



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

ROBERTO MATHEUS NUNES TORQUATO

**ESTIMAÇÃO DO EFEITO DAS MOTOCICLETAS NA CAPACIDADE DE
INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS**

FORTALEZA

2019

ROBERTO MATHEUS NUNES TORQUATO

ESTIMAÇÃO DO EFEITO DAS MOTOCICLETAS NA CAPACIDADE DE
INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS

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

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

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na
Publicação Universidade Federal do
Ceará

Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

-
- T64e Torquato, Roberto Matheus Nunes.
Estimação do efeito das motocicletas na capacidade de interseções semaforizadas / Roberto
Torquato. – 2019.
100 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de
Pós- Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Manoel Mendonça de Castro Neto.
1. Fluxo de saturação. 2. Tempo perdido inicial. 3. Regressão linear. I. Título.

CDD 388

ROBERTO MATHEUS NUNES TORQUATO

ESTIMAÇÃO DO EFEITO DAS MOTOCICLETAS NA CAPACIDADE DE
INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS

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

Aprovada em: 21/11/2019

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Ph.D. Francisco Moraes de Oliveira Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Ph.D. Maria Alice Prudêncio Jacques
Universidade de Brasília (UnB)

AGRADECIMENTOS

À FUNCAP, pelo apoio financeiro desta pesquisa.

Ao prof. Manoel, por todas a orientação para o desenvolvimento da pesquisa, pela maneira que conduziu todo o processo e pelas contribuições dadas ao meu crescimento pessoal e acadêmico durante esses anos de graduação e mestrado.

Ao prof. Moraes e à Profa. Maria Alice, pela revisão crítica e pelas contribuições dadas como banca examinadora.

Aos professores Felipe Loureiro, Flávio Cunto, Verônica Castelo e Bruno Bertoncini, por todos os ensinamentos acadêmicos e pessoais.

À minha mãe, Veleida Maria, por todo o apoio incondicional em todas as decisões realizadas por mim até este momento. Ao meu pai, Roberto Denis, por toda a contribuição ao meu desenvolvimento pessoal. E ao meu irmão, Lucas Torquato, por ser o suporte e amigo de todas as horas, mesmo de longe.

À Raina, por todo o amor e apoio fornecidos durante esse processo, principalmente nos momentos de maior dificuldade.

Aos amigos Renan Carioca e Samir Auad, por serem, desde a graduação, catalizadores para o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos amigos do PETRAN, em especial Talyson Bandeira, Isabela Castro e Lucas Tito, por compartilharem os bons momentos e as dificuldades durante o percurso do mestrado.

Ao Janailson Queiroz e Alessandro Macêdo, da Transitar Engenharia, por todo o companheirismo e profissionalismo durante esse processo.

Aos amigos e amigas Beatriz Rodrigues, Hannah Silva, Ezequiel Dantas, Gustavo Pinheiro, Bianca Macedo, Mariana Gomes e Tais Costa, por toda o afeto e aprendizados compartilhados no ambiente de trabalho e fora dele.

Aos colegas do PAITT, por fornecerem o ambiente de trabalho que permitiu o desenvolvimento desse projeto e pela imposição de desafios que me permitem ser um profissional mais qualificado.

RESUMO

Uma das principais atividades da engenharia de tráfego é a estimação da capacidade de aproximações de interseções semaforizadas. A grande parcela dos estudos de capacidade não contabiliza a participação das motocicletas nos fluxos veiculares, pois partem do princípio de que as motocicletas não impactam significativamente a fluidez do tráfego geral. No entanto, estudos elaborados em países asiáticos, que apresentam uma elevada participação de motocicletas na frota veicular, indicam que as motocicletas exercem efeitos significativos no tempo perdido no início do verde e nos *headways* de saturação. No Brasil, desde os anos 90, ocorre um aumento significativo na aquisição de motocicletas, principalmente devido à insatisfação relacionada ao nível de serviço do transporte público ofertado e à facilidade de crédito. Atualmente, a repartição deste modo na frota veicular é de 26% no Brasil e de 49% no Ceará, reforçando a relevância do principal objetivo deste trabalho, que é o de avaliar o efeito das motocicletas na capacidade de uma interseção semaforizada de Fortaleza. Para atingir esse objetivo, foram coletadas variáveis que buscassem representar a presença de motocicletas à frente do primeiro veículo da fila, entre veículos longitudinalmente e entre veículos lateralmente (corredor virtual). A partir da coleta, foram elaboradas análise descritiva de correlação e modelos de regressão linear com a finalidade de determinar e avaliar o efeito das motocicletas no tempo perdido no início do verde, no *headway* de descarga, no fluxo de saturação, além de obter e analisar o fator de equivalência veicular das motocicletas. Os resultados apontaram que o efeito médio de uma motocicleta posicionada à frente ou entre veículos no tempo perdido inicial está entre 0,3 e 0,7 segundos. No entanto, não houve indícios que motocicletas posicionadas no corredor virtual (espaço formado pela brecha entre veículos de duas faixas de tráfego adjacentes) influenciem o *headway* de descarga. Quanto aos *headways* de descarga em regime de saturação, os resultados indicaram que uma motocicleta à frente do veículo aumenta o *headway* aproximadamente 0,7 segundo, o que representa um acréscimo de 30% no *headway* do veículo leve. De acordo com os modelos elaborados, o aumento de 1% da proporção de motocicletas posicionadas longitudinalmente entre veículos durante o regime de saturação diminui, em média, o fluxo de saturação entre 4 e 6 veículos por hora. O fator de equivalência veicular das motocicletas, considerando apenas as que estavam posicionadas longitudinalmente entre veículos, obtido nesse estudo varia entre 0,15 e 0,21.

Palavras-chave: Fluxo de saturação. Tempo perdido inicial. Regressão linear.

ABSTRACT

One of the main activities of traffic engineering is the estimation of the capacity of approximations of signalized intersections. Most of the traffic engineering studies do not consider the participation of motorcycles in vehicular flows, since it is considered that they do not significantly impact the fluidity of usual traffic. However, studies carried out in Asian countries – which have a high number of motorcycles in the vehicle fleet – indicate that motorcycles have significant effects on start-up lost time and on saturation headways. In Brazil, since the 1990s, there has been a significant increase in the acquisition of motorcycles, mainly due to dissatisfaction related to the level of service offered by public transportation and the credit facility. Currently, the percentage of motorcycles in the vehicle fleet is 26% in Brazil and 49% in Ceará, reinforcing the relevance of the main aim of this work: to evaluate the effect of motorcycles on the capacity of a signalized intersection in Fortaleza. To accomplish this goal, variables that represent the presence of motorcycles in front of the first vehicle in the row were collected: distance between vehicles longitudinally and between vehicles laterally (virtual corridor). From collected data, descriptive correlational analysis and linear regression models were developed in order to determine and evaluate the effect of motorcycles on the start-up lost time, on the discharge headway and on the saturation flow. In addition, the passenger-car equivalence factor of motorcycles were also analyzed. The results showed that the average effect of a motorcycle positioned ahead or between vehicles in the initial lost time is between 0.3 and 0.7 seconds. However, there was no evidence that motorcycles positioned in the virtual corridor (space formed by the gap between vehicles from two adjacent traffic lanes) influence the discharge headway. As for the discharge headways in saturation regime, the results indicated that a motorcycle in front of the vehicle increases the headway by approximately 0.7 seconds, which represents a 30% increase in the light vehicle's headway. According to the models developed, the 1% increase in the proportion of motorcycles positioned longitudinally between vehicles during the saturation regime decreases the saturation flow between 4 and 6 vehicles per hour. The vehicle equivalence factor for motorcycles varies between 0.15 and 0.21, considering only those that were positioned longitudinally between vehicles.

Keywords: Saturation flow. Start-up lost time. Linear regression.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – <i>Headways</i> de descarregamento de uma fila de interseção semaforizada.....	17
Figura 2 – Posição relativa das motocicletas para analisar o S	23
Figura 3 – Posição relativa das motocicletas para analisar o tp_1	23
Figura 4 – Método empregado.....	30
Figura 5 – Exemplificação da variável quarto <i>headway</i> acumulado dos veículos, em segundos, do ciclo semafórico j ($H4_j$)	32
Figura 6 – Exemplificação da variável quantidade de motocicletas acumuladas à frente do primeiro veículo da fila do ciclo semafórico j (Qmf_j).	32
Figura 7 – Exemplificação da variável somatório da quantidade de motocicletas posicionadas longitudinalmente, durante a descarga da fila, entre o primeiro e o quarto veículo, do ciclo semafórico j ($Qmev_j$)	33
Figura 8 – Exemplificação da variável última posição dos veículos em fila que possui, nas suas adjacências, motocicletas no corredor virtual, do ciclo semafórico j ($Pmcv_j$)	33
Figura 9 – Exemplificação da variável quantidade de veículos pesados, até o 4º veículo da fila, do ciclo semafórico j (Qvp_j)	33
Figura 10 – Exemplificação das variáveis hds_{ij} , qm_{ij} e tv_{ij}	34
Figura 11 – Exemplificação das variáveis hs_j , S_j e pm_j	35
Figura 12 – Macrolocalização da interseção analisada	38
Figura 13 – Visualização da filmagem obtida da aproximação oeste do cruzamento entre as avenidas Bernardo Manuel e Dr. Silas Munguba, pela qual foi realizada a coleta deste estudo.....	39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – <i>Headways</i> de descarga da fila, em segundos, por faixa de tráfego	42
Gráfico 2 – Intervalo de confiança da média do <i>headway</i> de descarga, em segundos, por posição na fila	45
Gráfico 3 – <i>Headways</i> de descarga da fila, em segundos, por faixa de tráfego e por tipo de veículo.....	46
Gráfico 4 – Intervalo de confiança da média do <i>headway</i> de descarga, em segundos, por tipo de veículo na faixa direita e por posição na fila	49
Gráfico 5 – <i>Headways</i> de descarga da fila, em segundos, por faixa de tráfego e por presença ou ausência de motocicleta	50
Gráfico 6 – Quantidade média de motocicletas à frente dos veículos por posição na fila	54
Gráfico 7 – Intervalo de confiança da média do <i>headway</i> de descarga, em segundos, por presença de motocicletas na faixa esquerda e por posição na fila	55
Gráfico 8 – Intervalo de confiança da média do <i>headway</i> de descarga, em segundos, por presença de motocicletas na faixa direita e por posição na fila	55
Gráfico 9 – Matriz de correlação entre as variáveis H_{4j} , Q_{mfj} , Q_{mevj} , Q_{vpj} e P_{mcvj} na faixa esquerda	59
Gráfico 10 – Matriz de correlação entre as variáveis H_{4j} , Q_{mfj} , Q_{mevj} , Q_{vpj} e P_{mcvj} na faixa direita	61
Gráfico 11 – Matriz de correlação entre as variáveis hds_{ij} , qm_{ij} e tv_{ij} na faixa esquerda	63
Gráfico 12 – Matriz de correlação entre as variáveis hds_{ij} , qm_{ij} e tv_{ij} na faixa direita	64
Gráfico 13 – Matriz de correlação entre as variáveis S_j e pm_j na faixa esquerda.....	66
Gráfico 14 – Matriz de correlação entre as variáveis S_j e pm_j na faixa direita.....	67
Gráfico 15 – Matriz de correlação entre as variáveis TVS_j , QM_j , QVL_j e QVP_j na faixa esquerda	68
Gráfico 16 – Matriz de correlação entre as variáveis TVS_j , QM_j , QVL_j e QVP_j na faixa direita	69
Gráfico 17 – Resíduos do modelo de regressão do H_{4j} em ordem da coleta, da faixa esquerda	75
Gráfico 18 – Diagnóstico dos resíduos da regressão do H_{4j} da faixa esquerda	76
Gráfico 19 – Diagnóstico dos resíduos da regressão do H_{4j} da faixa direita	78
Gráfico 20 – Diagnóstico dos resíduos da regressão do hds_{ij} da faixa esquerda.....	81

Gráfico 21 – Diagnóstico dos resíduos da regressão do hds_{ij} da faixa direita.....	83
Gráfico 22 – Resíduos do modelo de regressão do S_j em ordem da coleta, da faixa esquerda	86
Gráfico 23 – Diagnóstico dos resíduos da regressão do S_j da faixa esquerda.....	87
Gráfico 24 – Diagnóstico dos resíduos da regressão do S_j da faixa direita.....	89
Gráfico 25 – Resíduos do modelo de regressão do S_j em ordem da coleta, da faixa esquerda	92
Gráfico 26 – Diagnóstico dos resíduos da regressão do TVS_j da faixa esquerda.....	93
Gráfico 27 – Diagnóstico dos resíduos da regressão do TVS_j da faixa direita.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores dos parâmetros obtidos por Mihn e Sano (2003)	25
Tabela 2 – Ciclos semafóricos durante o período em estudo	40
Tabela 3 – Volumes horários veiculares da aproximação analisada	41
Tabela 4 – Estatísticas descritivas dos <i>headways</i> de descarga, por posição na fila, da faixa esquerda	43
Tabela 5 – Estatísticas descritivas dos <i>headways</i> de descarga, por posição na fila, da faixa direita	44
Tabela 6 – Estatísticas descritivas dos <i>headways</i> de descarga, por tipo de veículo e por posição na fila, da faixa esquerda	47
Tabela 7 – Estatísticas descritivas dos <i>headways</i> de descarga, por tipo de veículo e por posição na fila, da faixa direita	48
Tabela 8 – Estatísticas descritivas dos <i>headways</i> de descarga, por ausência e presença de motocicletas e por posição na fila, da faixa esquerda.....	52
Tabela 9 – Estatísticas descritivas dos <i>headways</i> de descarga, por ausência e presença de motocicletas e por posição na fila, da faixa direita.....	53
Tabela 10 – Resultados da regressão linear da variável H_{4j} para a faixa esquerda.....	73
Tabela 11 – Resultado dos testes das premissas da regressão do H_{4j} da faixa esquerda	74
Tabela 12 – Resultados da regressão linear da variável H_{4j} para a faixa direita.....	77
Tabela 13 – Resultado dos testes das premissas da regressão do H_{4j} da faixa direita	78
Tabela 14 – Resultados da regressão linear da variável hds_{ij} para a faixa esquerda	79
Tabela 15 – Resultado dos testes das premissas da regressão do hds_{ij} da faixa esquerda.....	80
Tabela 16 – Resultados da regressão linear da variável hds_{ij} para a faixa direita	82
Tabela 17 – Resultado dos testes das premissas da regressão do hds_{ij} da faixa direita.....	83
Tabela 18 – Resultados da regressão linear da variável S_j para a faixa esquerda	84
Tabela 19 – Resultado dos testes das premissas da regressão do S_j da faixa esquerda.....	85
Tabela 20 – Resultados da regressão linear da variável S_j para a faixa direita	88
Tabela 21 – Resultado dos testes das premissas da regressão do S_j da faixa direita.....	89
Tabela 22 – Resultados da regressão linear da variável TVS_j para a faixa esquerda.....	90
Tabela 23 – Resultado dos testes das premissas da regressão do TVS_j da faixa esquerda.....	91
Tabela 24 – Resultados da regressão linear da variável TVS_j para a faixa direita.....	93
Tabela 25 – Resultado dos testes das premissas da regressão do TVS_j da faixa direita.....	94

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
tp ₁	Tempo perdido inicial
p ₂	Tempo perdido final
hds	<i>Headway</i> de descarga de saturação
hs	<i>Headway</i> de saturação
S	Fluxo de saturação
HCM	Highway Capacity Manual
TRB	Transportation Research Board
R ²	Coefficiente de determinação
hd	<i>Headway</i> de descarga
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
MDCs	<i>Motorcycle Dependent Cities</i>
MCU	<i>Motorcycle Unit</i>
FEQ	Fator de equivalência veicular
H ₄	<i>Headway</i> acumulado dos quatro primeiros veículos em fila
Q _{mf}	Quantidade de motocicletas acumuladas à frente do primeiro veículo da fila
Q _{mev}	Somatório da quantidade de motocicletas posicionadas longitudinalmente, durante a descarga da fila, entre o primeiro e o quarto veículo
P _{cmv}	Última posição dos veículos em fila que possui, nas suas adjacências, motocicletas no corredor virtual
Q _{vp}	Quantidade de veículos pesados, até o 4º veículo da fila
q _m	Volume de motocicletas entre veículos consecutivos que estão no regime de descarga de saturação, não sendo consideradas as motocicletas posicionadas no corredor virtual
tv	Variável binária que considera o tipo de veículo de cada <i>headway</i> de descarga, com valor 0 para o veículo leve e valor 1 para o veículo pesado

pm	Porcentagem de motocicletas entre veículos consecutivos que estão no regime de descarga de saturação, levando em consideração a quantidade de veículos leves e de veículos pesados
TVS	Tempo de verde durante o regime de saturação
QM	Volume de motocicletas posicionadas longitudinalmente entre veículos consecutivos
QVL	Volume de veículos leves durante o regime de saturação
QVP	Volume de veículos pesado durante o regime de saturação
r	Coeficiente de correlação de Pearson
CTAFOR	Controle de Tráfego em Área de Fortaleza
PAS-FOR	Plano de Acessibilidade Sustentável de Fortaleza
MMQ	Métodos dos mínimos quadrados
MELNV	Melhores estimadores lineares não-viesados

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Problema e questões de pesquisa	14
1.2	Objetivos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Fatores que afetam a capacidade de interseções semaforizadas	16
2.2	Impacto das motocicletas na operação de interseções semaforizadas	21
3	MÉTODO EMPREGADO	30
4	INTERSEÇÃO DE ESTUDO	38
5	ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS	42
5.1	Headways de descarga	42
<i>5.1.1</i>	<i>Perfil geral dos headways de descarga</i>	<i>42</i>
<i>5.1.2</i>	<i>Perfil dos headways de descarga, por tipo de veículo</i>	<i>45</i>
<i>5.1.3</i>	<i>Perfil dos headways de descarga, por presença de motocicleta</i>	<i>50</i>
5.2	Conclusões parciais	56
6	ANÁLISE DE CORRELAÇÃO ESTATÍSTICA	58
6.1	Tempo perdido inicial	58
6.2	Headway de descarga de saturação	62
6.3	Fluxo de saturação	65
6.4	Fator de equivalência veicular	67
6.5	Conclusões parciais	70
7	ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR	73
7.1	Tempo perdido inicial	73
7.2	Headways de descarga de saturação	79
7.3	Fluxo de saturação	84
7.4	Fator de equivalência veicular	90
8	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
	REFERÊNCIAS	103

1 INTRODUÇÃO

No que se refere às malhas urbanas, as interseções são os pontos críticos considerando a ocorrência de congestionamentos e acidentes. Principalmente porque são nas interseções em que há restrições de capacidade, além de uma maior ocorrência de conflitos de tráfego. Considerando a fluidez, algumas técnicas de engenharia de tráfego buscam, por exemplo, avaliar a capacidade veicular de interseções semaforizadas. A capacidade de uma aproximação depende fortemente dos tempos semaforicos, dos tempos perdidos no início e fim de cada ciclo, além do seu respectivo fluxo de saturação.

Apesar de representarem cerca de 26% da frota veicular do Brasil e aproximadamente 49% da frota veicular do Ceará, conforme dados de 2019 disponibilizados pelo Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN), geralmente os estudos locais acerca da capacidade de interseções semaforizadas não incluem os veículos motorizados de duas rodas (motocicleta e motoneta). Luna (2003), por exemplo, cuja pesquisa tratou sobre fluxo de saturação, não considerou as motocicletas em seu estudo, afirmando que estes veículos não impactam significativamente o fenômeno em estudo. Entretanto, para estudos de tráfego em interseções semaforizadas, o DENATRAN (2014) aplica um fator de equivalência de 0,33 para as motocicletas; logo, considera que o efeito deste tipo de veículo é equivalente a um terço do efeito do carro de passeio.

Nacionalmente, o impacto das motocicletas tem sido estudado consideravelmente na perspectiva da segurança viária (MÂNICA, 2007; MARTINS *et al.*, 2013; BERGER, 2014; HOLZ, 2014, COUTINHO *et al.*, 2015). De acordo com Holz (2014), apesar da ampla utilização de motocicletas como modo de transporte, sendo o principal modo motorizado em algumas cidades, as motocicletas são mais frequentemente abordadas em trabalhos relacionados à segurança viária. Ainda de acordo com o autor, poucos são os trabalhos que buscam dissertar acerca do uso das motocicletas no ambiente urbano e os impactos da sua utilização.

Apesar da carência de trabalhos nacionais que tratam sobre o efeito das motocicletas na capacidade de interseções semaforizadas, alguns estudos internacionais indicam que estes veículos podem impactar significativamente a fluidez do tráfego geral, se representarem uma proporção significativa do fluxo do tráfego (NAKATSUJI *et al.*, 2001; MIHN e SANO, 2003; RONGVIRIYAPANICH e SUPPATTRAKUL, 2005; ANUSHA *et al.*, 2013, RADHAKRISHNAN e RAMADURAI, 2015).

De acordo com esses estudos, o efeito das motocicletas no tráfego geral pode se manifestar principalmente em duas situações: no tempo perdido inicial e no *headway* de saturação. O primeiro caso ocorre quando há uma quantidade significativa de motocicletas próximo à faixa de retenção, atrasando os primeiros veículos da fila. Essa situação é mais comum devido à facilidade das motos de atingirem à faixa de retenção quando a indicação do semáforo é vermelha. O segundo caso ocorre quando, na descarga da fila, há motos posicionadas longitudinalmente entre dois automóveis, podendo aumentar o *headway* entre estes veículos, acarretando uma diminuição do fluxo de saturação. Há também a possibilidade de a presença de motocicletas no corredor virtual (corredor entre as faixas de tráfego) atrasarem o descarregamento da fila, devido à proximidade destas com os veículos.

Devido às características físicas e operacionais das motocicletas, como por exemplo, permitirem uma maior velocidade operacional quando comparadas ao transporte público e ao automóvel, e de apresentarem um menor custo de compra e manutenção, espera-se um contínuo aumento da frota desta categoria veicular no Brasil, principalmente na região nordeste. Considerando os dados de frota veicular disponibilizados pelo DENATRAN, entre 2009 e 2019, no Brasil, verificou-se um aumento de aproximadamente 87% da quantidade de motocicletas, enquanto, no mesmo período, houve um aumento de 62% de automóveis. Diante disso, considerando a perspectiva da engenharia de tráfego, é importante identificar e caracterizar os efeitos que este modo de transporte atribui, não somente para a segurança viária, mas para a fluidez do tráfego geral nas cidades brasileiras, principalmente naquelas em que sua presença é expressiva como no caso da cidade de Fortaleza.

1.1 Problema e questões de pesquisa

Dado o contexto apresentado, a problemática abordada por esta pesquisa consiste nos efeitos das motocicletas na operação de interseções semaforizadas, em particular nos cruzamentos de Fortaleza. Para esta problemática, as seguintes questões de pesquisa foram identificadas para este trabalho:

- a) Qual o efeito da quantidade de motocicletas acumuladas junto à faixa de retenção e posicionadas longitudinalmente entre veículos no tempo perdido inicial de aproximações semaforizadas?

- b) A presença de motocicletas no corredor virtual afeta a capacidade de aproximações semaforizadas?
- c) Qual é o efeito da quantidade de motocicletas posicionadas entre dois veículos nos *headways* de descarga durante o regime de saturação de aproximações semaforizadas?
- d) Qual é o efeito da proporção de motocicletas no fluxo de saturação de aproximações semaforizadas?
- e) Qual é o fator de equivalência veicular das motocicletas, no desempenho de interseções semaforizadas, considerando a realidade de Fortaleza?

1.2 Objetivos

De acordo com o que foi exposto, o objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar o efeito das motocicletas na capacidade de uma aproximação semaforizadas de Fortaleza. Os objetivos específicos desse estudo são:

- a) Avaliar o efeito da quantidade de motocicletas acumuladas junto à faixa de retenção e posicionadas longitudinalmente entre veículos no tempo perdido inicial de aproximações semaforizadas;
- b) Examinar o impacto da presença de motocicletas posicionadas no corredor virtual na capacidade de aproximações semaforizadas;
- c) Analisar o efeito da quantidade de motocicletas posicionadas entre dois veículos nos *headways* de descarga em regime de saturação de aproximações semaforizadas;
- d) Avaliar o efeito da proporção de motocicletas no fluxo de saturação de aproximações semaforizadas;
- e) Determinar o fator de equivalência veicular das motocicletas na descarga de interseções semaforizadas, considerando a realidade de Fortaleza.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fatores que afetam a capacidade de interseções semaforizadas

Em interseções semaforizadas, pelotões de tráfego conflitantes competem pela mesma área de interseção. O total de tempo disponível dentro de uma hora deve ser alocado criteriosamente de forma a aumentar a capacidade e minimizar os atrasos da interseção (ELEFTERIADOU, 2014). Além do tempo de verde indicado para determinada aproximação, que deve ser calculado a partir da demanda dos movimentos conflitantes, há dois fatores importantes que contribuem para a capacidade de uma interseção semaforizada: o tempo perdido e o fluxo de saturação.

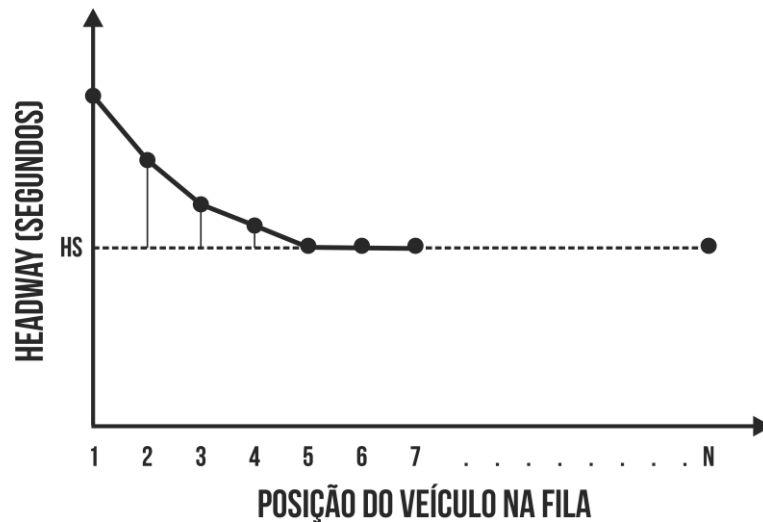
De acordo com DENATRAN (2014), o fluxo de saturação de um grupo de movimentos consiste no número máximo de veículos que poderia passar em uma aproximação controlada por sinalização semaforica, considerando que esta aproximação recebesse indicação de verde durante o período de uma hora. Stokes (1989) listou uma série de condições que afetam o fluxo de saturação de uma via, que foram classificadas em condições operacionais, características do tráfego e fatores ambientais e outros. As condições operacionais consistem na programação semaforica, características do tráfego, estacionamentos e parada de ônibus. Características do tráfego consistem na composição veicular, movimentos de conversão e atividade de pedestres. Por fim, os fatores ambientais são os relacionados ao clima, ao comportamento do motorista, às condições da via e ao uso do solo adjacente.

O tempo perdido em um estágio semaforico é dividido em duas partes: inicial e final. O tempo perdido inicial (tp_1) é o tempo adicional consumido pelos primeiros veículos da fila em que seus *headways* são maiores do que os *headways* de descarga durante o regime de saturação, devido à reação dos motoristas ao início do verde e ao tempo de aceleração. O tempo perdido final (tp_2) consiste no tempo ao final do estágio durante o qual os movimentos servidos por ela não podem mais prosseguir de forma efetiva na taxa do fluxo de saturação.

No descarregamento da fila, o primeiro *headway*, geralmente, contribui com a maior parte do tp_1 e os seguintes apresentam valores cada vez menores. Dessa forma, o *headway* de descarregamento diminui até se estabilizar em um valor aproximadamente constante. Esse valor é o *headway* de descarga durante o regime de saturação para o veículo

i no ciclo j (hds_{ij}), em que sua média no ciclo semafórico é o *headway* de saturação (hs_j) que configura o fluxo de saturação (S_j). O comportamento desse descarregamento da fila é apresentado na Figura 1.

Figura 1 – *Headways* de descarregamento de uma fila de interseção semaforizada



Fonte: Elaborado pelo autor. Adaptado de Roess (2004)

A capacidade de um movimento de uma interseção semaforizada é medido através do S , tamanho do ciclo e tempo de verde efetivo, que consiste no somatório do tempo de verde, de amarelo e de vermelho geral do estágio, diminuído pelo tp_1 e tp_2 . A Equação 1 apresenta a função utilizada para obtenção da capacidade.

$$c = S * \frac{gef}{Ciclo} \quad (1)$$

Onde:

c = capacidade, em veículos/hora/faixa;

gef = tempo de verde efetivo, em segundos;

Ciclo = duração do ciclo, em segundos;

S = fluxo de saturação, em veículos/hora/faixa.

Vários estudos foram realizados com o intuito de identificar fatores que afetam expressivamente o S e o tp_1 e, portanto, na capacidade de interseções semaforizadas. O Highway Capacity Manual - HCM (2010), por exemplo, propõe um modelo para obtenção do S considerando o efeito de fatores como: largura da faixa, greide, presença de

estacionamentos e parada de ônibus, veículos pesados, movimentos de conversão e atividade de pedestres.

Na pesquisa de Bonneson (1992) foram realizados testes ANOVA e modelos de regressão para identificar efeitos significantes e para calibrar modelos preditivos do h_s e do tp_1 . Verificou-se, por exemplo, que o h_{ds} da conversão à esquerda variou significativamente com o raio de conversão. Nesse trabalho, também foi analisado o efeito da demanda do tráfego, medida pelo volume de tráfego por ciclo, no *headway* de descarga da fila (h_{sj}). Os dados apontaram para um efeito significativo desse fator, ou seja, um aumento na pressão do tráfego resultou em uma diminuição da descarga da fila.

A literatura também expõe estudos que tratam do impacto do uso do solo adjacente (residencial, comercial, lazer e *shopping*) no S e nos tp_1 e tp_2 , como por exemplo a pesquisa de Le *et al.* (2000). Na análise desse trabalho, foram realizados testes ANOVA para testar a hipótese de igualdades entre os *headways* e entre os tempos perdidos dos diferentes tipos de área. Os resultados apontaram que os h_{ds} de áreas lazer são significativamente maiores do que os de outras áreas, tanto para os movimentos em frente quanto para o de conversão à esquerda. Os resultados do estudo também indicaram que as desigualdades dos tempos perdidos coletados para diferentes tipos de uso do solo não foram estatisticamente significativas.

Pesquisas também foram desenvolvidas com o objetivo de avaliar o efeito da proporção de idosos na operação de interseções semaforizadas. Por exemplo, Lu e Pernía (2000) tiveram como principal objetivo de pesquisa investigar e avaliar as diferenças do comportamento de condução entre motoristas idosos e motoristas de outras faixas etárias, em termos de tp_1 e h_s . Três faixas etárias foram investigadas e comparadas na pesquisa: idoso (acima de 65 anos), adulto (entre 30 e 64 anos) e jovem (menos de 30 anos). Os autores realizaram testes ANOVA para comparar esses grupos. Os resultados do estudo indicaram que um aumento da proporção de motoristas idosos causou acréscimos no tp_1 e no h_s , reduzindo a capacidade das faixas de tráfego analisadas.

Queiroz e Jacques (2002) desenvolveram um modelo matemático para estimativa do S , por faixa de tráfego, considerando as condições de tráfego de Brasília. As autoras aplicaram análise de regressão estatística a partir de dados coletados em 20 interseções semaforizadas. Obteve-se um coeficiente de determinação (R^2) de 0,525; ou seja, as variáveis independentes conseguiram explicar 52,5% da variação amostral do S . As

variáveis independentes abordadas no trabalho foram: greide, largura da faixa, tipo localização e condição de fluidez.

Silva e Jacques (2002) realizaram uma estimativa do *headway* de descarga em interseções semaforizadas com o auxílio de redes neurais artificiais. De acordo com os autores, o *headway* de descarga (hd) é entendido pelo intervalo de tempo decorrido entre a passagem de dois veículos consecutivos por uma seção de referência (faixa de retenção, por exemplo), tomado com relação a um ponto de referência dos veículos (eixo traseiro, por exemplo), obtidos durante a dissipação de uma fila de veículos em uma interseção controlada por semáforo. Foram consideradas as seguintes variáveis para treinamento da rede: greide, localização da faixa na via, localização da via, fluidez a jusante da faixa de retenção e posição na fila. Os autores elaboraram um modelo que conseguiu estimar satisfatoriamente cerca de 60% dos *headways* de descarga em interseções controladas por semáforo da cidade de Brasília, considerando os dados utilizados para teste.

Agbolosu-Amison *et al.* (2004) avaliaram o impacto do clima no hs e no tp_1 . Para melhor avaliar os dados obtidos, os autores elaboraram *boxplots* comparativos e testes ANOVA para quantificar as diferenças entre os valores de hs e tp_1 sob seis diferentes tipos de clima. Os autores concluíram que há evidências estatísticas que sugerem que o clima tem impactos significativos no hs, enquanto não há evidências para efeitos significativos no tp_1 . Por exemplo, na condição de superfície seca, obteve-se hs de 1,8 segundos, enquanto na condição de superfície molhada e lamacenta, o hs obtido foi de 2,1 segundos.

Outros estudos buscaram avaliar o efeito de elevados períodos de verde do S. O estudo de Khosla e Williams (2006) avaliou o S de cinco aproximações semaforizadas, cujos tempos de verdes excediam 50 segundos. Os autores realizaram testes de diferenças de médias comparando os *headways* de saturação (hds) dos veículos entre a 10^o e 14^o posição e dos últimos cinco veículos cruzando a interseção durante o tempo de verde. Os dados coletados indicaram que não houve uma alteração significativa do hs considerando os dois posicionamentos. Esses estudos contrariam os indícios encontrados por Teply (1983 *apud* Khosla e Williams, 2006) que sugerem que os *headways* de descarga (hds) tendem a aumentar depois de 40 segundos de indicação de verde.

O efeito da presença de temporizador semafórico na descarga de filas de interseções semaforizadas foi estudado por Sharma *et al.* (2009). Para realizar a análise, os autores elaboraram regressões lineares com o intuito de explicar as brechas dos veículos na

descarga da fila. Os resultados indicaram que na condição sem temporizador semafórico, os *headways* de descarga da fila apresentam, respectivamente, três regimes: de decaimento, de estabilização e de crescimento. Na condição da operação do temporizador semafórico, a descarga da fila apresenta apenas dois regimes: de estabilização e de decaimento. Também foi apontado que os automóveis apresentaram menores valores de tp_1 na situação de operação do temporizador semafórico.

Matsoukis e Efstathiadis (2013) avaliaram o efeito da largura da faixa, da posição da faixa, do período do dia e da velocidade regulamentada no tempo perdido e nos *headways* de saturação (hs). Por meio de testes ANOVA, os autores concluíram que a largura da faixa e a posição da faixa não apresentaram efeitos significativos no tp_1 e nos *headways* de saturação. No entanto, os resultados apontaram efeitos significativos do período do dia no tp_1 e nos *headways* de saturação. Também concluíram que há impactos significantes considerando o efeito combinando do tipo de uso do solo e velocidade regulamentada no tp_1 .

Efeitos da composição do tráfego, largura da faixa, greide e raio de curvatura nos fluxos de saturação foram avaliados por Shao *et al.* (2011). Os efeitos desses fatores foram analisados utilizando regressão linear. Os autores concluíram que o tipo de veículo apresenta efeito significativo no S e, para diferentes movimentos de conversão, o efeito do greide não é o mesmo. Os autores também concluíram que a largura da faixa apresenta um efeito significativo no S; contudo, os valores encontrados destoam dos valores dos fatores de ajustes indicados pelo HCM (2010). Por fim, os autores também averiguaram que o raio de curvatura apresenta efeito significativo na operação de interseções semaforizadas, cujos resultados indicaram que maiores raios propiciam maiores fluxos de saturação.

Como mostra a revisão da literatura apresentada, várias pesquisas foram realizadas com o intuito de averiguar o efeito de diversos fatores na capacidade de aproximações semaforizadas. Nesses estudos foram aplicados métodos estatísticos com o propósito de identificar e mensurar o efeito dos fatores analisados. Em geral, as análises apresentadas foram realizadas em ambientes com tráfego predominantemente homogêneo, em que a participação da motocicleta é desprezível e, portanto, torna-se irrelevante a avaliação do seu impacto sob a fluidez do tráfego geral. Como já dito anteriormente, o Brasil, apesar de não apresentar um tráfego predominante de motocicletas como em alguns países asiáticos, possui uma parcela significativa desse modo no tráfego geral, tornando

relevante a identificação e mensuração do efeito desse modo na capacidade de aproximações semaforizadas.

2.2 Impacto das motocicletas na operação de interseções semaforizadas

A circulação de motocicletas nas cidades brasileiras geralmente ocorre em situações de tráfego misto, na qual as motos tendem a trafegar pelos corredores que se formam na lateral entre um veículo e outro. Este espaço formado entre veículos utilizado pelas motos, geralmente na posição das faixas seccionadas que dividem as faixas de tráfego, é conhecido por corredor virtual (HOLZ, 2014). Parcela expressiva dos motociclistas percebem estes corredores como um meio para evitar o congestionamento do tráfego geral. Apesar destes corredores permitirem uma maior fluidez para este modo, também contribuem para a ocorrência de conflitos veiculares.

Os corredores virtuais são tidos como prejudiciais considerando a perspectiva da segurança viária, embora a circulação de motocicletas neste espaço não é considerada infração. O artigo 56 do Código de Trânsito Brasileiro – CTB apontava a prática como irregular, no entanto, o artigo foi vetado em 1997 com a justificativa de que: “Ao proibir o condutor de motocicletas e motonetas, a passagem entre veículos de filas adjacentes, o dispositivo restringe sobremaneira a utilização desse tipo de veículo que, em todo o mundo, é largamente utilizado como forma de garantir maior agilidade de deslocamento”.

Contudo, o inciso II do artigo 29 do Código de Trânsito Brasileiro indica que o condutor deve garantir distância de segurança lateral e frontal entre o seu e os demais veículos, considerando a velocidade e as condições do local. Dessa forma, apesar de ser permitido a passagem de motocicletas entre veículos de filas adjacentes, os condutores devem garantir uma distância lateral de segurança aos demais veículos.

Inspirado por práticas estrangeiras, algumas cidades brasileiras começaram a adotar medidas operacionais de forma a separar o tráfego das motocicletas do tráfego geral, com o intuito de reduzir os conflitos entre motocicletas e outros veículos. A cidade de São Paulo, por exemplo, implantou faixas segregadas para motocicletas com o objetivo principal de reduzir a ocorrência de acidentes com este modo. Além disso, o tráfego de motocicletas nos corredores virtuais foi apontado como causa de 36% dos acidentes fatais envolvendo este modo (MARTINS *et al.*, 2013).

Outra prática recorrente nas cidades brasileiras e mundo afora tem sido a implantação de caixas de retenção para motocicletas, mais conhecidas como *motobox*. A justificativa da implantação deste tratamento é que as motocicletas têm uma aceleração inicial superior em relação aos demais veículos. Desta forma, a separação concebida pela *motobox* propicia uma redução nos conflitos veiculares no início do verde.

Apesar de algumas cidades brasileiras terem implantados tratamentos viários voltados à motocicleta, diante da parcela significativa deste modo na frota e da questão da segurança viária, é escassa a quantidade de trabalhos que tratam sobre o uso de motocicletas em ambientes urbanos e os impactos da sua utilização, principalmente considerando a questão da fluidez viária. Geralmente, os estudos que buscam mensurar e avaliar os efeitos das motocicletas na fluidez foram desenvolvidos nos países asiáticos, cuja frota é predominantemente de motocicletas.

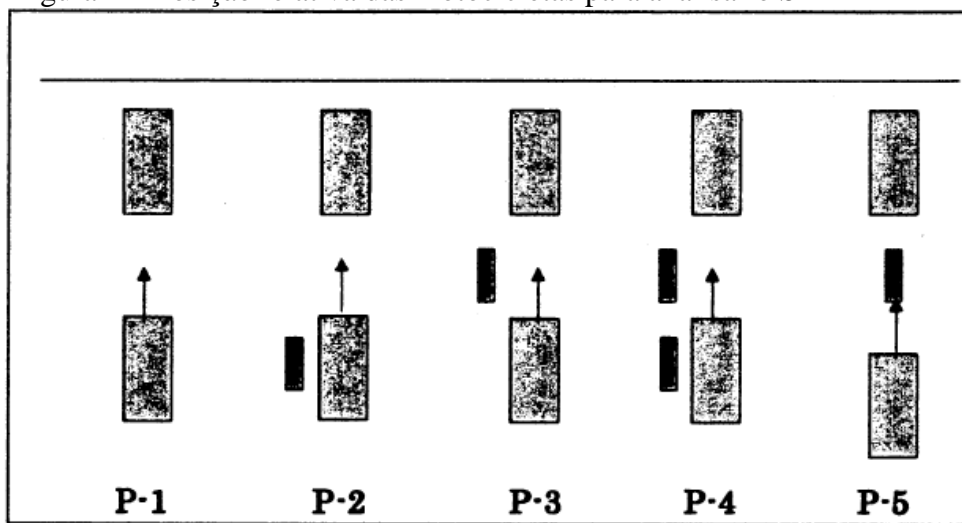
A revisão da literatura tem apresentado poucos estudos voltados ao tráfego em condições de “*non-lane based*” – situações em que o tráfego não é regido por faixas – ou de tráfego heterogêneo em países em desenvolvimento. Alguns estudos buscaram aplicar uma variação de práticas desenvolvidas para o tráfego homogêneo através da conversão do tráfego heterogêneo em uma equivalência de unidades de carro de passeio. No entanto, estudos apontaram que uma definição linear de equivalência veicular é inadequada, pois os valores da equivalência veicular dependem da composição do tráfego, grau de saturação e local (KHAN e MAINI, 1999).

O Manual de Semáforos – DENATRAN (2014) indica uma equivalência de carro de passeio de 0,33 para as motocicletas, ou seja, no Brasil, considera-se que a motocicleta possui um efeito no tráfego equivalente a um terço do efeito causado pelo carro de passeio em interseções semaforizadas. De acordo com DENATRAN (2014), o fator de equivalência de cada tipo de veículo reflete o desempenho de sua circulação no sistema viário em comparação ao automóvel. No caso da sinalização semaforizada o desempenho está diretamente relacionado ao tempo de verde necessário para atendê-lo. Ou seja, se um veículo pesado necessita 4 segundos para passar por uma interseção semaforizada, enquanto o veículo leve necessita de apenas 2 segundos, o fator de equivalência do veículo pesado é igual a 2.

Um dos primeiros estudos que buscaram avaliar o efeito das motocicletas no tp_1 e no S foi desenvolvido por Nakatsuji *et al.* (2001) em Hanoi e Bangkok. O efeito das

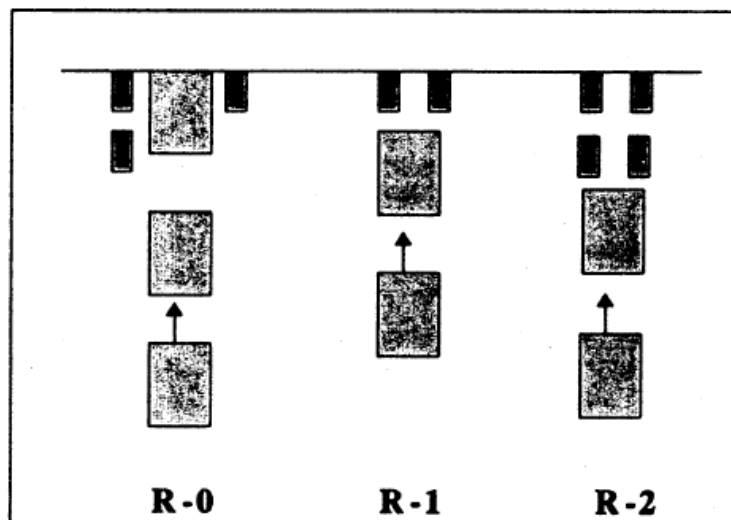
motocicletas no S foi investigado através da posição relativa das motos em relação aos veículos, como exemplificado na Figura 2. Considerando que o tp_1 não depende apenas da quantidade de motos paradas à frente do primeiro veículo, mas também da proximidade das motos entre si, os autores propuseram três configurações para avaliar o efeito no tp_1 : sem motocicleta, uma “linha” de motocicletas à frente do primeiro veículo e duas “linhas” de motocicletas à frente do primeiro veículo. A demonstração das três configurações está apresentada na Figura 3. Por fim, foi estimado valores de equivalência veicular para as motocicletas de 0,603 para Bangkok e de 0,626 para Hanoi.

Figura 2 – Posição relativa das motocicletas para analisar o S



Fonte: Nakatsuji *et al.* (2001)

Figura 3 – Posição relativa das motocicletas para analisar o tp_1



Fonte: Nakatsuji *et al.* (2001)

Como ferramenta estatística, os autores aplicaram testes de média, de variância e modelos de regressão, com o intuito de avaliar a correlação entre o padrão da posição das motos e os *headways* de saturação (h_s) e o tp_1 . Dados coletados em Hanoi indicaram, em situação em que não há motocicletas, um h_s médio de 2,1 s com desvio padrão de 0,2 s. Na situação em que há uma motocicleta entre veículos, rigorosamente à frente do veículo seguidor, o h_s médio obtido foi de 3,4 s com desvio padrão de 0,5 s. Estes resultados apontam para um efeito significativo das motocicletas nos *headways* veiculares.

Dados obtidos do tp_1 para a interseção de Hanoi apresentaram, na situação de ausência de motocicletas à frente do primeiro veículo da fila, valores médios de 3,3 segundos e desvio padrão de 1,3. Na situação de duas filas de motocicletas, foi obtido um tp_1 médio de 5,7 com desvio padrão de 1,4. Da mesma forma, os dados obtidos também apontam para um efeito significativo da presença de motos no tp_1 .

Como conclusão, os autores afirmaram que a posição relativa das motocicletas tem um impacto crucial no S, considerando que o S diminuiu em até 40% em situações que havia motocicleta entre dois veículos. A quantidade de faixas de motocicletas é um fator que influencia o tp_1 . Por fim, os valores de equivalência veicular, obtidos através da comparação dos *hds*, foram de aproximadamente 0,60 para ambas as cidades, sendo bem distinto do valor de 0,33 proposto pelo DENATRAN (2014).

Mihn e Sano (2003) tiveram como objetivo principal de pesquisa analisar os efeitos da motocicleta no tráfego também nas cidades de Hanoi e Bangkok. Os autores avaliaram o efeito da presença de motocicletas no h_s dos automóveis e no tp_1 , por meio de modelos de regressões linear. Considerando a divisão da frota veicular nas interseções analisadas, verificou-se que 20% do total do tráfego de Bangkok era composto por motocicleta, enquanto Hanoi apresentou um valor de 90%.

Buscando quantificar a efeito da quantidade de motocicletas entre veículos nos *hds*, foram elaboradas regressões lineares. Foram obtidos valores de R^2 de 0,79 para a cidade de Hanoi e de 0,60 para a cidade de Bangkok. Os autores citam que as flutuações nos dados vêm das diferentes posições relativas entre as motocicletas e entre os carros e motocicletas. Vale ressaltar que os autores não indicaram que foi realizada uma separação da posição das motocicletas entre corredor virtual ou meio da faixa de tráfego. No que se refere aos parâmetros da regressão, os autores encontraram valores semelhantes para ambas as cidades (Tabela 1).

Tabela 1 – Valores dos parâmetros obtidos por Mihn e Sano (2003)

	β_0 (Intercepto)	β_1 (Coeficiente angular)
Hanoi	2,11	0,51
Bangkok	2,03	0,60

Fonte: Adaptado de Mihn e Sano (2003)

Apesar dos resultados interessantes, os autores não realizaram análises dos valores obtidos, além de não terem expostos as significâncias e os intervalos de confiança dos coeficientes, necessários para a interpretação do “efeito” das motocicletas no tráfego geral. Os coeficientes angulares explicam, por exemplo, que a adição de uma motocicleta entre dois veículos aumenta, em média, 0,51 segundos dos *headways* de saturação na interseção analisada em Hanoi e 0,60 segundos em Bangkok. Os interceptos indicam os *headways* médio de saturação quando não há motocicletas entre veículos.

Os valores dos interceptos obtidos permitem concluir que, em ciclos em que há ausência de motocicletas, os fluxos de saturação são de aproximadamente 1.706 veículos por hora (veíc/h) em Hanoi e de 1779 veíc/h em Bangkok. Caso houvesse uma motocicleta entre sucessivos veículos durante todos os *headways* de saturação de um ciclo, por exemplo, o S da interseção de Hanoi seria 1374 veíc/h neste ciclo, representando uma redução de aproximadamente 20% quando comparado à situação de ausência de motocicletas. Nas mesmas condições, a interseção de Bangkok apresentaria um S de 1368 veíc/h, o que representaria uma redução de aproximadamente 23% quando comparado à situação de ausência de motocicletas.

Quanto ao efeito da presença de motocicletas no tp_1 , os autores coletaram a quantidade de motocicletas à frente do primeiro veículo por ciclo e o respectivo tp_1 . Os dados observados variam de 0 a 6 motocicletas à frente do primeiro veículo e de 2 a 8 segundos do tp_1 . Diferentemente do modelo elaborado para os *headways* veiculares, os autores elaboraram regressões quadráticas, obtendo R^2 de 0,49 para a interseção analisada em Hanoi e de 0,63 para a interseção analisada em Bangkok. Semelhante à análise anterior, os autores não avaliaram os valores dos coeficientes obtidos e não apresentaram as respectivas significâncias estatísticas e os intervalos de confiança.

Os autores analisaram que em situações nas quais não há motocicletas à frente do primeiro veículo, os tempos perdidos são similares às aquelas em que há uma ou duas motocicletas. A explicação para este fenômeno foi baseada no comportamento dos motociclistas, dado que esses começam a atravessar a interseção ainda no período de vermelho geral, permitindo um tempo de resposta menor dos motoristas dos veículos ao início do verde. Concluiu-se que a presença de motocicletas afeta significativamente à capacidade do tráfego, especialmente quando a sua repartição na frota veicular é alta.

Esses dois estudos de Nakatsuji *et al.* (2001) e de Mihn e Sano (2003) buscaram avaliar o efeito das motocicletas isoladamente em cada *headway* veicular de descarga durante o regime de saturação (hds), também não realizando distinção entre os tipos de veículos (leve ou pesado). Dessa forma, não foram realizadas análises mais genéricas, como por exemplo, avaliando o efeito da proporção de motocicletas no hs de cada ciclo. Nas análises estatísticas realizadas pelos autores, como dito anteriormente, não foram apresentados e discutidos os valores dos limites inferiores e superiores de cada coeficiente, além dos resultados de testes para averiguar se as premissas de regressão foram atendidas

Esses dois trabalhos também realizaram análises de fator de equivalência veicular das motocicletas. Nakatsuji *et al.* (2001) obtiveram fatores de ajuste para o fluxo de saturação, a partir de modelos de regressão de linear, considerando a presença de motocicletas na posição P-5, conforme apresentada na Figura 2. Os valores dos fatores de ajuste obtidos foram de 0,615 para Hanoi e de 0,624 para Bangkok. Através desses fatores de ajuste, que aponta a redução no fluxo de saturação na condição de presença de motocicletas, os autores estimaram os fatores de equivalência de motocicletas para veículos leves. Com a aplicação dos fatores de ajuste de fluxo de saturação na Equação 02, os autores obtiveram os fatores de equivalência veicular de 0,627 para Hanoi e 0,587 para Bangkok.

$$FEQ_{motos} = \frac{1}{f_{P5}} - 1 \quad (2)$$

Onde:

FEQ_{motos} = fator de equivalência de motocicletas para veículos leves;

f_{P5} = fator de ajuste de fluxo de saturação para as motocicletas.

Mihn e Sano (2003) aplicaram regressão linear múltipla para obtenção direta dos fatores de equivalência das motocicletas em veículos de passeio, na qual o tempo de verde saturado é a variável explicada, enquanto as quantidades de cada tipo de veículo (motocicleta, veículo leve e pesado) passando pela faixa de retenção durante esse tempo são as variáveis explicativas. O tempo de verde saturado é obtido através do somatório dos *headways* dos veículos durante o regime de saturação de cada ciclo semafórico. A obtenção do fator de equivalência das motocicletas é dada pela divisão entre o coeficiente respectivo à motocicleta e o respectivo ao veículo de passeio. Os resultados apontaram fatores de equivalência das motocicletas, em veículos de passeio, de 0,24 e 0,18 respectivamente para Hanoi e Bangkok.

Ainda sob a perspectiva do tráfego geral, Rongviriyapanich e Suppatrakul (2005) avaliaram o efeito das motocicletas na operação de tráfego em vias arteriais, tanto em interseções semaforizadas quanto em meios de quadra. Considerando apenas o efeito nas interseções, os autores buscaram avaliar o efeito da presença de motocicletas no tp_1 em uma interseção sem *motobox* e em outra interseção com *motobox*. Na interseção sem *motobox*, os dados foram divididos em dois grupos: presença e ausência de motocicletas. Na interseção com *motobox*, os dados também foram divididos em dois grupos: invasão de veículos na *motobox* ou respeito dos veículos à *motobox*.

Foram coletados 132 ciclos na interseção sem *motobox*, que permitiram comparar as médias dos tempos perdidos iniciais para os dois grupos analisados (presença ou ausência de motocicletas) através da aplicação do teste *t-student*. Para o primeiro grupo de dados foi obtido um tp_1 médio de 5,1 segundos, enquanto para o segundo grupo de dados, foi obtido um tp_1 de 3,2 segundos. Os resultados dos testes indicaram a rejeição da hipótese nula de que os tempos perdidos iniciais são iguais, o que leva à conclusão de que há indícios que os tempos perdidos iniciais são diferentes para ambas as classificações.

No caso da interseção com *motobox*, foram coletados 198 ciclos semafóricos que permitiram comparar as médias dos tempos perdidos iniciais para os dois grupos analisados (invasão de veículos na *motobox* ou respeito dos veículos à *motobox*). Para o primeiro grupo, foi obtido um tp_1 médio de 6,1 segundos, enquanto foi obtido um valor de 8,3 segundos de tp_1 médio para o segundo grupo. Os resultados da aplicação do teste *t-student* indicaram a rejeição da hipótese nula de que os tempos perdidos iniciais são equivalentes para ambos os casos.

Diferentemente dos estudos apresentados anteriormente, que buscaram avaliar o efeito das motocicletas considerando a perspectiva do tráfego geral, outros estudos foram desenvolvidos considerando a motocicleta como principal modo, visto que em determinadas localidades da Ásia, a motocicleta representa a maior parcela da frota veicular. A pesquisa desenvolvida por Radhakrishnan e Ramadurai (2015), por exemplo, examinou fatores que afetam o *hd* de filas sob condições de tráfego heterogêneo, caracterizado pela composição de tráfego misto e ausência de disciplina de faixa de tráfego. Os dados foram coletados em Chennai, na Índia, cuja frota apresentou pelo menos 50% de motocicletas.

Os autores aplicaram regressões lineares para mensurar o efeito de fatores sob os *headways* de descarga das filas de interseções semaforizadas. Ao fim da análise, verificou-se que o tipo do veículo (veículos de duas rodas, carros, *auto-rickshaws*, veículos de cargas leves e veículos pesados) a posição lateral (próximo ao canteiro ou ao meio-fio) e o período do tempo de verde eram os fatores que afetavam significativamente o *hs* das filas. Apesar da significância dos coeficientes da regressão, os modelos elaborados apresentaram coeficientes de determinação em torno de 0,15; portanto, os modelos não conseguiram explicar satisfatoriamente os *headways* veiculares.

Com a justificativa de que os métodos de análise de capacidade não consideram condições específicas do comportamento do motorista e tipo de fluxo de tráfego dominante, Nguyen *et al.* (2016) elaboraram um estudo com o objetivo de analisar e propor um método de obtenção de *S* em interseções analisadas em cidades cujo tráfego é predominantemente de motocicletas (*motorcycles dependent cities – MDCs*), nas quais a participação deste modo na frota veicular é superior à 40%.

Visto que o estudo foi aplicado na cidade de Ho Chi Mihn, no Vietnã, sendo a motocicleta o modo de transporte predominante na frota veicular, os autores propuseram uniformizar a classificação veicular em unidades de motocicletas, aplicando fatores de conversão veicular para veículos de passeio e ônibus. Dados foram coletados com a intenção de quantificar o efeito do tipo de veículo e de movimentos de conversão no *S*. Por fim, os autores propuseram um modelo para obtenção de valores de *S* em motocicletas por hora, considerando a largura da aproximação, frota veicular e movimentos de conversão.

Os autores determinaram que uma aproximação com largura de 3,5 metros pode apresentar fluxo de saturação de aproximadamente 13.000 motocicletas por hora, sendo 5.8 vezes mais alto do que o fluxo de saturação básico do tráfego geral, considerando o valor de

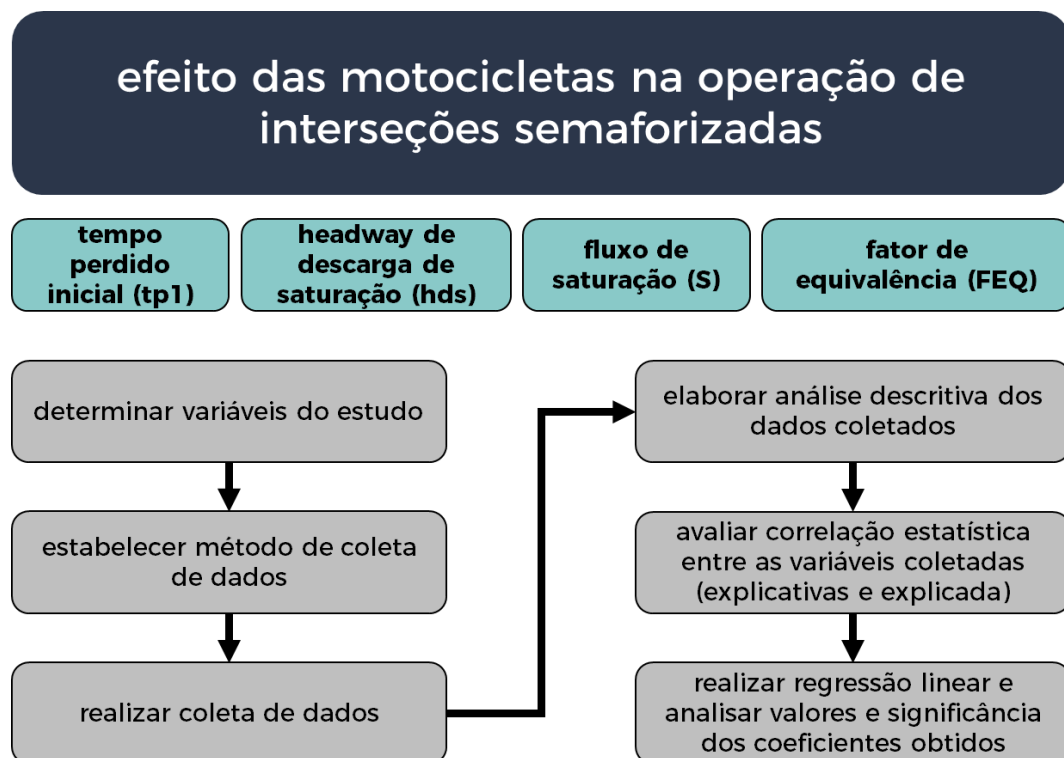
1.900 veículos por hora. Além disso, durante a pesquisa os autores perceberam uma redução o fluxo de saturação ao longo do tempo de verde. De acordo com os autores, esse fenômeno é ainda mais perceptível com aproximações com maiores larguras, devido ao maior distúrbio provocado pelo fluxo de motocicletas, dado às movimentações laterais e longitudinal. O fator de equivalência dos veículos em relação às motocicletas, determinado como *motorcycle unit* (MCU) pelos autores, foi calculado por 5,35 (cerca de 0,19 considerando o fator de equivalência veicular).

Como apresentado neste capítulo, vários trabalhos foram desenvolvidos com o intuito de avaliar o efeito das motocicletas no tráfego geral. Apesar disso, verificou-se que, nacionalmente, há uma lacuna quanto à essa abordagem, dado que não foram encontrados estudos que investigassem o impacto da presença de motos no tráfego geral nas cidades brasileiras a partir de análises estatísticas, o que reitera as questões de pesquisa e os objetivos definidos neste estudo.

3 MÉTODO EMPREGADO

O método utilizado para esta pesquisa está dividido em seis etapas, conforme apresentado nas caixas de cor cinza da Figura 4. O estudo foi dividido em quatro tópicos: o primeiro tópico é relacionado ao tempo perdido inicial (tp_1); o segundo tópico é relacionado ao *headway* de descarga em regime de saturação (hds); o terceiro tópico é relacionado ao fluxo de saturação (S); enquanto o último tópico é relacionado ao fator de equivalência (FEQ).

Figura 4 – Método empregado



Fonte: Elaborada pelo autor

A primeira etapa consistiu em determinar quais variáveis deveriam ser coletadas. As variáveis foram definidas de acordo com cada tópico da pesquisa. O primeiro tópico, que é relacionado ao tp_1 , abordará o primeiro e o segundo objetivo delimitados para esta pesquisa. O primeiro objetivo, apresentado anteriormente, compreende em avaliar o efeito da quantidade de motocicletas junto à faixa de retenção e posicionadas longitudinalmente entre veículos no tp_1 . O segundo consiste em examinar o impacto da presença de motocicletas posicionadas no corredor virtual na capacidade de aproximações semaforizadas.

Para a coleta dos *headways*, utilizou-se como referência o eixo traseiro dos veículos, conforme indicado por DENATRAN (2014). Também foi percebido que, utilizando como referência o eixo dianteiro dos veículos, geralmente o primeiro *headway* é consideravelmente inferior ao segundo, devido à proximidade do eixo dianteiro do primeiro veículo à faixa de retenção. Essa situação não é validada pela literatura, na qual o primeiro *headway* geralmente apresenta maior valor durante a descarga da fila.

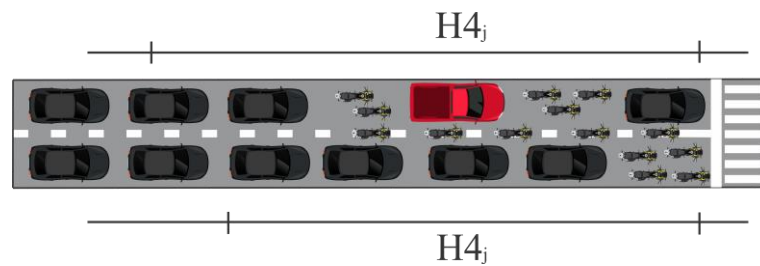
Quanto à classificação do tipo de veículo, o estudo apresenta definições distintas à resolução N°396 do CONTRAN. Para esta pesquisa, definem-se como veículos leves: automóvel, utilitário, caminhonete e camioneta. Os veículos pesados são os mesmos definidos na resolução N°396 do CONTRAN, ou seja: ônibus, micro-ônibus, caminhão, caminhão-trator, trator de rodas, trator misto, chassi-plataforma, motor-casa, reboque ou semirreboque e suas combinações. Como motocicletas, foram considerados todos veículos motorizados e de duas rodas. Para alcançar ambos os objetivos nesse tópico, foram definidas as seguintes variáveis:

- a) H_{4j} : quarto *headway* acumulado dos veículos, em segundos, do ciclo semafórico j . Ver Figura 5;
- b) Q_{mfj} : quantidade de motocicletas acumuladas à frente do primeiro veículo da fila do ciclo semafórico j . Ver Figura 6;
- c) Q_{mevj} : somatório da quantidade de motocicletas posicionadas longitudinalmente, durante a descarga da fila, entre o primeiro e o quarto veículo, do ciclo semafórico j . Ver Figura 7;
- d) P_{mcyj} : última posição dos veículos em fila que possui, entre o primeiro e quarto veículo, que possui, nas suas adjacências, motocicletas no corredor virtual, do ciclo semafórico j . Ver Figura 8;
- e) Q_{vpj} : quantidade de veículos pesados, até o 4° veículo da fila, do ciclo semafórico j . Ver Figura 9.

Conforme DENATRAN (2014), o tp_1 é restringido aos quatro primeiros veículos da fila. O valor do tp_1 é obtido através da diminuição entre o H_{4j} e o hs (uma constante), logo, entende-se que o H_{4j} é suficiente para realizar a análise do tp_1 . Portanto, o tp_1 não será avaliado diretamente, mas através do H_{4j} . As variáveis Q_{mfj} e Q_{mevj} representam as condições definidas no primeiro objetivo. Levanta-se a hipótese que Q_{mfj} e Q_{mevj} resultam

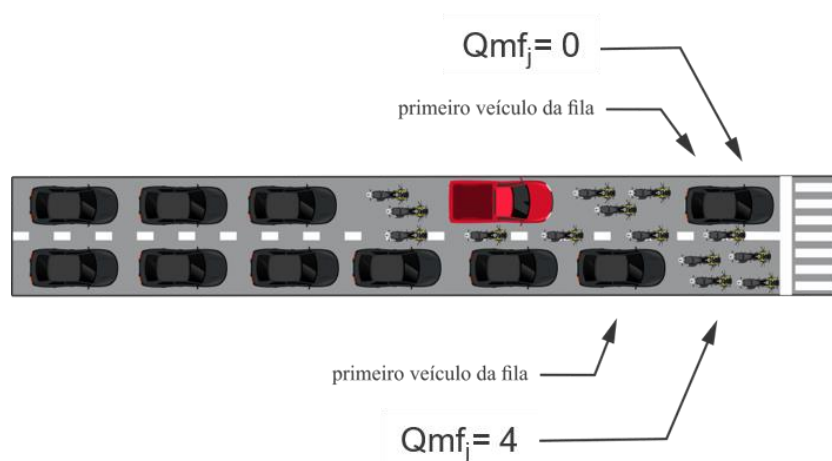
em maiores valores de $H4_j$ e, portanto, do tp_1 . A variável Pm_{cv_j} representa a condição do segundo objetivo da pesquisa. Nesse estudo, é levantada a hipótese de que a presença de motocicletas no corredor virtual afeta a descarga dos veículos adjacentes, o que acarreta maiores valores de $H4_j$ e, portanto, do tp_1 . Por fim, decidiu-se acrescentar a quantidade de veículos pesados, pois é de conhecimento da comunidade técnica que veículos pesados acarretam maiores *headways*, além de ser uma variável de fácil obtenção.

Figura 5 – Exemplificação da variável quarto *headway* acumulado dos veículos, em segundos, do ciclo semafórico j ($H4_j$)



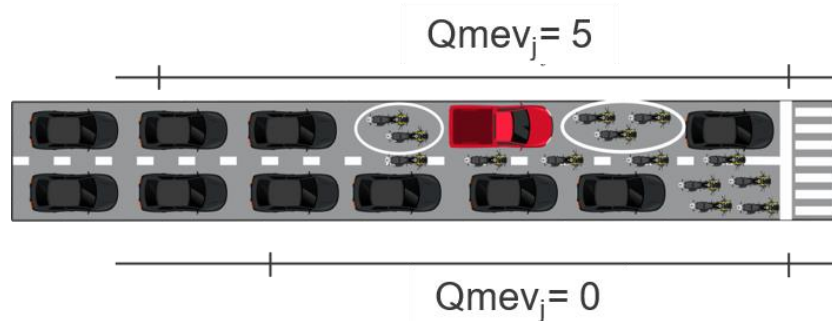
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 6 – Exemplificação da variável quantidade de motocicletas acumuladas à frente do primeiro veículo da fila do ciclo semafórico j (Qmf_j).



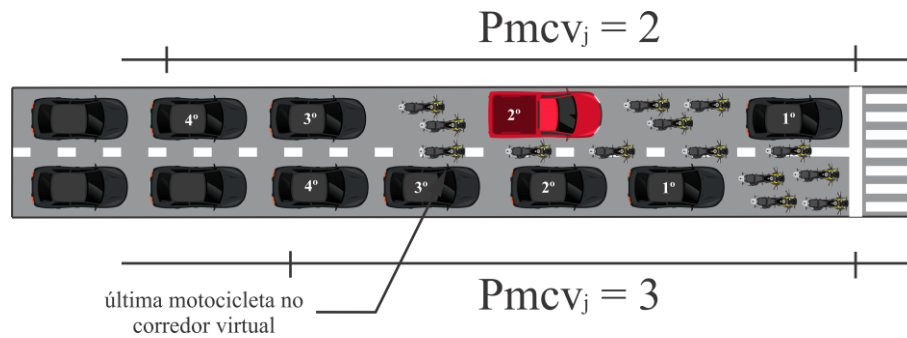
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 7 – Exemplificação da variável somatório da quantidade de motocicletas posicionadas longitudinalmente, durante a descarga da fila, entre o primeiro e o quarto veículo, do ciclo semafórico j (Q_{mev_j})



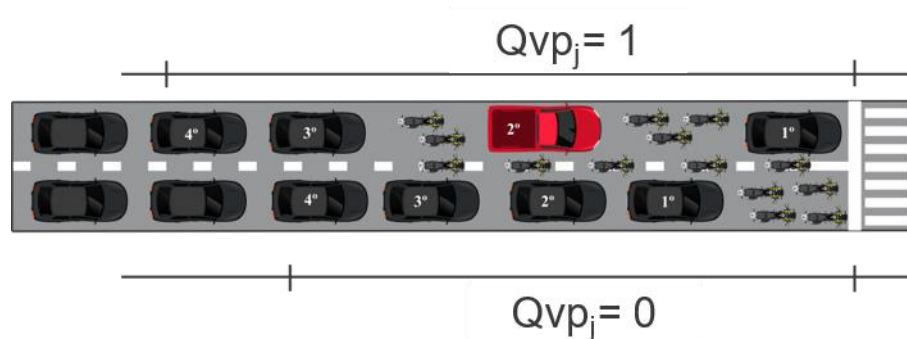
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 8 – Exemplificação da variável última posição dos veículos em fila que possui, nas suas adjacências, motocicletas no corredor virtual, do ciclo semafórico j (P_{mcv_j})



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 – Exemplificação da variável quantidade de veículos pesados, até o 4º veículo da fila, do ciclo semafórico j (Q_{vp_j})



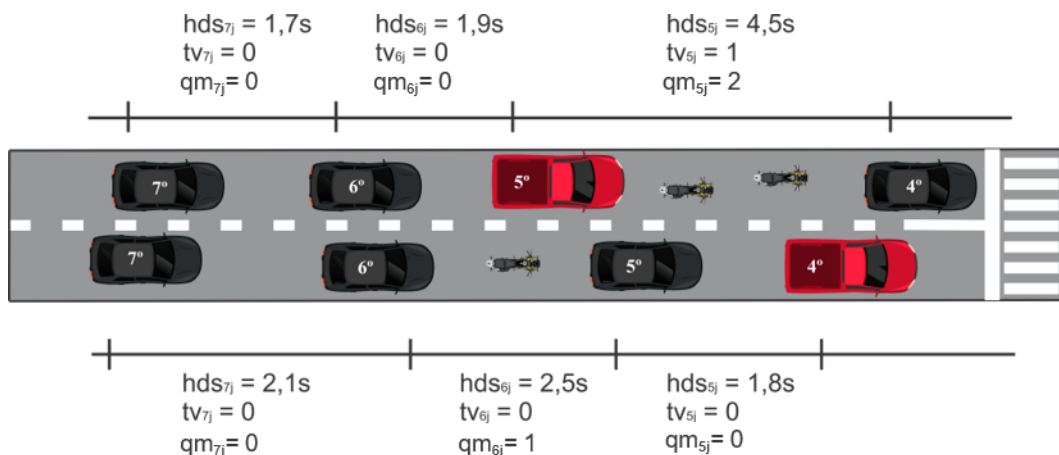
Fonte: Elaborado pelo autor.

O segundo tópico, que é relacionado ao hds, abordará o terceiro objetivo delimitado para a pesquisa, que consiste em analisar o efeito da quantidade de motocicletas posicionadas longitudinalmente entre dois veículos nos *headways* de descarga durante o regime de saturação. Para esse tópico, foram definidas as seguintes variáveis:

- a) hds_{ij} : *headway* de descarga de veículos leves ou pesados, em segundos, durante o ciclo semafórico i e na posição j da fila. O regime de saturação foi considerado a partir do 5º veículo em fila;
- b) qm_{ij} : quantidade de motocicletas entre veículos consecutivos que estão no regime de descarga de saturação, durante o ciclo semafórico i e à frente do veículo na posição j da fila. Para essa variável, não foram consideradas as motocicletas que estão no corredor virtual;
- c) tv_{ij} : variável binária que considera o tipo de veículo de cada hd_{ij} , com valor 0 para o veículo leve e valor 1 para o veículo pesado.

Nesse tópico, levanta-se a hipótese de que maiores valores de qm_{ij} acarretam maiores valores de hds_{ij} . A variável tv_{ij} foi definida com a intenção de isolar o efeito do tipo de veículo (leve ou pesado). A demonstração das variáveis desse tópico está apresentada na Figura 10.

Figura 10 – Exemplificação das variáveis hds_{ij} , qm_{ij} e tv_{ij} .



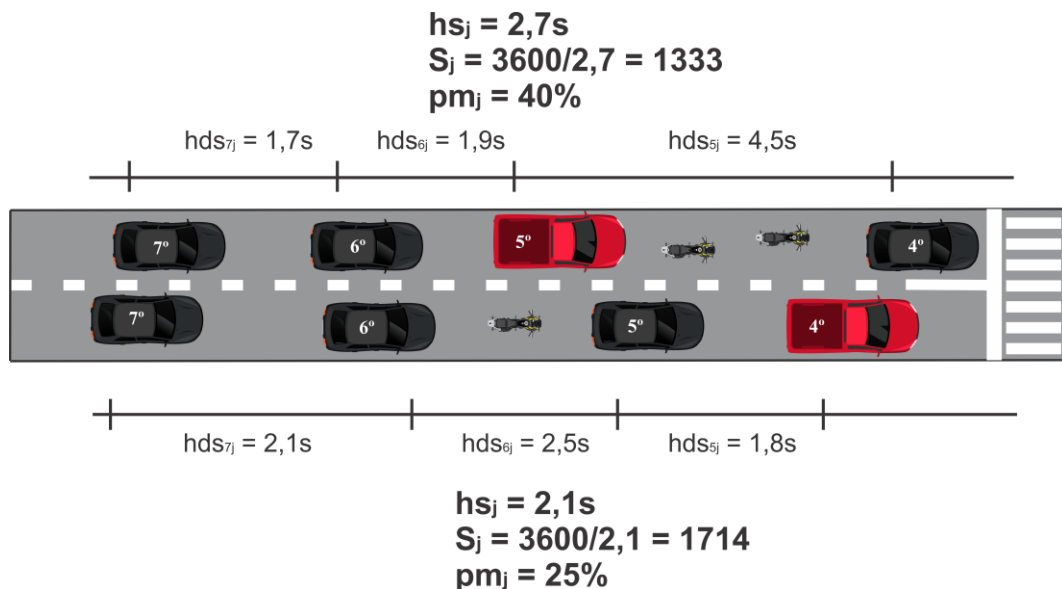
Fonte: Elaborado pelo autor.

O terceiro tópico, relacionado ao fluxo de saturação (S), abordará o quarto objetivo da pesquisa, que consiste em avaliar o efeito da proporção de motocicletas no fluxo de saturação de aproximações semaforizadas. Para esse tópico, foram definidas as seguintes variáveis:

- hs_j : *headway* de saturação, em segundos, do ciclo j , obtido pelo média dos hds_{ij} do ciclo j ;
- S_j : fluxo de saturação, em veículos por hora, do ciclo semaforico j , obtido através da divisão entre 3600 e hs_j ;
- pm_j : porcentagem de motocicletas, do ciclo semaforico j , entre veículos consecutivos que estão no regime de descarga de saturação, tomando como denominador a quantidade de motos (Q_{mj}), veículos leves (Q_{vlj}) e de veículos pesados (Q_{vpj}) no ciclo j ;

Para esse tópico, será verificada a hipótese de que maiores proporções de motocicletas (pm_j) ocasionam em menores valores de S_j . A demonstração das variáveis desse tópico está apresentada na Figura 11.

Figura 11 – Exemplificação das variáveis hs_j , S_j e pm_j



Fonte: Elaborado pelo autor.

O último tópico, relacionado ao fator de equivalência veicular (FEQ), abordará o quinto objetivo da pesquisa, que consiste em determinar o FEQ das motocicletas, no

desempenho de interseções semaforizadas, a partir de dados coletados em Fortaleza. Para esse tópico, serão utilizadas as mesmas variáveis adotadas por Mihn e Sano (2003), que são:

- a) TVS_j : tempo de verde durante o regime de saturação, do ciclo semaforico j , que consiste no somatório dos hd_{ij} de cada ciclo;
- b) QM_j : quantidade de motocicletas posicionadas longitudinalmente entre veículos consecutivos, do ciclo semaforico j , durante o regime de saturação;
- c) QVL_j : quantidade de veículos leves, do ciclo semaforico j , durante o regime de saturação;
- d) QVP_j : quantidade de veículos pesados, do ciclo semaforico j , durante o regime de saturação.

Vale ressaltar que não será analisado o FEQ das motocicletas diretamente, mas sim as variáveis que permitem a sua obtenção (TVS_j e QM_j). Após a definição das variáveis, foi realizado o planejamento da coleta de dados que consistiu em preparar uma planilha que garantisse o preenchimento adequado de todas as informações necessárias para a obtenção das variáveis coletadas, além de definir o local de coleta. Devido à quantidade de dados a serem coletados, foi necessária a obtenção de filmagens da aproximação semaforizada do local em estudo. As premissas para a seleção dessas imagens foram: visualização das indicações luminosas que controlam a faixa de tráfego analisada, quantidade considerável de motocicletas na via e boa visualização até o final da fila. A terceira etapa compreendeu a realização da coleta de dados.

A quarta etapa consistiu em realizar a análise descritiva das amostras coletadas. Para analisar o perfil dos *headways* de descarga por posição na fila, considerando a faixa, o tipo de veículo (leve ou pesado) e a presença de motocicletas. Essa análise permitiu identificar, através das elaboração e análise de gráficos, a influência do tipo de veículo e da presença de motocicletas, nos *headways* de descarga das interseções semaforizadas.

A quinta etapa deste estudo constituiu-se em realizar uma análise de correlação estatística entre as variáveis de cada tópico, materializada a partir do cálculo do coeficiente de correlação de Pearson (r). Pretendeu-se, neste estágio, identificar em qual grau as variáveis coletadas se correlacionam, sendo possível reforçar ou atenuar a hipótese de que determinada variável explicativa influencia no comportamento da variável explicada. Dentro dos objetivos de pesquisa, essa análise permitiu identificar o grau de associação entre as

variáveis que representam as motocicletas e as variáveis $H4_j$, hds_{ij} , S_j e TVS_j que pôde fortalecer ou atenuar as hipóteses levantadas.

A última etapa residiu na realização de análises de regressão linear entre as variáveis explicativas e explicadas de cada tópico. Nessa etapa, foram analisados os valores médio e intervalos de confiança dos coeficientes obtidos, significância, R^2 , além do atendimento às premissas de independência, linearidade, normalidade e homocedasticidade dos resíduos. A análise de regressão permitiu, por fim, obter e avaliar o efeito médio que a mudança unitária que representa a motocicleta tem sobre as variáveis dependentes ($H4_j$, hds_{ij} , S_j e TVS_j), o que deu indícios sobre o efeito das motocicletas na capacidade de interseções semaforizadas.

Por fim, ressalta-se que este é um estudo exploratório, o qual propõe e testa um método para: avaliar o impacto da presença de motocicletas sobre o tempo perdido inicial e sobre o fluxo de saturação de uma faixa controlada por um semáforo, além da determinação do fator de equivalência veicular para motos e veículos pesados.

4 INTERSEÇÃO DE ESTUDO

Para a realização do estudo, como mencionado anteriormente, foi necessária a utilização de filmagens em interseções semaforizadas. Desta forma, utilizou-se a base de câmeras disponibilizadas pelo Controle de Tráfego em Área de Fortaleza (CTAFOR) para selecionar o local adequado para a coleta dos dados. Vale salientar que poucas câmeras disponibilizadas satisfazem os critérios necessários para a realização do estudo.

A interseção em que os critérios de imagem foram satisfeitos e, portanto, foi definida para a análise em questão, consiste no cruzamento entre as avenidas Bernardo Manuel e Doutor Silas Munguba. As avenidas representam conexões para importantes polos geradores de tráfego da cidade, como terminal urbano de ônibus, campus universitário, aeroporto, shopping center e estádio de futebol; além de propiciar importante conexão entre a região periférica e o centro da cidade. A macrolocalização da interseção está apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Macrolocalização da interseção analisada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na interseção analisada, a Av. Bernardo Manuel apresenta duas faixas de tráfego misto e uma faixa exclusiva de ônibus por sentido, separados por canteiro central. A Av. Dr. Silas Munguba apresenta duas faixas de tráfego misto por sentido, também separados por canteiro central. A coleta deste estudo foi realizada na aproximação oeste do cruzamento, que compõe a Av. Dr. Silas Munguba. A representação da filmagem está apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Visualização da filmagem obtida da aproximação oeste do cruzamento entre as avenidas Bernardo Manuel e Dr. Silas Munguba, pela qual foi realizada a coleta deste estudo



Fonte: CTAFOR

As faixas da aproximação analisada apresentam 3,2 metros cada, enquanto o canteiro central possui 1,2 metro. O greide da pista em estudo é de -1,5%. Quanto às possíveis interferências na descarga da fila da aproximação em questão, a parada de ônibus à montante está localizada a cerca 240 metros e a parada à jusante está localizada a 60 metros da interseção. Durante a realização da coleta, não foram percebidas perturbações na descarga da fila devido a essas condições. Há um semáforo cerca de 250 metros à jusante da aproximação analisada, no entanto, também não foram percebidos impactos na descarga da fila devido à sua existência.

O cruzamento apresenta fiscalização eletrônica em todas as aproximações. Quanto à operação semafórica, a interseção apresenta dois estágios veiculares, sendo um para a Av. Bernardo Manuel e o outro para a Av. Dr. Silas Munguba. Em todas as aproximações, somente são permitidos os movimentos em frente e de conversão à direita. O semáforo em questão apresenta oito planos semafóricos ao longo do dia, considerando os dias da semana, os quais possuem ciclos entre 80 e 144 segundos. Visto que a coleta foi realizada apenas durante o turno da manhã, devido às condições de iluminação, apresentam-se na Tabela 2, os tempos semafóricos dessa interseção no período estudado.

Tabela 2 – Ciclos semafóricos durante o período em estudo

Plano Semafórico	Ciclo (s)	Estágio	Verde (s)	Amarelo (s)	Vermelho geral (s)	Vermelho (s)
06h00 – 08h30	144	Av. Dr. Silas Munguba	63	4	3	74
		Av. Bernardo Manuel	67	4	3	70
08h30 – 10h30	128	Av. Dr. Silas Munguba	60	4	3	61
		Av. Bernardo Manuel	54	4	3	67

Fonte: Tabela elaborada pelo autor. Dados obtidos pelo CTAFOR.

O Plano de Acessibilidade Sustentável de Fortaleza (PAS – For), que visa caracterizar, diagnosticar problemas e apontar soluções para o sistema de transportes da cidade, está sendo elaborado no momento em que se produz esse estudo. Vários pontos foram selecionados para a realização de pesquisas volumétricas e, dentre esses, a interseção analisada nessa pesquisa. Os fluxos veiculares obtidos pela pesquisa realizada para a aproximação analisada, por tipo de veículo e por turno, estão apresentados na Tabela 3. As definições de veículos leve, motocicletas e veículo pesado são as mesmas do presente estudo.

Tabela 3 – Volumes horários veiculares da aproximação analisada

	Veículos leves (veíc/h)	Motocicleta (veíc/h)	Veículo Pesado (veíc/h)
Pico - Manhã	2192	1532	198
%	56%	39%	5%
Pico - Tarde	1460	749	198
%	61%	31%	8%
Pico - Noite	1126	670	98
%	59%	35%	5%

Fonte: Tabela elaborada pelo autor. Dados obtidos pelo PAS-For.

Os dados obtidos pela pesquisa volumétrica indicam que há uma participação expressiva de motocicletas na repartição modal do fluxo, variando entre 31 e 39%, com o volume mais expressivo no pico da manhã, sendo de 1500 motocicletas por hora. Na coleta realizada para a realização desse trabalho, que será descrita posteriormente, verificou-se que os veículos pesados trafegam majoritariamente pela faixa direita. Enquanto a repartição (considerando apenas veículos leves e pesados) da faixa esquerda foi de 4% de veículos pesados e 96% de veículos leves, a faixa direita apresentou uma proporção de 31% de veículos pesados e 69% de veículos leves.

Como dito anteriormente, a coleta de dados foi realizada para a aproximação oeste da interseção, na qual opera o estágio da Av. Dr. Silas Munguba. A coleta de dados foi efetuada através de filmagens processadas nos dias 17 de maio de 2018 (06h50 às 09h10), 09 de outubro de 2019 (06h30 às 08h30), 09 de abril de 2019 (06h45 às 10h00), 10 de abril de 2019 (06h30 às 10h00) e 11 de abril de 2019 (06h30 às 10h00), totalizando 14 horas e 35 minutos de coleta. Os dados foram obtidos para as duas faixas de tráfego que operam nessa aproximação.

Para a realização da coleta, foram considerados apenas os ciclos semafóricos com, no mínimo, seis veículos ao final do vermelho geral, conforme indica DENATRAN (2014), sendo contabilizados tanto saturados como não-saturados. No total, foram coletados 199 ciclos para a faixa direita que resultaram em 1.816 *headways* de descarga veiculares e 221 ciclos para a faixa esquerda que resultaram em 2.261 *headways* de descarga veiculares.

5 ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

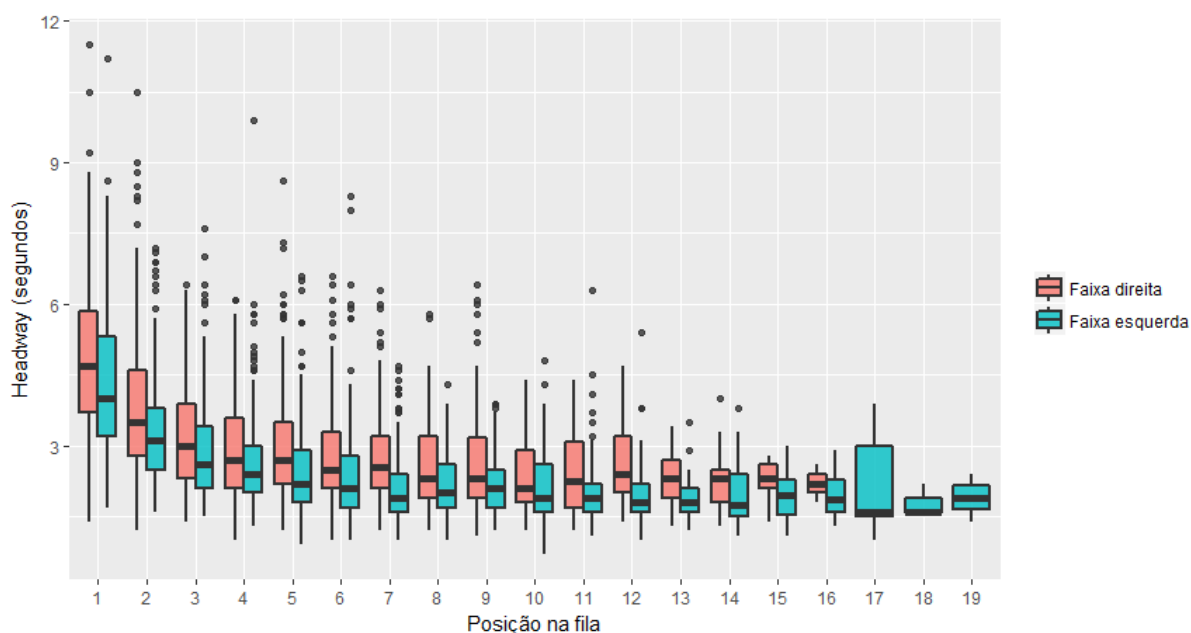
5.1 Headways de descarga

Nesta subetapa, foi realizada a análise do perfil dos *headways* de descarga por posição na fila. Para isso, a análise foi dividida em três partes: considerando todos os dados *headways* de descarga; *headways* de descarga por tipo de veículo e *headways* de descarga considerando a presença de motocicletas à frente do veículo.

5.1.1 Perfil geral dos *headways* de descarga

Com a finalidade de descrever o comportamento da descarga da fila nas duas faixas de tráfego da aproximação da interseção analisada, elaborou-se um gráfico *boxplot* dos hd por posição na fila, apresentado no Gráfico 1.

Gráfico 1 – *Headways* de descarga da fila, em segundos, por faixa de tráfego



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando a média de todos os hd que pertencem ao tp_1 (os quatro primeiros veículos), obtiveram-se valores de 3,3 e 3,7 segundos (s) para as faixas da esquerda e da direita respectivamente. Enquanto as médias dos hds foram de 2,2 e 2,7 s para as faixas da esquerda e da direita respectivamente.

Os dados indicam, de forma geral, que a faixa direita tende a apresentar valores maiores de *headways*. A partir dos dados coletados e de visita ao local do campo, parte-se da hipótese de que isso é influenciado tanto pelo movimento de conversão à direita (permitida apenas para essa faixa), quanto pela maior quantidade de veículos pesados. Valores de média, desvio padrão, coeficiente de variação (CV) e quantidade de observações (N) por posição na fila estão apresentados nas Tabela 4 e Tabela 5 para as faixas da esquerda e direita respectivamente.

Tabela 4 – Estatísticas descritivas dos *headways* de descarga, por posição na fila, da faixa esquerda

HEADWAYS DE DESCARGA - FAIXA ESQUERDA				
Posição na fila	Média amostral	Desvio padrão	CV	N
1°	4,3	1,6	36%	221
2°	3,3	1,1	34%	221
3°	2,9	1,1	37%	221
4°	2,6	1,0	39%	221
5°	2,4	1,0	40%	221
6°	2,3	1,1	46%	221
7°	2,1	0,7	34%	205
8°	2,1	0,7	31%	164
9°	2,1	0,6	29%	144
10°	2,1	0,8	36%	123
11°	2,0	0,8	37%	100
12°	1,9	0,7	36%	70
13°	1,8	0,4	24%	49
14°	1,9	0,7	35%	36
15°	1,9	0,6	30%	20
16°	1,9	0,5	25%	12
17°	2,2	1,2	53%	7
18°	1,8	0,3	20%	3
19°	1,9	0,7	37%	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 – Estatísticas descritivas dos *headways* de descarga, por posição na fila, da faixa direita

HEADWAYS DE DESCARGA - FAIXA DIREITA				
Posição na fila	Média amostral	Desvio padrão	CV	N
1º	4,9	1,6	34%	199
2º	3,9	1,6	41%	199
3º	3,2	1,1	36%	199
4º	2,9	1,0	35%	199
5º	3,0	1,2	40%	199
6º	2,8	1,1	38%	199
7º	2,7	1,0	35%	174
8º	2,6	0,9	37%	135
9º	2,7	1,1	42%	114
10º	2,3	0,8	35%	71
11º	2,4	0,8	34%	50
12º	2,6	0,8	30%	33
13º	2,3	0,6	25%	25
14º	2,3	0,8	33%	13
15º	2,2	0,5	24%	5
16º	2,2	0,6	26%	2

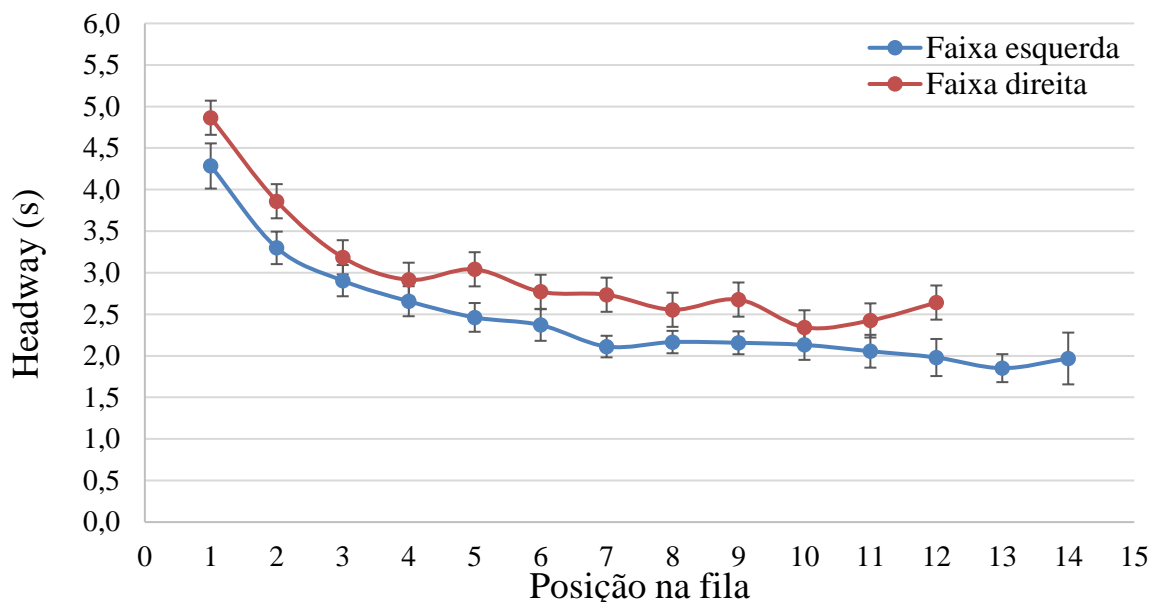
Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme as informações apresentadas nas tabelas acima, houve mais do que 30 observações na faixa esquerda, considerando cada posição na fila entre a 1º e a 14º, enquanto houve mais do que 30 observações nas posições entre a 1º e 12º para a faixa direita. Considerando apenas as posições de fila que obtiveram mais do que 30 observações, percebe-se que a estabilização do valor médio do *headway* ocorre aproximadamente a partir da 7º posição na faixa esquerda e direita. No entanto, visto esta pesquisa não tem o foco de analisar a estabilização dos hd, este trabalho adotará o método indicado pelo DENATRAN (2014), no qual a estabilização do hds é contabilizada a partir do 5º veículo em fila. Não é possível observar um padrão a respeito do coeficiente de variação (CV) por posição na fila, visto que os valores se situam majoritariamente entre 30 e 40% para ambas as faixas de tráfego.

Com o intuito de identificar e avaliar o intervalo de confiança do valor médio de cada *headway* de descarga, nas faixa direita e esquerda, elaborou-se o Gráfico 2. Esse gráfico foi elaborado considerando as posições da fila que tiveram no mínimo 30

observações, o que garante a aplicação do Teorema do Limite Central para a estimação do intervalo de confiança. Utilizou-se um grau de confiança de 99%.

Gráfico 2 – Intervalo de confiança da média do *headway* de descarga, em segundos, por posição na fila



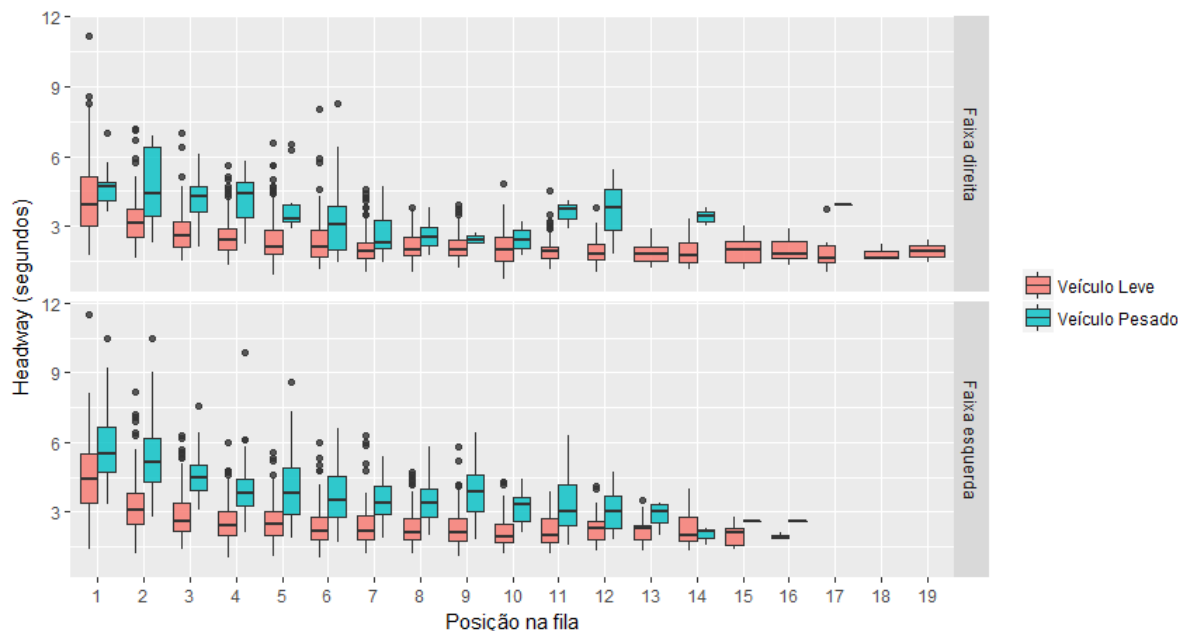
Fonte: Elaborado pelo autor.

Através do Gráfico 2, é possível confirmar que o valor médio do hd na faixa direita é superior ao da faixa esquerda. Também é possível identificar uma clara estabilização do hd da faixa esquerda a partir do 7º veículo, enquanto na faixa direita a estabilização não é evidente, pois o 10º hd médio apresenta um valor inferior aos demais. Apesar disso, é possível visualizar uma leve estabilização também após o 7º veículo.

5.1.2 Perfil dos *headways* de descarga, por tipo de veículo

Além da posição na fila, outro fator que influencia na descarga da fila de interseções semaforizadas é o tipo de veículo: leve ou pesado. A classificação veicular foi coletada com a finalidade de mensurar qual a contribuição do tipo de veículo no comportamento da descarga da fila. Para visualizar esse comportamento, elaborou-se um gráfico de *boxplot*, apresentado no Gráfico 3, dos hd por posição de fila para ambas as faixas de tráfego, considerando o tipo de veículo.

Gráfico 3 – *Headways* de descarga da fila, em segundos, por faixa de tráfego e por tipo de veículo



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do gráfico apresentado, pode-se perceber que, de forma geral, os *hd* dos veículos pesados são consideravelmente maiores do que os *hd* dos veículos leves. Considerando apenas os *hds*, obtiveram-se médias de 2,1 e 3,1 s, respectivamente para veículos leves e pesados que trafegaram na faixa esquerda; enquanto foram obtidas médias de 2,4 e 3,7 s, respectivamente para veículos leves e pesados da faixa direita. Dado que as diferenças entre as médias variam de 0,9 e 1,3 s respectivamente para as faixas da esquerda e direita, nota-se a significância do tipo de veículo na descarga da fila e, portanto, na capacidade da via.

Analisando apenas os *hd* relativos ao tp_1 , foram obtidas médias de 3,2 e 4,4 s, respectivamente para veículos leves e pesados que trafegavam na faixa esquerda, enquanto foram obtidas médias de 3,3 e 5,0 s para a faixa direita. As diferenças entre as médias variam entre 1,2 e 1,7 s, o que indica que o impacto do veículo pesado é ainda maior nos primeiros *headways*. Os valores de média, desvio padrão, coeficiente de variação (CV) e quantidade de observações (N) por tipo de veículo e por posição na fila, estão apresentados nas Tabela 6 e Tabela 7 para as faixas da esquerda e direita respectivamente.

Tabela 6 – Estatísticas descritivas dos *headways* de descarga, por tipo de veículo e por posição na fila, da faixa esquerda

HEADWAYS DE DESCARGA - FAIXA ESQUERDA								
Tipo de veículo			Veículo Leve			Veículo Pesado		
Posição na fila	Média amostral	Desvio padrão	CV	N	Média amostral	Desvio padrão	CV	N
1°	4,3	1,6	37%	210	4,8	1,0	22%	11
2°	3,2	1,1	33%	210	4,4	1,6	38%	11
3°	2,8	1,0	35%	208	4,3	1,6	36%	13
4°	2,5	0,8	32%	206	4,3	1,9	45%	15
5°	2,4	0,9	38%	208	3,7	1,3	35%	13
6°	2,3	1,0	41%	210	3,8	2,2	58%	11
7°	2,1	0,7	33%	192	2,6	0,9	36%	13
8°	2,1	0,6	30%	155	2,7	0,7	25%	9
9°	2,2	0,6	30%	140	2,3	0,4	16%	4
10°	2,1	0,8	36%	118	2,4	0,5	22%	5
11°	2,0	0,6	29%	95	3,9	1,5	39%	5
12°	1,9	0,5	29%	65	3,0	1,5	51%	5
13°	1,8	0,4	24%	48	2,0	-	-	1
14°	1,9	0,6	32%	34	3,4	0,6	17%	2
15°	1,9	0,6	30%	20	-	-	-	0
16°	2,0	0,5	25%	12	-	-	-	1
17°	1,9	1,0	52%	6	3,9	-	-	1
18°	1,8	0,3	20%	3	-	-	-	0
19°	1,9	0,7	37%	2	-	-	-	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Estatísticas descritivas dos *headways* de descarga, por tipo de veículo e por posição na fila, da faixa direita

HEADWAYS DE DESCARGA - FAIXA DIREITA									
Tipo de veículo	Veículo Leve				Veículo Pesado				
	Posição na fila	Média amostral	Desvio padrão	CV	N	Média amostral	Desvio padrão	CV	N
	1º	4,5	1,5	33%	153	5,9	1,6	28%	46
	2º	3,3	1,1	34%	147	5,5	1,6	29%	52
	3º	2,8	0,9	33%	157	4,6	0,8	19%	42
	4º	2,6	0,8	31%	151	4,0	0,9	23%	48
	5º	2,6	0,8	30%	142	4,1	1,4	35%	57
	6º	2,4	0,8	32%	149	3,8	1,2	31%	50
	7º	2,5	0,9	35%	136	3,5	0,8	24%	38
	8º	2,3	0,8	33%	109	3,5	1,0	27%	26
	9º	2,3	0,8	35%	90	3,9	1,2	31%	24
	10º	2,2	0,7	33%	59	3,3	0,7	20%	12
	11º	2,3	0,7	31%	42	3,1	1,1	36%	8
	12º	2,5	0,7	28%	27	3,4	0,8	25%	6
	13º	2,2	0,5	23%	22	3,1	0,4	12%	3
	14º	2,4	0,8	34%	10	2,0	0,4	19%	3
	15º	2,1	0,6	26%	4	2,6	-	-	1
	16º	1,8	-	-	1	2,6	-	-	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível identificar diferenças entre os valores dos hd de cada faixa de tráfego para o mesmo tipo de veículo. Essa condição reforça a hipótese de que a faixa direita apresenta outras influências que não são apenas relacionadas ao tipo de veículo, como a conversão à direita que é permitida apenas para essa faixa de tráfego.

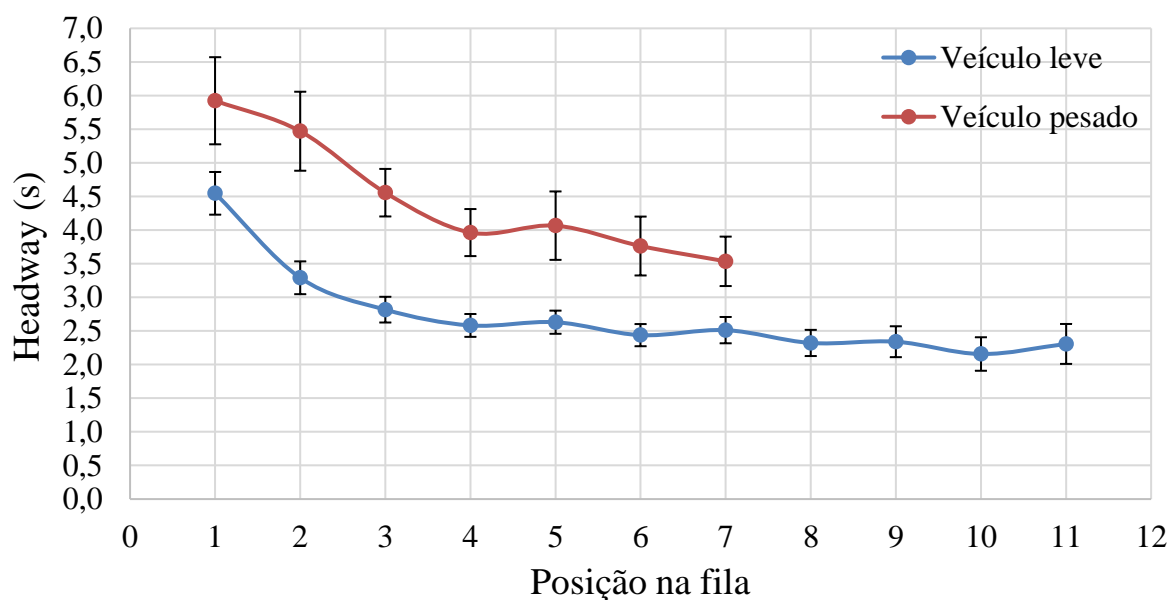
A partir da média dos hd por posição da fila, não é possível elaborar análises consistentes acerca dos hd dos veículos pesados devido à pequena quantidade de observações. No entanto, quanto aos hd dos veículos leves, é possível identificar que a estabilização dos valores ocorre aproximadamente após o 7º veículo em fila. Contudo, conforme dito anteriormente, este trabalho adotará o método do DENATRAN (2014) que considera a estabilização após o 5º veículo em fila.

Outro ponto a ressaltar é a maior quantidade de observações de veículos pesados na faixa direita, quando comparado com a faixa esquerda. Isso contribui para valores maiores dos hd médio para essa faixa de tráfego, conforme vistos no Gráfico 1 e nas Tabela 4 e Tabela 5. Com exceção dos hd dos veículos pesados na faixa esquerda, em que foram

obtidas poucas observações e o CV apresenta valores mais destoantes, os CV restantes variam em torno dos 30%.

Para identificar e avaliar o intervalo de confiança do valor médio de cada *headway* de descarga por tipo de veículo, elaborou-se o Gráfico 4. Esse gráfico foi elaborado considerando as posições da fila que tiveram no mínimo 30 observações, o que garante a aplicação do Teorema do Limite Central para a estimação do intervalo de confiança. Portanto, a análise foi realizada apenas para a faixa direita, visto que a faixa esquerda não apresentou posições de fila com mais de 30 observações.

Gráfico 4 – Intervalo de confiança da média do *headway* de descarga, em segundos, por tipo de veículo na faixa direita e por posição na fila



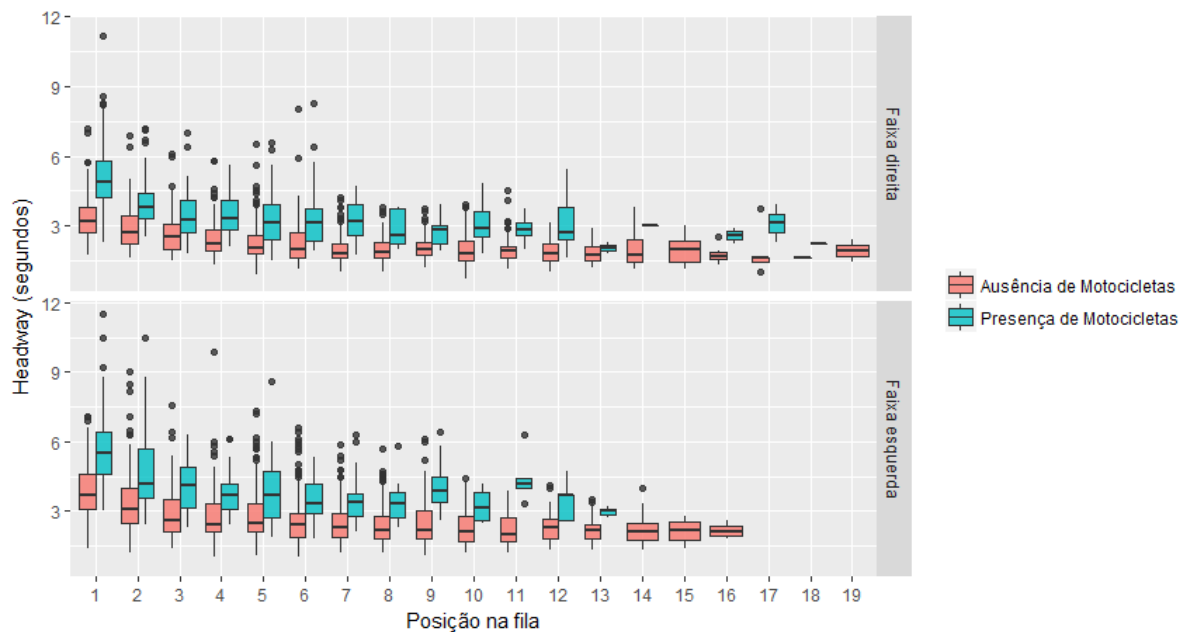
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados apresentados confirmam que o veículo pesado tende a apresentar valores maiores de hd em todas as posições na fila. Na primeira posição, por exemplo, o intervalo de confiança do hd médio do veículo leve foi de 4,2 a 4,9 segundos; enquanto para o veículo pesado, o intervalo de confiança do hd médio foi de 5,3 a 6,6 segundos. Na 7ª posição, no entanto, o intervalo de confiança do hd médio do veículo leve foi de 2,3 a 2,7 segundos; enquanto foi de 3,2 a 3,9 segundos para o veículo pesado. Diferentemente dos dados visualizados referente à faixa direita no Gráfico 2, quando se considera apenas os veículos leves nessa faixa de tráfego, há uma estabilização do hd aproximadamente após a 4ª posição na fila.

5.1.3 Perfil dos headways de descarga, por presença de motocicleta

Essa parte da análise busca explorar a influência das motocicletas nos *headways* de descarga da fila em interseções semaforizadas, que é a principal motivação para a realização desse estudo. Para isso, para cada *headway* coletado, foi obtida a informação da quantidade de motocicletas imediatamente à sua frente. Parte-se, portanto, da hipótese de que a presença de motocicletas longitudinalmente entre veículos aumenta o valor dos *headways* de descarga. Para visualizar o comportamento dos *headways* de descarga veiculares na presença ou ausência de motocicletas, elaborou-se um gráfico de *boxplot*, apresentado no Gráfico 5, dos *headways* por posição da fila para ambas as faixas de tráfego, considerando a presença ou ausência de motocicletas entre o veículo em questão e o veículo líder.

Gráfico 5 – *Headways* de descarga da fila, em segundos, por faixa de tráfego e por presença ou ausência de motocicleta



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do gráfico apresentado, pode-se perceber que, de forma geral, os *headways* dos veículos que tiveram presença de motocicletas à sua frente são consideravelmente maiores do que os *headways* dos veículos que tiveram ausência de motocicletas. Considerando apenas os *headways* no regime de saturação (hds), obtiveram-se

médias de 2,1 e 3,1 s, respectivamente para veículos que apresentaram ausência e presença de motocicletas à sua frente na faixa esquerda; enquanto foram obtidas médias de 2,6 e 3,7 s, respectivamente para veículos que apresentaram ausência e presença de motocicletas à sua frente na faixa direita. Dado que as diferenças entre as médias variam de 1,0 e 1,1 s respectivamente para as faixas da esquerda e direita, o que representa um aumento de 47% e de 42%, pode-se afirmar que há indícios que reforçam a hipótese de que a presença de motocicletas afeta significativamente os *headways* de descarga da via e, portanto, na capacidade viária do fluxo de veículos leves e pesados.

Explorando os dados dos *headways* relativos ao tp_1 , foram obtidas médias de 2,8 e 4,3 s, respectivamente para veículos que apresentaram ausência e presença de motocicletas à sua frente na faixa esquerda; enquanto foram obtidas médias de 3,2 e 5,0 s, respectivamente para veículos que apresentaram ausência e presença de motocicletas à sua frente na faixa direita. As diferenças entre as médias variam entre 1,5 e 1,8 s, sendo valores maiores comparando com as diferenças entre as médias dos *headways* em regime de saturação, o que indica que o efeito das motocicletas é ainda maior na descarga dos primeiros veículos. A hipótese para esse fenômeno é de que as motocicletas tendem a se concentrar próximo aos primeiros veículos e, portanto, afetam mais significativamente a descarga desses. Os valores de média, desvio padrão, coeficiente de variação (CV) e quantidade de observações (N) por ausência e presença de motocicleta e por posição na fila, estão apresentados nas Tabela 8 e Tabela 9 para as faixas da esquerda e direita respectivamente.

Tabela 8 – Estatísticas descritivas dos *headways* de descarga, por ausência e presença de motocicletas e por posição na fila, da faixa esquerda

HEADWAYS DE DESCARGA - FAIXA ESQUERDA								
Tipo de veículo	Ausência de motocicleta				Presença de motocicleta			
Posição na fila	Média amostral	Desvio padrão	CV	N	Média amostral	Desvio padrão	CV	N
1°	3,3	1,0	31%	111	5,3	1,4	27%	110
2°	2,9	0,9	31%	148	4,1	1,1	28%	73
3°	2,7	0,9	35%	170	3,7	1,2	31%	51
4°	2,4	1,0	40%	170	3,4	0,9	26%	51
5°	2,3	0,8	36%	184	3,4	1,2	37%	37
6°	2,2	0,9	43%	183	3,2	1,3	40%	38
7°	2,0	0,6	29%	184	3,2	0,9	27%	21
8°	2,1	0,6	28%	143	2,9	0,7	24%	21
9°	2,1	0,6	28%	130	2,8	0,6	22%	14
10°	2,0	0,7	34%	110	3,0	0,8	26%	13
11°	1,9	0,6	30%	91	3,2	1,3	40%	9
12°	1,8	0,5	25%	60	2,9	1,1	39%	10
13°	1,8	0,4	24%	47	2,1	0,3	15%	2
14°	1,9	0,7	35%	35	3,0	-	-	1
15°	1,9	0,6	30%	20	-	-	-	0
16°	1,8	0,4	20%	9	2,6	0,3	12%	3
17°	1,8	1,1	59%	5	3,1	1,1	37%	2
18°	1,6	0,0	0%	2	2,2	-	-	1
19°	1,9	0,7	37%	2	-	-	-	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

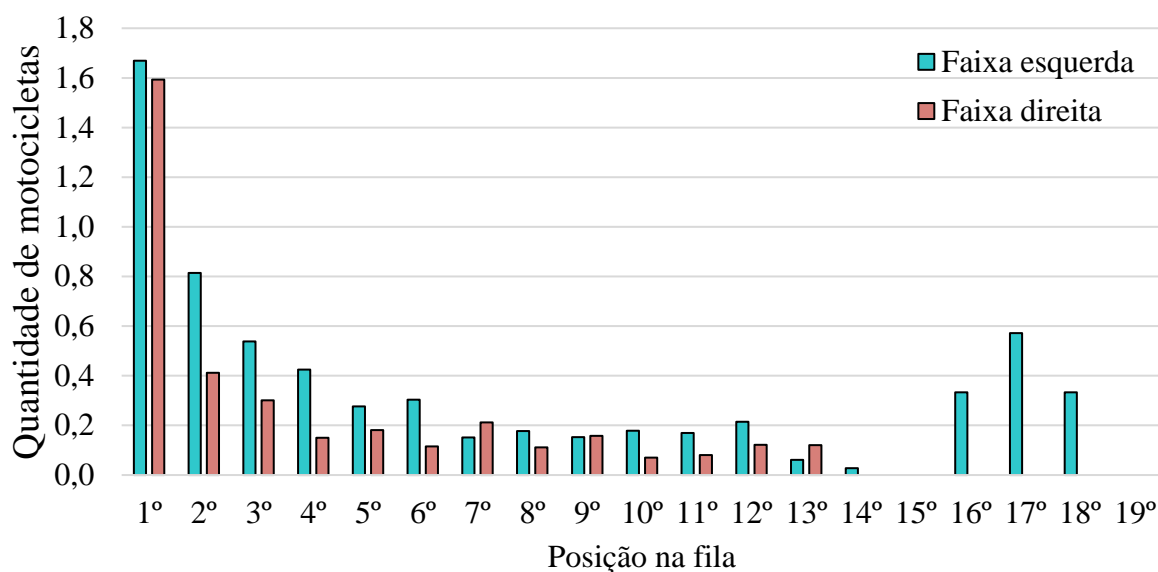
Tabela 9 – Estatísticas descritivas dos *headways* de descarga, por ausência e presença de motocicletas e por posição na fila, da faixa direita

HEADWAYS DE DESCARGA - FAIXA DIREITA								
Tipo de veículo	Ausência de motocicleta				Presença de motocicleta			
Posição na fila	Média amostral	Desvio padrão	CV	N	Média amostral	Desvio padrão	CV	N
1º	4,0	1,2	31%	96	5,7	1,6	27%	103
2º	3,5	1,4	39%	152	5,0	1,7	35%	47
3º	3,0	1,1	36%	160	4,1	1,1	27%	39
4º	2,8	1,0	34%	176	3,9	1,0	25%	23
5º	2,9	1,1	38%	175	4,1	1,4	35%	24
6º	2,7	1,0	38%	181	3,7	1,0	28%	18
7º	2,6	0,9	34%	149	3,6	1,0	29%	25
8º	2,5	0,9	36%	123	3,4	1,0	29%	12
9º	2,5	1,0	40%	104	4,2	1,3	31%	10
10º	2,3	0,8	34%	67	3,2	0,9	26%	4
11º	2,3	0,7	31%	46	4,0	0,5	12%	4
12º	2,5	0,7	27%	29	3,7	0,8	23%	4
13º	2,2	0,6	25%	22	3,0	0,2	8%	3
14º	2,3	0,8	33%	13	-	-	-	0
15º	2,2	0,5	24%	5	-	-	-	0
16º	2,2	0,6	26%	2	-	-	-	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto à presença de motocicletas, cerca de 52% e 50% dos *headways* dos veículos na 1º posição da fila tiveram motocicletas à sua frente, respectivamente nas faixas da esquerda e direita. Quando analisado para o 5º veículo da fila, por exemplo, essa proporção cai para 17% e 12% respectivamente para as faixas da esquerda e direita. Os dados apresentados também indicam que o efeito das motocicletas é ainda maior para os primeiros *headways*, especialmente para a 1º posição da fila. Comparando as condições com a presença e ausência de motocicletas, as diferenças entre os *headways* médios dos veículos da 1º posição em fila foram de 1,9 e 1,7 s respectivamente para as faixas da esquerda e da direita, enquanto a diferença entre os *headways* médios dos veículos da 5º posição em fila foram de 1,1 e 1,2 s respectivamente. Para averiguar a concentração de motocicletas ao longo da fila, elaborou-se o Gráfico 6 que apresenta a quantidade média de motocicletas à frente dos veículos por posição na fila.

Gráfico 6 – Quantidade média de motocicletas à frente dos veículos por posição na fila

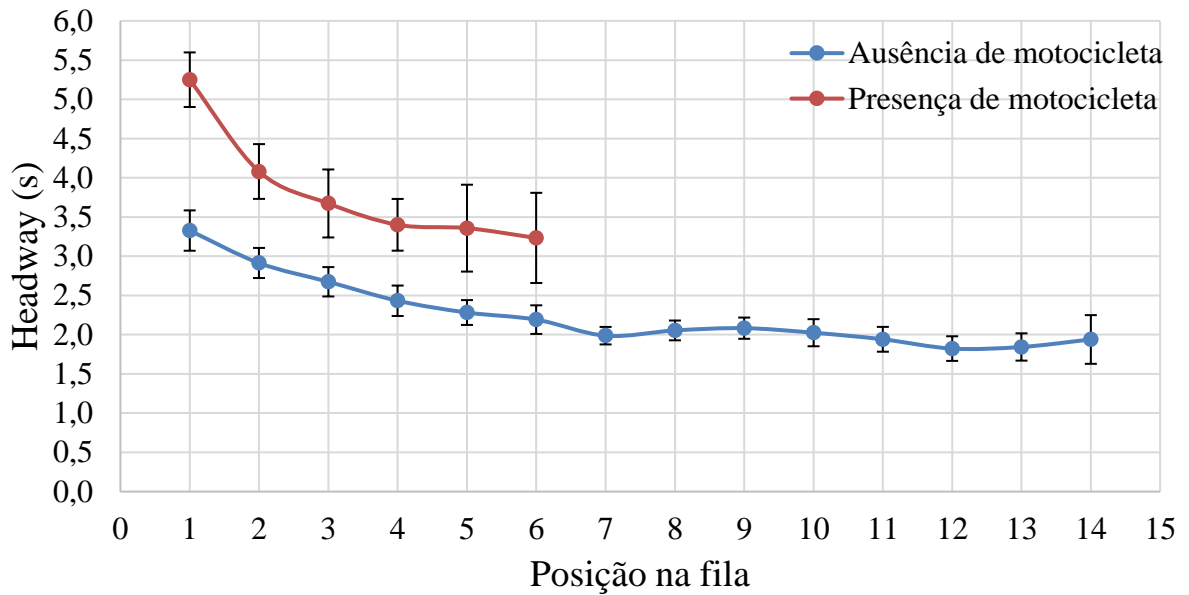


Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos dados apresentados no gráfico acima, é possível perceber que as motocicletas tendem a se concentrar nos primeiros veículos da fila. Analisando o 1º veículo da fila, as quantidades médias obtidas foram de 1,7 e 1,6 motos à frente, respectivamente para as faixas da direita e esquerda. Enquanto as quantidades médias obtidas para o 5º veículo foram de 0,3 e 0,2 motos, respectivamente para as faixas da esquerda e direita. Dessa forma, pode-se afirmar que a quantidade de motocicletas impacta mais significativamente a descarga dos primeiros veículos em fila. Os valores obtidos nas posições 16º, 17º e 18º na faixa esquerda apresentaram valores destoantes do restante, no entanto, devido à baixa quantidade de observações de *headways* nessa posição, esse comportamento não pode ser dado como representativo da realidade.

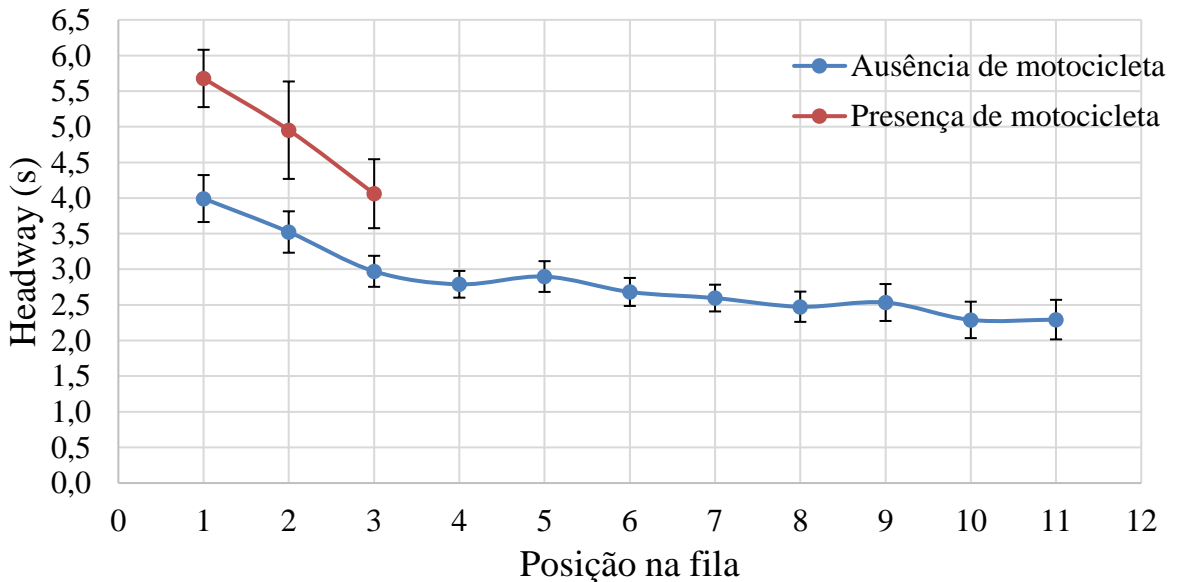
Por fim, com a finalidade de avaliar o intervalo de confiança do valor médio de cada *headway* de descarga considerando a presença de motocicletas, elaboraram-se os Gráfico 7 e Gráfico 8, que apresentam os dados respectivamente das faixas esquerda e direita. Esse gráfico foi elaborado considerando as posições da fila que tiveram no mínimo 30 observações, o que garante a aplicação do Teorema do Limite Central para a estimação do intervalo de confiança. Portanto, a análise foi realizada apenas para a faixa direita, visto que a faixa esquerda não apresentou posições de fila com mais de 30 observações.

Gráfico 7 – Intervalo de confiança da média do *headway* de descarga, em segundos, por presença de motocicletas na faixa esquerda e por posição na fila



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 8 – Intervalo de confiança da média do *headway* de descarga, em segundos, por presença de motocicletas na faixa direita e por posição na fila



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados indicam que a média dos *headways* de descarga com presença de motocicleta é maior do que na condição de ausência de motocicletas. No entanto, como não houveram observações suficientes em todas as posições na fila, não foi possível identificar

exatamente como se comporta a variável ao longo da fila. Aparentemente, a diferença entre as duas condições é maior principalmente no 1º veículo da fila, o que é causado principalmente devido ao maior acúmulo de motocicletas próximo à faixa de retenção.

5.2 Conclusões parciais

Nessa etapa foi realizada a análise do perfil dos *headways* de descarga por posição na fila. Para isso, a análise foi dividida em três partes: considerando todos os dados *headways* de descarga; *headways* de descarga por tipo de veículo e *headways* de descarga considerando a presença de motocicletas à frente do veículo. Com o objetivo de sintetizar as conclusões das análises realizadas considerando o perfil dos *headways* de descarga por posição na fila, pode-se dizer que:

- De forma geral, a faixa direita tende a apresentar maiores valores de *headways* do que a faixa esquerda. Esse fenômeno pode ser explicado devido à maior quantidade de veículos pesados na faixa direita e devido ao movimento de conversão à direita que é permitido apenas nessa faixa;
- A estabilização do valor médio do *headway* de descarga ocorre aproximadamente a partir da 7ª posição na faixa esquerda (aproximadamente 2,01 s) e 7ª na faixa direita (aproximadamente 2,7 s);
- Os *headways* dos veículos pesados geralmente são consideravelmente maiores do que os *headways* dos veículos leves. Considerando apenas os *headways* no regime de saturação (hds), obtiveram-se médias de 2,1 e 3,1 s, respectivamente para veículos leves e pesados que trafegaram na faixa esquerda; enquanto foram obtidas médias de 2,4 e 3,7 s, respectivamente para veículos leves e pesados da faixa direita;
- Analisando apenas os *headways* relativos ao tp1, foram obtidas médias de 3,2 e 4,4 s, respectivamente para veículos leves e pesados que trafegavam na faixa esquerda, enquanto foram obtidas médias de 3,3 e 5,0 s para a faixa direita. Considerando apenas os *headways* no regime de saturação (hds), obtiveram-se médias de 2,1 e 3,1 s, respectivamente para veículos leves e pesados que

trafegaram na faixa esquerda; enquanto foram obtidas médias de 2,4 e 3,7 s, respectivamente para veículos leves e pesados da faixa direita.

- As diferenças entre as médias dos *headways* de cada tipo de veículos no tp_1 variam entre 1,2 e 1,6 s, enquanto as diferenças entre as médias dos hds foram de 1,0 e 1,3 s, o que indica que o impacto do veículo pesado é maior nos primeiros *headways*;
- De forma geral, os *headways* dos veículos que tiveram presença de motocicletas à sua frente são consideravelmente maiores do que os *headways* dos veículos que tiveram ausência de motocicletas;
- Explorando os dados dos *headways* relativos ao tp_1 , foram obtidas médias de 2,8 e 4,3 s, respectivamente para veículos que apresentaram ausência e presença de motocicletas à sua frente na faixa esquerda; enquanto foram obtidas médias de 3,2 e 5,0 s, respectivamente para veículos que apresentaram ausência e presença de motocicletas à sua frente na faixa direita. Considerando apenas os *headways* no regime de saturação (hds), obtiveram-se médias de 2,1 e 3,1 s, respectivamente para veículos que apresentaram ausência e presença de motocicletas à sua frente na faixa esquerda; enquanto foram obtidas médias de 2,6 e 3,7 s, respectivamente para veículos que apresentaram ausência e presença de motocicletas à sua frente na faixa direita;
- As diferenças entre as médias dos *headways* na ausência e presença de motocicletas no tp_1 variam entre 1,5 e 1,8 s, enquanto as diferenças entre as médias dos hds foram de 1,0 e 1,1 s, o que indica que o impacto das motocicletas é ainda maior na descarga dos primeiros veículos. A hipótese para esse fenômeno é de que as motocicletas tendem a se concentrar próximo aos primeiros veículos e, portanto, afetam mais significativamente a descarga desses. Essa hipótese foi corroborada pelo gráfico elaborado que apresentou a quantidade média de motocicletas por posição na fila.

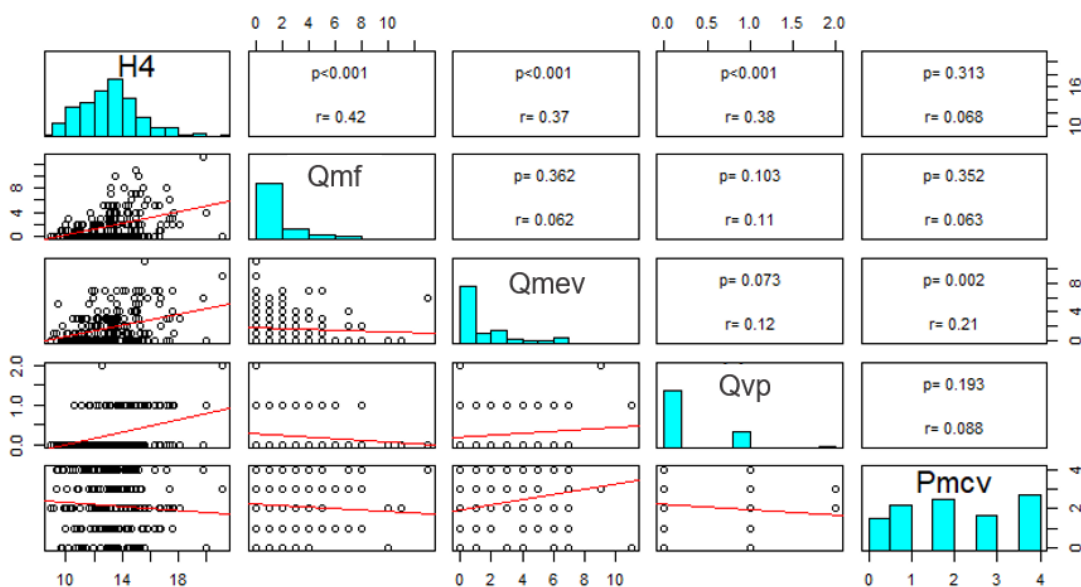
6 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO ESTATÍSTICA

Esta etapa constituiu-se em realizar uma análise de correlação estatística entre as variáveis de cada tópico definido no método, os quais são: tempo perdido inicial (tp_1), *headway* de descarga de saturação (hds), fluxo de saturação (S) e fator de equivalência veicular (FEQ). Nesta fase, buscou-se identificar em qual grau as variáveis coletadas se correlacionam, sendo possível reforçar ou atenuar a hipótese de que determinada variável explicativa influencia no comportamento da variável explicada de cada tópico. Apesar de não implicar causalidade, o coeficiente de correlação de Pearson pretende quantificar a relação de dependência linear entre duas variáveis. Além dos coeficientes de Pearson (r), também serão apresentados os respectivos valores-p, que apontam para a significância do coeficiente.

6.1 Tempo perdido inicial

Com o objetivo de identificar as correlações entre as variáveis $H4_j$, Qmf_j , $Qmev_j$, Qvp_j e Pmc_j na faixa esquerda, elaborou-se o Gráfico 9 que apresenta os valores dos coeficientes de Pearson (r) e suas respectivas significâncias, além do diagrama de dispersão entre as variáveis com a reta de regressão e o histograma de cada variável. Foram obtidas 221 observações, que representam a quantidade de ciclos semaforicos coletados nessa faixa de tráfego.

Gráfico 9 – Matriz de correlação entre as variáveis $H4_j$, Qmf_j , $Qmev_j$, Qvp_j e $Pmcv_j$ na faixa esquerda



Fonte: Elaborado pelo autor.

Primeiramente será analisado as correlações entre a variável explicada ($H4_j$) e as variáveis explicativas (Qmf_j , $Qmev_j$, Qvp_j e $Pmcv_j$). Entre as variáveis $H4_j$ e Qmf_j , foi obtido um valor de r de 0,42 com significância estatística (valor- $p < 0,001$), indicando que há uma relação linear positiva com intensidade moderada entre as variáveis que representam o quarto *headway* acumulado por ciclo e a quantidade motocicletas à frente do primeiro veículo. Essa relação pode ser visualizada no diagrama de dispersão entre ambas as variáveis, em que valores maiores de Qmf_j estão relacionados à valores maiores de $H4_j$.

Entre as variáveis $H4_j$ e $Qmev_j$, foi obtido um valor de r de 0,37 com significância estatística (valor- $p < 0,001$), o que indica uma relação linear positiva com intensidade moderada entre quarto *headway* acumulado por ciclo e a quantidade de motocicletas posicionadas longitudinalmente entre o 1º e 4º veículo. Essa relação também pode ser visualizada no diagrama de dispersão entre ambas as variáveis, em que valores maiores de $Qmev_j$ estão relacionados à valores maiores de $H4_j$.

Entre as variáveis $H4_j$ e Qvp_j , foi obtido um valor de r de 0,38 com significância estatística (valor- $p < 0,001$), o que indica uma relação linear positiva com intensidade moderada entre o quarto *headway* acumulado por ciclo e a quantidade de veículos pesados até o 4º veículo em fila. Essa relação também pode ser visualizada no diagrama de dispersão

entre ambas as variáveis, em que valores maiores de Q_{vpj} estão relacionados à valores maiores de H_{4j} .

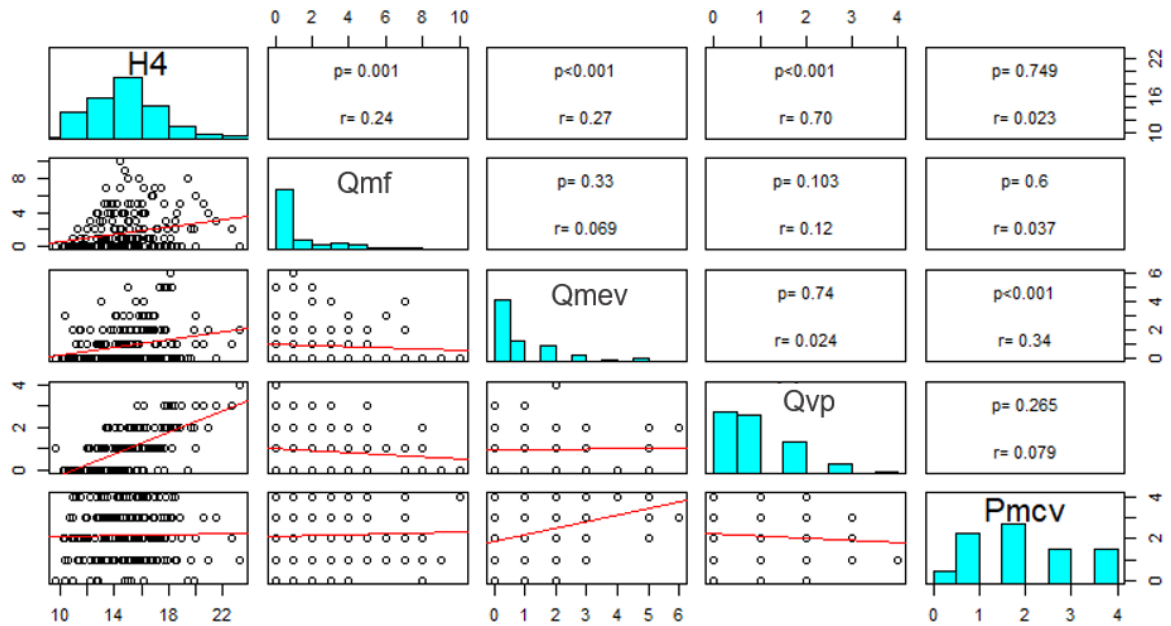
Entre as variáveis H_{4j} e P_{mcvj} , foi obtido um valor de r de 0,08 sem significância estatística (valor- $p = 0,313$), o que indica que não há relação linear entre o quarto *headway* acumulado por ciclo e a última posição dos veículos em fila que possui, nas suas adjacências, motocicletas no corredor virtual. O diagrama de dispersão também indica que não há uma relação linear entre as variáveis, podendo ser visualizado pela reta de regressão que praticamente não apresenta inclinação.

Esses resultados reforçam a hipótese levantada de que motocicletas à frente do primeiro veículo e entre veículos, além da quantidade de veículos pesados, resultam em maiores valores de H_{4j} e, portanto, no tp_1 . No entanto, os dados também apontam que não há indícios que motocicletas no corredor virtual estão correlacionados com maiores *headways* na descarga dos quatro primeiros veículos em fila.

Quanto à correlação entre as variáveis explicativas (Q_{mfj} , Q_{mevj} , Q_{vpj} e P_{mcvj}), não houve significância estatística dos coeficientes de Pearson, com exceção da relação entre as variáveis Q_{mevj} e P_{mcvj} que apresentou um valor de r de 0,21 com valor- p de 0,002. Logo, apesar de haver significância estatística, ou seja, a hipótese de que o coeficiente é 0 foi rejeitada, o valor do r indica uma correlação positiva baixa entre as variáveis. Com esses resultados, pode-se afirmar que não haverá o problema de multicolinearidade, no qual as variáveis explicadas são correlatas, o que ocasionaria em inferências dos coeficientes do modelo de regressão errôneas ou pouco confiáveis.

Com o objetivo de identificar as correlações entre as mesmas variáveis na faixa direita, elaborou-se o Gráfico 10 que apresenta os valores dos coeficientes de Pearson (r) e suas respectivas significâncias, além do diagrama de dispersão entre as variáveis com a reta de regressão e o histograma de cada variável. Foram obtidas 199 observações, que representam a quantidade de ciclos semaforicos coletados nessa faixa de tráfego.

Gráfico 10 – Matriz de correlação entre as variáveis $H4_j$, Qmf_j , $Qmev_j$, Qvp_j e $Pmcv_j$ na faixa direita



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como na faixa esquerda, serão analisadas as correlações entre a variável tida como explicada ($H4_j$) e as variáveis explicativas (Qmf_j , $Qmev_j$, Qvp_j e $Pmcv_j$) na faixa direita. Entre as variáveis $H4_j$ e Qmf_j , foi obtido um valor de r de 0,24 com significância estatística (valor- $p < 0,001$), indicando que há uma relação linear positiva com baixa intensidade entre as variáveis que representam o quarto *headway* acumulado por ciclo e a quantidade motocicletas à frente do primeiro veículo. Essa baixa correlação pode ser visualizada no diagrama de dispersão entre ambas as variáveis, cuja reta de regressão apresenta baixa inclinação.

Entre as variáveis $H4_j$ e $Qmev_j$, foi obtido um valor de r de 0,27 com significância estatística (valor- $p < 0,001$), o que indica uma relação linear positiva com baixa intensidade entre as variáveis que representam o quarto *headway* acumulado por ciclo e a quantidade de motocicletas posicionadas longitudinalmente entre o 1º e 4º veículo. Essa baixa correlação pode ser visualizada no diagrama de dispersão entre ambas as variáveis, cuja reta de regressão apresenta baixa inclinação.

Entre as variáveis $H4_j$ e Qvp_j , foi obtido um valor de r de 0,70 com significância estatística (valor- $p < 0,001$), o que indica uma relação linear positiva com alta intensidade entre as variáveis que representam o quarto *headway* acumulado por ciclo e a quantidade de

veículos pesados até o 4º veículo em fila. Essa relação também pode ser visualizada no diagrama de dispersão entre ambas as variáveis, através da inclinação acentuada da reta de regressão. Logo, maiores quantidades de veículos pesados estão fortemente correlacionadas à maiores valores do quarto *headway* acumulado na faixa direita.

Entre as variáveis $H4_j$ e Pm_{cv_j} , foi obtido um valor de r de 0,02 sem significância estatística (valor- $p = 0,749$), o que indica que não há relação linear entre as variáveis que representam o quarto *headway* acumulado por ciclo e a última posição dos veículos em fila que possui, nas suas adjacências, motocicletas no corredor virtual. O diagrama de dispersão também indica que não há uma relação linear entre as variáveis, reforçado pela reta de regressão que praticamente não possui inclinação.

Na faixa direita, os resultados quanto à conclusão da significância estatística dos coeficientes de correlação foram semelhantes comparados aos resultados da faixa esquerda. No entanto, a força da correlação varia entre as faixas de tráfego analisadas. Na faixa esquerda, as correlações entre as variáveis Qm_{f_j} , Qm_{ev_j} e Qv_{p_j} com a variável $H4_j$ apresentam intensidade moderada (0,42; 0,37 e 0,38 respectivamente), enquanto na faixa direita a força da correlação é menor para as variáveis Qm_{f_j} e Qm_{ev_j} (0,24 e 0,27) e alta para a variável Qv_{p_j} (0,70). A hipótese levantada para esse fenômeno é que o efeito na descarga da fila do veículo pesado é maior do que o da motocicleta, e, portanto, o fato de haver mais observações com veículos pesados na faixa direita do que na faixa esquerda deixou isso mais perceptível.

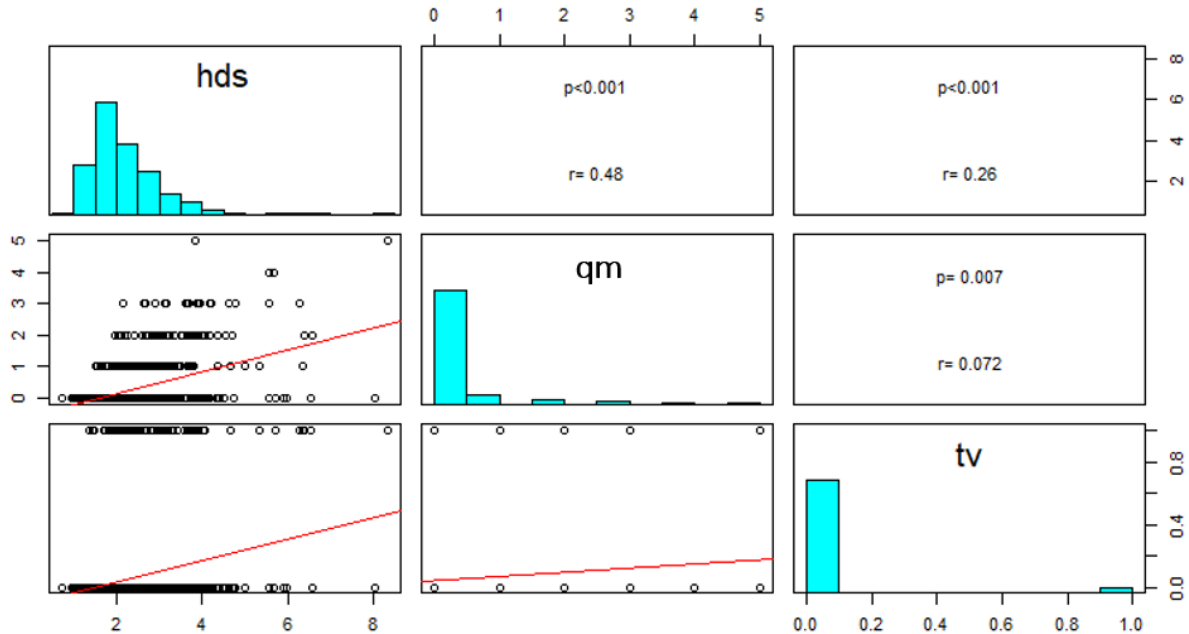
Quanto à correlação entre as variáveis explicativas (Qm_{f_j} , Qm_{ev_j} , Qv_{p_j} e Pm_{cv_j}), assim como na faixa esquerda, não houve significância estatística dos coeficientes de Pearson, com exceção da relação entre as variáveis Qm_{ev_j} e Pm_{cv_j} que apresentou um valor de r de 0,34 com valor- p inferior a 0,001. Logo, apesar de haver significância estatística, ou seja, a hipótese de que o coeficiente é 0 foi rejeitada, o valor do r indica uma correlação positiva moderada entre as variáveis. Com esses resultados, pode-se afirmar que não haverá problema de multicolinearidade no modelo de regressão linear.

6.2 Headway de descarga de saturação

Com o objetivo de identificar as correlações entre as variáveis hds_{ij} , qm_{ij} e tv_{ij} na faixa esquerda, elaborou-se o Gráfico 11 que apresenta os valores dos coeficientes de Pearson (r) e suas respectivas significâncias, além do diagrama de dispersão entre as

variáveis com a reta de regressão e o histograma de cada variável. Vale ressaltar que foram obtidas 1377 observações, que representam o total de hds coletados nessa faixa de tráfego.

Gráfico 11 – Matriz de correlação entre as variáveis hds_{ij} , qm_{ij} e tv_{ij} na faixa esquerda



Fonte: Elaborado pelo autor.

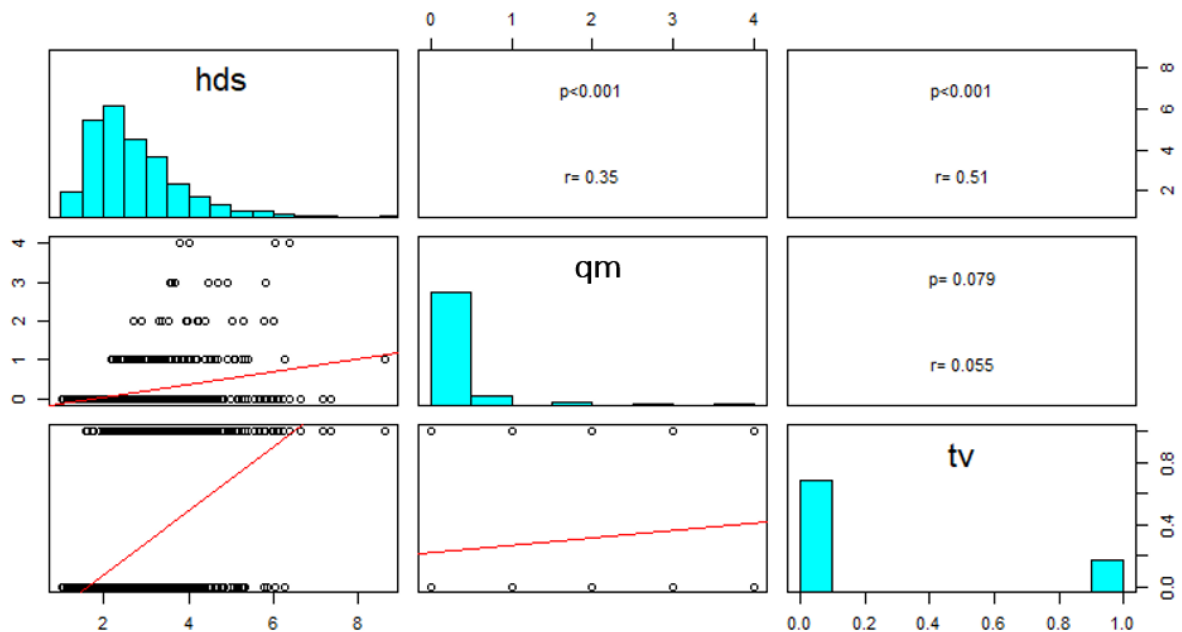
Primeiramente, serão analisadas as correlações entre a variável explicada (hds_{ij}) e variáveis explicativas (qm_{ij} e tv_{ij}) na faixa esquerda. Entre as variáveis hds_{ij} e qm_{ij} , foi obtido um valor de r de 0,48 com significância estatística (valor- $p < 0,001$), o que indica uma relação linear positiva com intensidade moderada entre os hds e a quantidade de motocicletas posicionadas longitudinalmente à frente dos veículos. Essa correlação pode ser visualizada no diagrama de dispersão entre ambas as variáveis, cuja reta de regressão apresenta inclinação média, indicando que valores maiores de qm_{ij} estão correlacionados com maiores valores de hds_{ij} .

Entre as variáveis hds_{ij} e tv_{ij} , foi obtido um valor de r de 0,26 com significância estatística (valor- $p < 0,001$), o que indica uma relação linear positiva com baixa intensidade entre as variáveis que representam os hds e o tipo veículo. Vale salientar que o valor 0 da variável tv_{ij} representa veículo leve, enquanto o valor 1 da variável tv_{ij} representa veículo pesado. Sabe-se, no entanto, que veículos pesados apresentam valores maiores de *headways*. Logo, levanta-se a hipótese que essa baixa correlação entre as variáveis é explicada pela baixa quantidade de veículos pesados trafegando nessa faixa de tráfego.

A correlação entre as variáveis explicativas (qm_{ij} e tv_{ij}) apresentou um valor de 0,07 do coeficiente r , com significância estatística (valor- $p < 0,001$). Apesar de ser significativo estatisticamente (r diferente de 0), o valor é consideravelmente baixo, indicando que a correlação é praticamente nula. Logo, pode-se afirmar que não há o problema de multicolinearidade em um modelo de regressão.

Com o objetivo de identificar as correlações entre as variáveis hds_{ij} , qm_{ij} e tv_{ij} na faixa direita, elaborou-se o Gráfico 12 que apresenta os valores dos coeficientes de Pearson (r) e suas respectivas significâncias, além do diagrama de dispersão entre as variáveis com a reta de regressão e o histograma de cada variável. Foram obtidas 1020 observações, que representam o total de hds coletados nessa faixa de tráfego.

Gráfico 12 – Matriz de correlação entre as variáveis hds_{ij} , qm_{ij} e tv_{ij} na faixa direita



Fonte: Elaborado pelo autor.

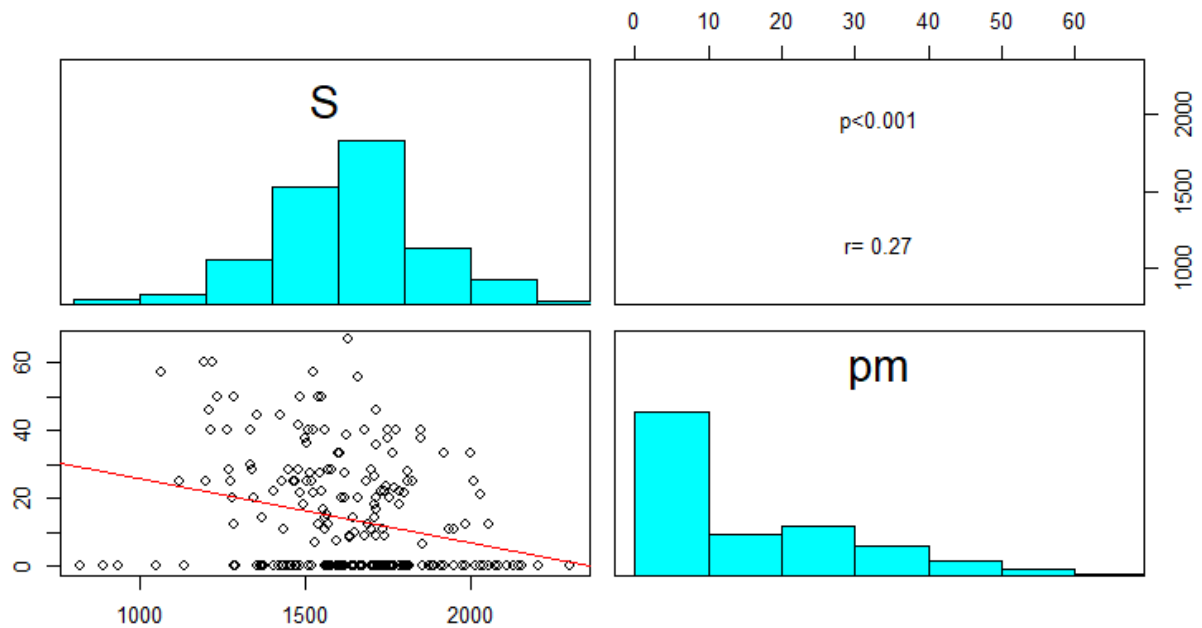
Avaliando a correlação entre as variáveis hds_{ij} e qm_{ij} na faixa direita, foi obtido um valor de r de 0,35 com significância estatística (valor- $p < 0,001$), o que indica uma relação linear positiva com intensidade moderada entre as variáveis que representam os hds e a quantidade de motocicletas posicionadas longitudinalmente à frente dos veículos. Essa correlação pode ser visualizada no diagrama de dispersão entre ambas as variáveis, cuja reta de regressão apresenta inclinação média, indicando que valores maiores de qm_{ij} estão correlacionados com maiores valores de hds_{ij} . O resultado é inferior ao encontrado para a faixa esquerda.

Entre as variáveis hds_{ij} e tv_{ij} , foi obtido um valor de r de 0,51 com significância estatística (valor- $p < 0,001$), o que indica uma relação linear positiva com intensidade moderada entre as variáveis que representam os hds e o tipo veículo. O resultado é distinto ao obtido na faixa esquerda, cuja correlação é baixa. Na faixa direita, cerca de 229 hds_{ij} foram de veículos pesados ($tv_{ij} = 1$), enquanto 104 hds_{ij} apresentaram motocicletas à frente do veículo ($qm_{ij} > 0$), de um total de 1020 observações. Logo, é possível afirmar que há uma quantidade considerável de observações de *headways* de veículos pesados na faixa direita, comparado à faixa esquerda, o que indica que esse fator apresenta maior influência nos hds_{ij} nessa faixa.

A correlação entre as variáveis explicativas (qm_{ij} e tv_{ij}) apresentou um valor de 0,07 do coeficiente r , com significância estatística (valor- $p < 0,001$). Apesar de ser significativa estatisticamente (r diferente de 0), o valor é consideravelmente baixo, apontando que a correlação é praticamente nula. Logo, pode-se afirmar que não há o problema de multicolinearidade.

6.3 Fluxo de saturação

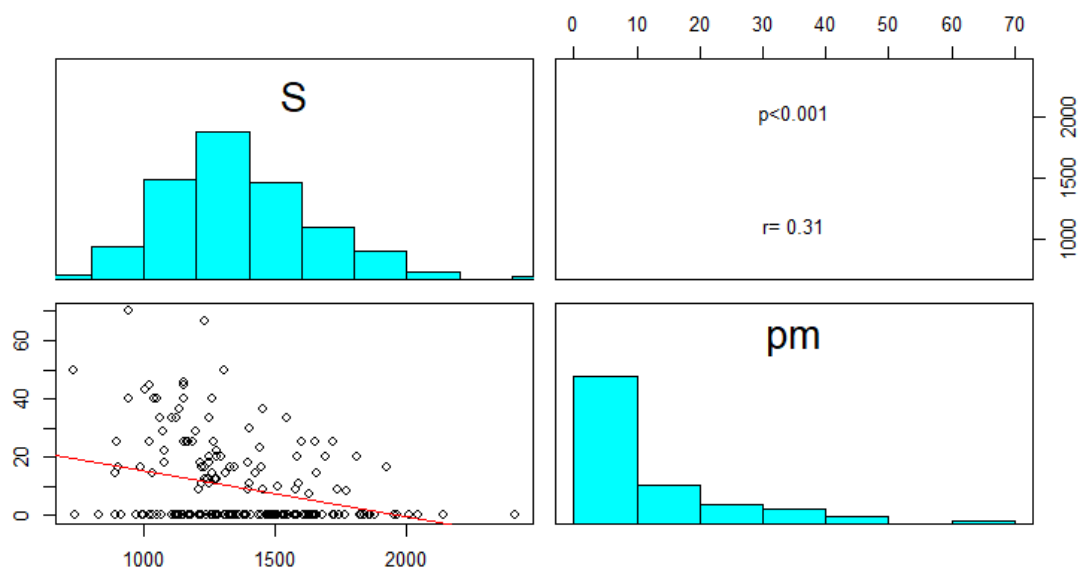
Com o objetivo de identificar as correlações entre as variáveis S_j e pm_j na faixa esquerda, elaborou-se o Gráfico 13 que apresenta os valores dos coeficientes de Pearson (r) e suas respectivas significâncias, além do diagrama de dispersão entre as variáveis com a reta de regressão e o histograma de cada variável. Foram obtidas 221 observações, que representam o total ciclos semaforicos coletados nessa faixa de tráfego.

Gráfico 13 – Matriz de correlação entre as variáveis S_j e pm_j na faixa esquerda

Fonte: Elaborado pelo autor.

Avaliando a correlação entre as variáveis S_j e pm_j na faixa esquerda, foi obtido um valor de r de 0,27 com significância estatística (valor- $p < 0,001$), o que indica uma relação linear negativa com baixa intensidade entre o fluxo de saturação e a porcentagem de motocicletas, por ciclo semafórico, considerando apenas o regime de saturação. Essa correlação pode ser visualizada no diagrama de dispersão entre ambas as variáveis. Através do diagrama de dispersão é possível observar que, mesmo em condições de ausência de motocicletas ($pm_j = 0$), há valores baixos de fluxo de saturação (próximo à 1000 veículos por hora, por exemplo), pois há outros fatores que influenciam a descarga dos veículos em regime de saturação.

Com o intuito de identificar as correlações entre as variáveis S_j e pm_j na faixa direita, elaborou-se o Gráfico 14 que apresenta os valores dos coeficientes de Pearson (r) e suas respectivas significâncias, além do diagrama de dispersão entre as variáveis com a reta de regressão e o histograma de cada variável. Foram obtidas 199 observações, que representam o total de ciclos semafóricos coletados nessa faixa de tráfego.

Gráfico 14 – Matriz de correlação entre as variáveis S_j e pm_j na faixa direita

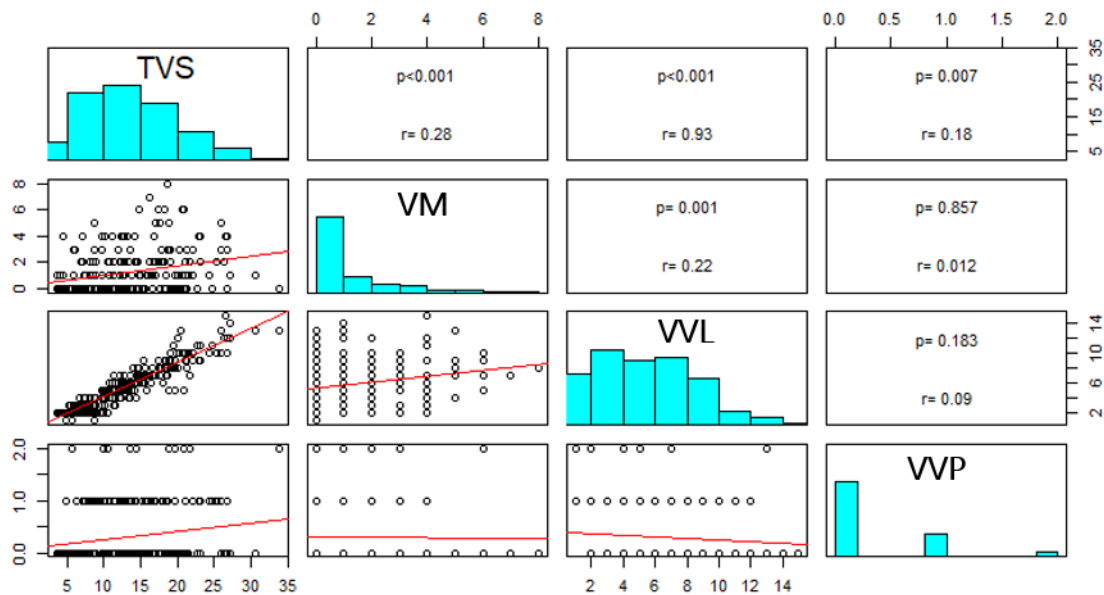
Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi obtido um valor do coeficiente r de 0,31 entre as variáveis S_j e pm_j na faixa direita, com significância estatística (valor- $p < 0,001$), o que indica uma relação linear negativa com baixa intensidade entre as variáveis que representam o fluxo de saturação e a porcentagem de motocicletas, por ciclo semafórico, considerando apenas o regime de saturação. A força dessa correlação é semelhante ao obtido na faixa esquerda. Através do diagrama de dispersão, assim como na faixa esquerda, também é possível observar que, mesmo em condições de ausência de motocicletas ($pm_j = 0$), há valores baixos de fluxo de saturação, próximo à 1000 veículos por hora.

6.4 Fator de equivalência veicular

Esse tópico busca avaliar a correlação entre as variáveis que, posteriormente, permitirão calcular o fator de equivalência veicular, mas não do fator em si. Logo, com o objetivo de identificar as correlações entre as variáveis TVS_j , QM_j , QVL_j e QVP_j na faixa esquerda, elaborou-se o Gráfico 15 que apresenta os valores dos coeficientes de Pearson (r) e suas respectivas significâncias, além do diagrama de dispersão entre as variáveis com a reta de regressão e o histograma de cada variável. Foram obtidas 221 observações, que representam o total ciclos semafóricos coletados nessa faixa de tráfego.

Gráfico 15 – Matriz de correlação entre as variáveis TVS_j , QM_j , QVL_j e QVP_j na faixa esquerda



Fonte: Elaborado pelo autor.

Primeiramente, serão analisadas as correlações entre a variável explicada (TVS_j) e variáveis explicativas (QM_j , QVL_j e QVP_j) na faixa esquerda. Entre as variáveis TVS_j e QM_j , foi obtido um valor de r de 0,28 com significância estatística (valor- $p < 0,001$), o que indica uma relação linear positiva com baixa intensidade entre as variáveis que representam o tempo de verde em regime de saturação e a quantidade de motocicletas posicionadas longitudinalmente durante o regime de saturação. Entre as variáveis TVS_j e QVL_j , foi obtido um valor de r de 0,93 com significância estatística (valor- $p < 0,001$), o que indica uma relação linear positiva com alta intensidade entre as variáveis que representam o tempo de verde em regime de saturação e a quantidade de veículos leves durante regime de saturação.

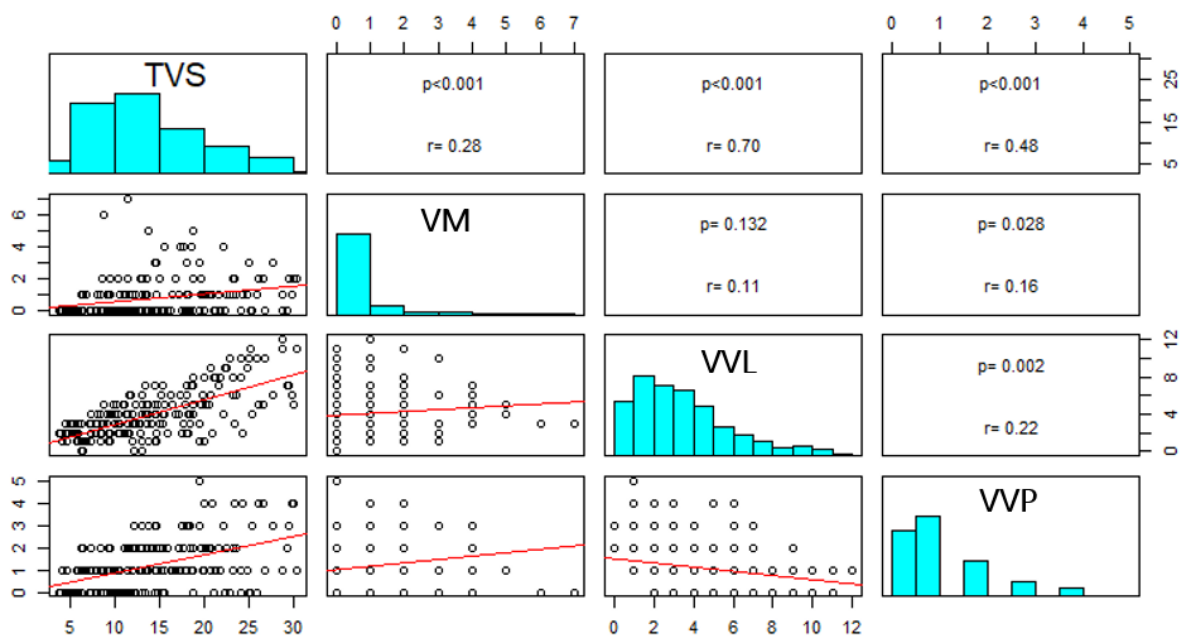
Entre as variáveis TVS_j e QVP_j , foi obtido um valor de r de 0,18 com significância estatística (valor- $p < 0,001$), apontando para uma baixa relação linear positiva entre as variáveis que representam o tempo de verde em regime de saturação e a quantidades de veículos pesados em regime de saturação. Pelo histograma, é possível identificar que poucas observações apresentam QVP_j diferente de 0 e que não houve observações com mais de 2 veículos pesados no mesmo ciclo semafórico.

Analisando a correlação entre as variáveis explicativas, apenas houve significância estatística entre as variáveis QM_j e QVL_j , no entanto, o valor do coeficiente r

obtido foi de 0,22, o que indica uma baixa correlação entre as variáveis. Com esses resultados, é possível afirmar que não há problema de multicolinearidade.

Para a faixa esquerda, o Gráfico 16 apresenta os valores dos coeficientes de Pearson (r) e suas respectivas significâncias, além do diagrama de dispersão entre as variáveis com a reta de regressão e o histograma de cada variável. Foram obtidas 221 observações, que representam o total ciclos semafóricos coletados nessa faixa de tráfego.

Gráfico 16 – Matriz de correlação entre as variáveis TVS_j , QM_j , QVL_j e QVP_j na faixa direita



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como na faixa esquerda, primeiramente serão analisadas as correlações entre a variável explicada (TVS_j) e variáveis explicativas (QM_j , QVL_j e QVP_j) na faixa direita. Entre as variáveis TVS_j e QM_j , foi obtido um valor de r de 0,28 com significância estatística (valor- $p < 0,001$), o que indica uma relação linear positiva com baixa intensidade entre as variáveis que representam o tempo de verde em regime de saturação e a quantidade de motocicletas posicionadas longitudinalmente durante o regime de saturação. Esse valor é igual ao obtido para a faixa esquerda. Entre as variáveis TVS_j e QVL_j , foi obtido um valor de r de 0,70 com significância estatística (valor- $p < 0,001$), o que indica uma relação linear positiva com alta intensidade entre as variáveis que representam o tempo de verde em regime de saturação e a quantidade de veículos leves durante regime de saturação. Apesar de

ainda ser considerada uma correlação alta, vale salientar que o valor obtido para a faixa direita (0,70) é inferior ao da faixa esquerda (0,93).

Entre as variáveis TVS_j e QVP_j , foi obtido um valor de r de 0,48 com significância estatística (valor- $p < 0,001$), apontando para uma relação linear positiva de intensidade moderada entre as variáveis que representam o tempo de verde em regime de saturação e a quantidade de veículos pesados em regime de saturação. Pelo histograma, é possível identificar que, diferentemente da faixa esquerda, foram obtidas várias observações de QVP_j diferente de 0 e que houve observações com 4 veículos pesados no mesmo ciclo semafórico. Essa pode ser uma explicação para a correlação ter sido consideravelmente maior nessa faixa ($r = 0,48$) do que na faixa esquerda ($r = 0,18$).

Analisando a correlação entre as variáveis explicativas, houve significância estatística entre as variáveis QM_j e QVP_j e entre as variáveis QVL_j e QVP_j , com valores significantes do coeficiente r de 0,16 e 0,22 respectivamente. Apesar da significância estatística, os valores indicam uma fraca correlação linear entre as variáveis e, portanto, é possível afirmar que não há problema de multicolinearidade.

6.5 Conclusões parciais

Esta etapa constituiu-se em realizar uma análise de correlação estatística entre as variáveis de cada tópico definido no método, os quais são: tempo perdido inicial (tp_1), *headway* de descarga de saturação (hds), fluxo de saturação (S) e fator de equivalência veicular (FEQ). Nesta fase, identificou-se qual grau as variáveis coletadas se correlacionam, sendo possível reforçar ou atenuar a hipótese de que determinada variável explicativa influencia no comportamento da variável explicada de cada tópico. Com o objetivo de sintetizar as conclusões das análises realizadas, pode-se dizer que:

- Na faixa esquerda, o $H4_j$ apresentou correlação positiva com intensidade moderada e significância estatística com a quantidade de motos à frente do primeiro veículo (Qmf_j), a quantidade de motos entre veículos ($Qmev_j$) e a quantidade de veículos pesados (Qvp_j). Não houve significância estatística da correlação entre o $H4_j$ e a variável que representa as motos no corredor virtual ($Pmcv_j$). Logo, os resultados indicam que as motocicletas posicionadas longitudinalmente entre veículos e à frente do primeiro veículo podem resultar

em maiores valores do tp_1 , enquanto as motocicletas no corredor virtual não parecem impactar;

- Na faixa direita, diferentemente da faixa esquerda, o $H4_j$ apresentou baixa correlação positiva, com significância estatística, com as variáveis que representam a quantidade de motos à frente do primeiro veículo (Qmf_j) e da quantidade de motos entre veículos ($Qmevj$) e alta correlação positiva com a quantidade de veículos pesados (Qvp_j). A hipótese levantada para esse fenômeno é que o efeito do veículo pesado na descarga da fila é maior do que o da motocicleta, o que ficou mais evidente na análise dessa faixa de tráfego, dado que há mais observações com veículos pesados na faixa direita do que na faixa esquerda. Assim como na faixa esquerda, não houve significância estatística do $H4_j$ na faixa direita com a variável que representa a presença de motos no corredor virtual ($Pmcv_j$). Com esses resultados, reforçam-se as hipóteses de que as motocicletas entre veículos e à frente do primeiro veículo podem resultar em maiores valores do tp_1 , enquanto a hipótese do impacto das motocicletas no corredor virtual é atenuada;

- Na faixa esquerda, o hds_{ij} apresentou correlação positiva com intensidade moderada com a variável que representa a quantidade de motos posicionadas longitudinalmente à frente dos veículos (qm_{ij}). No entanto, o hds_{ij} indicou uma baixa correlação positiva com o tipo de veículo (tv_{ij}). Apesar disso, sabe-se que veículos pesados apresentam, em geral, valores maiores de *headways*. Logo, levantou-se a hipótese que essa baixa correlação entre as variáveis é explicada pela baixa quantidade de veículos pesados percorrendo nessa faixa de tráfego. Os resultados reforçam a hipótese de que maiores quantidades de motos entre veículos resultam em maiores valores dos hds ;

- Na faixa direita, o hds_{ij} apresentou correlação positiva com intensidade moderada com a variável que representa a quantidade de motos posicionadas longitudinalmente à frente dos veículos (qm_{ij}), mas com força inferior ao resultado da faixa esquerda. O hds_{ij} também indicou uma correlação positiva com intensidade moderada com o tipo de veículo (tv_{ij}). O resultado é distinto ao obtido na faixa esquerda, cuja correlação é baixa. Levantou-se a hipótese de que a maior quantidade de observações de *headways de* veículos pesados na faixa

direita, comparado à faixa esquerda, foi capaz de mostrar a influência dos veículos pesados nos hds_{ij} nessa faixa. Os resultados reforçam a hipótese de que maiores quantidades de motos entre veículos resultam em maiores valores dos hds ;

- Para ambas as faixas, o S_j apresentou baixa, porém significativa, correlação negativa com a variável pm_j . Através do diagrama de dispersão, foi possível observar que mesmo em condições de ausência de motocicletas ($pm_j = 0$), há valores baixos de fluxo de saturação (próximo à 1000 veículos por hora, por exemplo), o que aponta que há outros fatores que influenciam significativamente a descarga dos veículos em regime de saturação. Os resultados reforçam a hipótese de que maiores proporções de motocicletas resultam em menores valores de fluxo de saturação;
- Na faixa esquerda, o TVS_j apresentou baixa correlação com as variáveis QM_j e QVP_j , apesar de estatisticamente significativa. Como indicado anteriormente e visualizado nos histogramas, há baixa quantidade de veículos pesados nessa faixa. O TVS_j apresentou alta correlação com a variável QVL_j . Essa alta correlação é esperada, visto que a maioria dos veículos que trafegam são leves, além de que maiores quantidades de veículos em um ciclo resultam em maiores tempos de verde saturado;
- Na faixa direita, o TVS_j apresentou baixa correlação com a variável QM_j e alta correlação com a variável QVL_j , ambos significantes estatisticamente. Diferentemente da faixa esquerda, o TVS_j apontou uma correlação com intensidade moderada com a variável QVP_j . Pelo histograma, foi possível identificar que foram obtidas diversas observações com QVP diferente de 0, podendo ser uma explicação para a correlação ter sido consideravelmente maior nessa faixa.

7 ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR

Com a realização das etapas da coleta de dados, da análise do perfil dos *headways* e da análise de correlação das variáveis, segue-se com a última etapa que consiste na análise de regressão linear. Essa etapa residiu na realização de análises de regressão linear entre as variáveis explicativas e explicadas de cada tópico. Para isso, foram analisados os valores médios e intervalos de confiança de 95% dos coeficientes obtidos, significância, R^2 , além do atendimento às premissas de independência, linearidade, normalidade e homocedasticidade dos resíduos.

7.1 Tempo perdido inicial

Para avaliar o efeito das motocicletas no tp_1 na faixa esquerda, realizou-se a regressão linear considerando a variável explicada H_{4j} e as variáveis explicativas Qmf_j , $Qmev_j$, $Pmcv_j$ e Qvp_j . Os valores médios, intervalos de confiança dos coeficientes e suas respectivas significâncias, além do R^2 , estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados da regressão linear da variável H_{4j} para a faixa esquerda

FAIXA ESQUERDA						
Coefficientes	Valor médio	valor-P	Limite inferior	Limite superior	R^2	N
Intercepto	11,7	< 0,1%	11,2	12,1		
Qmf_j	0,4	< 0,1%	0,3	0,5		
$Qmev_j$	0,4	< 0,1%	0,3	0,4	0,51	221
$Pmcv_j$	-0,1	10%	-0,3	0,0		
Qvp_j	1,8	< 0,1%	1,3	2,3		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos os coeficientes apresentaram significância estatística, exceto a variável $Pmcv_j$ que representa as motos no corredor virtual. É possível visualizar que o intervalo de confiança engloba o valor 0, não sendo possível rejeitar a hipótese nula. O resultado da regressão reforça o indicado pelas conclusões da análise de correlação, em que não houve correlação significativa entre as variáveis H_{4j} e $Pmcv_j$ ($r = 0,07$). O intercepto indica o somatório dos quatro primeiros *headways* de veículos leves, quando não há presença de motocicletas.

As variáveis Qmf_j e $Qmev_j$ que representam a quantidade de motos à frente do primeiro veículo e a quantidade de motos entre veículos respectivamente, apresentaram

coeficiente de valor 0,4 s; com intervalo de confianças semelhantes e estreitos. Isso indica que a posição da moto (a frente do primeiro veículo ou entre veículos) não altera o seu impacto na descarga dos quatro primeiros veículos. Os resultados mostram que cada moto posicionada longitudinalmente à frente do primeiro veículo ou entre veículos representa, em média, um acréscimo de 0,4 s ao $H4_j$ e, portanto, ao tp_1 . Estimando que o tp_1 geralmente é em torno de 4 s, cada moto, nessas posições, representa um acréscimo de 10% do tp_1 .

Por fim, a variável que representa o veículo pesado (Qvp_j) apresentou um coeficiente com valor médio de 1,8 s com limite inferior e superior de 1,3 e 2,3 s. Esse resultado indica que um veículo pesado, nessa faixa de tráfego, tem efeito médio 4,5 vezes maior do que o efeito de uma motocicleta na descarga da fila dos primeiros quatro veículos. Quanto ao R^2 , pode-se afirmar que cerca de 51% da variação dos $H4_j$ pôde ser explicada pela quantidade de motocicletas e veículos pesados. Os resultados dos testes de normalidade (Kolmogorov-Smirnov), de independência (Durbin-Watson) e de homocedasticidade dos resíduos, referentes à faixa esquerda estão apresentados na Tabela 11.

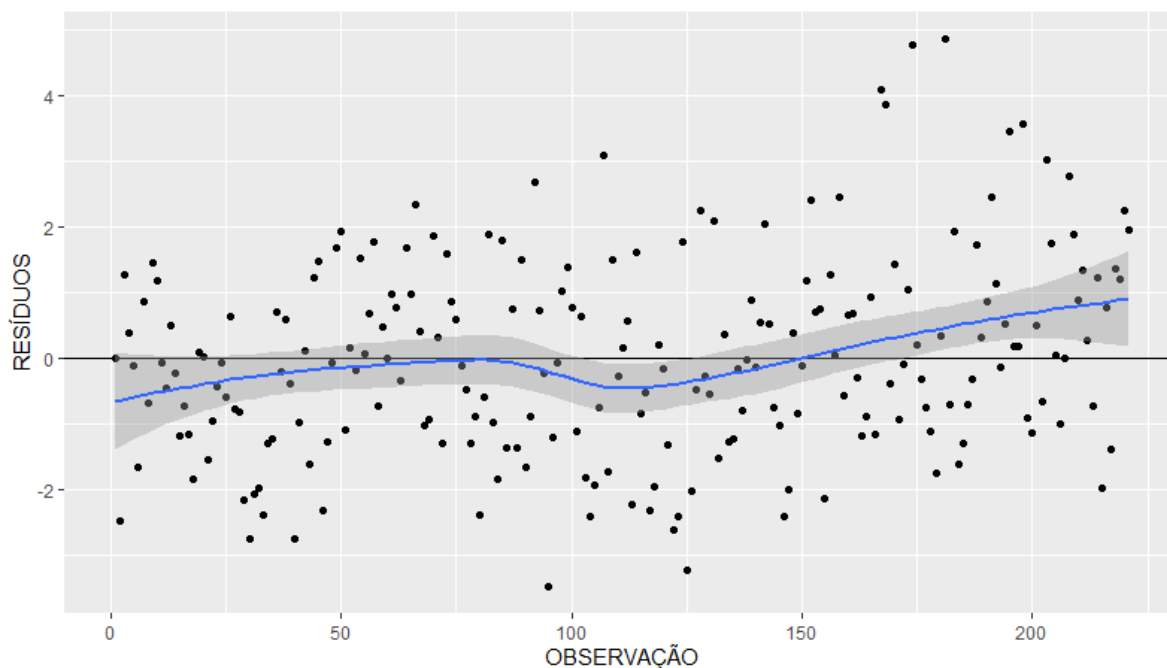
Tabela 11 – Resultado dos testes das premissas da regressão do $H4_j$ da faixa esquerda

FAIXA ESQUERDA		
Teste de Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)	Teste de Independência (Durbin Watson)	Teste de Homocedasticidade (Breush-Pagan)
83%	1%	19%

Fonte: Elaborado pelo autor

Das premissas da regressão linear, apenas a independência dos erros foi rejeitada através do valor-p de 1%. Esse resultado indica que há autocorrelação entre os resíduos da regressão. Para um maior aprofundamento dessa questão, elaborou-se o Gráfico 17, no qual estão apresentados os resíduos por observação durante a coleta, sendo possível identificar se há um padrão do comportamento da variável.

Gráfico 17 – Resíduos do modelo de regressão do H4_j em ordem da coleta, da faixa esquerda



Fonte: Elaborado pelo autor.

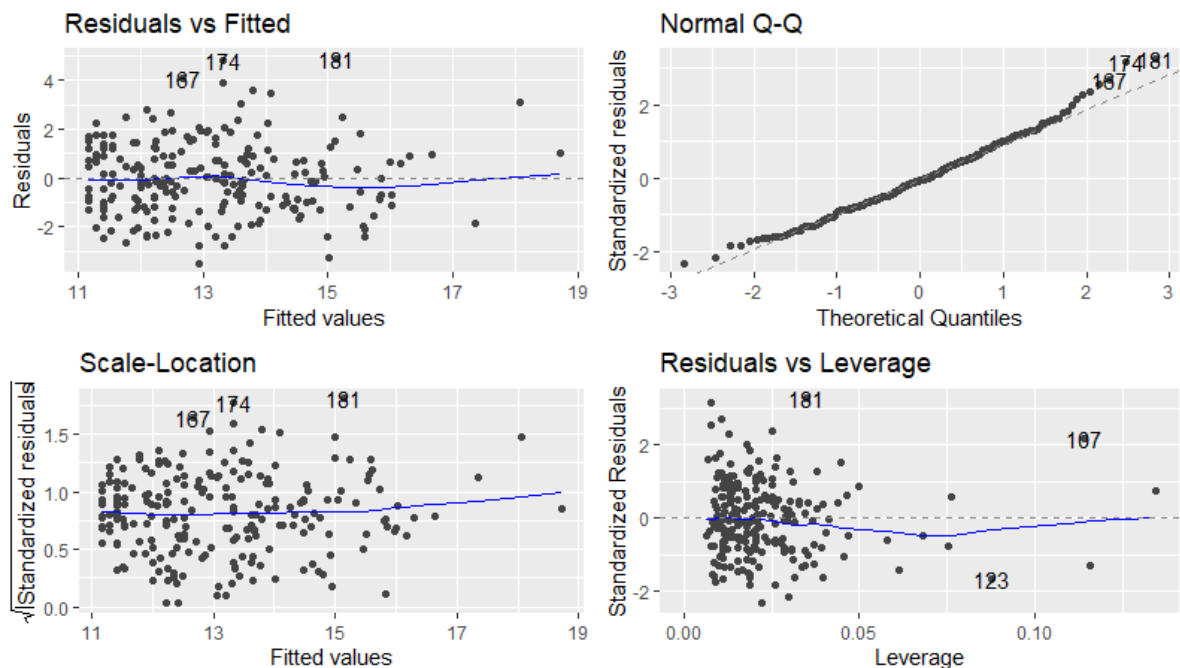
Apesar do resultado do teste que indica autocorrelação dos resíduos, os dados apresentados acima indicaram que não há um padrão estabelecido do comportamento dos erros considerando a ordem da coleta, com exceção das primeiras observações (entre observação 1 e 70) da coleta em que é possível identificar um padrão em formato de onda. Após essas observações, os resíduos não indicam padrão definido e com média aproximadamente 0. Para um diagnóstico mais completo dos resíduos, elaborou-se uma imagem com quatro gráficos, sendo eles:

- a) *Residuals vs Fitted*: Utilizado para avaliar a premissa de relação linear. Uma linha horizontal, sem um padrão distinto, é uma indicação de uma relação linear;
- b) *Normal Q-Q*: Utilizado para avaliar se os resíduos são normalmente distribuídos. Um bom indício de normalidade se dá quando os pontos seguem a linha tracejada.
- c) *Scale-Location*: Utilizado para checar a homogeneidade da variância dos resíduos (homocedasticidade). Uma linha horizontal, sem um padrão distinto, é uma indicação de homocedasticidade.

d) *Residuals x Leverage*: Usado para identificar casos de influência, que são valores extremos que podem influenciar a regressão quando incluídos ou excluídos da análise. Os pontos de influência são visualizados quando o gráfico apresenta uma reta tracejada vermelha.

O diagnóstico dos resíduos da regressão do $H4_j$ da faixa esquerda está apresentado no Gráfico 18.

Gráfico 18 – Diagnóstico dos resíduos da regressão do $H4_j$ da faixa esquerda



Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico *Residuals vs Fitted* não indica um padrão específico, apresentado pela linha que é praticamente reta, o que aponta para uma relação linear. O gráfico *Normal Q-Q* apresenta alguns pontos fora da linha tracejada, principalmente entre os quantis 2 e 3, no entanto, esse comportamento não é suficiente para indicar que os resíduos não seguem distribuição normal. O gráfico *Scale-Location* apresenta uma linha com leve inclinação para valores maiores de *fitted values*, no entanto, também não é o suficiente para indicar heterocedasticidade. O gráfico *Residuals vs Leverage* não apresenta a reta tracejada vermelha e, portanto, não há pontos de influência.

Para avaliar o efeito das motocicletas no tp_1 na faixa direita, realizou-se a regressão linear considerando a variável explicada $H4_j$ e as variáveis explicativas Qmf_j ,

Q_{mev_j} , P_{mcv_j} e Q_{vp_j} . Os valores médios, intervalos de confiança dos coeficientes e suas respectivas significâncias, além do R^2 estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados da regressão linear da variável $H4_j$ para a faixa direita

FAIXA DIREITA						
Coefficientes	Valor médio	valor-P	Limite inferior	Limite superior	R^2	N
Intercepto	11,9	< 0,1%	11,4	12,5		
Q_{mf_j}	0,4	< 0,1%	0,3	0,5		
Q_{mev_j}	0,6	< 0,1%	0,4	0,7	0,66	199
P_{mcv_j}	-0,1	52%	-0,2	0,1		
Q_{vp_j}	2,0	< 0,1%	1,8	2,2		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como na faixa esquerda, todos os coeficientes apresentaram significância estatística, exceto também a variável P_{mcv_j} que representa as motos no corredor virtual que apresentou valor-p de 52%. O resultado da regressão também reforça o indicado pelas conclusões da análise de correlação, em que não houve correlação significativa entre as variáveis $H4_j$ e P_{mcv_j} . O intercepto indica o somatório dos quatro primeiros *headways* de veículos leves, quando não há presença de motocicletas. O valor (11,9 s) é bastante similar ao obtido para a faixa esquerda.

A variável Q_{mf_j} apresentou coeficiente médio igual ao obtido para a faixa esquerda, com valor de 0,4 s e intervalo de confiança entre 0,3 e 0,5 s. Isso indica que a moto à frente do primeiro veículo Q_{mev_j} , aumenta, em média, 0,4 s no $H4_j$ e, portanto, ao tp_1 . A variável Q_{mev_j} apresentou coeficiente médio maior ao obtido para da faixa direita, com valor de 0,6 s e intervalo de confiança entre 0,4 e 0,7 s. Esse resultado representa que cada motocicleta entre veículos aumenta, em média, 0,6 s ao $H4_j$ e, portanto, ao tp_1 . Apesar de apresentar um valor médio maior, os intervalos de confiança da variável Q_{mev_j} de cada faixa de tráfego são sobrepostos, não dando indícios que o efeito das motocicletas entre veículos é maior na direita do que na faixa da esquerda.

Por fim, a variável que representa o veículo pesado (Q_{vp_j}) apresentou um coeficiente com valor médio de 2,0 s com limite inferior e superior de 1,8 e 2,2 s. O intervalo de confiança estreito é resultado da maior quantidade de observações com veículos pesados nessa faixa de tráfego, dando uma maior confiança do valor médio. O valor para a faixa direita é apenas um pouco maior que o da esquerda, mas os intervalos de confiança são sobrepostos, não dando indícios que o veículo pesado atribui impacto diferente comparando

as duas faixas de tráfego. Quanto ao R^2 , pode-se afirmar que cerca de 66% da variação dos $H4_j$ pôde ser explicada pela quantidade de motocicletas e veículos pesados. Os resultados dos testes de normalidade (Kolmogorov-Smirnov), de independência (Durbin-Watson) e de homocedasticidade dos resíduos, referentes à faixa esquerda estão apresentados na Tabela 13.

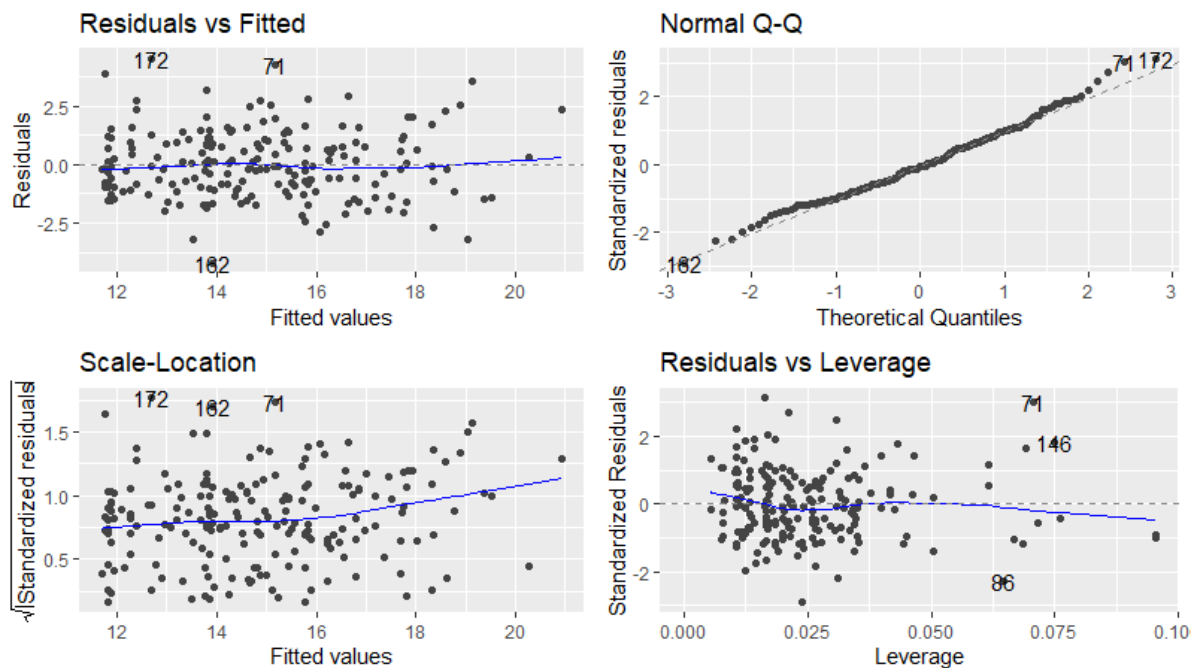
Tabela 13 – Resultado dos testes das premissas da regressão do $H4_j$ da faixa direita

FAIXA DIREITA		
Teste de Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)	Teste de Independência (Durbin Watson)	Teste de Homocedasticidade (Breush-Pagan)
69%	98%	5%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando um nível de significância de 5%, pode-se afirmar que nenhuma premissa da regressão linear é rejeitada. Para um diagnóstico mais completo dos resíduos, elaborou-se o Gráfico 19 que apresenta o diagnóstico dos resíduos da regressão do $H4_j$ da faixa direita.

Gráfico 19 – Diagnóstico dos resíduos da regressão do $H4_j$ da faixa direita



Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico *Residuals vs Fitted* não indica um padrão específico, apresentado pela linha que é praticamente reta, o que aponta para uma relação linear. O gráfico *Normal Q-Q*, assim como na faixa esquerda, apresenta alguns pontos fora da linha tracejada, principalmente entre os quantis 2 e 3, apesar disso, esse comportamento não é suficiente para indicar que os resíduos não seguem distribuição normal. O gráfico *Scale-Location* apresenta a linha azul com inclinação para maiores de *fitted values*, dando indícios de heterocedasticidade. O resultado do teste Breush-Pagan realizado atingiu exatamente o critério adotado para um grau de confiança de 95%. Logo, os resultados não são conclusivos. O gráfico *Residuals vs Leverage* não apresenta a reta tracejada vermelha e, portanto, não há pontos de influência.

Como conclusões desse tópico do tp_1 , pode-se afirmar, com base nos resultados das regressões que o efeito médio de uma motocicleta posicionada à frente do primeiro veículo e entre veículos, no tp_1 , está entre de 0,4 e 0,6 s, com intervalo de confiança dos estimadores variando entre 0,3 e 0,7 s. Não houve significância estatística do parâmetro que representa as motocicletas no corredor virtual, portanto, não há indícios de que as motocicletas posicionadas no corredor virtual atrasam a descarga da fila dos veículos. Praticamente todas as premissas da regressão foram atendidas, com exceção da premissa da independência dos erros na regressão realizada para a faixa esquerda, que teve a hipótese nula do teste de Durbin-Watson rejeitada.

7.2 Headways de descarga de saturação

Para avaliar o efeito das motocicletas posicionada à frente dos veículos nos hds na faixa esquerda, realizou-se a regressão linear considerando a variável explicada hds_{ij} e as variáveis explicativas qm_{ij} e tv_{ij} . Os valores médios, intervalos de confiança dos coeficientes e suas respectivas significâncias, além do R^2 , estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados da regressão linear da variável hds_{ij} para a faixa esquerda

FAIXA ESQUERDA						
Coefficientes	Valor médio	valor-P	Limite inferior	Limite superior	R^2	N
Intercepto	2,0	< 0,1%	2,0	2,1	0,28	1377
qm_{ij}	0,6	< 0,1%	0,6	0,7		
tv_{ij}	0,9	< 0,1%	0,7	1,0		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos os coeficientes apresentaram significância estatística. O intercepto apresentou valor de 2,0 s, que representa o *headway* médio de descarga dos veículos leves, em regime de saturação, na faixa da esquerda, cujo intervalo de confiança variou entre 2,0 e 2,1 s. O coeficiente tv_{ij} indica o acréscimo no caso de o veículo ser pesado e apresentou valor de 0,9 s; logo, um veículo pesado tem um hds médio de 2,9 s. O intervalo de confiança do tv_{ij} variou entre 0,7 e 1,0 s.

O coeficiente qm_{ij} que representa o aumento do *headway* de acordo com a quantidade de motocicletas à frente do veículo, apresentou valor médio de 0,6 s. Dessa forma, no caso de haver uma motocicleta à frente de um veículo leve, de acordo com o modelo, o *headway* médio seria de 2,6 s, o que simboliza um acréscimo de 30%. No caso do veículo pesado, uma motocicleta à frente incorreria no aumento do seu *headway* de 2,9 para 3,5 s, um aumento médio de aproximadamente 20%.

Finalmente, o R^2 indicou que 28% da variação dos hds podem ser explicados pelo tipo de veículo e quantidade de motocicletas posicionadas longitudinalmente à frente. Os resultados dos testes de normalidade (Kolmogorov-Smirnov), de independência (Durbin-Watson) e de homocedasticidade dos resíduos, referentes à faixa esquerda estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultado dos testes das premissas da regressão do hds_{ij} da faixa esquerda

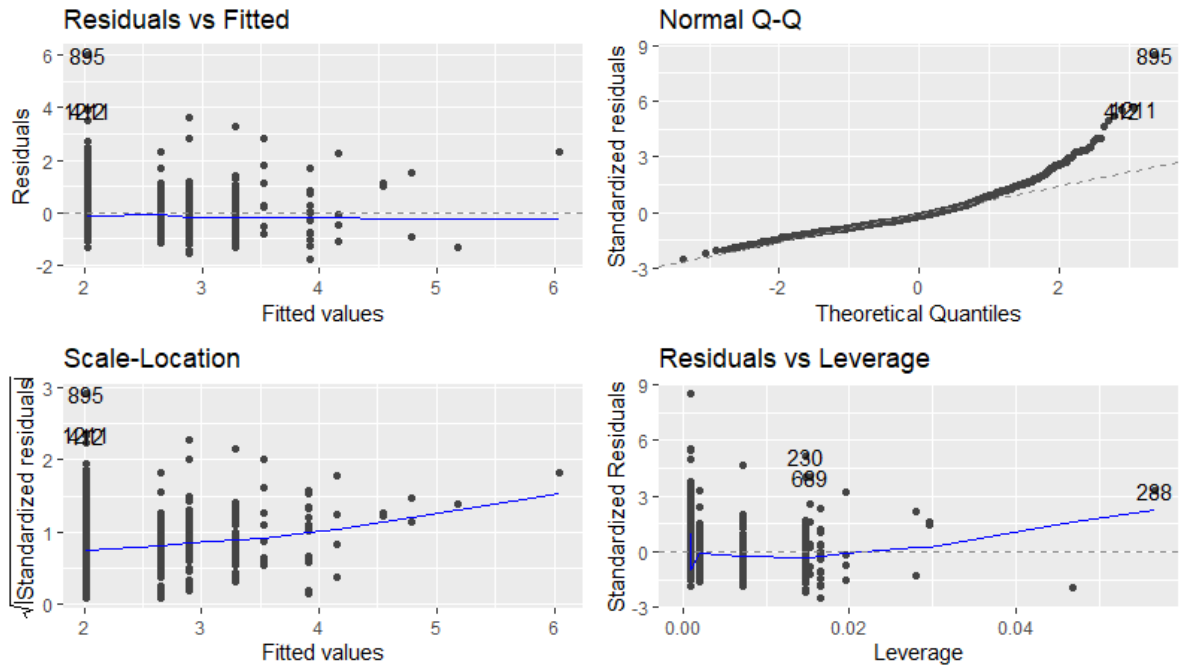
FAIXA ESQUERDA		
Teste de Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)	Teste de Independência (Durbin Watson)	Teste de Homocedasticidade (Breush-Pagan)
0%	73%	0%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando um nível de significância de 5%, pode-se afirmar as hipóteses de normalidade e homocedasticidade foram rejeitadas. A premissa de normalidade não é um pressuposto necessário para que os estimadores obtidos através do Método dos Mínimos Quadrados (MQQ) sejam os melhores estimadores lineares não-viesados (MELNV), mas necessário para que as inferências sejam válidas. A premissa de homocedasticidade, no entanto, não elimina as propriedades de ausência de viés e consistência dos estimadores de MQQ, mas eles deixam de ter a variância mínima, logo, deixam de ser MELNV. Concluindo, não é possível confiar nas inferências realizadas e os estimadores não são

MELNV, mas continuam consistentes e com ausência de viés. O diagnóstico dos resíduos da regressão do hds_{ij} da faixa esquerda está apresentado no Gráfico 20.

Gráfico 20 – Diagnóstico dos resíduos da regressão do hds_{ij} da faixa esquerda



Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico *Residuals vs Fitted* não indica um padrão específico, apresentado pela linha que é praticamente reta, o que aponta para uma relação linear. O gráfico *Normal Q-Q*, apresenta vários pontos fora da linha tracejada, principalmente acima do quantil 2, reforçando que os resíduos não seguem normal. O gráfico *Scale-Location* apresenta a linha azul com inclinação para maiores de *fitted values*, dando indícios de heterocedasticidade, confirmado pela rejeição da hipótese nula no teste Breush-Pagan. O gráfico *Residuals vs Leverage* não apresenta a reta tracejada vermelha e, portanto, não há pontos de influência.

Para avaliar o efeito das motocicletas posicionada à frente dos veículos nos hds na faixa direita, também foi realizada a regressão linear considerando a variável explicada hds_{ij} e as variáveis explicativas qm_{ij} e tv_{ij} . Os valores médios, intervalos de confiança dos coeficientes e suas respectivas significâncias, além do R^2 estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultados da regressão linear da variável hds_{ij} para a faixa direita

FAIXA DIREITA						
Coefficientes	Valor médio	valor-P	Limite inferior	Limite superior	R ²	N
Intercepto	2,3	< 0,1%	2,3	2,4	0,37	1020
qm _{ij}	0,7	< 0,1%	0,6	0,8		
tv _{ij}	1,2	< 0,1%	1,1	1,3		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como na faixa esquerda, todos os coeficientes apresentaram significância estatística na faixa direita. O intercepto apresentou valor de 2,3 s, que representa o *headway* médio de descarga dos veículos leves, em regime de saturação, na faixa da direita, cujo intervalo de confiança variou entre 2,3 e 2,4. O valor médio é 0,3 s maior do que o obtido na faixa esquerda. O coeficiente tv_{ij} indica o acréscimo no caso de o veículo ser pesado e apresentou valor de 1,2 s; logo, um veículo pesado tem um *headway* de descarga médio, no regime de saturação, de 3,5 s, sendo maior do que o da faixa esquerda em 0,6 s. O intervalo de confiança do tv_{ij} variou entre 1,1 e 1,3.

Os resultados reforçam a hipótese levantada na análise descritiva e de correlação, que a faixa da direita apresenta *headways* maiores, tanto pela maior presença de veículos pesados, quanto, possivelmente, por outros fatores que impactam na descarga dos veículos, como a existência de conversão à direita que é permitida apenas nessa faixa de tráfego.

O coeficiente qm_{ij} que representa o aumento do *headway* de acordo com a quantidade de motocicletas à frente do veículo, apresentou valor médio de 0,7 s, sendo semelhante ao valor obtido na faixa esquerda. No caso de haver uma motocicleta à frente de um veículo leve, de acordo com o modelo, o seu *headway* médio passaria de 2,3 para 3,0 s, acréscimo aproximado de 30%. No caso do veículo pesado, uma motocicleta à frente representa um aumento médio de aproximadamente 20%.

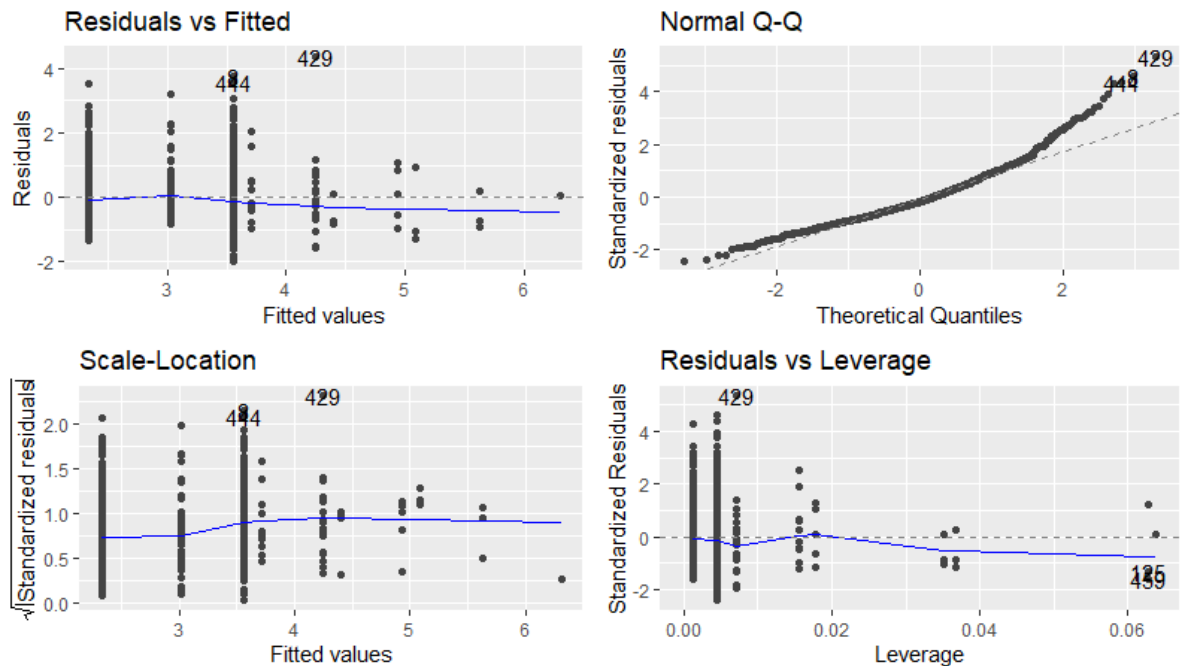
Por fim, o R² indicou que 37% da variação dos hds o podem ser explicados pelo tipo de veículo e quantidade de motocicletas posicionadas longitudinalmente à frente. Os resultados dos testes de normalidade (Kolmogorov-Smirnov), de independência (Durbin-Watson) e de homocedasticidade dos resíduos, referentes à faixa esquerda estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultado dos testes das premissas da regressão do hds_{ij} da faixa direita

FAIXA DIREITA		
Teste de Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)	Teste de Independência (Durbin Watson)	Teste de Homocedasticidade (Breush-Pagan)
0%	64%	0%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando um nível de significância de 5%, pode-se afirmar as hipóteses de normalidade e homocedasticidade foram rejeitadas. As conclusões, portanto, são as mesmas realizadas para a faixa esquerda, dado que os resultados dos testes foram iguais. Como as premissas de normalidade e homocedasticidade foram violadas, as inferências não são válidas e os coeficientes deixam de ser MELNV, no entanto, apresentam a ausência de viés e consistência do MQQ. O diagnóstico dos resíduos da regressão do hds_{ij} da faixa esquerda está apresentado no Gráfico 21.

Gráfico 21 – Diagnóstico dos resíduos da regressão do hds_{ij} da faixa direita

Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico *Residuals vs Fitted* não indica um padrão específico, apresentado pela linha que é praticamente reta, o que aponta para uma relação linear. O gráfico *Normal Q-Q*, apresenta vários pontos fora da linha tracejada, principalmente acima do quantil 2,

reforçando que os resíduos não seguem distribuição normal, conforme indicado pela rejeição do teste. O gráfico *Scale-Location* apresenta a linha azul com leve inclinação a partir de *fitted values* maiores do que 3, no entanto, a linha é basicamente horizontal, contrariando o resultado do teste. O gráfico *Residuals vs Leverage* não apresenta a reta tracejada vermelha e, portanto, não há pontos de influência.

Com base nos resultados da regressão linear, é possível concluir que uma motocicleta à frente do veículo aumenta o seu respectivo *headway*, durante o regime de saturação, entre 0,6 e 0,7 segundo. Esse valor representa, para o veículo leve, um aumento de cerca de 30%. Quanto às premissas da regressão, as hipóteses de normalidade e homocedasticidade foram violadas em ambas as análises. Dado isso, as inferências não são válidas e os coeficientes deixam de ser MELNV, no entanto, apresentam a ausência de viés e consistência do MQQ.

7.3 Fluxo de saturação

Para identificar e avaliar o efeito da proporção de motocicletas posicionadas longitudinalmente, durante o regime de saturação, no fluxo de saturação da faixa esquerda, realizou-se a regressão linear considerando a variável explicada S_j e a variável explicativa pm_j . Os valores médios, intervalos de confiança dos coeficientes e suas respectivas significâncias, além do R^2 estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados da regressão linear da variável S_j para a faixa esquerda

FAIXA ESQUERDA						
Coefficientes	Valor médio	valor-P	Limite inferior	Limite superior	R^2	N
Intercepto	1684	< 0,1%	1644	1723	0,09	199
pm_j	-3,9	< 0,1%	-5,7	-2,0		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os coeficientes apresentaram significância estatística. O intercepto apresentou valor de 1684, que indica o fluxo de saturação (S_j) da faixa esquerda, em veíc/h quando não há motocicletas posicionadas longitudinalmente durante o regime de saturação. O intervalo de confiança desse coeficiente variou entre 1644 e 1723. O valor médio obtido do intercepto é representado pelo hs_j médio de aproximadamente 2,1 s.

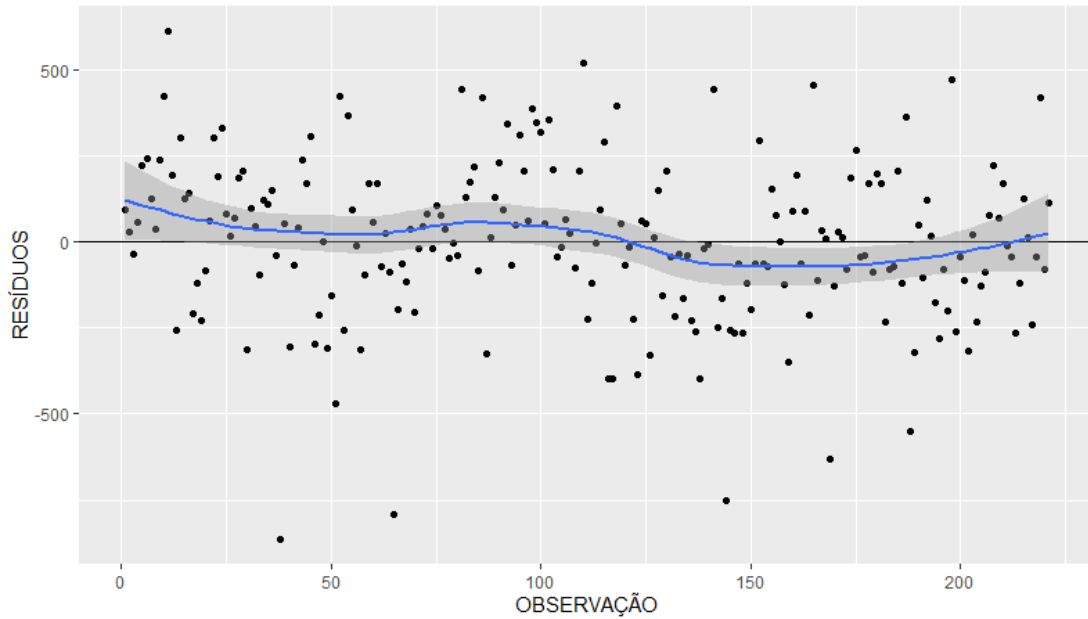
O valor médio do coeficiente pm_j obtido foi de -3,9 veíc/h, indicando a diminuição, em veículos por hora, de 1% de aumento da proporção de motocicletas. Logo, de acordo com o modelo, uma proporção de 50% de motocicletas em um ciclo semafórico ocasiona um fluxo de saturação de 1489 veículos por hora, o que resulta em uma redução de 12% quando comparado com a situação de ausência de motocicletas. O intervalo de confiança do coeficiente variou de -5,7 à -2,0 veíc/h. O R^2 indicou que 9% da variação do fluxo de saturação do ciclo semafórico podem ser explicados pela proporção de motocicletas posicionadas longitudinalmente durante o regime de saturação. Os resultados dos testes de normalidade (Kolmogorov-Smirnov), de independência (Durbin-Watson) e de homocedasticidade dos resíduos, referentes à faixa esquerda estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Resultado dos testes das premissas da regressão do S_j da faixa esquerda

FAIXA ESQUERDA		
Teste de Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)	Teste de Independência (Durbin Watson)	Teste de Homocedasticidade (Breush-Pagan)
29%	3%	11%

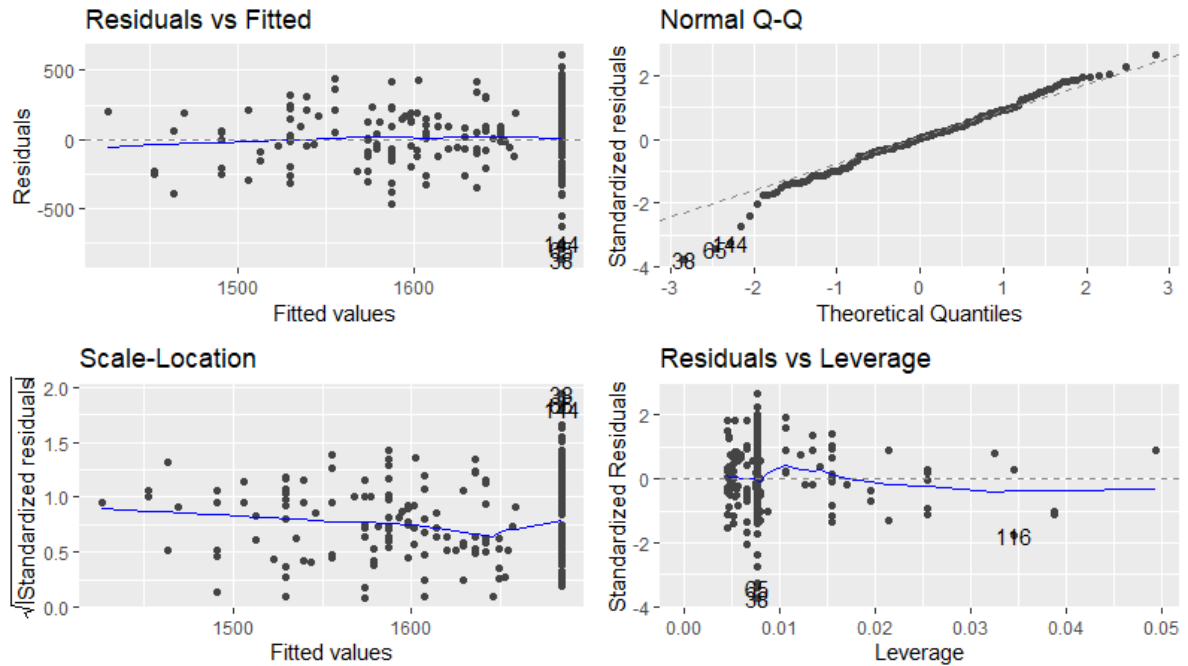
Fonte: Elaborado pelo autor.

Das premissas da regressão linear, apenas a independência dos erros foi rejeitada através do valor-p de 3%. Esse resultado indica que há autocorrelação entre os resíduos da regressão. Para um maior aprofundamento dessa questão, elaborou-se o Gráfico 22, no qual estão apresentados os resíduos por observação durante a coleta, sendo possível identificar se há um padrão do comportamento da variável.

Gráfico 22 – Resíduos do modelo de regressão do S_j em ordem da coleta, da faixa esquerda

Fonte: Elaborado pelo autor.

Contrariando o resultado do teste que indica autocorrelação dos resíduos, os dados apresentados acima indicaram que não há um padrão estabelecido do comportamento dos erros considerando a ordem da coleta. De forma geral, os resíduos não indicam padrão e com média aproximadamente 0. O diagnóstico dos resíduos da regressão do S_j da faixa esquerda está apresentado no Gráfico 23.

Gráfico 23 – Diagnóstico dos resíduos da regressão do S_j da faixa esquerda

Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico *Residuals vs Fitted* não indica um padrão específico, apresentado pela linha que é praticamente reta, o que aponta para uma relação linear. O gráfico *Normal Q-Q*, apresenta alguns pontos fora da linha tracejada, principalmente entre os quantis -3 e -2, apesar disso, esse comportamento não é suficiente para indicar que os resíduos não seguem distribuição normal, pois aparentemente são poucos pontos. O gráfico *Scale-Location* apresenta a linha azul com basicamente horizontal, dando indícios de homocedasticidade. O gráfico *Residuals vs Leverage* não apresenta a reta tracejada vermelha e, portanto, não há pontos de influência.

Para identificar e avaliar o efeito da proporção de motocicletas posicionadas longitudinalmente, durante o regime de saturação, no fluxo de saturação da faixa direita, realizou-se a regressão linear considerando a variável explicada S_j e a variável explicativa pm_j . Os valores médios, intervalos de confiança dos coeficientes e suas respectivas significâncias, além do R^2 estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Resultados da regressão linear da variável S_j para a faixa direita

FAIXA DIREITA						
Coeficientes	Valor médio	valor-P	Limite inferior	Limite superior	R ²	N
Intercepto	1416	< 0,1%	1371	1461	0,07	221
pm_j	-6,0	< 0,1%	-8,6	-3,4		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como na faixa esquerda, os coeficientes apresentaram significância estatística. O intercepto apresentou valor de 1416 veíc/h, que indica o fluxo de saturação (S_j) da faixa direita, em veíc/h, quando não há motocicletas posicionadas longitudinalmente durante o regime de saturação. O valor é consideravelmente inferior ao obtido pela faixa esquerda, como esperado, devido à maior quantidade de veículos pesados nessa faixa. O intervalo de confiança desse coeficiente variou entre 1371 e 1461 veíc/h. O valor médio obtido do intercepto é representado pelo hs_j médio de aproximadamente 2,5 s.

O valor médio do coeficiente pm_j obtido foi de -6,0 veíc/h; o que indica a diminuição, em veículos por hora, de 1% de aumento da proporção de motocicletas. Logo, de acordo com o modelo, uma proporção de 50% de motocicletas em um ciclo semafórico ocasiona um fluxo de saturação de 1.116 veículos por hora, o que resulta em uma redução de 21% quando comparado com a situação de ausência de motocicletas. O intervalo de confiança do coeficiente variou de -8,6 à -3,4.

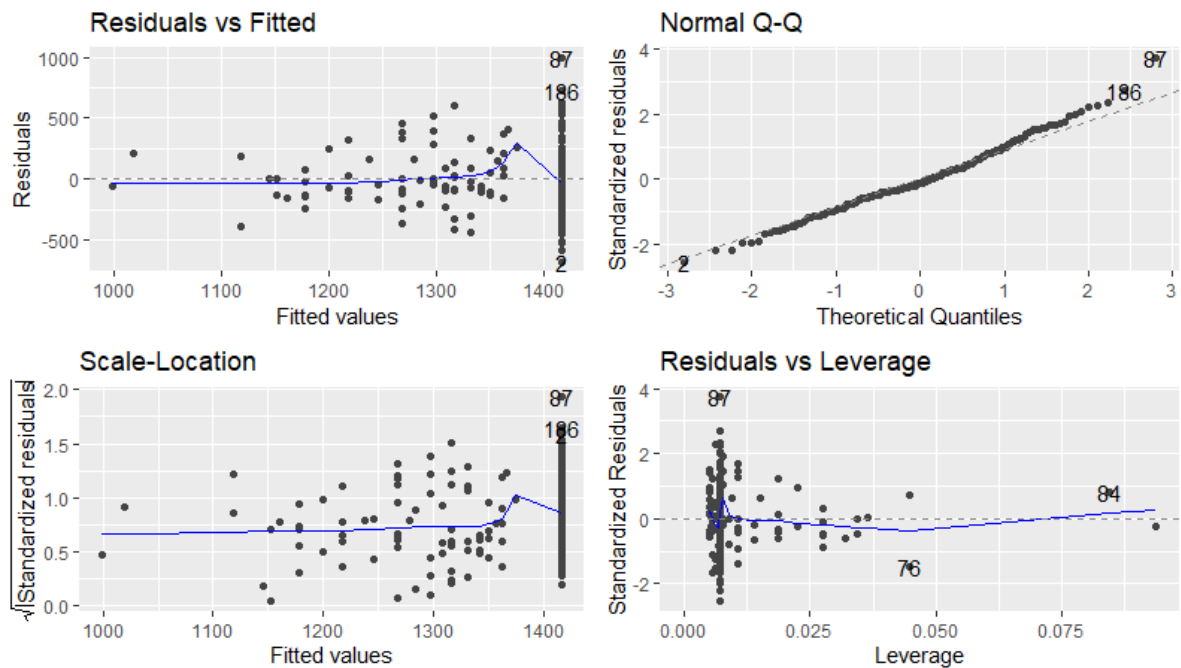
Vale ressaltar que os intervalos de confiança do coeficiente pm_j obtidos para ambas as faixas são sobrepostos, não dando indícios que o impacto da motocicleta é maior em uma faixa de tráfego específica. O R² indicou que 7% da variação do fluxo de saturação do ciclo semafórico podem ser explicados pela proporção de motocicletas posicionadas longitudinalmente durante o regime de saturação. Os resultados dos testes de normalidade (Kolmogorov-Smirnov), de independência (Durbin-Watson) e de homocedasticidade dos resíduos, referentes à faixa direita estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Resultado dos testes das premissas da regressão do S_j da faixa direita

FAIXA DIREITA		
Teste de Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)	Teste de Independência (Durbin Watson)	Teste de Homocedasticidade (Breush-Pagan)
45%	94%	2%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Das premissas da regressão linear, apenas a hipótese de homocedasticidade foi violada. Isso indica que os coeficientes obtidos não são MELNV, dado que a variância dos estimadores deixa de ser mínima. O diagnóstico dos resíduos da regressão do S_j da faixa direita está apresentado no Gráfico 24.

Gráfico 24 – Diagnóstico dos resíduos da regressão do S_j da faixa direita

Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico *Residuals vs Fitted* apresenta uma linha com uma inclinação forte em um ponto específico, no entanto, não é o suficiente para indicar padrão. O gráfico *Normal Q-Q*, apresenta poucos pontos fora da linha tracejada, dando indícios de normalidade. O gráfico *Scale-Location* apresenta a linha azul com basicamente horizontal, mas também com inclinação forte em um ponto específico. Excetuando esse ponto, não há um padrão que indique heterocedasticidade, como acusou o resultado do teste de Breush-Pagan. O gráfico

Residuals vs Leverage não apresenta a reta tracejada vermelha e, portanto, não há pontos de influência.

Para concluir, com base nos resultados da regressão linear, é possível afirmar que, em média, 1% de aumento da proporção de motocicletas diminui o fluxo de saturação entre 3,9 e 6,0 veículos por hora. As regressões também indicaram que a proporção de motos explica cerca de 7 e 9% da variação do fluxo de saturação dos ciclos semafóricos. Quanto às premissas da regressão, a hipótese de independência foi rejeitada para a faixa esquerda, enquanto a premissa de homocedastidade foi rejeitada para a faixa direita.

7.4 Fator de equivalência veicular

Para obter e analisar o FEQ das motocicletas na faixa esquerda, realizou-se a regressão linear considerando a variável explicada TVS_j e as variáveis explicativa QVL_j , QVP_j e QM_j . Os valores médios, intervalos de confiança dos coeficientes e suas respectivas significâncias, além do R^2 estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Resultados da regressão linear da variável TVS_j para a faixa esquerda

FAIXA ESQUERDA						
Coeficientes	Valor médio	valor-P	Limite inferior	Limite superior	R^2	N
Intercepto	1,1	< 0,1%	0,6	1,6	0,93	199
QVL_j	1,9	< 0,1%	1,8	2,0		
QVP_j	3,0	< 0,1%	2,6	3,3		
QM_j	0,3	< 0,1%	0,1	0,4		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos os coeficientes apresentaram significância estatística. Nessa regressão, esperava-se que o intercepto apresentasse valor 0, visto que não há sentido fenomenológico em haver tempo de verde saturado quando não há veículos leves, pesados ou motos. O estimador de QVL_j apresentou valor médio de 1,9 s, enquanto o estimador de QVP_j apresentou valor médio de 3,0 s. Por fim, o coeficiente obtido para QM_j foi de 0,3 s, com intervalo de confiança variando entre 0,1 e 0,4.

O FEQ da motocicleta é obtido através da divisão entre os coeficientes de QM_j e QVL_j . Dividindo os valores médios, obteve-se um valor de FEQ de 0,15, o que significa que

6 motocicletas posicionadas longitudinalmente entre veículos, durante o regime de saturação, têm efeito similar na capacidade de 1 veículos leve. O resultado é diferente do valor atribuído pelo DENATRAN (2014), que indica um valor de FEQ de 0,33 para as motocicletas, que significa que 3 motocicletas têm efeito similar a 1 veículo leve. Vale ressaltar que essa análise despreza as motocicletas no corredor virtual, dado que os resultados do tp_1 indicaram que, nessa posição, as motocicletas não impactam na capacidade da via.

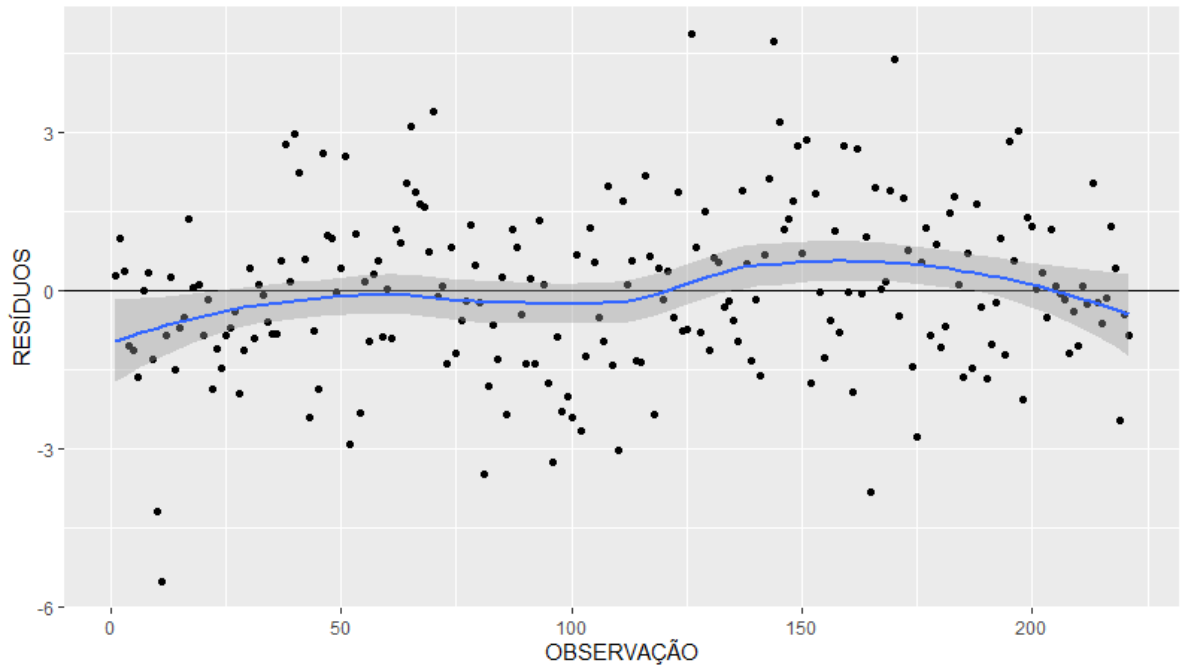
O R^2 indicou que 93% da variação do tempo de verde saturado do ciclo semafórico podem ser explicados pela quantidade de veículos leves, pesados e motos. Os resultados dos testes de normalidade (Kolmogorov-Smirnov), de independência (Durbin-Watson) e de homocedasticidade dos resíduos, referentes à faixa esquerda estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Resultado dos testes das premissas da regressão do TVS_j da faixa esquerda

FAIXA ESQUERDA		
Teste de Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)	Teste de Independência (Durbin Watson)	Teste de Homocedasticidade (Breush-Pagan)
86%	0%	0%

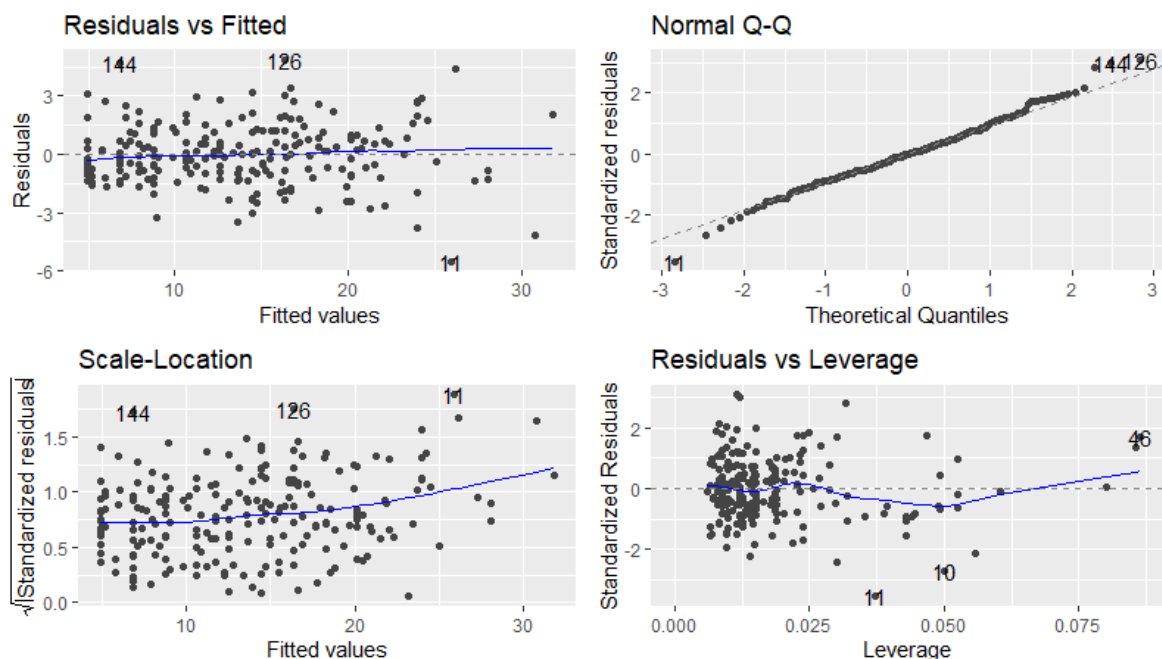
Fonte: Elaborado pelo autor.

Das premissas da regressão linear, as hipóteses de independência e homocedasticidade foram violadas. Isso indica que os coeficientes obtidos não são MELNV, dado que a variância dos estimadores deixa de ser mínima. Buscando avaliar se há autocorrelação dos resíduos, elaborou-se o Gráfico 25, que apresenta o comportamento dos resíduos por ordem de coleta.

Gráfico 25 – Resíduos do modelo de regressão do S_j em ordem da coleta, da faixa esquerda

Fonte: Elaborado pelo autor.

Contrariando o resultado do teste que indica autocorrelação dos resíduos, os dados apresentados acima indicaram que não há um padrão estabelecido do comportamento dos erros considerando a ordem da coleta. De forma geral, os resíduos não indicam padrão e com média de aproximadamente 0. O diagnóstico dos resíduos da regressão do TVS_j da faixa esquerda está apresentado no Gráfico 26.

Gráfico 26 – Diagnóstico dos resíduos da regressão do TVS_j da faixa esquerda

Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico *Residuals vs Fitted* apresenta uma linha basicamente reta, o que aponta para uma relação linear. O gráfico *Normal Q-Q* indica que praticamente todos os pontos estão sobrepostos à linha tracejada, o que dá indícios de normalidade dos resíduos. O gráfico *Scale-Location* apresenta a linha azul com inclinação para maiores de *fitted values*, dando indícios de heterocedasticidade. O gráfico *Residuals vs Leverage* não apresenta a reta tracejada vermelha e, portanto, não há pontos de influência.

Para obter e analisar o FEQ das motocicletas na faixa direita, realizou-se a regressão linear considerando a variável explicada TVS_j e as variáveis explicativa QVL_j , QVP_j e QM_j . Os valores médios, intervalos de confiança dos coeficientes e suas respectivas significâncias, além do R^2 estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Resultados da regressão linear da variável TVS_j para a faixa direita

FAIXA DIREITA						
Coefficientes	Valor médio	valor-P	Limite inferior	Limite superior	R^2	N
Intercepto	0,4	19,5%	-0,2	1,0	0,94	221
QVL_j	2,2	< 0,1%	2,1	2,3		
QVP_j	3,8	< 0,1%	3,6	4,1		
QM_j	0,5	< 0,1%	0,3	0,7		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Diferentemente do resultado obtido na faixa esquerda, a faixa da direita não indicou significância estatística para o intercepto. Como dito anteriormente, esse resultado é esperado, dado que não há sentido fenomenológico em haver tempo de verde saturado quando não há veículos leves, pesados ou motos. O estimador de QVL_j apresentou valor médio de 2,2 s, enquanto o estimador de QVP_j apresentou valor médio de 3,8 s. Ambos os valores são maiores do que os obtidos para a faixa esquerda.

Por fim, o coeficiente obtido para QM_j foi de 0,5 s, com intervalo de confiança variando entre 0,3 e 0,7. Dividindo os valores médios de QM_j pelo QVL_j , obteve-se um valor de FEQ de 0,21, o que significa que aproximadamente 5 motocicletas posicionadas longitudinalmente entre veículos, durante o regime de saturação, têm efeito similar na capacidade de 1 veículos leve. O resultado também diferente do valor atribuído pelo DENATRAN (2014), que indica um valor de FEQ de 0,33 para as motocicletas, que significa que 3 motocicletas têm efeito similar a 1 veículo leve. Vale ressaltar que essa análise despreza as motocicletas no corredor virtual, dado que os resultados do tp_1 indicaram que, nessa posição, as motocicletas não impactam na capacidade da via.

Apesar do valor do FEQ da motocicleta obtido através dos valores médios, para a faixa direita, ser superior ao da faixa esquerda, os valores são similares. Além disso, os intervalos de confiança dos estimadores são sobrepostos, não dando indícios que o FEQ das motos é diferente considerando ambas as faixas de tráfego. O R^2 indicou que 94% da variação do tempo de verde saturado do ciclo semaforico podem ser explicados pela quantidade de veículos leves, pesados e motos. Os resultados dos testes de normalidade (Kolmogorov-Smirnov), de independência (Durbin-Watson) e de homocedasticidade dos resíduos, referentes à faixa direita estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Resultado dos testes das premissas da regressão do TVS_j da faixa direita

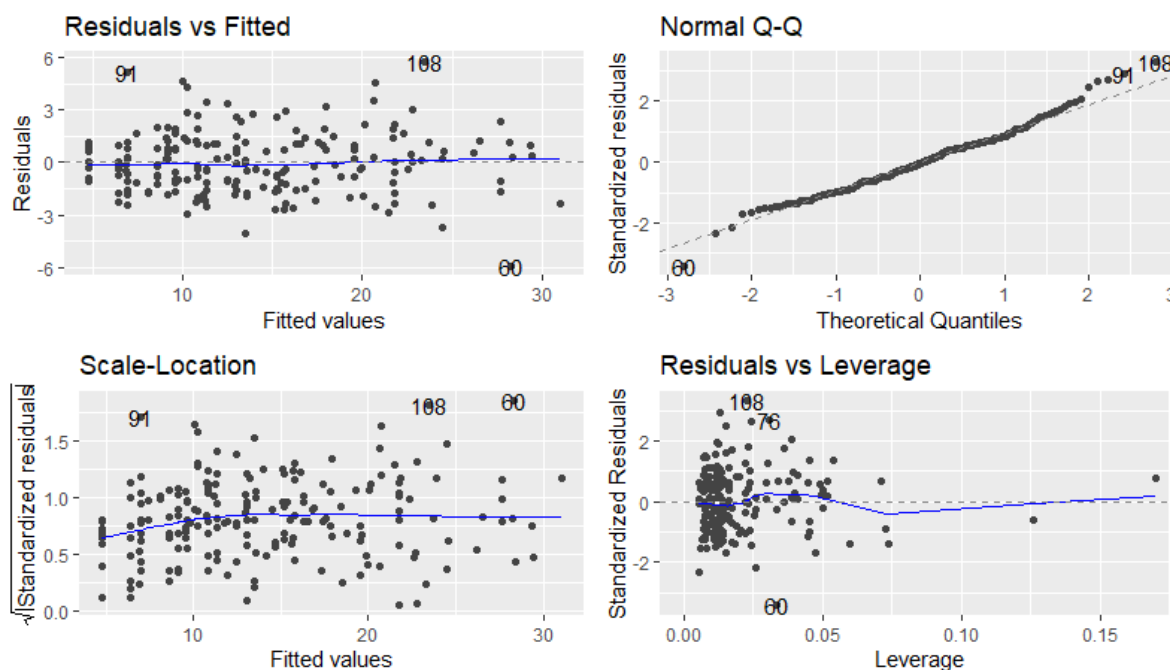
FAIXA DIREITA		
Teste de Normalidade (Kolmogorov-Smirnov)	Teste de Independência (Durbin Watson)	Teste de Homocedasticidade (Breush-Pagan)
70%	44%	8%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando um nível de significância de 5%, pode-se afirmar que nenhuma premissa da regressão linear é rejeitada. Para um diagnóstico mais completo dos resíduos,

elaborou-se o Gráfico 19 que apresenta o diagnóstico dos resíduos da regressão do TVS_j da faixa direita.

Gráfico 27 – Diagnóstico dos resíduos da regressão do TVS_j da faixa direita



Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico *Residuals vs Fitted* apresenta uma linha reta, o que indica uma relação linear. O gráfico *Normal Q-Q* indica que praticamente todos os pontos estão sobrepostos à linha tracejada, dando indícios de normalidade dos resíduos, reforçado pela não-rejeição da hipótese nula no teste de Kolmogorov-Smirnov. O gráfico *Scale-Location* também apresenta a linha azul praticamente reto, dando indícios de homocedasticidade, que é reforçado pela não-rejeição da hipótese nula no teste de Breush-Pagan. O gráfico *Residuals vs Leverage* não apresenta a reta tracejada vermelha e, portanto, não há pontos de influência.

Como conclusões desse tópico, pode-se afirmar que, de acordo com os resultados da regressão, o FEQ das motocicletas está entre 0,15 e 0,21; o que representa que é necessário entre 5 e 6 motocicletas para ocasionar o mesmo efeito de um veículo leve no fluxo de saturação. Esse resultado, como dito anteriormente, difere do FEQ indicado por DENATRAN (2014) que apresenta um FEQ das motocicletas de 0,33. Vale ressaltar ainda que os dados da regressão consideraram apenas motocicletas posicionadas

longitudinalmente entre veículos, portanto, motos no corredor virtual foram desconsideradas. Caso essas motos fossem consideradas, o FEQ reduziria.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar da literatura apresentar alguns trabalhos publicados acerca do efeito das motocicletas na capacidade de interseções semaforizadas sob a ótica do tráfego homogêneo, verificou-se há lacuna acerca deste tipo de trabalho nas condições do tráfego das cidades brasileiras.

Para avaliar os efeitos que as motocicletas podem atribuir à capacidade de interseções semaforizadas, e atingir os objetivos estabelecidos, o estudo foi subdividido em quatro etapas: tempo perdido inicial, *headway* de descarga de saturação, fluxo de saturação e fator de equivalência veicular. Para isso, propôs-se um método subdividido em: determinação das variáveis do estudo, planejamento e realização da coleta de dados, análises descritiva, de correlação e de regressão.

Na determinação das variáveis coletadas, estas foram definidas buscando representar a presença de motocicletas à frente do primeiro veículo da fila, no corredor virtual, entre veículos longitudinalmente, proporção de motocicletas posicionadas longitudinalmente entre veículos durante o regime de saturação e quantidade de motocicletas durante o regime de saturação. A coleta de tráfego deste estudo foi realizada em uma aproximação semaforizada que apresenta duas faixas de tráfego e totalizou cerca de 14 horas de coleta, que resultaram em cerca de 4.000 *headways* veiculares.

A etapa da análise descritiva permitiu identificar que, aparentemente, a estabilização do *headway* de descarga acontece aproximadamente a partir do 7º veículo em fila, com valores de 2,1 segundos na faixa esquerda e 2,7 na faixa direita. A faixa direita, portanto, apresentou maior valor que pôde ser explicado pela maior quantidade de veículos pesados e também por permitir movimento de conversão. De acordo com os dados coletados e em concordância com o que a literatura aborda, os *headways* dos veículos pesados são, geralmente, maiores do que os dos veículos leves. Considerando os *headways* de descarga durante o regime de saturação, as médias obtidas foram de 2,1 e 3,1 segundos para veículos leves e pesados respectivamente na faixa esquerda; enquanto as médias obtidas foram de 2,4 e 3,7 segundos para veículos leves e pesados respectivamente na faixa direita.

Os dados também apontaram que os *headways* dos veículos que tiveram presença de motocicletas à sua frente são, de maneira geral, consideravelmente maiores do que os *headways* dos veículos que tiveram ausência de motocicletas. Considerando os quatro primeiros *headways* que representam o tempo perdido inicial, foram obtidas médias

de 2,8 e 4,3 segundos respectivamente para veículos com ausência e com presença de motocicletas na faixa esquerda, enquanto foram obtidas médias de 3,2 e 5,0 segundos respectivamente para veículos que apresentaram ausência e presença de motocicletas na faixa direita. Quanto aos *headways* em regime de saturação (a partir do 5º veículo em fila), foram obtidas médias de 2,1 e 3,1 segundos respectivamente para veículos com ausência e presença de motocicletas na faixa esquerda; enquanto foram obtidas médias de 2,6 e 3,7 segundos respectivamente para veículos que apresentaram ausência e presença de motocicletas.

As diferenças entre as médias dos *headways* na ausência e presença de motocicletas no tempo perdido inicial variam entre 1,5 e 1,8 segundos, enquanto as diferenças entre as médias dos *headways* de descarga durante o regime de saturação foram de 1,0 e 1,1 segundos, indicando que o impacto das motocicletas é ainda maior na descarga dos primeiros veículos. Elaborou-se a hipótese que esse fenômeno acontece devido ao comportamento das motocicletas tenderem a se concentrar próximo aos primeiros veículos e, portanto, afetam mais significativamente a descarga desses. Essa hipótese foi corroborada através gráfico elaborado que apresentou a quantidade médio de motocicletas por posição na fila, que indicou que as motos se concentram principalmente próximo à faixa de retenção.

Durante a etapa de correlação, foi possível identificar o grau em que as variáveis coletadas de relacionam, o que foi possível reforçar ou atenuar as hipóteses elaboradas para cada análise de regressão. Considerando a análise do tempo perdido inicial na faixa esquerda, a variável $H4_j$ (que representa o quarto *headway* acumulado) apresentou correlação positiva com intensidade moderada e significância estatística com a quantidade de motos à frente do primeiro veículo (Qmf_j), a quantidade de motos entre veículos ($Qmev_j$) e a quantidade de veículos pesados (Qvp_j). Não houve significância estatística da correlação entre o $H4_j$ e a variável que representa as motos no corredor virtual ($Pmcv_j$).

Na faixa direita, a variável $H4_j$ apresentou baixa correlação positiva, com significância estatística, com as variáveis que representam a quantidade de motos à frente do primeiro veículo (Qmf_j) e da quantidade de motos entre veículos ($Qmev_j$) e alta correlação positiva com a quantidade de veículos pesados (Qvp_j). Assim como na faixa esquerda, não houve significância estatística do $H4_j$ na faixa direita com a variável que representa a presença de motos no corredor virtual ($Pmcv_j$). Com esses resultados, as hipóteses de que as motocicletas entre veículos e à frente do primeiro veículo podem resultar em maiores

valores do tempo perdido inicial foram reforçadas, enquanto a hipótese do impacto das motocicletas no corredor virtual foi atenuada.

Com relação aos resultados da análise de correlação dos *headways* de descarga da de saturação, em ambas as faixas de tráfego, o hds_{ij} apresentou correlação positiva com intensidade moderada e significância estatística com a variável que representa a quantidade de motos posicionadas longitudinalmente à frente dos veículos (qm_{ij}). Esses resultados reforçaram a hipótese levantada de que maiores quantidades de motocicletas entre veículos resultam em maiores valores de hds_{ij} .

Na análise de correlação do fluxo de saturação (S_j), em ambas as faixas, o S_j apresentou baixa, porém significativa, correlação negativa com a variável que representa a proporção de motocicletas posicionadas longitudinalmente entre veículos durante o regime de saturação (pm_j). Através do diagrama de dispersão, foi possível observar que mesmo em condições de ausência de motocicletas ($pm_j = 0$), há valores baixos de fluxo de saturação (próximo à 1000 veículos por hora, por exemplo), o que aponta que há outros fatores que influenciam significativamente a descarga dos veículos em regime de saturação. Os resultados reforçam a hipótese de que maiores proporções de motocicletas resultam em menores valores de fluxo de saturação, no entanto, não aparenta ser um fator que impacta fortemente.

Na análise de correlação do fator de equivalência veicular (FEQ_j), em ambas faixas de tráfego, o TVS_j apresentou alta correlação com a quantidade de veículos leves durante o regime de saturação (QVL_j). Essa alta correlação é esperada, visto que a maioria dos veículos que trafegam são leves, além de que maiores quantidades de veículos em um ciclo resultam em maiores tempos de verde saturado. Apesar de significativa, a correlação da variável TVS_j com as variáveis VQM_j e QVP_j foi baixa ou moderada em ambas as faixas de tráfego.

Na etapa de regressão linear do tempo perdido inicial em ambas as faixas de tráfego, foi possível concluir que o efeito médio de uma motocicleta posicionada à frente do primeiro veículo e entre veículos, no tp_1 , está entre de 0,4 e 0,6 segundos. Não houve significância estatística do parâmetro que representa as motocicletas no corredor virtual, portanto, não houveram indícios de que as motocicletas posicionadas no corredor virtual atrasam a descarga da fila dos veículos. Praticamente todas as premissas da regressão foram atendidas, com exceção da premissa da independência dos erros na regressão

realizada para a faixa esquerda, que teve a hipótese nula do teste de Durbin-Watson rejeitada. No entanto, elaborou-se um gráfico dos resíduos por ordem de coleta, no qual não foi possível identificar um padrão do comportamento dos resíduos. Dessa forma, apesar da conclusão do teste, o gráfico não deu indícios de dependência dos resíduos.

Com relação aos resultados da análise de correlação dos *headways* de descarga de saturação, foi possível concluir que uma motocicleta à frente do veículo está relacionada com o aumento do seu respectivo *headway*, durante o regime de saturação, entre 0,6 e 0,7 segundo. Esse valor representa, para o veículo leve, um aumento de cerca de 30% do tempo necessário para ser atendido na interseção semaforizada. Quanto às premissas da regressão, as hipóteses de normalidade e homocedasticidade foram violadas em ambas as faixas de tráfego. Dado isso, as inferências não são válidas e os coeficientes deixam de ser os Melhores Estimadores Lineares Não-Viesados (MELNV), no entanto, apresentam a ausência de viés e consistência do Método Mínimos Quadrados (MQQ).

Na análise de regressão do fluxo de saturação, foi possível afirmar que, em média, 1% de aumento da proporção de motocicletas está relacionado à diminuição do fluxo de saturação entre 3,9 e 6,0 veículos por hora. As regressões também indicaram que a proporção de motos explica cerca de 7 e 9% da variação do fluxo de saturação dos ciclos semaforicos. Quanto às premissas da regressão, a hipótese de independência foi rejeitada para a faixa esquerda, enquanto a premissa de homocedasticidade foi rejeitada para a faixa direita.

Quanto à premissa de dependência violada na faixa esquerda, elaborou-se um gráfico dos resíduos por ordem de coleta, no qual não foi possível identificar um padrão do comportamento dos resíduos. Dessa forma, apesar da conclusão do teste, os dados apresentados no gráfico não deram indícios de dependência dos resíduos. A rejeição da premissa de homocedasticidade na análise da faixa direita indica que o coeficiente obtido não é eficiente, apesar de continuar sendo não-tendencioso e consistente. Dessa forma, os testes estatísticos realizados apresentaram resultados inexatos.

Quanto à análise de regressão realizada para o fator de equivalência veicular (FEQ), foi possível afirmar que o FEQ das motocicletas está entre 0,15 e 0,21; o que representa que é necessário entre 5 e 6 motocicletas posicionadas longitudinalmente entre veículos para ocasionar o mesmo efeito de um veículo leve na descarga durante o regime de saturação. Esse resultado, como dito anteriormente, difere do FEQ indicado por

DENATRAN (2014) que apresenta um valor de 0,33. Vale ressaltar ainda que os dados da regressão consideraram apenas motocicletas posicionadas longitudinalmente entre veículos, portanto, motos no corredor virtual foram desconsideradas. Dado que os resultados obtidos na análise do tempo perdido inicial indicaram que as motocicletas posicionadas no corredor virtual não afetaram a descarga dos quatro primeiros veículos, entende-se que o FEQ apresentaria valor ainda inferior, caso essas motos fossem consideradas.

Dado que o trabalho apresentou questões de pesquisa fenomenológicas, ou seja, que buscaram avaliar o fenômeno do impacto das motocicletas na capacidade de interseções semaforizadas, e não necessariamente de elaborar apenas modelos preditivos, os modelos que apresentaram violação das premissas de regressão linear não foram corrigidos. Portanto, sugere-se para trabalhos futuros que, para fins de aplicação e maiores investigações, realize-se o tratamento das variáveis que corrija as violações ou sejam elaborados outros modelos não-lineares. Sugere-se também que, para fins de aplicação, sejam elaborados modelos mais generalistas, que considerem, por exemplo, a proporção total de motocicletas em determinado regime (tempo perdido inicial ou fluxo de saturação).

Sugere-se que os trabalhos futuros incorporem mais observações e outras variáveis que impactam a descarga dos veículos, como largura de faixa e movimento de conversão, o que garantirá conclusões mais concretas sobre o fenômeno analisado. Para futuros estudos, também é indicado analisar o impacto, sobre o *headway* de descarga de um veículo, do tipo de veículo que vai na sua frente. Ou seja, avaliar se o *headway* de um veículo leve, por exemplo, é estatisticamente distinto se este segue um veículo leve ou veículo pesado.

Apesar dos resultados conclusivos sobre as motocicletas no corredor virtual, entende-se que a variável P_{mcj} não representa fielmente o comportamento das motocicletas no corredor virtual, visto que a posição final das motocicletas no início do verde não indica necessariamente os veículos que podem ser impactados, dado que a descarga das motocicletas é geralmente mais ágil que a dos veículos. Portanto, propõe-se para estudos futuros uma variável binária, para cada *headway* veicular, que indique a presença ou ausência de motocicletas à sua adjacência no momento que o veículo passa na faixa de retenção. É indicada a aplicação do método proposto para uma amostra de faixas controladas por semáforo que seja representativa das características da operação semafórica em Fortaleza. Isto permitirá estimar, de forma mais abrangente, como a fluidez veicular

(excluindo as motos) em interseções semaforizadas tem sido afetada pela presença das motocicletas.

Por fim, ressalta-se que este foi um estudo exploratório, o qual propôs e aplicou um método para: avaliar o impacto da presença de motocicletas sobre o tempo perdido inicial e sobre o fluxo de saturação de uma faixa controlada por um semáforo, além da determinação do fator de equivalência veicular para motos e veículos pesados. Os resultados foram obtidos através de uma aproximação semaforizada, portanto os valores obtidos neste estudo somente poderão ser assumidos para condições semelhantes às quais o estudo foram aplicados.

REFERÊNCIAS

- AGBOLOSU-AMISON, S. J.; SADEK, A. W.; ELDESSOUKI, W. Inclement weather and traffic flow at signalized intersections. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1867, p. 163-171, 2004.
- ANUSHA, C. S.; VERMA, A.; A. V.; KAVITHA, G. Effects of two-wheelers on saturation flow at signalized intersections in developing countries. **Journal of Transportation Engineering**, v. 139, p. 448-457, 2013.
- BERGER, Pedro Pelacani. **Estudo dos acidentes com motocicletas e da gravidade das lesões recorrentes**. 87f. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.
- BONNESON, J. A. Study of Headway and Lost Time at Single-Point Urban Interchanges. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1365, p. 30-39, 1992.
- COUTINHO, C. H. L.; CUNTO, F. J. C.; FERREIRA, S. M. P. Análise da severidade dos acidentes com motocicletas utilizando modelos proibit e logit ordenados. **Transportes**, v. 23, n. 3, p.60-66, 2015.
- DENATRAN. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito Volume V – Sinalização Semafórica**. Departamento Nacional de Trânsito, 2014.
- ELEFTERIADOU, Lily. **An introduction to traffic flow theory**. New York: Springer, 2014.
- HOLZ, Raquel da Fonseca. **Realidade da motocicleta no ambiente urbano com foco no Brasil**. 202f. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.
- KHAN, S, I.; MAINI, P. Modeling heterogeneous traffic flow. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1678, p. 234-241, 1999.
- KHOSLA, K.; WILLIAMS, J. C. Saturation flow at signalized intersections during longer green time. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1978, p. 61-67, 2006.
- LE, X.; LU, J. J.; MIERZEJEWSKI, E. A.; ZHOU, Y. Variations in capacity at signalized intersections with different area types. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1710, p. 199-204, 2000.
- LU, J. J.; PERNÍA, J. C. The differences of driving behavior among different driver age groups at signalized intersections. **IATSS Research**, v. 24, p. 75-84, 2000.

LUNA, Marcelo dos Santos de. **Sobre o fluxo de saturação: conceituação, aplicação, determinação e variação.** 148f. 2003. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

MÂNICA, André Geraldi. **Modelo de previsão de acidentes rodoviários envolvendo motocicletas.** 177f. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MARTINS, E. T.; BOING, A. F.; PERES, M. A. Mortalidade por acidentes de motocicleta no Brasil: análise de tendência temporal, 1996-2009. **Revista de Saúde Pública**, v. 47, n.5, p. 931-941, 2013.

MATSOUKIS, E.; EFSTATHIADIS, S. An investigation of the variability of start-up lost times and departure headways at signalized intersection in urban areas. **WIT Transactions on the Built Environment**, v. 111, p. 59-68, 2011.

MIHN, C. C.; SANO, K. Analysis of motorcycles effects to saturation flow rate at signalized intersection in developing countries. **Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies**, v. 5, p. 1211-1222, 2003.

NAKATSUJI, T.; HAI, N. G.; TANABORIBOON, Y. Effects of motorcycle on capacity of signalized intersections. **Journal of Infrastructure Planning**, v. 18, n. 5, p. 935-942, 2001.

NGUYEN, H. D. Saturation flow rate analysis at signalized intersections for mixed traffic conditions in motorcycle dependent cities. **Transportation Research Procedia**, v. 15, p. 694-708, 2016.

RADHAKRISHNAN, S.; RAMADURAI, G.; Discharge headway model for heterogeneous traffic conditions. **Transportation Research Procedia**, v. 10, p. 145-154, 2015.

RONGVIRIYAPANICH, T.; SUPPATTRAKUL, C.; Effects of motorcycles on traffic operations on arterial streets. **Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies**, v. 6, p. 137-146, 2005.

QUEIROZ, I. N. F.; JACQUES, M. A. P. Modelo para estimativa do fluxo de saturação desenvolvido a partir das condições de tráfego de Brasília. **Transportes**, v. 10, n.1, 2002.

SILVA, T. L. P. Q.; JACQUES, M. A. P. Estimativa do headway de descarga em interseções semaforizadas com auxílio de redes neurais artificiais. **Transportes**, v. 11, n.1, 2003.

SHAO, C.; RONG, J.; LIU, X. Study on the saturation flow rate and its influence factors at signalized intersections in China. **Procedia – Social and Behavioral Sciences**, v. 16, p. 504-514, 2011.

SHARMA, A.; VANAJAKSHI, L.; RAO, N. Effect of phase countdown timers on queue discharge characteristics under heterogeneous traffic conditions. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2130, p. 93-100, 2009.

STOKES, R. W. Some factors affecting signalized intersection capacity. **ITE Journal**, v.59, p. 35-40, 1989.

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