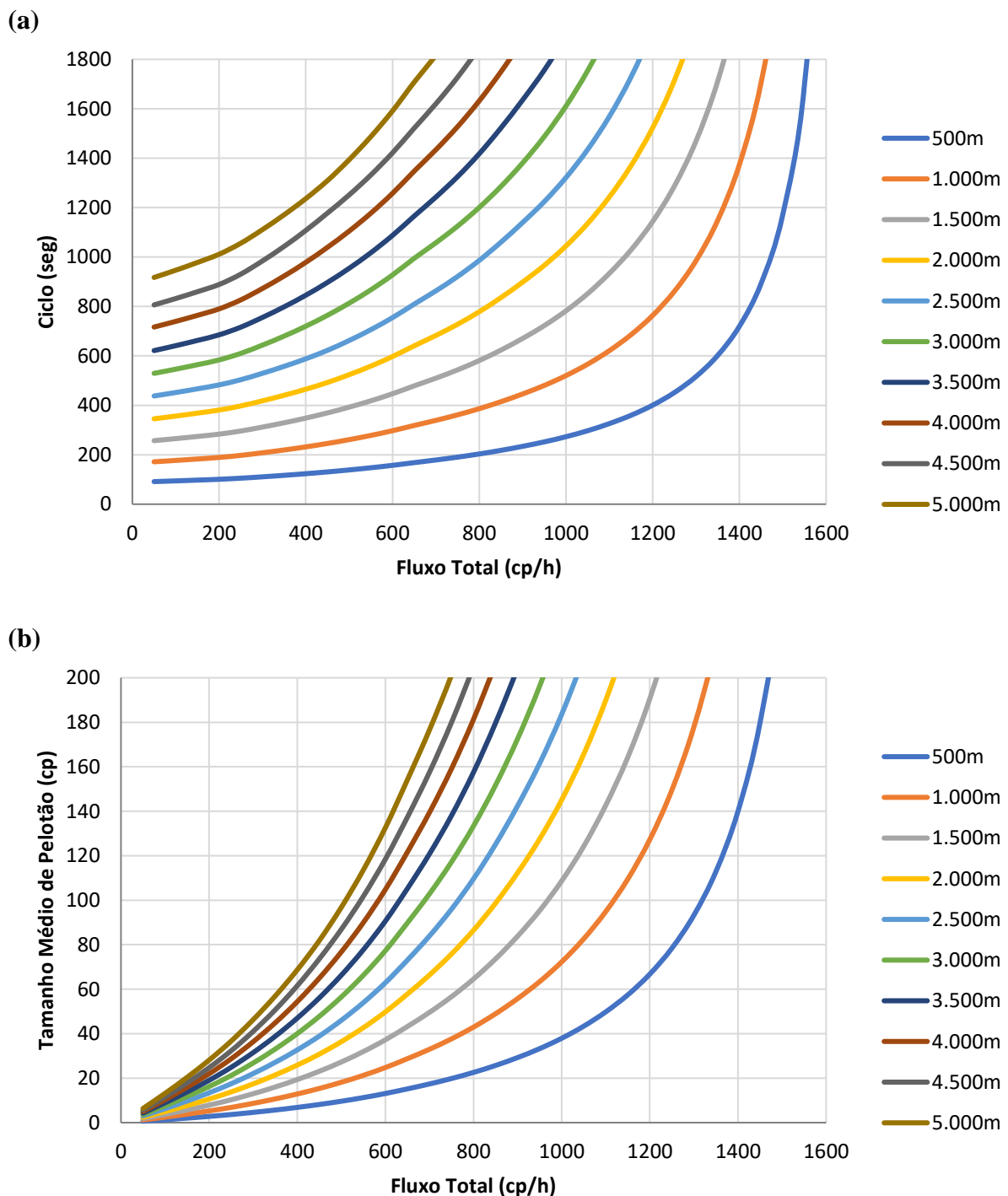


### 7.5.3 Terreno Montanhoso

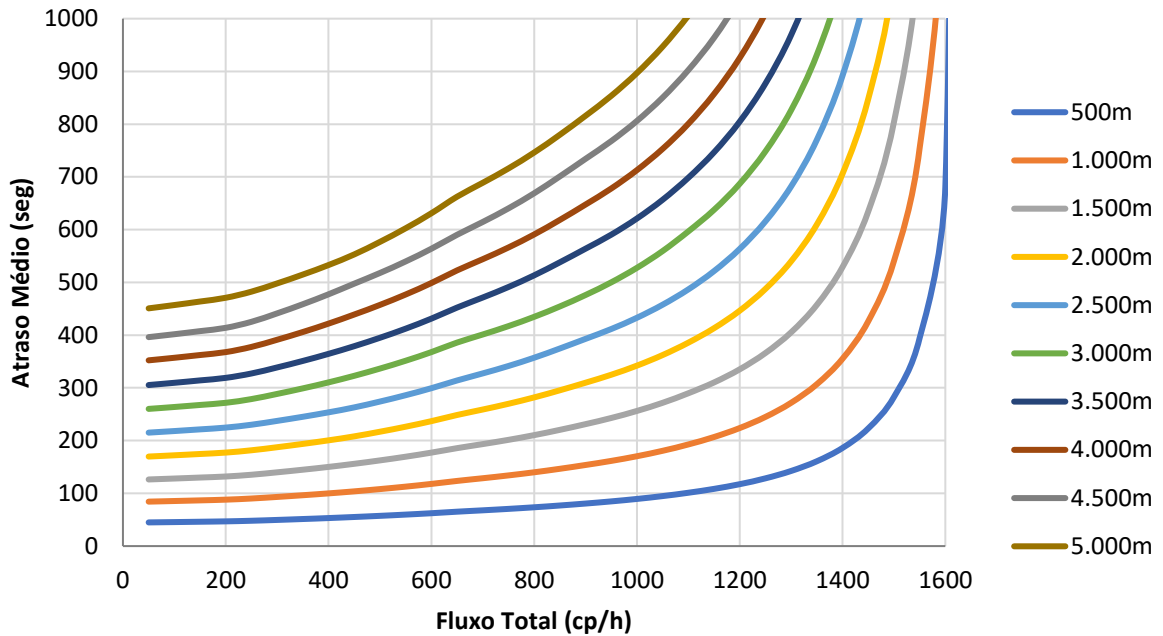
Esta seção apresenta os resultados das análises de sensibilidade de algumas medidas operacionais e de desempenho em **terreno** montanhoso, em função da variação do fluxo de veículos e do comprimento do trecho de obras. A Figura 7.12 indica as variações do ciclo  $C$ , do tamanho médio de pelotão  $P$  e do atraso médio  $d$  em função do fluxo total do trecho, para

diferentes cenários de comprimento de obras. Novamente, adotando-se como referência os resultados obtidos para terreno plano, observa-se impactos significativos do relevo montanhoso sobre os índices avaliados. Para obras com extensão de 1.000 metros e fluxo total de 1.000 cp/h, por exemplo, o tempo de ciclo varia de 316 para 520 segundos (+65%), o pelotão médio sobe de 44 para 72 cp (+64%) e atraso médio aumenta de 115 para 170 segundos (+48%).

Figura 7.12: Análises de sensibilidade do tempo médio de ciclo (a); do tamanho médio de pelotão (b); e do atraso médio (c) em relação ao fluxo total do trecho para diferentes cenários de comprimento de obra e trechos montanhosos ( $i = 6\%$ )



(c)

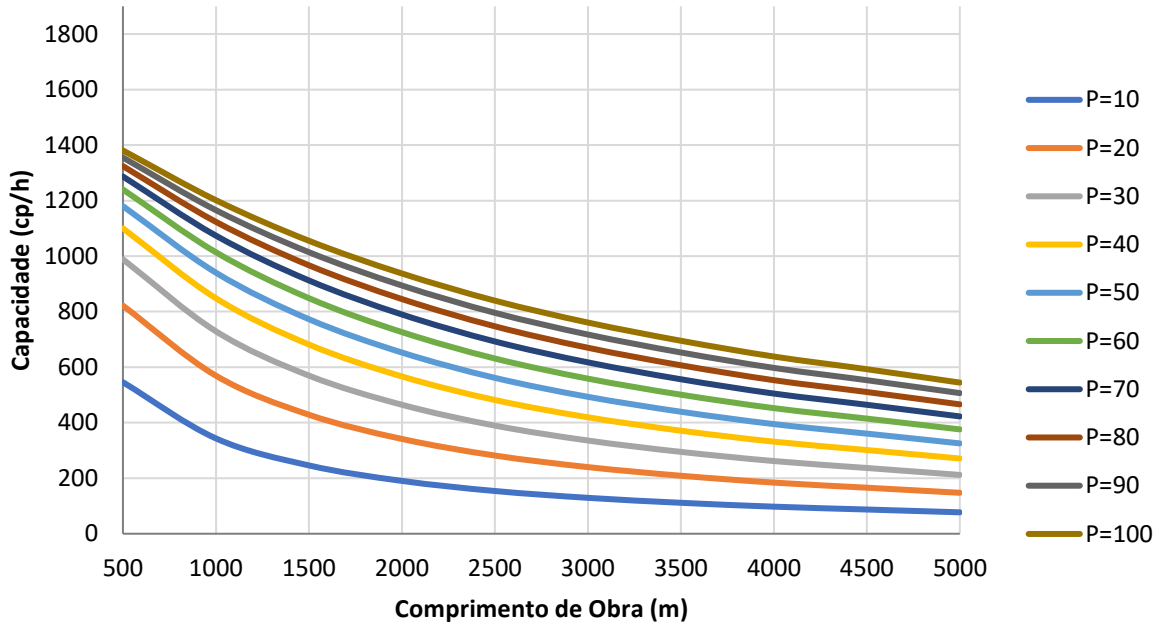


Da mesma forma, o desempenho dos veículos em terreno montanhoso também impacta significativamente a capacidade da intervenção. A Figura 7.13 mostra as curvas de capacidade *versus* comprimento de obra para cada cenário de valores limites de tamanho médio de pelotão (entre 10 e 100 cp/ciclos) e de atraso médio (entre 1 e 10 minutos). Para obras de extensão de 2.000 metros, por exemplo, admitindo pelotões médios de até 30 cp ( $P_{lim} = 30$  cp), o fluxo máximo aceitável quando comparável com terrenos planos cai de 574 para 465 cp/h, o que representa uma redução de 19%. Da mesma forma, considerando o valor limite de atraso de 5 minutos, a capacidade da intervenção reduz de 1.340 para 1.019 cp/h, que implica em uma queda de 24%.

Por último, a Figura 7.14 mostra as curvas de comprimento máximo de obras em função da variação do fluxo total e dos valores limite  $P_{lim}$  e  $d_{lim}$ . Os resultados obtidos revelam que a extensão das obras em terreno montanhoso deve ser inferior à planejada em relevo plano, para atender às mesmas condições operacionais. Considerando trechos com fluxo de 800 cp/h, por exemplo, a extensão máxima admitida cai de 1.054 para 694 metros (variação de -34%) para pelotões médios  $P_{lim}$  de até 30 cp. De forma análoga, considerando tempo limite de atraso  $d_{lim}$  igual a 5 minutos, comprimento máximo de obras reduz de 3.214 para 2.202 metros, o que representa uma queda de 31%.

Figura 7.13: Análises de sensibilidade da capacidade em relação ao comprimento de obra para diferentes limites de tamanho médio de pelotão (a) e de atraso médio (b) para trechos montanhosos ( $i = 6\%$ )

(a)



(b)

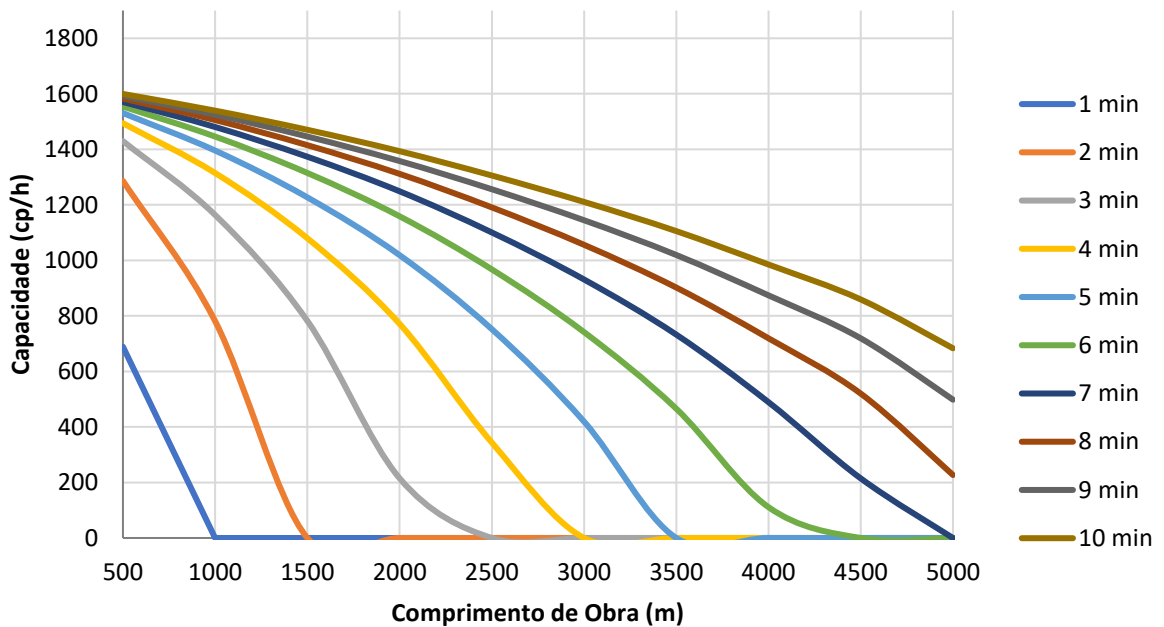
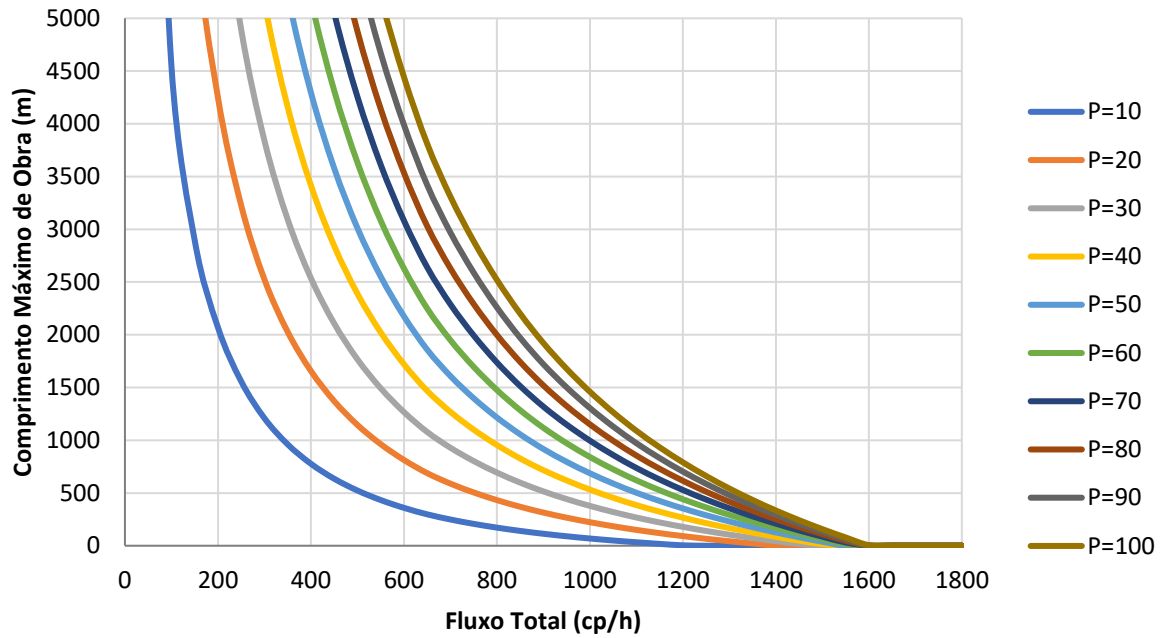
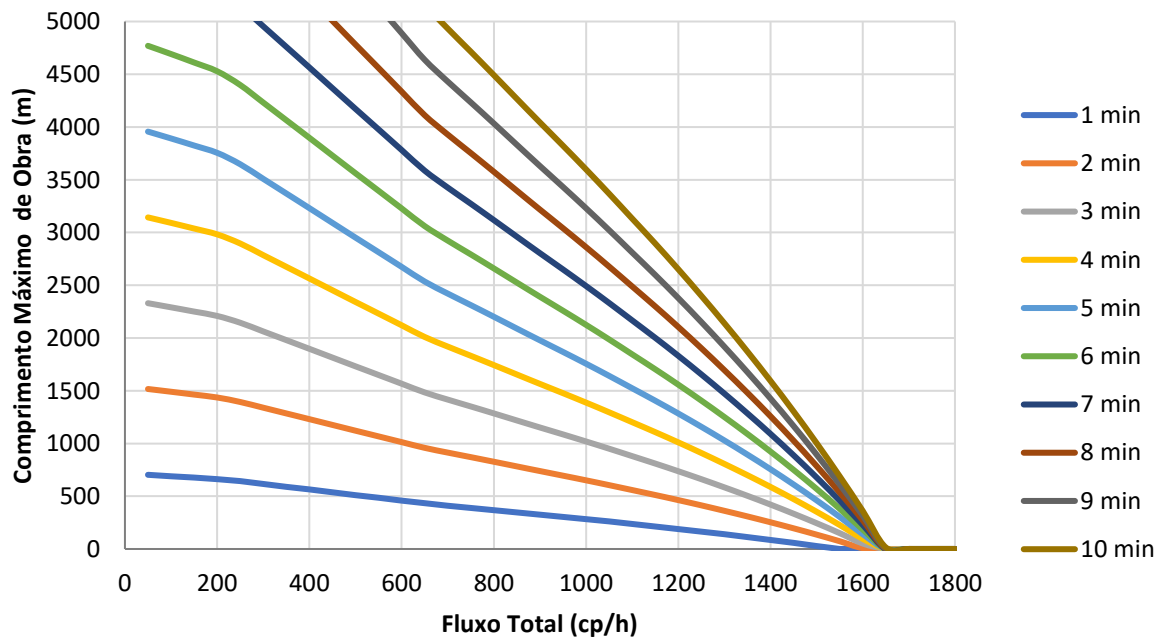


Figura 7.14: Análises de sensibilidade do comprimento máximo de obra em relação ao fluxo total para diferentes limites de tamanho médio de pelotão (a) e de atraso médio (b) para trechos montanhosos ( $i = 6\%$ )

(a)



(b)



## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como meta principal propor um método para determinação de capacidade e de medidas de desempenho para segmentos de rodovias de pista simples sob regime de Pare e Siga durante a execução de obras. Para tanto, desenvolveu-se uma formulação matemática determinística, baseada em Teoria de Filas e nas semelhanças com a dissipação de veículos que ocorre em semáforos.

O método desenvolvido permite estimar os atrasos médios dos usuários e os tamanhos médios dos pelotões formados em cada ciclo de “PARE” e “SIGA”, bem como detalha os diferentes estágios envolvidos no processo, tais como tempos de verde efetivo e de limpeza. Através da formulação apresentada, também é possível calcular a capacidade do segmento e dimensionar o comprimento máximo do trecho em obras, condicionada a valores aceitáveis de tamanho de pelotão e atraso médio.

Para validação do método, construiu-se uma rede de microsimulação de tráfego no software Aimsun Next (recalibrado para condições locais) que possibilitou a obtenção de medidas de desempenho para diferentes cenários. A comparação dos resultados das duas abordagens apresentou índices de correlação bastante satisfatórios, com desvios muito baixos.

Diante dos resultados obtidos, a modelagem matemática pode ser aplicada, ainda, para construção de um método para determinação da qualidade de serviço em trechos de rodovias de pista simples durante a execução de obras, de forma a classificar as diferentes condições de tráfego e estabelecer critérios mínimos para a operação da intervenção.

### 8.1 Coleta de dados

A coleta de dados realizadas neste trabalho foi realizada através da observação direta das condições de tráfego em zonas de obras em rodovias de pista simples. Foram realizadas filmagens nos pontos de controle do Pare e Siga, de forma a captar características da corrente de tráfego, tais como *headways*, velocidade média e filas, e da intervenção, como tempos de ciclo e verde efetivo. Esse conjunto de dados contribuiu tanto para a determinação de variáveis do problema definidas na modelagem matemática, quanto para calibrar o simulador de microsimulação de tráfego no Aimsun Next.

Apesar da amostragem de obras acompanhadas abranger características distintas entre si, recomenda-se, para trabalhos futuros, obter dados de forma mais ampla, contemplando

diferentes perfis geométrico, demandas de tráfego e comprimentos de zonas de obras. Um maior número de observações proporcionaria maior confiabilidade às análises realizadas, sobretudo às mudanças de comportamento dos usuários individualmente e de desempenho do segmento em decorrência da intervenção.

Em trabalhos futuros, sugere-se a obtenção de registros individuais de veículos em segmentos anteriores e posteriores à obra para avaliação dos impactos da formação de pelotão devido ao bloqueio de pista e como ocorre a dissipação da fila. Através da identificação das placas dos veículos, é possível estabelecer os horários de passagem em pontos específicos da rodovia (estações de monitoramento, radares ou praças de pedágio) e quantificar os atrasos médios dos veículos “represados” na zona de obras.

## **8.2 Microsimulação de tráfego**

A dificuldade em se obter informações de tráfego *in loco* torna o simulador de tráfego um importante aliado para a construção de modelos de transportes. Por meio de uma rede de simulação no Aimsun Next, foi possível obter-se medidas de desempenho para diferentes configurações de geometria, demanda e zona de obras, que dificilmente seriam observadas em campo.

A produção de dados sintéticos, no entanto, requer uma calibração criteriosa dos parâmetros do simulador, para representar, de forma fidedigna, o comportamento real do tráfego. O processo de calibração e validação dos parâmetros da microsimulação neste estudo consistiu na identificação de parâmetros dos modelos de *car-following* e de desempenho veicular, que impactam no processo de dissipação de filas e no percurso no trecho de obras, tendo em vista que não é permitido ultrapassagens e tampouco há movimentos conflitantes que justifiquem os demais modelos comportamentais (*gap-acceptance* e *lane-changing*) do simulador.

As velocidades desejadas por classe de veículos foram estimadas a partir dos registros individuais em um sensor de tráfego, durante a execução de obras no trecho. As características de peso e potência para cada classe foram obtidas junto ao trabalho de Silva *et. al.* (2018). Para validação, comparou-se os valores simulados e pesquisados de velocidade média nos desvios das obras acompanhadas em campo.

Em trabalhos futuros, recomenda-se a exploração de mais parâmetros comportamentais do simulador, bem como a adoção de mais estatísticas para validação. A realização de análises de sensibilidade para identificação das variáveis de influência, bem como a aplicação de métodos de otimização para calibração do simulador, também pode contribuir para uma melhor



aderência do simulador aos resultados observados em campo.

### **8.3 Formulação matemática**

Uma das principais características de uma intervenção Pare e Siga consiste na capacidade de adaptação dos tempos de verde, em função da variação da demanda de tráfego em cada sentido. Basicamente, as boas práticas dessa operação sugerem que o acesso ao desvio de obras deve estar liberado tão somente enquanto houver veículos em fila. Matematicamente, isso implica que o grau de saturação da aproximação (fluxo/capacidade) é equivalente ao percentual do tempo de verde (verde/ciclo).

Essa é a premissa fundamental que orientou toda a formulação matemática desenvolvida neste estudo. A partir dessa relação, aplicou-se alguns conceitos da teoria de filas e de operação de semáforos para dedução de equações que possibilitaram tanto o dimensionamento dos diferentes estágios envolvidos quanto o cálculo das medidas de desempenho.

Nesse processo, identificou-se algumas variáveis, as quais foram observadas nas etapas de coleta de dados e de microsimulação de tráfego. Foram aferidos alguns parâmetros como fator de equivalência para veículos pesados, fluxos de saturação, velocidades médias e tempos perdidos para arranque.

Apesar de o método ter se mostrado bem aderente aos resultados obtidos por meio da microsimulação de tráfego, recomenda-se aprofundar em algumas variáveis que não foram consideradas ou foram pouco exploradas. Sugere-se, por exemplo, avaliar os impactos das rampas sobre o processo de dissipação de fila e as variações da velocidade média em função do volume de tráfego e/ou maior concentração de veículos pesados na corrente de tráfego.



## REFERÊNCIAS

- AIMSUN (2020) *Aimsun 20: Dynamic Simulators User's Manual*. Barcelona, Espanha.
- ALLEN, R. W.; HARWOOD, D. W.; CHRISTOS, J. P.; GLAUZ, W. D. (2000) *The capability and enhancement of VDANL and TWOPAS for analyzing vehicle performance on upgrades and downgrades within IHSDM*. Report No. FHWA-RD-00-078, Federal Highway Administration.
- ARGUEA, D. F. (2006) *Simulation-based approach to estimate the capacity of a temporary freeway work zone lane closure*. Ph.D. dissertation, Univ. of Florida, Gainesville, FL.
- ARTESP (2019) *Metodologia para Obtenção Nível de Serviço no Plano Operacional*. Agência de Transporte do Estado de São Paulo. São Paulo, SP.
- BARCELÓ, J.; FERRER, J. L.; GRAU, R.; FLORIAN, M. (1995) *A route based variant of the AIMSUN microsimulation model*. Anais do 2nd World Congress on Intelligent Transport Systems, Yokohama - Japão.
- CASSIDY, M. J.; HAN, L. D. (1993) *Proposed model for predicting motorist delays at two-lane highway work zones*. Journal of Transportation Engineering, 119, 27–42.
- CEDER, A.; REGUEROS, A. (1990) *Traffic control (at alternate one-way sections) during lane closure periods of a two-way highway*. Proceedings, 11th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, New York
- CHEN, C. H.; SCHONFELD, P. (2004) *Work Zone Optimization for Two-Lane Highway Maintenance Projects*. In Transportation Research Record 1877, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 95–105.
- CHEN, C. H.; SCHONFELD, P.; PARACHA, J. (2005) *Work zone optimization for two-lane highway resurfacing projects with an alternate route*. Transportation Research Record 1911, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 51–66
- CHIEN, S.; TANG, Y.; SCHONFELD, P. (2002) *Optimizing work zones for two-lane highway maintenance projects*. Journal of Transportation Engineering, 128, 145–155.
- CNT (2019) *Pesquisa CNT de Rodovias 2019*. Conselho Nacional de Trânsito. Brasília, DF.
- CONTRAN (2017) *Sinalização Temporária*. Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito. Conselho Nacional de Trânsito. Brasília, DF.
- GIPPS, P. G. (1981) *A Behavioural Car-following Model for Computer Simulation*. Transportation Research Board – Part B, Vol. 15B, pp. 105-111.
- GIPPS, P. G. (1986) *A Model for Structure of Lane-changing Decisions*. Transportation Research, Vol. 20-B, No.5, pp. 403- 414
- GOMES, G. (2015) *Análise Comparativa das Características de Tráfego Calculadas pelo HCM-2010 e pelo Microsimulador Aimsun para uma Área de Estudo em Santa Catarina*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

- HUA, X.; WANG, Y.; YU, W.; ZHU, W.; WANG, W. (2019) *Control Strategy Optimization for Two-Lane Highway Lane-Closure Work Zones*. Sustainability, 11, 4567. 1-21.
- HUANG, Q., SHI, J. (2008) *Optimizing work zones for two-lane urban road maintenance projects*. Tsinghua Science Technology 13 (5), 644-650.
- JIAN, Z.; CHANGQIAO, S.; JIAN, R.; RONGGUI, Z.; WANG, X. (2004) *Capacity Analysis of Urban Interchange Using Simulation Method*. Traffic and Safety of Road, 2004, vol. 7, No. 2, pp. 907-912.
- KRAMMES, R. A.; CROWLEY, K. W. (1986) Passenger car equivalents for truck on level freeway segments. *Transportation Research Record*, Washington D. C., EUA, n. 1091, p. 10-17.
- LIMA, C. M.; FLEURY, L. V.; SILVA, F. A.; BESSA JR; J. E.; COSTA, A. L.; VELHO, D. M. C.; ANDALÍCIO, A. F. (2018) Caracterização da frota de caminhões da rodovia BR-040 para fins de simulação microscópica com o Vissim. In: 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, 2018, Gramado-RS. Anais eletrônicos do congresso. Gramado-RS: ANPET, 2018.
- NEWELL, G. F. (1969) *Properties of vehicle-actuated signals: one-way street*. Transportation Science 3, 30-51.
- PORTUGAL, L. S. (2005) *Simulação de Tráfego: conceitos e técnicas de modelagem*. Rio de Janeiro: Interciência.
- SCHOEN, J. M., BONNISON, J. A.; SAFI, C.; SCHROEDER, B.; HAJBABAIE, A.; YEOM, C. H.; ROUPHAIL, N.; WANG, Y.; ZHU, W.; ZOU, Y. (2015). *Work Zone Capacity Methods for the Highway Capacity Manual*. NCHRP Project 03-107. National Cooperative Highway Research Program, Washington, DC.
- SCHONFELD, P.; CHIEN, S. (1999) *Optimal work zone lengths for two-lane highways*. Journal of Transportation Engineering, 125, 21–29.
- SHIBUYA, S.; NAKATSUJI, T.; FUJIWARA, T.; MATSUYAMA, E. (1996) *Traffic control at flagger-operated work zones on two-lane roads*. Transportation Research Record 1529, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 3-9.
- SON, Y. T. (1999) *Queuing delay models for two-lane highway work zones*. Transportation Research Part B: Methodological, 33(7), 459–471.
- SONG, H.; ZHANG, W.; YANG, X. (2012) *Capacity Research on Cloverleaf Interchange by Using Simulation Loading Method*. In: CICTP 2012: International Conference of Transportation Professionals, Beijing, China. pp. 707-717.
- SOUSA, V. C.; BESSA JR; J. E.; OLIVEIRA, J. K. S.; BETHONICO, F. C. (2018) Modelos para obtenção da capacidade e do nível de serviço em rotatórias urbanas. In: 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, 2019, Balneário Camboriú-SC. Anais eletrônicos do congresso. Balneário Camboriú-SC: ANPET, 2019.
- TRB (2016) *Highway Capacity Manual 2016*. Transportation Research Board. Washington, DC.
- USDOT (2003) *Manual on uniform traffic control devices (MUTCD)*. United States

Department of Transportation, Washington, DC.

USDOT (2005). *Types of Traffic Analysis Tools*. United States Department of Transportation, Washington, DC.

WASHBURN, S.; HILES, T.; KEVIN, H. (2008) *Impact of Lane Closures on Roadway Capacity: Development of a Two-Lane Work Zone Lane Closure Analysis Procedure (Part A)*. Florida Department of Transportation: Tallahassee, FL, USA.

WEBSTER, F. V. (1958) *Traffic Signal Settings*. Road Research Technical Paper. Road Research Laboratory: London, UK.

ZHU, W.; LI, Z.; ASH, J.; WANG, Y.; HUA, X. (2017) *Capacity Modeling and Control Optimization for a Two-Lane Highway Lane-Closure Work Zone*. *Journal of Transportation Engineering*, 143, 04017059.