



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DO FLUXO DE MOTOCICLETAS E AUTOMÓVEIS
ATRAVÉS DE UM MODELO MICROSCÓPICO CONTÍNUO**

MAURÍCIO PEREIRA MAGALHÃES DE NOVAES SANTOS

RECIFE-PE

2017

MAURÍCIO PEREIRA MAGALHÃES DE NOVAES SANTOS

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DO FLUXO DE MOTOCICLETAS E AUTOMÓVEIS
ATRAVÉS DE UM MODELO MICROSCÓPICO CONTÍNUO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Pernambuco como
requisito básico para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Fábio Santana Magnani

RECIFE-PE

2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

S237a Santos, Maurício Pereira Magalhães de Novaes.
Análise computacional do fluxo de motocicletas e automóveis através de um modelo microscópico contínuo / Maurício Pereira Magalhães de Novaes Santos - 2017.
88 folhas, Il.; Tabs. e Simb.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Santana Magnani.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Curso de Engenharia Mecânica, 2017.

Inclui Referências e Anexos e Apêndices.

Engenharia Mecânica. 2. Fluxo de veículo. 3. Modelo contínuo.
4. Mudança de faixa. 5. Tráfego. I. Magnani, Fábio Santana.(Orientador).
II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-112



DEMEC

**Departamento de Engenharia Mecânica
Centro de Tecnologia e Geociências-EEP**

A comissão examinadora da Tese de Conclusão de Curso

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DO FLUXO DE MOTOCICLETAS E AUTOMÓVEIS
ATRAVÉS DE UM MODELO MICROSCÓPICO CONTÍNUO**

defendida por

Maurício Pereira Magalhães de Novaes Santos

Considera o candidato APROVADO

Recife, 13 de fevereiro de 2017

Banca examinadora:

Prof. Dr. Fábio Santana Magnani – UFPE
(Orientador)

Prof.^a M^a. Jessica Helena de Lima – UFPE
(Examinadora)

Bel. Fernando Wesley Cavalcanti de Araújo -UFPE
(Examinador)

Agradecimentos

Primeiramente quero agradecer minha família por todo apoio durante minha graduação, especialmente minha mãe Maria Letícia, meu Pai Mauro Roberto, meu irmão Gabriel, minha prima Marisa e minha namorada Maria Clara.

Agradeço meu orientador, Prof. Fábio Magnani, por me apresentar este campo de pesquisa, assim como pelos seus conselhos, auxílios e correções durante a realização deste trabalho.

Agradeço a Fernando Wesley pelos auxílios e compartilhamento dos resultados de sua pesquisa.

Agradeço aos criadores do pacote computacional tráfego utilizado neste trabalho, Arne Kesting e Martin Treiber, pelos esclarecimentos e sugestões.

Monge Takuan: Se ficar apegado a uma folha, não enxergará a árvore, se ficar apegado a uma árvore, não enxergará a floresta, não deixar o espírito sobre um único ponto. Não ver o detalhe para enxergar o todo. Esse é o significado verdadeiro da 'visão'.

Takehiko Inue, Vagabond 7: A história de Musashi

RESUMO

O planejamento de transportes nas vias urbanas é cada vez mais importante, uma vez que congestionamentos são comuns e afetam a sociedade no âmbito socioeconômico e ambiental. Desperdício de combustível, maior emissão de gases poluentes e perda de tempo são os maiores problemas relacionados com o congestionamento. Em países em desenvolvimento, como o Brasil, o tráfego urbano misto (representado principalmente por carros, motos e ônibus) possui uma grande quantidade de veículos de duas rodas. Este trabalho busca estudar o fluxo de veículos individuais através de um modelo computacional microscópico contínuo. O tráfego é analisado sob diferentes densidades de veículos e velocidades máximas com a troca de faixa podendo ocorrer para carros e motos ou apenas para as motos. Quatro combinações de velocidades máximas para carros e motos, 54 km/h e 135 km/h, foram utilizadas para analisar o impacto do aumento ou redução da velocidade máxima no fluxo de veículos. O modelo de tráfego utilizado, em comparação com o modelo de tráfego discreto, não representou mudanças significativas no comportamento macroscópico. Em altas densidades, as velocidades máximas dos veículos analisadas não têm papel fundamental, pois a alta quantidade de veículos restringe a velocidade média para um valor inferior a 50 km/h. Além disso, a mudança de faixa de carros e motos é uma característica importante para simulação em baixas densidades.

Palavras-chave: Fluxo de veículos. Modelo contínuo. Mudança de faixa. Tráfego.

ABSTRACT

Transportation planning is more and more important, since traffic jam are usual and affect the society in an environmental and socioeconomic scope. Fuel waste, increased emission of polluting gases and waste of time are the biggest problems related to traffic congestion. In developing countries, such as Brazil, the mixed urban traffic (majorly represented by cars, motorcycles and buses) has a large number of two wheeler vehicles. This final project seeks to study the flow of individual vehicles through a continuous microscopic model. The traffic is analyzed under different vehicle densities and maximum velocities with lane change that can occur for car and motorcycles or only for motorcycles. Four combinations of maximum velocities for cars and motorcycles, 54 km/h and 135 km/h, were used to analyze the impact of increase or decrease in the traffic flow. The traffic model used did not result in meaningful change of macroscopic traffic behavior in comparison to a discrete traffic model. The maximum velocities analyzed do not have influence at high vehicles densities, because the high number of vehicles restrain the velocity for a number below to 50 km/h. Furthermore, the lane change ability is an important feature for simulations at low densities.

Keywords: Vehicle flow. Continuous model. Lane change. Traffic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação da escala dos modelos de tráfego	21
Figura 2 - Diagrama espaço-tempo	22
Figura 3 - Representação gráfica do espaçamento e afastamento	23
Figura 4 - Diagrama Fundamental.....	23
Figura 5 - Simulação no MovSim com densidade de 9 carros/km/via	30
Figura 6 - Simulação no MovSim com densidade de 32 carros/km/via	31
Figura 7 - Afastamento mínimo entre veículos no modelo utilizado	35
Figura 8 - Representação gráfica da pista de 7,5 km utilizada	35
Figura 9 - Diagramas fundamentais para seleção de ϵ para carros (a) e para motos (b).....	40
Figura 10 - Comportamento macroscópico do tráfego utilizando a situação base de estudo.....	43
Figura 11 - Comportamento dos automóveis no tráfego (caso base). a) fluxo de carros b) velocidade média dos carros.....	44
Figura 12 - Desvio padrão das velocidades dos carros (caso base)	45
Figura 13 - Comportamento das motocicletas no tráfego (caso base). a) fluxo de motos b) velocidade média das motos	46
Figura 14 - Desvio padrão das velocidades das motos (caso base)	47
Figura 15- Fluxo de veículos para quatro combinações de velocidade máximas para carros e motos.....	48
Figura 16- Fluxo de veículos no modelo contínuo (Krauss). $V_{m\acute{a}x,carro}=135$ km/h e $V_{m\acute{a}x,moto}=135$ km/h.....	51
Figura 17 - Fluxo de veículos no modelo discreto (AC). $V_{m\acute{a}x,carro}=135$ km/h e $V_{m\acute{a}x,moto}=135$ km/h.....	51
Figura 18 - Velocidade média dos carros utilizando o modelo contínuo (Krauss). $V_{m\acute{a}x,carro}=135$ km/h e $V_{m\acute{a}x,moto}=135$ km/h	51
Figura 19 - Velocidade média dos carros utilizando o modelo discreto(AC). $V_{m\acute{a}x,carro}=135$ km/h e $V_{m\acute{a}x,moto}=135$ km/h	51
Figura 20 - Fluxo de veículos para as situações em que carros e motos mudam de faixa (a) e apenas motos mudam de faixa (b)	56
Figura 21 – Fluxo de motos para as situações em que carros e motos mudam de faixa (a) e apenas motos mudam de faixa (b)	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Regra 184 - Autômato celular elementar.....	26
Tabela 2 - Organização dos resultados (Apêndices e Anexos).....	42
Tabela 3 - Fluxo máximo de veículos para cada combinação de velocidades máximas de carros e motos para a situação em que apenas motos mudam de faixa	50
Tabela 4 - Diferença da velocidade média dos carros, em km/h, entre o modelo contínuo e discreto em função da densidade de motos e automóveis	52
Tabela 5 - Diferença da velocidade média das motos, em km/h, entre o modelo contínuo e discreto em função da densidade de motos e automóveis	53
Tabela 6 - Resumo comparativo entre o fluxo de veículos do modelo contínuo, Apêndice C (Figura A1 a D1), e os resultados obtidos utilizando um modelo discreto, Anexo C.....	54
Tabela 7 - Comparação das características de tráfego para fluxo máximo utilizando um modelo contínuo e discreto. Os valores em negritos representam o modelo discreto e os valores entre parênteses representam a diferença percentual em relação ao modelo contínuo	55
Tabela 8 - Fluxo máximo de veículos para cada combinação de velocidades máximas para as condições em que carros e motos mudam de faixa e apenas motos trocam de faixa. Os valores em negrito correspondem a situação em que carros e motos mudam de faixa e os valores entre parênteses representam a diferença percentual em relação a situação em que apenas motos trocam de faixa	58

LISTA DE SÍMBOLOS

$Q(x, t)$	Fluxo de veículos
Δx	Seção da via
N	Número de veículos
Δt	Intervalo de tempo
$\rho(x, t)$	Densidade de veículos
q_m	Fluxo máximo de veículos
ρ_{max}	Densidade para fluxo máximo
ρ_j	Densidade máxima na via
As	Afastamento (gap)
Xl	Posição do carro líder
Xs	Posição do carro seguidor
Cl	Comprimento do carro líder
s^*	Afastamento desejado
s	Afastamento atual
a	Máxima aceleração
v_0	Velocidade desejada
v	Velocidade atual
δ	Parâmetro de frenagem
p	Probabilidade de o veículo desacelerar
T	Período de tempo
\bar{v}^c	Velocidade média dos carros
\bar{v}^m	Velocidade média das motos
σ	Desvio padrão da velocidade dos veículos
ρ^m	Densidade de motos
ρ^c	Densidade de carros
v_{seg}	Velocidade de segurança
Δt_r	Tempo de reação/adaptação
b	Desaceleração máxima
s_0^c	Afastamento mínimo para carros
s_0^m	Afastamento mínimo para motos
v_1	Velocidade determinada pelo modelo de Gipps
v_2	Velocidade mínima pelo modelo de Krauss
ε	Parâmetro de frenagem aleatória
v_{rand, v_1, v_2}	Velocidade aleatória entre v_1 e v_2
p_e	Parâmetro de educação no trânsito
$a_{i, troca}$	Aceleração do veículo com troca de faixa
$a_{i, atual}$	Aceleração do veículo sem troca de faixa
$a_{n, troca}$	Aceleração do veículo seguidor na faixa ao lado com troca de faixa
$a_{n, atual}$	Aceleração do veículo seguidor na faixa ao lado sem troca de faixa
$a_{a, troca}$	Aceleração do veículo seguidor na faixa atual com a troca de faixa
$a_{a, atual}$	Aceleração do veículo seguidor na faixa atual sem a troca de faixa
Δm	Aumento de aceleração necessária para troca de faixa
b_{seg}	Desaceleração de segurança
d_{min}	Distância mínima entre veículos para troca de faixa
$V_{máx, carro}$	Velocidade máxima para os carros
$V_{máx, moto}$	Velocidade máxima para as motos
$V_{máx}$	Velocidade máxima

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivo específico	19
1.1.3	Metas	19
1.2	Organização do trabalho	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Introdução à engenharia do tráfego	20
2.2	Principais modelos microscópicos	24
2.3	Modelo veículo seguidor: modelos completos	25
2.4	Autômato celular	26
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
4	METODOLOGIA	32
4.1	Seleção do <i>software</i> e considerações iniciais	32
4.2	Modelo de tráfego utilizado	37
4.2.1	Modelo de Krauss	37
4.2.2	Modelo de troca de faixa: MOBIL (Minimizing Overall Braking Induced by Lane Change)	40
5	Resultados	42
5.1	Estudo do caso base: análise introdutória	43
5.2	Estudo de caso com apenas as motos mudando de faixa: análise da influência da velocidade máxima	47
5.3	Estudo do caso com apenas as motos mudando de faixa: influência do modelo de tráfego utilizado	50
5.4	Estudo do caso com ambos os veículos mudando de faixa: impacto da mudança de faixa dos carros	55
6	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	61
	Apêndice A: fluxo de automóveis versus densidade de carros (modelo contínuo)	64
	Apêndice B: fluxo de moto versus densidade de carros (modelo contínuo)	66
	Apêndice C: fluxo de veículos versus densidade de carros (modelo contínuo)	68
	Apêndice D: fluxo total de veículos em função da densidade total (modelo contínuo)	70
	Apêndice E: velocidade média dos carros versus densidade de carros (modelo contínuo)	72

Apêndice F: velocidade média das motos versus densidade de carros (modelo contínuo).....	74
Apêndice G: desvio padrão da velocidade dos carros versus densidade de carros (modelo contínuo)	76
Apêndice H: desvio padrão da velocidade das motos versus densidade de carros (modelo contínuo)	78
Anexo A: fluxo de automóveis versus densidade de carros (modelo discreto)	80
Anexo B: fluxo de moto versus densidade de carros (modelo discreto)	81
Anexo C: fluxo de veículos versus densidade de carros (modelo discreto)	82
Anexo D: fluxo total de veículos em função da densidade total (modelo discreto)	83
Anexo E: velocidade média dos carros versus densidade de carros (modelo discreto)	84
Anexo F: velocidade média das motos versus densidade de carros (modelo discreto)	85
Anexo G: desvio padrão das velocidades dos carros versus densidade de carros (modelo discreto)	86
Anexo H: desvio padrão das velocidades das motos versus densidade de carros (modelo discreto)	87
Anexo I: sugestão de Martin Treiber para melhor representar o deslocamento dos veículos.....	88

1 INTRODUÇÃO

A segunda revolução industrial, período que compreende a segunda metade do século XIX até a primeira metade do século XX, foi marcada por uma série de avanços tecnológicos, como o desenvolvimento do motor de combustão interna e o uso de petróleo como fonte energética. Essas invenções juntamente com o aumento de produtividade devido às técnicas desenvolvidas pela escola americana de produção, comumente representada por Frederick Winslow Taylor e Henry Ford, possibilitaram a fabricação em massa de automóveis. Tais fatos resultaram na popularização de carros devido aos preços mais baixos e acessíveis.

Franz e Seberino (2012) realizaram uma pesquisa bibliográfica sobre a história do trânsito e sua evolução. Nesse estudo é exposto que a segunda metade do século XX é de grande importância para indústria automobilística brasileira, pois o uso de automóveis cresceu devido à política de estado de investimento nesse setor. Além disso, eles destacam o Fundo Rodoviário Nacional e a fundação da PETROBRAS, que possibilitaram o uso de impostos para construção de estradas e a produção de asfalto em grande quantidade, respectivamente. Segundo eles, até os dias atuais, o Brasil nunca teve um sistema de trânsito que atendesse as necessidades existentes, pois, desde o período citado anteriormente, o crescimento da malha viária ocorre de forma desorganizada e não planejada. Mesmo com uma infraestrutura adequada em cidades grandes e pequenas também é necessário realizar gestão de tráfego de veículos. Apenas a ampliação de infraestrutura viária não é uma solução para longo prazo, pois o aumento de capacidade das vias é acompanhado por um incentivo à demanda de tráfego das vias que reduz grande parte (ou totalmente) a capacidade adicionada (GOMIDE; MORATO, 2011). Existem medidas que podem ser tomadas para melhorar o tráfego como reduzir o limite de velocidade no trânsito e incentivar o uso de ônibus e bicicletas. Por exemplo, para o transporte de 40 passageiros seria necessário um ônibus (50 m²) ou 48 carros (840 m²), se considerado uma média de 1,2 pessoas por automóvel (GALLO, 2015).

Atualmente, grandes centros urbanos sofrem diariamente com o congestionamento devido ao grande fluxo de veículos e planejamento inadequado. Contudo, não se pode afirmar que congestionamento é problema exclusivo de países subdesenvolvidos ou falta de planejamento em metrópoles. Lewis (2008), citado por Wu, Xue e He (2015), estima que o gasto com combustível e perda de tempo devido

ao congestionamento de veículos na área urbana de Nova Iorque e Los Angeles nos anos 2006 e 2007 foi aproximadamente 10 bilhões de dólares. Em um cenário mais amplo, Schrank, Eisele e Lomax (2012), mencionado por Mitoi, Moses e Ozguven (2014), afirmam que em 2011 o congestionamento nos Estados Unidos resultou em 5,5 bilhões de horas a mais de viagem e a compra de 2,9 galões de combustíveis extras, o que resultou em custos devido ao congestionamento de 121 bilhões de dólares.

O congestionamento não apenas resulta em perdas monetárias representadas por perda de tempo e maior consumo de combustível, mas também por maior emissão de gases poluentes e intensificadores do efeito estufa, aumento de doenças respiratórias e estresse em que os motoristas estão submetidos diariamente. O perfil atual do tráfego brasileiro consiste em um fluxo misto, onde principalmente carros e motocicletas coexistem. Segundo dados do DENATRAN (2016), Departamento Nacional de Trânsito, até outubro de 2016 o número automóveis e motocicletas representavam 77% da frota de veículos brasileiros. No período citado haviam 51.017.596 automóveis (54% da frota) e 20.821.872 motocicletas (22% da frota). Cidades grandes e pequenas possuem diferentes composições da frota de veículos. Os dados do DENATRAN (2016) mostram que em Recife existem 2,8 carros para cada moto. No interior de Pernambuco existem cidades que possuem mais motocicletas do que carros, como em Salgueiro (1,4 motos para cada carro), Serra Talhada (1,6 motos para cada carro) e Floresta (1,9 motos para cada carro). O uso de motocicletas como táxi representa uma forma alternativa de transporte com bastante aceitação nas cidades do interior, pois nas cidades pequenas que existem transporte público o serviço é precário, muitas áreas não são atendidas e nem possuem infraestrutura viária (RICARDO SILVA; ALVES SILVA, 2013).

Os gases poluentes emitidos de forma direta pelos veículos motorizados não apenas representam danos ao meio ambiente, mas também danos à saúde. Pode-se citar os seguintes possíveis efeitos devido a sua exposição: contaminação do solo, dano a vegetação e chuva ácida, para danos ambientais; e doenças pulmonares, infecção respiratórias e asma, para efeitos nocivos à saúde (MENDES, 2004). Os veículos também emitem gases de efeito estufa (GEE), que contribuem para a intensificação do aquecimento global. Usando-se o ano de 2013 como referência, o setor de transportes representa a maior parte de emissões de dióxido de carbono com

47%. Nesse setor, 28,8% das emissões de CO₂ são provenientes de automóveis, 2,9% de motos e 10,7% de ônibus (IEMA, 2015).

Acidente no trânsito é uma das maiores causas de morte no mundo, com 1,25 milhões de mortes em 2013, quando 90% das mortes ocorreram em países em desenvolvimento (WHO, 2015). Os países em desenvolvimento representam 82% da população mundial e 46 % dos veículos registrados (WHO, 2015), contudo países desenvolvidos e em desenvolvimento possuem, no geral, frotas de veículos com composições diferentes. No Brasil 29% das residências possuem veículos de duas rodas, enquanto nos Novos Tigres Asiáticos (Tailândia, Indonésia, Vietnã e Malásia) esse valor é superior a 80% (Statista, 2014a). Já em países desenvolvidos como Estados- Unidos, França, Japão e Alemanha mais de 80% das residências possuem automóveis (Statista, 2014b).

É possível associar o grande número de acidentes à grande quantidade de veículos de diferentes portes trafegando conjuntamente com a falta de planejamento da malha viária e ausência de campanha e trabalhos visando educação no trânsito. O Brasil possui diversas leis, objetivando uma maior segurança, que regulamentam o tráfego de veículos. A legislação relacionada com o tráfego de veículos inclui aspectos como o uso de cinto de segurança, uso de celulares, uso de capacetes em motocicletas, ingestão de bebidas alcoólicas, limite de velocidade máxima e restrição de crianças para sentar no banco da frente nos automóveis. Dessa maneira, infere-se que um ambiente mais seguro não pode ser alcançado apenas por uma legislação específica, visto que dados de 2015 da Organização Mundial de Saúde (OMS) indicam que o Brasil é o terceiro país em número de mortes no trânsito. Muitas medidas de segurança podem ser tomadas para preservar a integridade física dos motoristas, como o uso de capacetes e cinto de segurança, proibição do consumo de álcool e aplicação de padrão de segurança para veículos. Entretanto, existem medidas simples de planejamento de trânsito que também podem ser eficazes, como a redução de velocidade da via. Por exemplo, segundo o Departamento Estadual de Trânsito de Goiás (DETRAN-GO,2005) a chance de um pedestre adulto morrer ao ser atingido por um veículo a 60 km/h é aproximadamente 70%, enquanto a chance reduz para menos de 15% se o veículo estiver a 40 km/h.

Os meios de transportes motorizados podem ser classificados como coletivos e individuais. Embora os meios de transportes individuais correspondam à maior parte da frota brasileira, o transporte coletivo tem papel significativo na locomoção de

peças. Dados ANTP (2016a), Associação Nacional de Transportes Públicos, mostram que os ônibus representam 25% de todas as viagens realizadas por meios de transportes (motorizados e não motorizados) no Brasil, enquanto o número de viagens realizadas por carros e motos representam 27% e 4%, respectivamente. As viagens restantes realizadas no país são efetuadas por trens, metrô, bicicletas e a pé. No entanto, o uso de automóveis e motocicletas é cada vez mais atrativo para a população, pois o transporte coletivo é comumente associado a menor conforto, falta de segurança e maior perda de tempo. As motocicletas são cada vez mais utilizadas devido aos preços mais acessíveis e maior agilidade de deslocamento, como ocorre em corredores formados entre filas de carros. Essa tendência pode ser verificada com uma comparação entre dados de 2003 e 2014, período em que o número de viagens de motocicletas quase triplicou e o número de viagens de automóveis cresceu em uma taxa superior ao número de viagens de ônibus (ANTP,2016b).

Segundo o *Institute of Traffic Engineering* (ITE) a engenharia de tráfego é a fase de engenharia de transportes responsável pelo planejamento, projeto e operação de vias. Esse ramo é cada vez mais importante para o aspecto socioeconômico da sociedade, pois pode reduzir problemas de grandes centros urbanos causados pelo congestionamento, como: acidentes, poluição ambiental, redução de qualidade de vida e desperdício de combustível (HENCLEWOOD, 2007).

A ciência de tráfego possibilita a análise o fluxo de veículos em diferentes escalas: microscópica, macroscópica ou mesoscópica. Isto é, modelando o fluxo de veículos detalhadamente - contabilizando todos os agentes individualmente, considerando todos os veículos como um único sistema, ou um misto entre os dois modelos, respectivamente. Esse trabalho lidará com análise microscópica de tráfego misto, pois é de interesse a interação de diferentes tipos veículos em uma via. Tal interação é de grande importância para análise do comportamento dos veículos no trânsito.

O uso de modelos para descrever o tráfego de veículos não é novidade, desde a década de 50 vários modelos foram desenvolvidos. A necessidade de planejamento de tráfego surgiu com a necessidade de mitigar os problemas sociais, econômicos e ambientais que a grande quantidade de veículos resultou. Tais modelos inicialmente se desenvolveram a partir de análise de dados empíricos e concepção de modelos matemáticos que relacionavam densidade, velocidade e fluxo. Ainda, novos conceitos

foram formulados para ajudar na análise, como: espaçamento entre carros, distância de segurança, aceleração, densidade e fluxo.

Entretanto, ainda existem importantes fatores a serem estudados para melhor representação da interação entre veículos. Comumente, o tráfego era classificado em duas fases, trânsito fluído e congestionado. Contudo, entre 1996 e 2002, Boris Kerner desenvolveu a teoria de três fases do tráfego (VAN WAGENINGEN-KESSELS et al., 2014). Nessa nova abordagem ele considerou a fase de congestionamento com dois comportamentos distintos, trânsito intenso, mas com velocidade constante e a ocorrência de ondas de congestionamento, isto é, propagação de zonas mais lentas no sentido contrário ao fluxo (KERNER, 2009). Um comportamento comum de se observar no trânsito é a maior distância que carros com altas velocidades têm em relação aos veículos em sua frente, levando a uma menor densidade na via. Velocidades mais altas também resultam em frenagens e tempos de retomadas maiores em situação de tráfego intenso. Dessa maneira, dependendo do comportamento da motorista, uma região com uma determinada densidade pode apresentar velocidades médias constantes ou variáveis.

A utilização da engenharia do tráfego permite tentar adequar a via para as condições de fluxo diário, adequar o fluxo de veículos para as limitações da via, planejar uma via para determinada demanda ou estudar as características de tráfego urbano já existente. Essas ações podem ser realizadas por meio de análises oriundas de modelos de tráfego. Dessa maneira, o estudo do comportamento de veículos no tráfego misto atrelado ao consumo de combustível, emissão de gases poluentes e intensificadores de efeito estufa representa uma questão associada ao bem-estar social e atendimento a crescente conscientização de desenvolvimento sustentável. Contudo, sabe-se que os modelos matemáticos que representam o tráfego possuem suas limitações, sejam elas devido a condições simplificadoras ou custo computacional. Assim, é de fundamental importância considerar diferentes condições de entrada (densidade veículos e velocidade máxima, por exemplo) e modelos de tráfego em um mesmo cenário para investigar suas influências, como será realizado neste trabalho.

Modelos de tráfego também podem ser utilizados para outras ciências, visando melhorar a qualidade de vida, segurança e desempenho tecnológico. Uma abordagem da engenharia mecânica seria a utilização de modelos microscópicos para projetar um veículo próprio para o meio urbano. Isto é, considerar as limitações de movimento,

faixa característica de velocidade e comportamento do condutor para determinar propriedades do motor e aerodinâmicas para alcançar o melhor desempenho para esse propósito: menor consumo de combustível e menor emissão de gases poluentes.

Em adição, o estudo do tráfego permite um melhor planejamento urbano, como observado recentemente na cidade de São Paulo. Em julho de 2015 as velocidades máximas foram reduzidas em diversas localidades da cidade. A velocidade máxima foi reduzida de 90 km/h para 70 km/h em pistas expressas e a velocidade máxima foi reduzida de 70 km/h para 50 km/h em pistas locais, por exemplo. Essas medidas visavam não só melhorar o trânsito, mas também reduzir a frequência de acidentes (ou torná-los menos letais quando ocorressem). Segundo levantamento feito pela Folha de S. Paulo (2016), nos seis primeiros meses de 2016 houve uma queda de 21% no número de fatalidades decorrente do trânsito se comparado ao mesmo período do ano anterior. Embora a redução de velocidade seja uma tendência observada em grandes cidades do mundo como em Paris, Nova Iorque e Londres, a medida foi impopular na cidade de São Paulo. A população interpretou a redução de velocidade como uma maneira da cidade arrecadar recursos financeiros por meio de multas. Em 2016, o candidato a prefeito da cidade de São Paulo, João Doria, ganhou a eleição possuindo como uma de suas propostas o aumento dos limites de velocidade. O aumento de velocidade nas pistas expressas e locais foi efetivado em 25 de fevereiro de 2017, porém foi necessário a Justiça de São Paulo derrubar um processo judicial da Ciclocidade (Associação dos Ciclistas Urbanos de São Paulo) que pedia a suspensão do aumento de velocidade (ALVES, 2017).

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo analisar o fluxo de veículos individuais sob diferentes condições de tráfego utilizando um modelo de tráfego microscópico contínuo.

O grupo de pesquisa “LOST - Laboratório de Otimização de Sistemas Térmicos e de Estudos Sobre Bicicletas e Motocicletas”, da Universidade Federal de Pernambuco, utiliza um modelo de tráfego microscópico discreto proposto por Meng et al. (2007). Os autores citados anteriormente idealizaram um modelo para simular o tráfego de carros e motos na China (considerando a velocidade máxima para automóveis de 135 km/h e velocidade máxima para motocicletas de 54 km/h). Este trabalho também objetiva verificar se o uso de um modelo mais complexo representa diferenças significativas no fluxo de veículos individuais. Neste trabalho são

consideradas quatro combinações de velocidades máximas para os veículos, os carros e motocicletas podem alcançar no máximo 54 km/h ou 135 km/h. As velocidades máximas para carros e motos foram escolhidas com base no estudo de Araújo (2017). Essas combinações de velocidades máximas possibilitam uma análise do impacto da redução ou aumento da velocidade máximas no fluxo de veículos.

O modelo computacional utilizado neste trabalho corresponde apenas a um modelo de tráfego, isto é, as forças que atuam no veículo e as características do motor não são consideradas.

1.1.1 Objetivo Geral

Análise computacional do fluxo entre automóveis e motocicletas considerando a influência da densidade de veículos, velocidade máxima, troca de faixa e modelo de tráfego utilizado.

1.1.2 Objetivo específico

- Comparar os resultados com a dissertação de mestrado “Análise do Tráfego Misto de Motocicletas e Automóveis Considerando uma Variedade de Métricas, Escalas e Pontos de Vista” de Fernando Wesley Cavalcanti de Araújo (2017), que utiliza um modelo totalmente discreto

1.1.3 Metas

- Analisar a influência do modelo microscópico contínuo no espaço no cenário utilizado;
- Analisar o impacto de diferentes parâmetros no fluxo de veículos, isto é, densidade de veículos, troca de faixa e velocidade máxima

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos. No primeiro capítulo é feita introdução, com apresentação da motivação, objetivos e metas. O segundo capítulo é responsável pela fundamentação teórica com a exposição dos conceitos e elementos utilizados durante o trabalho. O capítulo 3 traz uma revisão bibliográfica sobre a modelagem de tráfego misto. O quarto capítulo expõe a metodologia utilizada para obtenção de resultados. No capítulo 5, os resultados são apresentados e discutidos. No sexto, e último capítulo, são expostas as conclusões obtidas e sugestões para trabalhos futuros. O trabalho ainda conta com seções de Apêndices e Anexos, onde todos os resultados obtidos e comparados estão expostos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção será exposta a teoria necessária para o entendimento do trabalho. Inicialmente, será realizado uma introdução aos principais conceitos relacionados à engenharia de tráfego. Posteriormente, os principais tipos de modelos de tráfego serão apresentados, sejam eles discretos ou contínuos. Deve-se ressaltar que o livro “*Traffic Flow Dynamics*” publicado em 2013 por Martin Treiber e Arne Kesting foi utilizado como principal fonte da literatura nesta seção.

2.1 Introdução à engenharia do tráfego

A descrição do fluxo de tráfego por meio de modelos matemáticos representa uma técnica capaz de estudar o comportamento de fluxo de veículos de maneira global ou detalhada. Todavia, é necessário reconhecer os ramos de estudo que a engenharia do tráfego pode englobar. Segundo Treiber e Kesting (2013) a distinção entre dinâmica de fluxo de tráfego e outros campos da engenharia de tráfego é a escala de tempo utilizada. O *planejamento de transportes*, por exemplo, é um ramo que lida com escala de horas e dias. Dados obtidos dessa maneira são muito úteis para planejamento e replanejamento de vias, estudo de demanda de fluxo e estrutura demográfica. Contudo, o foco desse trabalho será o campo da *dinâmica de fluxo*, o qual apenas lida com escala de tempo de segundos até poucas horas. Esse ramo da ciência está relacionado com o tempo de reação para acelerar ou desacelerar, ciclo temporal de sinais de trânsito, consumo de combustível, emissão de CO₂ e formação de ondas de congestionamento (*stop-and-go waves*).

No campo da teoria de fluxo de tráfego há dois principais modos de análise: microscópica e macroscópica, conforme Figura 1. O modelo macroscópico se iniciou na década de 50, possuindo sua fundamentação teórica realizada por Lighthill e Whitman em 1955, os quais descreveram o tráfego como um fluido em um duto (GAZIS, 2006). Essa abordagem tem a vantagem da analogia do comportamento de fluidos, possibilitando que a velocidade de fluxo seja determinada de maneira que obedeça a equação da continuidade e relações hidrodinâmicas. Esses modelos têm o benefício de necessitar de menos tempo para simulação computacional, uma vez que não é necessário representar todos os veículos e suas respectivas trajetórias. A abordagem macroscópica é útil para estudo do processo como um todo, como a evolução de uma região de engarrafamento e velocidade média em uma região.

- Fluxo de tráfego - $Q(x, t)$: número de veículos (N) que passam em um determinado local de uma via (Δx) em um intervalo de tempo definido (Δt), conforme Equação 1.

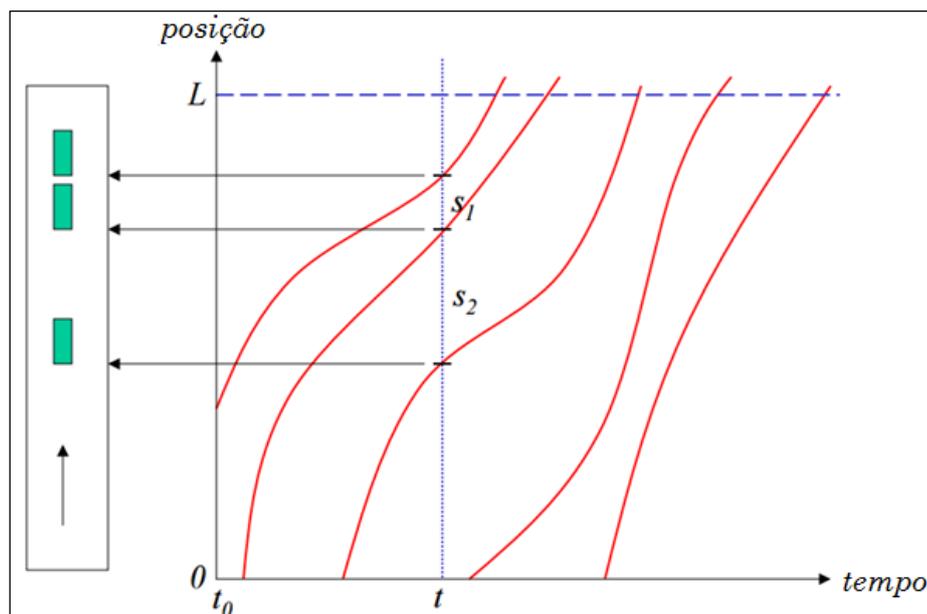
$$Q(x, t) = \frac{N(x, t)}{\Delta t} \quad (1)$$

- Densidade de tráfego - $\rho(x, t)$: número de veículos presentes em uma determinada extensão da via em determinado tempo. Pode ser estimado a partir do fluxo ($Q(x, t)$) e velocidade média ($V(x, t)$) usado a Equação 2 (relação hidrodinâmica).

$$\rho(x, t) = \frac{Q(x, t)}{V(x, t)} \quad (2)$$

O diagrama espaço-tempo, apresentado na Figura 2, é de grande utilidade para análise de tráfego, pois várias características do fluxo podem ser obtidas com seu uso. Nesse diagrama o percurso de cada veículo é demonstrado em relação ao tempo, permitindo assim a visualização da formação de ondas de congestionamento, tempos de parada e obtenção de dados além de fluxo e densidade, como os seguintes:

Figura 2 - Diagrama espaço-tempo

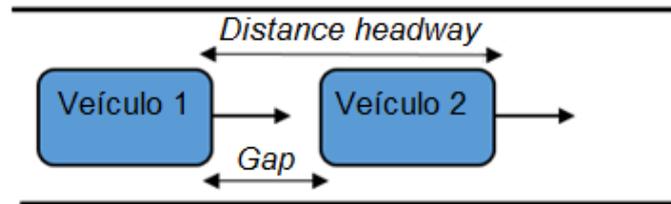


Fonte: CHABINI e ODONI (2002)

- Afastamento temporal (*time headway*): intervalo temporal entre a parte frontal de dois veículos, informa o tempo que dois veículos estão separados.

- Afastamento (*gap*): informa a distância entre veículos na via, representando a distância entre a parte dianteira do carro que segue e traseira do veículo líder, conforme Figura 3.

Figura 3 - Representação gráfica do espaçamento e afastamento

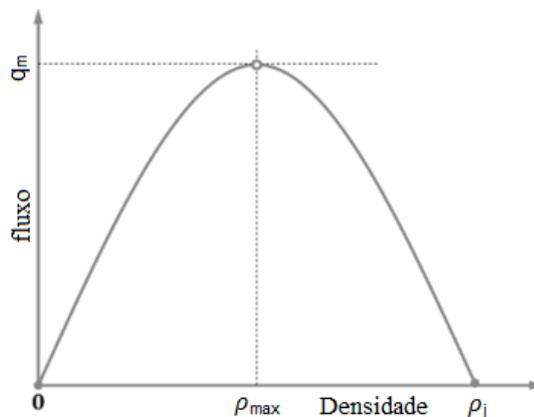


Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

- Espaçamento (*distance headway*): distância entre dois veículos, sendo composto pela distância entre a parte traseira e a parte dianteira mais o comprimento do carro que está na frente, conforme Figura 3.
- Velocidade local ou velocidade instantânea: representa a velocidade da parte dianteira. É dado pela derivada da trajetória em certo tempo.

Os diagramas fundamentais são de grande importância para análise de tráfego, pois representam as relações entre fluxo, densidade e velocidade. Greenshields, pioneiro nos anos 30 na obtenção de dados para análise de tráfego, propôs um modelo que representa a relação entre velocidade e densidade de forma linear. Em seu modelo o diagrama fluxo-densidade é representado por uma função parabólica, conforme a Figura 4. O símbolo q_m representa o fluxo máximo de veículos para dada densidade, ρ_{max} .

Figura 4 - Diagrama Fundamental



Fonte: Adaptado de NI (2015)

É possível notar que quando a densidade se aproxima de zero o mesmo ocorre com o fluxo, pois a via está praticamente vazia. Contudo, com uma grande densidade, o fluxo também se aproxima de zero, pois não há espaço para trafegar. A situação em que todos os veículos estão parados em alta densidade é representada por ρ_j . A relação velocidade-densidade, por exemplo, é útil para análise em escala microscópica, pois demonstra como a unidade veículo-motorista ajusta a velocidade em função do comportamento do tráfego ao seu redor (NI, 2015). Em uma análise macroscópica, o diagrama fluxo-densidade representa o comportamento médio e a formação de zonas de congestionamento. Treiber e Kesting (2013), no livro “Traffic Flow Dynamics”, afirmam que quando o diagrama fluxo-densidade descreve a relação em regime permanente em tráfego homogêneo é chamado de diagrama fundamental. Caso represente uma situação não estacionária de fluxo heterogêneo é apenas chamado de diagrama fluxo-densidade. Nesse trabalho o termo diagrama fundamental será utilizada para se referir ao diagrama fluxo-densidade, conforme a grande parte da literatura.

2.2 Principais modelos microscópicos

As formulações matemáticas dos modelos microscópicos incluem o modelo veículo seguidor (*car following model*) e autômato celular (*cellular automaton*). Nesses modelos o fluxo é modelado em termo da parametrização de cada veículo. Os modelos chamados de veículo seguidor são compostos por dois agentes, o carro líder e o carro que o segue. É importante salientar que o que é modelado não é o veículo, mas o conjunto veículo-motorista. Esses modelos só são apropriados quando há presença de outros veículos, logo não podem ser usados para simular situações de fluxo livre (TREIBER; KESTING, 2013).

Esses modelos são chamados de modelos mínimos quando descrevem apenas o movimento longitudinal, desconsiderando um comportamento mais realista do motorista. A resposta do motorista é descrita apenas em termo do afastamento (A_s), posição do carro líder (X_l), posição do carro seguidor (X_s) e comprimento do carro líder (Cl), conforme Equação 3.

$$A_s = X_l - Cl - X_s \quad (3)$$

Dessa maneira, a aceleração do carro seguido depende de sua velocidade, afastamento e diferença entre a velocidade do carro líder. Apesar de esse modelo ser a base para esse tipo de modelagem, ele resulta em acelerações irreais.

2.3 Modelo veículo seguidor: modelos completos

Os modelos veículo seguidor são chamados de completos quando são capazes de descrever todas as situações em uma via, como: seguir veículos em condições de equilíbrio e não equilíbrio, aproximação de carros lentos ou parados e semáforo vermelho. Isso pode ser feito modelando o comportamento do motorista utilizando, pelo menos, as seguintes suposições:

1. Se não houver obstáculo ou veículos, o veículo seguidor acelerará para velocidade desejada;
2. A aceleração diminui em função do aumento da própria velocidade;
3. A aceleração aumenta em função da distância do veículo líder;
4. A aceleração aumenta com a velocidade do veículo líder, mas decresce à medida que se aproxima do veículo líder;
5. Uma distância de segurança é sempre mantida entre os veículos.

O modelo de Gipps, por exemplo, utiliza o conceito de velocidade de segurança, a qual depende da distância em relação ao veículo líder. Esse modelo usa mais duas suposições: a frenagem é sempre constante e existe um tempo de reação. A velocidade é obtida por meio de uma função interativa, que depende principalmente da velocidade de segurança. Em adição a essa classe de modelos, há o modelo de Krauss, o qual é uma modificação do modelo de Gipps. Nesse modelo um termo estocástico é introduzido para representar diferentes comportamentos ao se dirigir. Além disso, a velocidade e aceleração variam em intervalos de tempo determinados, pois é discreto no tempo. Ainda nessa classe, há o modelo IDM (Intelligent Driver Model), o qual, segundo Treiber e Kesting (2013), resulta em perfis de aceleração reais e comportamentos razoáveis para todas as situações em via única. Esse modelo também utiliza mais hipóteses, como: sob condições normais, a frenagem é suave. Contudo em situações de perigo a frenagem alcança um nível que pode resultar em desconforto para o passageiro até que a situação crítica seja eliminada, conforme Equação 4.

$$v = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right] \quad (4)$$

Onde: s^* é o afastamento desejado, s é o afastamento atual, a representa máxima aceleração, v_0 é a velocidade desejada, v é a velocidade atual e δ define como ocorre a frenagem. Esse modelo pode possuir o mesmo perfil de aceleração do modelo de Gipps se δ é infinito.

2.4 Autômato celular

Autômato celular (AC) representa outra classe de modelos microscópicos em que o tempo e espaço são variáveis discretas. Esse é o tipo de modelo utilizado pelo o grupo de pesquisa “LOST - Laboratório de Otimização de Sistemas Térmicos e de Estudos Sobre Bicicletas e Motocicletas”. Nesse modelo o espaço é dividido em células e o tempo em intervalos. Dessa maneira, o tempo e o espaço são atualizados uma função de múltiplos inteiros. O primeiro modelo de fluxo de tráfego que utilizou essa abordagem usou o método chamado regra 184, a qual possui esse nome devido à possibilidade de ocupação de células representada em números binários. Considerando três células para caracterizar o movimento de um elemento com sua vizinhança, é possível concluir que há oito configurações possíveis do estado do elemento central. A representação em base binária dessas oito configurações resulta em 184, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Regra 184 - Autômato celular elementar

Estado atual	111	110	101	100	011	010	001	000
Novo estado (centro da célula)	1	0	1	1	1	0	0	0

Fonte: Treiber e Kesting (2013)

No contexto de tráfego, existem duas possibilidades do movimento do veículo: ocupar a célula seguinte vazia ou permanecer no mesmo lugar. Nesse modelo 1 representa célula ocupada e 0 célula vazia. De forma geral, a regra 184 pode ser descrita da seguinte maneira: se a distância entre o veículo e o carro a sua frente for maior que 1, o veículo pode avançar um espaço com velocidade 1, caso contrário o veículo permanece onde está com velocidade zero (GARCIA NETO, 2014). Esse modelo é a representação mais básica do tráfego usando AC, o qual apenas permite duas opções de velocidade, 0 ou 1.

Nagel e Schreckenberg (1992) publicaram um novo modelo considerando elementos estocásticos, conhecido como modelo NaSch. Essa nova abordagem adiciona um parâmetro p , que representa a probabilidade do veículo que está trafegando com a velocidade máxima permitida em continuar no mesmo estado ou diminuir a velocidade. Essa ação pode ser interpretada como a variação de comportamento humano ou influências externas (NAGEL; SCHRECKENBERG, 1992). Para uma configuração qualquer o sistema é atualizado seguindo quatro regras paralelamente para todos os veículos:

1. Haverá aceleração se a velocidade atual é menor que a velocidade máxima. A aceleração será de uma unidade;
2. Se o veículo da célula seguinte está a uma distância inferior que a sua velocidade, a velocidade é reduzida para o número de células igual a distância entre os veículos;
3. Existe uma probabilidade p do veículo reduzir sua velocidade em uma unidade;
4. Todos os veículos avançam a quantidade de células que correspondem a sua velocidade.

Diferentemente da regra 184, os veículos podem trafegar com velocidade múltipla de um inteiro entre zero e velocidade máxima. Para idealização desse modelo foi considerado que cada veículo ocupa 7,5 m, e esse valor deveria ser o tamanho de cada célula. Um veículo que é capaz de percorrer quatro células por segundo, estará trafegando a 108 km/h, por exemplo. O modelo NaSch possui limitações, pois seguindo as regras impostas, o veículo pode desacelerar da velocidade máxima para zero em um segundo. Inclusive, o veículo poderá trafegar com a velocidade inferior a máxima possível, pois não considera que o veículo líder também poderá se mover (GARCIA NETO, 2014).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os modelos computacionais de tráfego possuem diferentes complexidades e comportamentos devido às suas limitações. Entretanto, podem ser considerados representativos qualitativamente para estudo em escala microscópica e macroscópica. Zheng, Suzuki e Fujita (2012) conduziram um estudo utilizando dados reais de uma autoestrada na Califórnia para calibração e validação dos seguintes modelos: Gipps, Newell, OVM (*Optimal Velocity Model*) e NaSch. Os autores concluíram que NaSch é o único modelo que reproduziu satisfatoriamente o tráfego sob condições diferentes da calibração. Ainda, o modelo de Gipps e OVM resultam em velocidades negativas e colisões quando aplicados em situações diferentes da calibração. Contudo, o modelo de Gipps resultou melhor resultado para a situação em que foi calibrado.

Seguindo a mesma linha de estudo, Kanagaraj et al. (2013) avaliaram os modelos de Gipps, IDM e Krauss sob condição de tráfego misto em uma via com quatro faixas na Índia. Os resultados evidenciaram que o modelo de Gipps resulta melhor desempenho em condição de tráfego misto, pois apresenta menor nível de erro em escala macroscópica. Porém, o menor erro em velocidade para carros foi alcançado usando o modelo de Krauss. Já as motos apresentaram menor erro em velocidade com o uso do modelo de Gipps.

A definição dos parâmetros do modelo de tráfego utilizado tem impacto no comportamento do fluxo de veículos. Kesting e Treiber (2008), no artigo "*How reaction time, update time and adaptation time influence the stability of traffic flow*" analisaram a influência do tempo na estabilização do sistema. Os resultados desse artigo são válidos para os modelos OVM, IDM, Newell e Gipps. O tempo de reação, que pode ser interpretado na simulação como o período que os motoristas não prestam atenção ao dirigir ou como o tempo que o motorista leva para reagir para uma mudança do veículo líder, tem influência na estabilidade. Valores altos para esse parâmetro resultam em um perfil de onda de alta frequência para aceleração dos veículos.

Meng et al. (2007), um dos artigos utilizados como base neste trabalho, estudaram o comportamento do tráfego misto entre carros e motos. A utilização de um modelo de tráfego discreto baseado no modelo de NaSch permitiu uma análise qualitativa da influência da troca de faixa das motos no comportamento do tráfego de veículos. Nesse estudo foi concluído que a regra de prioridade de carros para a faixa

na esquerda não representa um impacto para o fluxo de carros sob condições periódicas de contorno.

Luo et al. (2013) propuseram um novo modelo AC para estudar a influência da posição lateral das bicicletas no fluxo de veículos, entre carros e bicicletas. Nesse modelo a ocupação lateral do carro está diretamente relacionado com sua velocidade. Foi verificado que as bicicletas preferem se locomover ao lado de carros parados ou lentos e que os resultados dos modelos AC propostos anteriormente têm o valor de fluxo de carros superestimado sob mesmas condições de tráfego.

Garcia Neto (2014) utilizou o modelo de tráfego desenvolvido por Meng et al. (2007) para adicionar a dinâmica do veículo e o motor. Em seu trabalho foi possível investigar a quantidade de simulações necessárias para estabilizar o sistema, características do tráfego para fluxo máximo de passageiros, consumo de combustível e emissão de dióxido de carbono.

Araújo (2017) usou o modelo de Garcia Neto (2014) para realizar novas investigações considerando o fluxo de veículos, emissão de dióxido de carbono e consumo de combustível. Em seu estudo, “Análise do Tráfego Misto de Motocicletas e Automóveis Considerando uma Variedade de Métricas, Escalas e Pontos de Vista”, foram analisadas quais seriam as melhores condições de tráfego para diferentes métricas (velocidade média, custos mensais para os motoristas e emissão e poluentes) e pontos de vistas (individual e social).

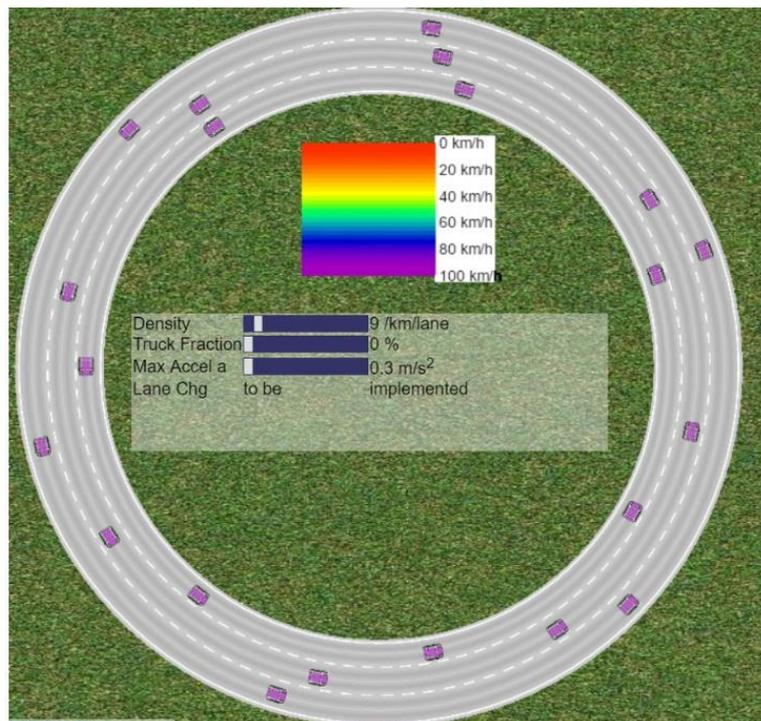
Sugiyama et al. (2007) realizaram uma análise experimental para estudar os mecanismos físicos que resultam em congestionamento sem a presença de efeito de gargalo (*bottleneck*). Esse efeito é causado em vias por obras, acidentes e redução do número de faixas, por exemplo. O estudo foi realizado em uma pista circular com 22 carros igualmente espaçados em uma única faixa de 230 m e contava com uma câmera que registrava fotografias em 360 graus. Teve-se como resultado o fato de que o sistema se estabilizou com seções na pista em que carros se concentravam parados e que os motoristas buscavam trafegar com velocidades superiores a determinadas inicialmente para todos os veículos. A concentração de veículos se propagava com velocidade constante contra o sentido do fluxo, fenômeno chamado de ondas de congestionamento.

Martin Treiber desenvolveu uma ferramenta que pode ser acessada *online* para o melhor entendimento do tráfego, trata-se de um simulador disponível em <http://www.traffic-simulation.de> que permite a visualização e mudança de parâmetros

para os seguintes cenários: pista circular, seção na pista interrompida para obra, rodovia com pista de acesso e saída.

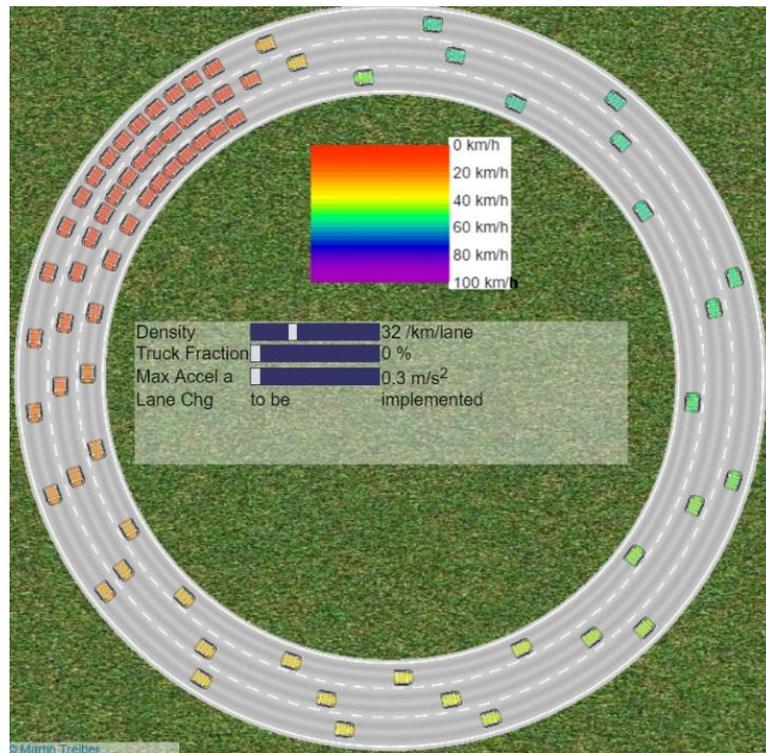
A utilização do simulador permite a melhor compreensão das influências das variáveis do tráfego a nível qualitativo. As Figuras 5 e 6 representam um cenário semelhante ao proposto experimentalmente por Sugiyama et al. (2007). Na Figura 5, a simulação está sendo realizada para baixa densidade de carros, 9 carros/km/via, que podem trafegar com velocidade máxima de 108 km/h. Observa-se que os carros trafegam livremente com velocidade máxima (cor roxa). Entretanto, na figura 6, a densidade dos carros é 32 carros/km/faixa. Nota-se que existe uma região em que inúmeros carros permanecem parados (cor vermelha) e que nas outras regiões os carros trafegam com velocidades inferiores a velocidade máxima (cor roxa). Esses resultados podem também ser observados se a densidade da via for mantida constante em 25 carros/km/faixa e a velocidade máxima do carro for limitada em 40 km/h e 80 km/h, respectivamente. Essas simulações sugeridas têm concordância com estudo experimental citado anteriormente, mostrando que a vontade de correr resulta na formação de ondas de congestionamento. Para o tráfego fluir melhor cada motorista deve correr menos no espaço livre, e com isso evitar desacelerações bruscas.

Figura 5 - Simulação no MovSim com densidade de 9 carros/km/via



Fonte: <http://www.traffic-simulation.de/index.html>

Figura 6 - Simulação no MovSim com densidade de 32 carros/km/via



Fonte: <http://www.traffic-simulation.de/index.html>

4 METODOLOGIA

O presente trabalho é definido como uma pesquisa explicativa, pois procura responder qual é a influência do modelo de tráfego escolhido no comportamento geral da simulação, assim como investigar a influência da troca de faixa e da velocidade máxima da moto e do carro no fluxo de veículos. Para obtenção do objetivo geral deste trabalho, as seguintes fases são necessárias:

- Seleção do pacote computacional a ser utilizado;
- Modificações do código base para obtenção dos dados desejados: velocidade média, densidade e desvio padrão;
- Calibração dos parâmetros do modelo de tráfego selecionado;
- Simulação de tráfego misto sob diferentes condições.

A fase inicial é constituída pelo estudo dos pacotes computacionais de tráfego disponíveis em código aberto. Neste trabalho a seleção do software deve atender os seguintes critérios:

- Gratuidade;
- Código aberto;
- Simulação microscópica;
- Suporte teórico;
- Suporte da comunidade científica.

4.1 Seleção do *software* e considerações iniciais

A primeira fase referente à escolha do software foi baseada inicialmente em três parâmetros: gratuidade, código aberto e simulação microscópica. Dessa maneira três possibilidades foram encontradas: MATSim, SUMO e MovSim.

MATSim (Multi Agent Transport Simulation) é um pacote computacional para uso apropriado para grandes escalas. Uma das mais importantes considerações feitas por seus desenvolvedores é que não são os veículos que geram tráfego, mas os motoristas (GIL, 2011). Dessa maneira, a abordagem utilizada considera que para otimizar o tráfego o que deve ser feito não é achar o melhor caminho para cada veículo, mas considerar a demanda diária de tráfego.

Apesar de ser classificado como modelo microscópico, MATSim não permite análise de interação entre os veículos. Isso ocorre, pois é modelado para resultar em menor tempo de simulação, utilizando teoria de filas. Apenas dois momentos são

contabilizados para os veículos em uma via, ao entrar e ao sair dela. Um veículo ao entrar em uma via é colocado no fim da fila de espera. Esse veículo permanece na via até se tornar o primeiro da fila ou não poder trafegar mais em velocidade livre. O que ocorre nesse intervalo não é contabilizado. O fluxo de carro deve obedecer a parâmetros configurados inicialmente, como capacidade da via. Além disso, o MATSim utiliza a demanda inicial baseada em planos e atividades de cada veículo para replanejar alternativas até convergir para melhor solução em tráfego. Esse pacote foi desconsiderado por não permitir a análise de interação entre cada veículo.

SUMO (Simulation of Urban Mobility) é um software de código aberto que começou a ser desenvolvido em 2000 utilizando C++ pelo Instituto de Pesquisa de Transportes (IVF) na Alemanha. Esse software representa uma ferramenta computacional de tráfego contínua no espaço e discreta no tempo que utiliza a extensão do modelo de Gipps, o modelo de tráfego microscópico desenvolvido por Stefan Krauss (KRAJZEWICZ et al., 2002). Apesar de utilizar um modelo microscópico, possibilita a análise de grandes cenários em tempo real em uma faixa entre 100.000 a 200.000 mil veículos (KRAJZEWICZ; BONERTT; WAGNER, 2006).

Esse pacote tem entre suas funcionalidades implementadas a possibilidade de modelagem de diferentes veículos e simulação com mais de uma via com a possibilidade de mudança de faixa. Apesar de essas funções serem importantes para esse estudo, o SUMO foi descartado, pois é descrito como ferramenta de análise para cenários de grandes escalas.

MovSim (*Multi Model Open Source Vehicular Traffic Simulator*) é um pacote em Java que permite a implementação de vários modelos microscópicos, como:

- IDM – Intelligent Driver Model
- Modelo de Gipps
- ACC – Adaptive Cruise Control
- NSW (Modelo de Nagek Schrengkenberg ou Modelo de Barlovic)
- OVN-FVDM (Optimal Velocity Model – Full Velocity Difference Model)
- Modelo de Newell
- Modelo de Krauss
- Modelo KKW

Todos esses modelos são expostos no livro “Traffic flow Theory” escrito por Arne Kesting, quem deu início ao projeto MovSim, e Martin Treiber, um dos

contribuidores do pacote. Em adição, o MovSim possui formas de contato direto com os seus contribuidores via e-mail (movsim.org@gmail.com) ou por fórum online (<https://github.com/movsim/movsim/issues>). Outra vantagem desse pacote computacional é a boa organização do código, o que facilita modificações. Dessa maneira, o MovSim atende todos os requisitos listados anteriormente.

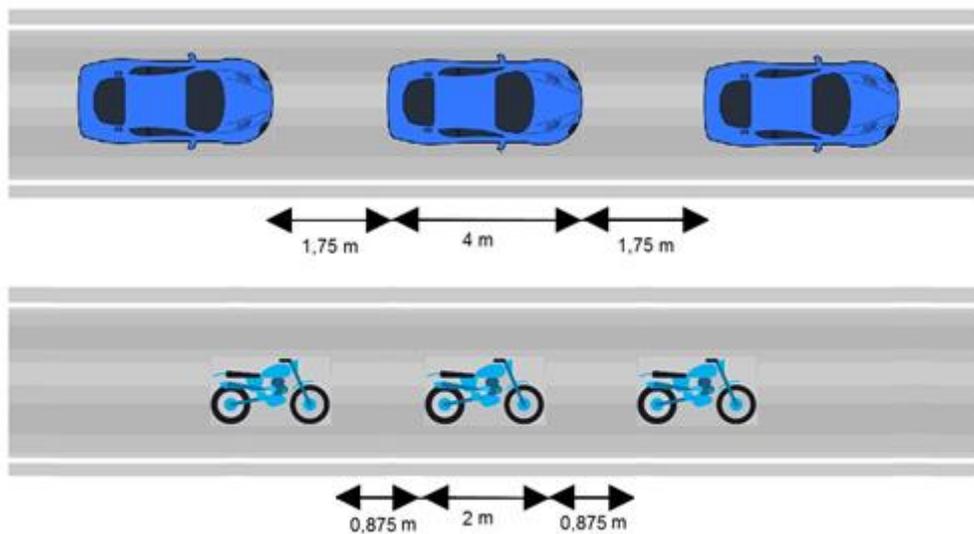
As fases seguintes representam a escolha do modelo de tráfego (seção 4.2), modificações no código¹ para obtenção dos dados necessários para análise e calibração do modelo levando em conta o cenário e modelo utilizado na tese de dissertação de mestrado de Araújo (2017).

O estudo desenvolvido neste trabalho foi baseado no artigo “*Cellular automaton model for mixed traffic flow with motorcycles*” realizado por Meng et al. (2007), dissertação de mestrado “Estudo computacional do tráfego misto de motocicletas e automóveis” de Garcia Neto (2014), que reproduziu o modelo de tráfego feito por Meng et al. (2007) e na tese de dissertação de mestrado “Análise do Tráfego Misto de Motocicletas e Automóveis Considerando uma Variedade de Métricas, Escalas e Pontos de Vista” de Fernando Wesley Cavalcanti de Araújo (2017), que utiliza o modelo de tráfego de Garcia Neto. O artigo citado busca estudar o comportamento do tráfego em países em desenvolvimento na Ásia, como China, Malásia e Vietnã, onde as motocicletas são muito utilizadas. O modelo de tráfego utilizado por todos os estudos citados é baseado no modelo de NaSch, existindo modificações no tamanho das células e na possibilidade de troca de faixa apenas para as motos. A troca de faixa é motivada pelo fato de existir um veículo mais lento em sua frente na mesma faixa, ou existir um veículo mais rápido na faixa ao lado. Contudo, no modelo idealizado a troca de faixa é feita primeiramente e separadamente do movimento para frente, ou seja, a troca de faixa não ocorre juntamente com o avanço na pista. Além disso, os carros apenas se locomovem na faixa da esquerda e as motocicletas podem trocar de faixa no modelo desenvolvido por Meng et al. (2007). Contudo, a faixa da esquerda é preferencial para carros, isto é, se as motos restringirem o movimento do automóvel devem retornar para faixa da direita. Nesse modelo o automóvel ocupa o dobro de espaço de motos, a moto ocupa uma célula de 3,75 m e o carro ocupa duas células (7,5 m).

¹ O código utilizado possui uma diferença em relação a expressão que efetua o avanço do veículo em relação ao código disponível no site. Essa mudança foi sugerida por Martin Treiber, conforme mostrado no anexo I.

O modelo de tráfego utilizado neste trabalho é caracterizado como discreto no tempo e contínuo no espaço, o modelo de Krauss, o qual será explicado na próxima seção 4.2.1. Neste modelo é necessário definir parâmetros como o tamanho e o afastamento dos veículos, entre outros. Dessa maneira, foi definido que os automóveis possuiriam 4 m de comprimento com um afastamento mínimo, quando parados, de 1,75 metros, o que resultaria em uma ocupação na rua de 7,5 m. Enquanto as motos possuiriam 2 m de comprimento com um afastamento mínimo, quando paradas, de 0,875 m, resultado numa ocupação de 3,75 m, conforme mostrado na Figura 7 abaixo.

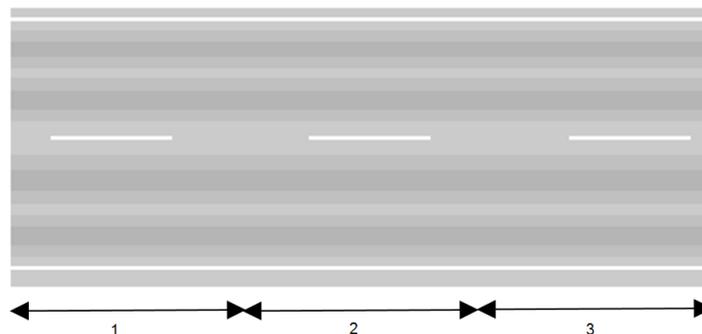
Figura 7 - Afastamento mínimo entre veículos no modelo utilizado



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Visando replicar os estudos citados anteriormente, a via utilizada neste estudo terá 7,5 km e duas faixas. Essa via estará associada a condições periódicas de contorno, isto é, o tráfego iria funcionar tal como em uma pista circular. Para isso a via será caracterizada por três segmentos, conforme figura 8, de 2,5 km.

Figura 8 - Representação gráfica da pista de 7,5 km utilizada



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

O segmento 1 será antecessor do segmento 2 e sucessor do segmento 3; o segmento 2 será antecessor do segmento 3 e sucessor do segmento 1; e por fim, o segmento 3 será antecessor do segmento 1 e sucessor do segmento 2. O afastamento mínimo entre os veículos e o tamanho dos carros e motos tem influência na inicialização na simulação. De maneira a reproduzir o afastamento mínimo dos automóveis no modelo discreto, os carros são posicionados aleatoriamente considerando células virtuais de 5,75 m. A parte frontal de cada automóvel estará posicionada aleatoriamente na faixa da esquerda em múltiplos de 5,75 m, e como cada carro possui 4 m, isso significa que pelo menos deve haver 1,75 m de afastamento. O mesmo raciocínio foi aplicado com as motocicletas, a parte frontal é posicionada aleatoriamente na faixa da direita em múltiplos de 2,875 m, e como cada moto possui 2 m, isso significa pelo menos um afastamento de 0,875 m. Embora essa maneira reproduza a ocupação mínima de um veículo na via, permite que comporte mais veículos que o caso base.

O caso base, proposto por Meng et al. (2007), é representado pela simulação limitando a velocidade máxima dos carros para 135 km/h e das motos para 54 km/h. Outras velocidades máximas para carros e motos serão simuladas neste trabalho (as quatro combinações possíveis para 54 km/h e 135 km/h), assim como a troca de faixa de carros e motos. Garcia Neto (2014) e Meng et al. (2007) mostraram que em suas simulações era importante desconsiderar os valores iniciais, buscando estabilizar as condições de simulação. Neste trabalho a mesma abordagem foi utilizada, após um período de 10.000 segundos, são armazenadas as velocidades de todos os veículos durante um período $T = 1.000$ segundos (ou aproximadamente 16,6 minutos). Na posse desses valores, a velocidade média dos carros (\bar{v}^c) e motos (\bar{v}^m) são calculadas para o intervalo de tempo T , conforme Equação 5 e 6, respectivamente. O termo N representa o número de veículos e os sobrescritos c e m são utilizados para diferenciar carros e motos em todo trabalho, respectivamente.

$$\bar{v}^m = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0+1}^{t_0+T} \left(\frac{1}{N^m} \sum_{i=1}^{N^m} v_i^m(t) \right) \quad (5)$$

$$\bar{v}^c = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0+1}^{t_0+T} \left(\frac{1}{N^c} \sum_{i=1}^{N^c} v_i^c(t) \right) \quad (6)$$

O simulador também calcula o desvio padrão, σ , das velocidades da moto e carros de acordo com a Equação 7.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left(\sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2 \right)} \quad (7)$$

Além disso, Garcia Neto (2014) e Meng et al. (2007) utilizaram 30 simulações para se obter um valor médio de um ponto que irá compor o diagrama fundamental. Essa necessidade foi, inclusive, demonstrada pelos resultados de Garcia Neto (2014) em sua tese de mestrado. Embora o modelo utilizado neste trabalho não seja autômato celular, o mesmo critério foi utilizado.

No simulador de tráfego utilizado, MovSim, é necessário definir o formato da via, assim como seu tamanho e a quantidade de veículos com as respectivas localizações da parte frontal. Além disso, é preciso definir os parâmetros de acordo com o modelo microscópico utilizado, assim como o tamanho do veículo, tempo de simulação e intervalo de atualização (*time step*). Tais parâmetros serão expostos na próxima seção, 4.2. A quantidade de veículos, assim como a posição da parte frontal de cada automóvel e motocicleta é determinado externamente com um programa feito pelo autor em MATLAB®.

A velocidade média e desvio padrão para cada combinação de velocidade máxima de carros e motos são obtidas para uma média de 30 simulações em um intervalo de 1.000 segundos, depois um período de transição de 10.000 segundos, calculadas para as seguintes densidades de moto e carros, ρ , em veículos/km:

- $\rho^m=13,333$; $\rho^m=40$, $\rho^m=93,333$; $\rho^m=133,333$ e $\rho^m=186,677$;
- ρ^c de 0 a 120, em intervalos de 10 em 10.

4.2 Modelo de tráfego utilizado

4.2.1 Modelo de Krauss

O modelo de Krauss é essencialmente uma modificação do modelo de Gipps para torná-lo estocástico. Ele foi escolhido por ser um modelo microscópico classificado na família dos modelos completos e possuir a mesma característica do modelo idealizado por NaSch, permitir um parâmetro que simule um ruído no sistema. Gipps propôs seu

modelo em 1981 buscando representar diferentes comportamentos dos motoristas e que seus parâmetros pudessem ser definidos sem um procedimento de calibração, uma vez que deveriam corresponder a características óbvias do conjunto veículo-motorista (GIPPS,1981). Ainda, o modelo é caracterizado pela limitação da velocidade de acordo com o cálculo de velocidade de segurança, v_{seg} , para assegurar a inexistência de colisão mesmo se o veículo líder parar completamente.

O modelo de Gipps implementado no MovSim é uma versão simplificada em relação ao artigo original, contudo segue o mesmo conceito (TREIBER; KESTING, 2013). O cálculo de v_{seg} permite que o modelo seja chamado de “livre de acidentes”, pois utiliza seus parâmetros para evitar colisão. Os parâmetros do modelo são velocidade desejada (v_0), tempo de reação/adaptação (Δt_r), aceleração (a), desaceleração (b) e afastamento (s_0). Esses parâmetros são utilizados no cálculo de velocidade de segurança da seguinte maneira:

- O veículo sempre desacelera com valor b ;
- O tempo de reação é sempre Δt_r (no simulador isso é igual ao tempo de atualização da posição);
- Se o veículo líder parar, o carro seguidor ficara no mínimo a uma distância s_0 (não presente na publicação original).

Além disso, no simulador foi considerado que a velocidade é constante durante o tempo de reação, o que não ocorre na publicação original de Gipps. Segundo Treiber e Kesting (2013), utilizando esses critérios, a velocidade de segurança é calculada com a Equação 8.

$$v_{seg(s,v_l)} = -b\Delta t + \sqrt{b^2\Delta t_r^2 + v_l^2 + 2b(s - s_0)} \quad (8)$$

Onde v_l é a velocidade do veículo líder e s é o afastamento atual. Assim, a velocidade determinada pelo modelo de Gipps (v_1) será dada pela Equação 9.

$$v_1 = \min[v_0, v + a \times \Delta t_r, v_{seg}] \quad (9)$$

Como esse trabalho busca comparar os resultados de tráfego sob diferentes condições utilizando o modelo autômato celular, os parâmetros serão definidos de maneira que façam sentido físico com os modelos em comparação. Como o modelo de Meng et al. (2007) foi discretizado em células de 3,75 m, os parâmetros a e b foram

definidos como 3,75 m/s². Além disso, $s0^c$ é definido como 1,75 m e $s0^m$ é definido como 0,875 m para que os veículos ocupem no mínimo o mesmo espaço das células definidas nos estudos citados como base de comparação. O tempo de atualização, que neste caso também representa o tempo de reação, é o mesmo (1s).

O modelo utilizado no simulador foi proposto por Krauss et al. (1997), caracterizado pela adição de um parâmetro no modelo de Gipps para simular a imperfeição ao se dirigir, isto é, mesmo que exista condições para o motorista atingir velocidade hipotética $v1$, ele pode trafegar com velocidades inferiores. O parâmetro adicional é ε , simula a flutuação da velocidade devido à frenagem aleatória dos veículos. O ε atua no sistema conforme a Equação 10 abaixo, de maneira que a velocidade seja um número aleatório entre $v1$ e $v2$.

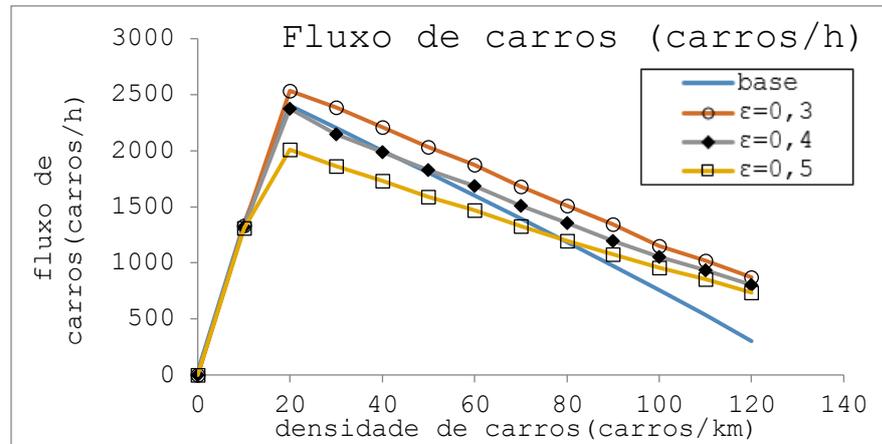
$$v2 = v1 - \varepsilon\{(v1 - [\min(0, v(t) - b)])\} \quad (10)$$

$$v(t + 1) = v_{rand,v1,v2}$$

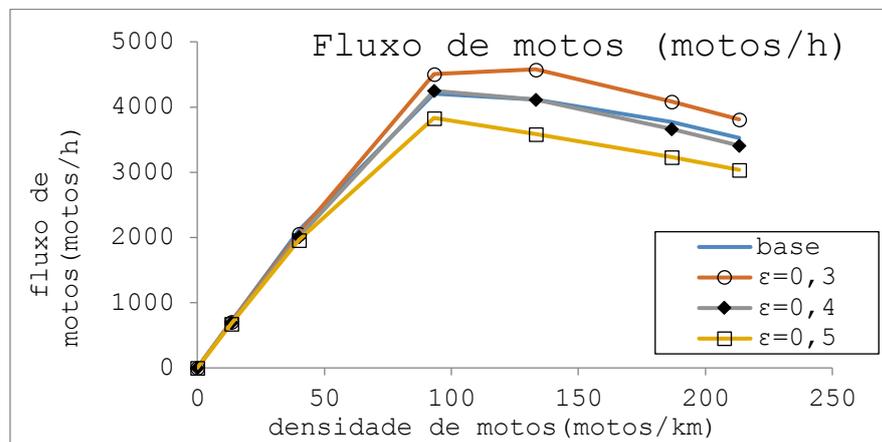
Diferentemente do modelo NaSch, ε não está associado a probabilidade de reduzir a velocidade. Krauss et al. (1997) estudaram as condições de tráfego utilizando o modelo NaSch associado com $\varepsilon = 0,4$. Posteriormente, Krauss (1998) investigou a influência da edição de ruído na dinâmica de modelos livres de colisão com $\varepsilon = 1,0$ em sua tese de dissertação de mestrado. Como o parâmetro para reproduzir aleatoriedade no sistema age de forma diferente do que o modelo discreto, três valores para ε foram utilizados (0,3; 0,4 e 0,5) em duas situações distintas, somente carros (Figura 9a) e apenas motos (Figura 9b) com velocidades máximas iguais ao do caso base. Os resultados foram posteriormente comparados com o caso base, resultados de Araújo (2017). Desse modo, $\varepsilon = 0,4$ foi o valor que resultou um comportamento mais semelhante, e por isso foi o valor definido para as simulações neste trabalho.

Figura 9 - Diagramas fundamentais para seleção de ε para carros (a) e para motos (b)

a) Diagrama fundamental para carros com diversos valores para ε .



b) Diagrama fundamental para motos com diversos valores para ε .



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

4.2.2 Modelo de troca de faixa: MOBIL (Minimizing Overall Braking Induced by Lane Change)

O modelo de tráfego de mudança de faixa utilizado foi proposto por Kesting et al. (1999). Esse modelo tem como maior inovação um parâmetro que simula a “educação” do motorista para mudar de faixa. Esse parâmetro é representado por p_e , o qual pode assumir valores entre o intervalo 0 e 1 (se zero representa um comportamento egoísta, por outro lado 1 representa um comportamento altruísta). Além disso, esse modelo pode ser usado associado com diversos modelos de tráfego, pois foi idealizado de forma que a decisão de troca de faixa ocorra baseada na aceleração dos veículos. A mudança de faixa ocorre quando a condição da equação 11 abaixo é satisfeita.

$$(a_{i,troca} - a_{i,atual}) + p_e(a_{n,troca} - a_{n,atual} + a_{a,troca} - a_{a,atual}) > \Delta m \quad (11)$$

O primeiro termo representa a vantagem ganha do veículo se houver mudança de faixa. O subscrito i representa um veículo hipotético nas condições sem troca de faixa, $a_{i,atual}$, ou com mudança de faixa, $a_{i,troca}$. O segundo termo calcula o ganho com a troca de faixa considerando os dois veículos imediatamente afetados com a mudança de faixa. O subscrito n representa o carro seguidor do carro i com a troca de faixa, já o subscrito a se refere ao carro seguidor do carro i sem a troca de faixa. O peso desse segundo termo é determinado pelo fator p_e . Por fim, o termo Δm tem o papel de evitar que haja mudança de faixa se a vantagem for pequena.

O nome do modelo, MOBIL (“Minimizando a Frenagem do Sistema Induzida pela Troca de Faixa”), é decorrente do fato de que para $p = 1$ e $\Delta m = 0$ representa a situação em que só há troca se houver vantagem para todos os três veículos. Em adição, há mais critérios de segurança a serem respeitados para evitar que não haja colisão com a troca de faixa. A desaceleração imposta para o novo carro seguidor não deve ser superior que o parâmetro de frenagem de segurança, b_{seg} . Esse parâmetro deve ser escolhido de forma realista, não pode ser superior a 9 m/s^2 (máximo possível em superfície seca, segundo Kesting et al. (1999)). Além disso, para haver troca de faixa deve haver uma distância mínima, d_{min} , em relação aos dois veículos da outra faixa.

Os parâmetros utilizados estão no Quadro 1. Eles foram baseados nas considerações feitas no livro “Traffic Flow Dynamics”, nos cenários exemplos do MovSim, no artigo “General Lane-Changing Model MOBIL for Car-Following Models” e no modelo de tráfego comparado.

Quadro 1 - Parâmetros utilizados para o modelo de mudança de faixa

Veículo \ Parâmetro	p_e	Δm	$b_{seg} (\text{m/s}^2)$	$d_{min} (\text{m})$
Motocicleta	0,1	0,2	5	3,75
Carro	0,2	0,2	5	3,75

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

5 Resultados

Nesta seção serão apresentadas diversas análises. Primeiramente será apresentada uma análise introdutória do tráfego utilizando o caso base. Em seguida será estudado a influência da velocidade máxima dos veículos no modelo utilizado. Posteriormente será feita uma comparação entre o modelo microscópico discreto e contínuo. Para finalizar, será estudada a influência da mudança de faixa dos automóveis no tráfego. Todos os resultados estão nos Apêndices e Anexos deste trabalho, conforme indicado na Tabela 2 abaixo. Nos Apêndices e Anexos estão os resultados para quatro combinações de velocidades máximas de carros e motos, $V_{máx} = 54$ km/h e $V_{máx} = 135$ km/h. Nos Apêndices constam os resultados deste trabalho (modelo contínuo) para os casos em que carros e motos trocam de faixa e apenas motos trocam de faixa. Nos Anexos constam os resultados de Araújo (2017), modelo discreto, para o caso em que apenas as motos trocam de faixa.

Tabela 2 - Organização dos resultados (Apêndices e Anexos).

Resultados	Seção dos resultados	Modelo de tráfego	Página inicial da seção
Fluxo de automóveis	Apêndice A	Contínuo	63
	Anexo A	Discreto	79
Fluxo de motos	Apêndice B	Contínuo	65
	Anexo B	Discreto	80
Fluxo de veículos	Apêndice C	Contínuo	67
	Anexo C	Discreto	81
Fluxo total de veículos	Apêndice D	Contínuo	69
	Anexo D	Discreto	82
Velocidade média dos carros	Apêndice E	Contínuo	71
	Anexo E	Discreto	83
Velocidade média das motos	Apêndice F	Contínuo	73
	Anexo F	Discreto	84
Desvio padrão da velocidade dos carros	Apêndice G	Contínuo	75
	Anexo G	Discreto	85
Desvio padrão da velocidade das motos	Apêndice H	Contínuo	77
	Anexo H	Discreto	86

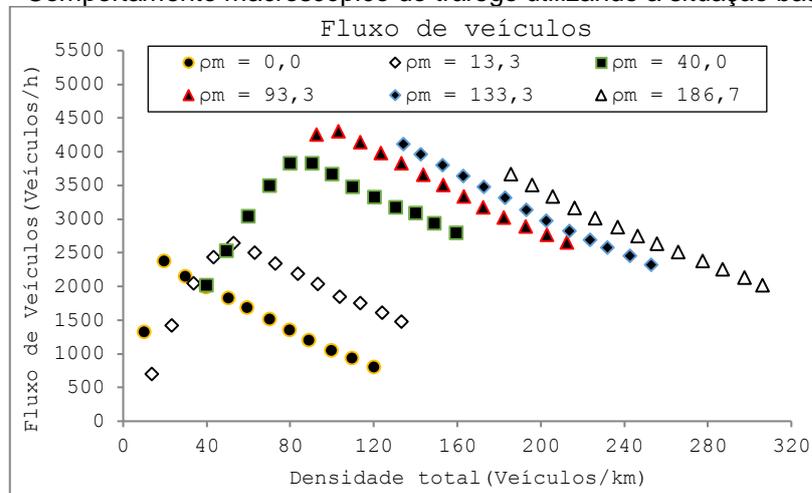
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

5.1 Estudo do caso base: análise introdutória

Nesta seção será analisada a interação entre carros e motocicletas considerando o caso base de estudo (isto é, a velocidade máxima do carro é 135 km/h e a velocidade máxima da moto 54 km/h). Neste estudo apenas as motocicletas trocam de faixa.

O gráfico de fluxo de veículos, Figura 10, fornece uma visão macroscópica do tráfego, pois representa o fluxo de todos os veículos correlacionados com a densidade total da via, soma de ρ^m e ρ^c . Observando cada uma das diferentes curvas, as quais representam diferentes densidades de motocicletas, é possível notar que existe para cada situação um valor máximo de fluxo, que a partir de um aumento de densidade de automóveis representa a diminuição do fluxo de veículos. Nota-se que até $\rho^m = 93,3$ o aumento da densidade de carros resulta inicialmente no aumento o fluxo total. Entretanto, acima dessa densidade de motocicletas, o aumento da densidade de automóveis provoca uma relativa queda de fluxo máximo. Além disso, o aumento da quantidade de motocicletas tem tendência de aumentar o fluxo máximo total até $\rho^m = 93,3$.

Figura 10 - Comportamento macroscópico do tráfego utilizando a situação base de estudo

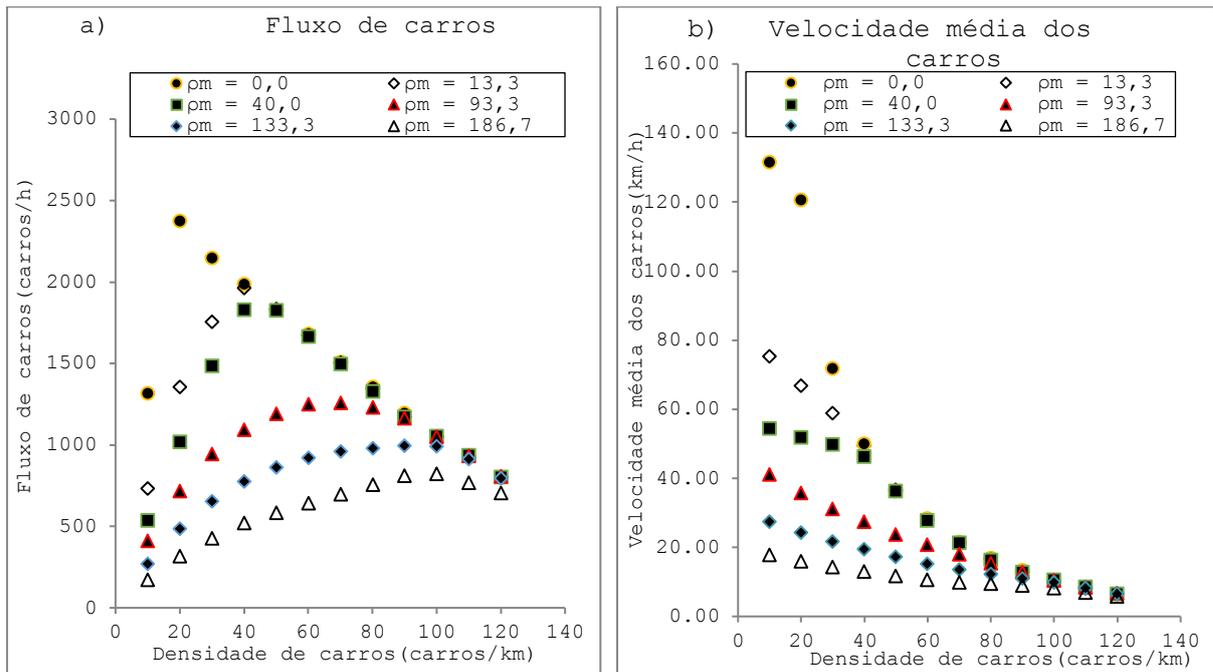


Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Uma análise mais microscópica permite entender porque o fluxo total se comporta da forma descrita anteriormente. A Figura 11a possibilita compreender como o fluxo de automóveis é influenciado pela interação entre motocicletas e carros. Para a situação em que $\rho^m = 0$, sem motocicletas, o aumento de densidade de carros inicialmente representa um aumento de fluxo, contudo existe um ponto máximo ($\rho^c = 20$) em que qualquer aumento da quantidade de carros representará uma queda de fluxo. Esse comportamento ocorre, pois inicialmente os carros são livres para se movimentar com

a velocidade desejada. Porém, o aumento da quantidade de veículos começa a restringir o movimento, provocando a redução da velocidade média dos automóveis na via, Figura 11b. Para qualquer outra situação de densidade de motocicletas, o fluxo de carros diminui. Essa queda de fluxo pode ser explicada analisando a velocidade média dos carros na via, Figura 11b.

Figura 11 - Comportamento dos automóveis no tráfego (caso base). a) fluxo de carros b) velocidade média dos carros



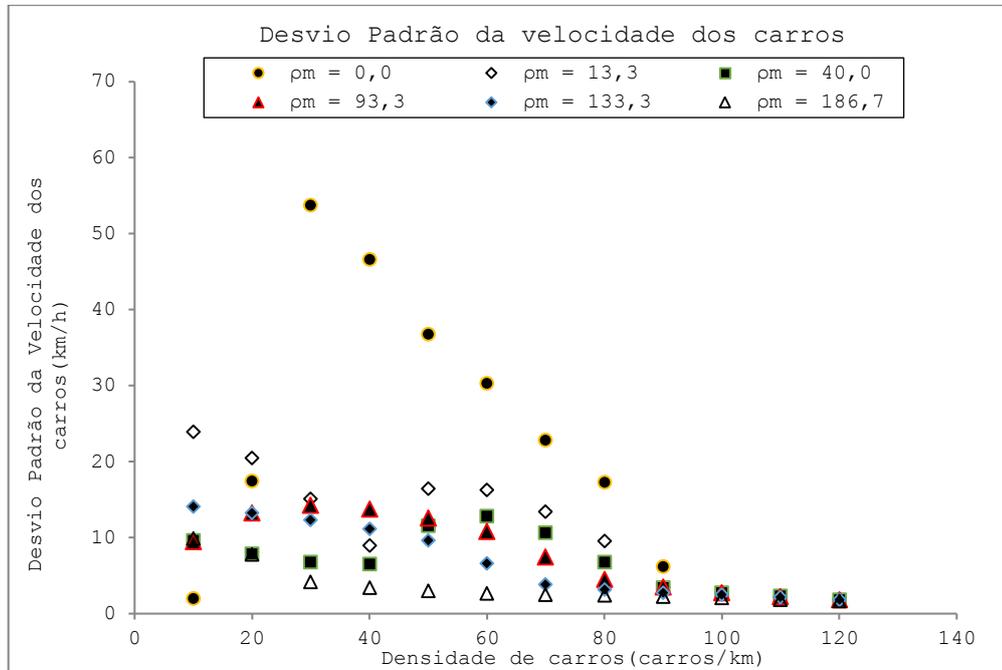
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

O aumento de densidade de motocicletas provoca uma diminuição de fluxo de carros, pois as motos diminuem a velocidade média dos automóveis devido à sua menor velocidade máxima e possibilidade de mudança de faixa. Os carros, que poderiam trafegar com velocidades superiores à velocidade máxima das motocicletas, têm sua aceleração restringida pela presença das motos.

A velocidade média analisada anteriormente representa o comportamento médio dos veículos na via, contudo diversos automóveis podem trafegar com velocidades inferiores ou superiores a ela. A Figura 12 mostra que em baixas e altas densidades de automóveis, para a situação de $\rho^m = 0$, todos os veículos trafegam com velocidades semelhantes. Isso é mostrado pelo baixo desvio padrão decorrente da liberdade dos carros trafegarem com alta velocidade e restrição para aceleração devido à grande quantidade de veículos em baixa e altas densidades de carros, respectivamente. Em densidades intermediárias, o desvio padrão assume grandes

valores. Isso ocorre devido à existência da situação em que se trafega em partes da via com altas velocidade e em outras partes com baixas velocidades (ou até mesmo com carros parados), como em ondas de congestionamento.

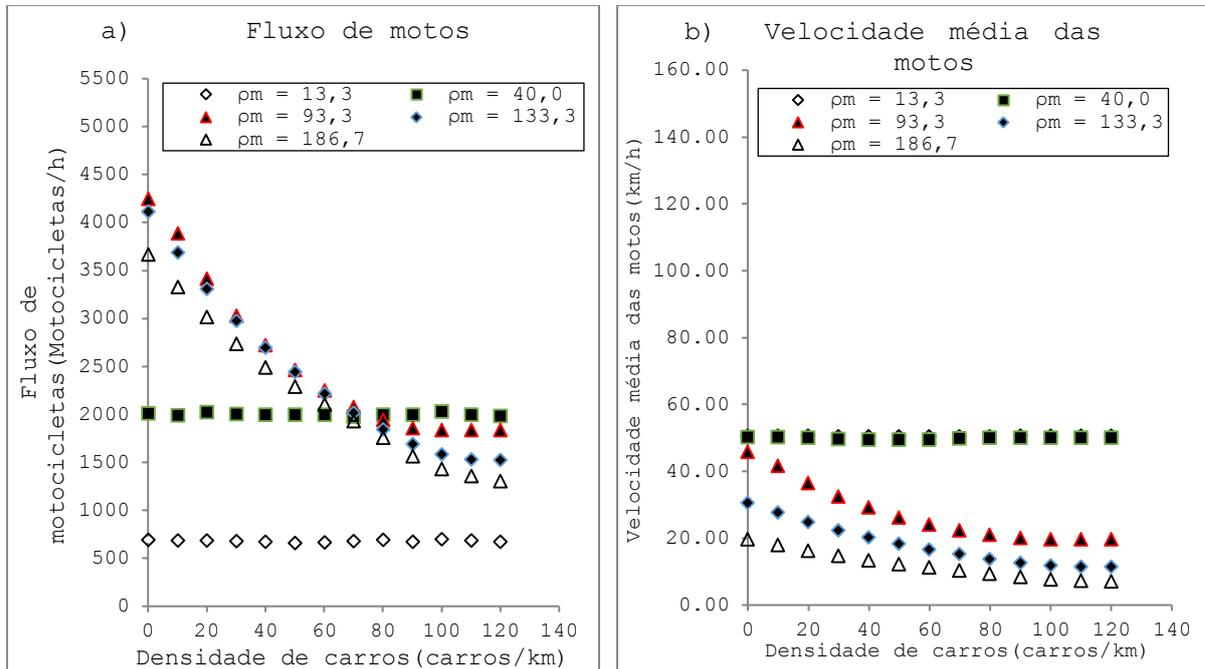
Figura 12 - Desvio padrão das velocidades dos carros (caso base)



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Análise semelhante pode ser realizada com as motocicletas. A Figura 13a na próxima página mostra que para até $\rho^m = 40$ o fluxo de motos não é influenciado pela quantidade de automóveis. Isso pode ser explicado pela Figura 13b. As motos conseguem trafegar livremente na via com sua velocidade próxima a máxima até $\rho^m = 40$, pois ocupam a metade do espaço dos carros e possuem velocidade máxima inferior. O tráfego de carros juntamente com motos representa um grande impacto no fluxo total de veículos, pois em situação sem motos o tráfego máximo é 2.376 carros/h. No entanto, esse valor pode quase duplicar com a presença de motos, alcançando 4.298 veículos/hora. Para a situação de somente moto na via, o fluxo máximo é 4.111 motos/h.

Figura 13 - Comportamento das motocicletas no tráfego (caso base). a) fluxo de motos b) velocidade média das motos

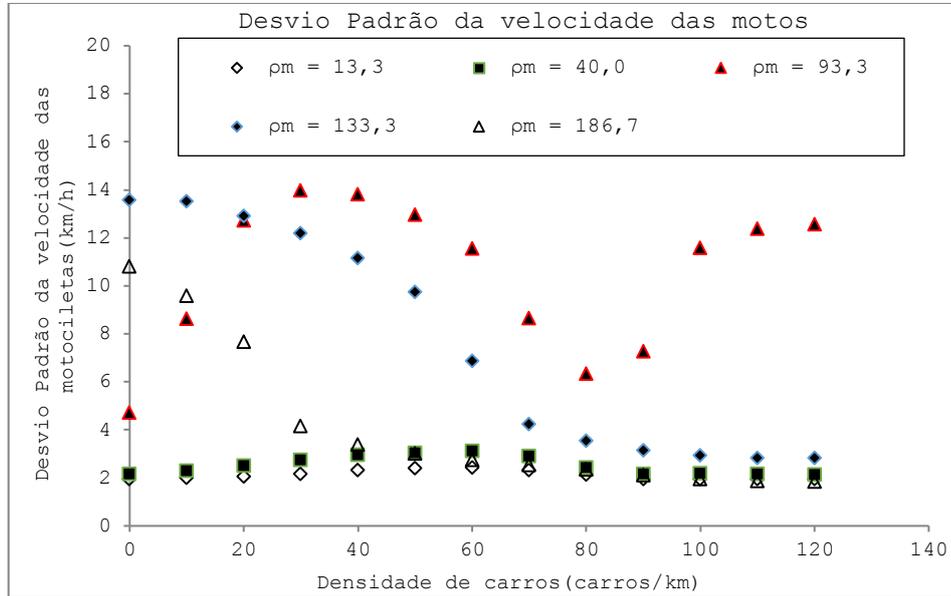


Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

O desvio padrão é baixo em baixas densidades de motos ($\rho^m = 13,3$ e $\rho^m = 40,0$), como mostrado na figura 14. As motocicletas podem se locomover livremente, uma vez que a quantidade de carros e motos não são suficientes para restringir o movimento. Em altas densidades de motos ($\rho^m = 133,3$ e $\rho^m = 186,7$), o aumento na quantidade de carros é acompanhado pela queda do desvio padrão. Isso ocorre devido à restrição de aceleração resultante da grande quantidade de veículos. Para densidades intermediárias ($\rho^m = 93,3$), o tráfego de motos possui comportamento com maior complexidade. Inicialmente existe um aumento de desvio padrão devido à troca de faixa das motocicletas. Os veículos têm seu movimento restringido devido à formação de zonas de congestionamento – seções na pista em que os veículos trafegam com velocidade mais baixa devido à alta concentração de carros e motos. À medida que a quantidade de carros cresce, maior é o número de regiões com congestionamento. Dessa maneira, o desvio padrão decresce devido a maior existência de seções na via com velocidades mais baixas. Por outro lado, com uma grande quantidade de veículos a troca de faixa não ocorre com tanta frequência. O aumento da quantidade de veículos resulta em uma queda da velocidade média na via. Uma menor velocidade significa veículos trafegando mais próximos, e como as motos ocupam a metade do espaço dos carros, isso possibilita a criação de áreas em

que as motocicletas podem trafegar por mais tempo com velocidade mais altas, próximas a máxima, o que favorece um aumento do desvio padrão.

Figura 14 - Desvio padrão das velocidades das motos (caso base)



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

5.2 Estudo de caso com apenas as motos mudando de faixa: análise da influência da velocidade máxima

Nesta seção serão apresentados os resultados das simulações com diferentes velocidades máximas com apenas motos mudando de faixa. Apenas os resultados mais relevantes serão mostrados, porém todos os resultados estão disponíveis nos Apêndices. A utilização de diferentes velocidades máximas para motocicletas (54 km/h e 135 km/h) e automóveis (54 km/h e 135 km/h) permite analisar o impacto da redução da velocidade dos veículos e verificar se motos e carros trafegando com a mesma velocidade modificam significativamente o fluxo de veículos.

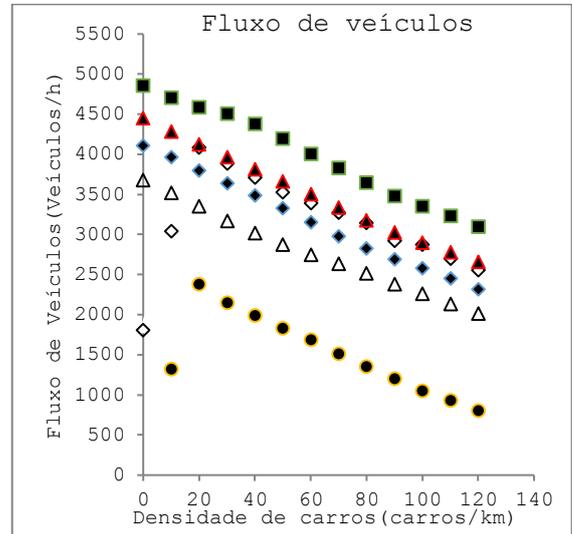
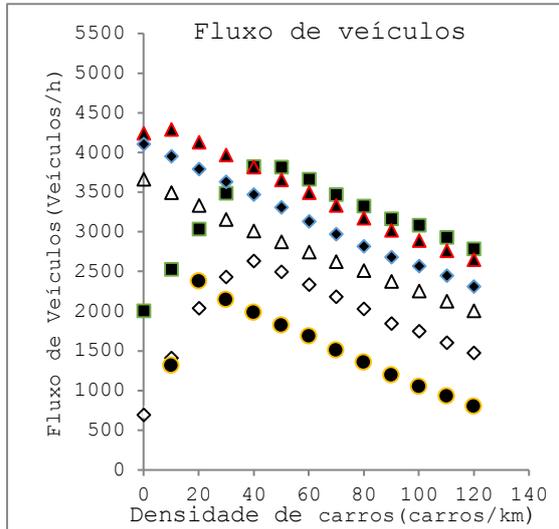
A Figura 15 mostra o resultado do fluxo de veículos em função da densidade de carros para diferentes densidades de motos. Percebe-se que em altas densidades de motos (a partir de $\rho^m = 93,3$) o fluxo de veículos praticamente não é influenciado pela velocidade máxima de carros e motos. Apenas existe uma diferença de fluxo de veículos, de 198 veículos/h, para $\rho^c = 0,0$ e $\rho^m = 93,3$ decorrente da diferença de valores de velocidade máxima. Em altas densidades de motocicletas, o movimento dos veículos é restringido pela quantidade de carros e motos na via. A velocidade máxima possível não é relevante, pois nessas situações as velocidades são

semelhantes e inferiores a 50 km/h, como pode ser verificado nos Apêndices E e F nas Figuras A1, B1, C1 e D1.

Figura 15- Fluxo de veículos para quatro combinações de velocidade máxima para carros e motos

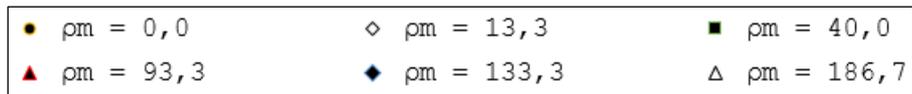
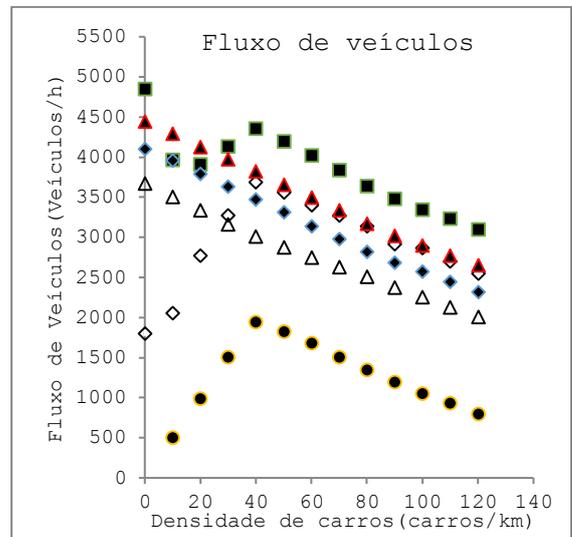
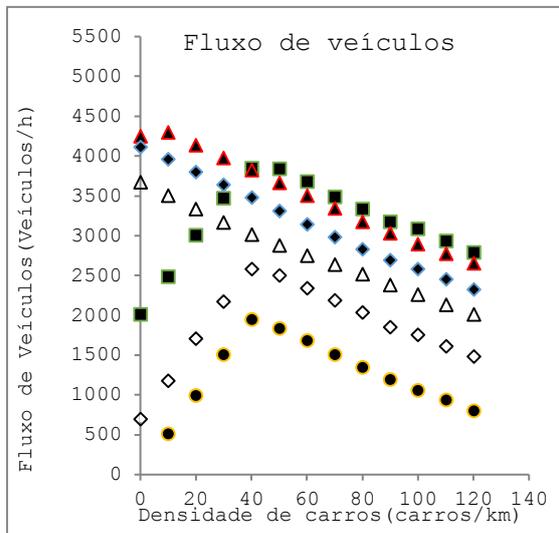
a) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;

b) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$



c) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$

d) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km}$



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Uma comparação entre a Figura (a) e (c) permite verificar a influência da velocidade máxima de carros. Nota-se semelhança no fluxo de veículos. Isso provavelmente ocorre, pois apenas as motocicletas podem ultrapassar. Os carros têm seu movimento limitado pelo veículo a sua frente e as motos têm mais liberdade para trafegar.

O pequeno aumento de fluxo veículos de $\rho^c = 0,0$ para $\rho^c = 10,0$ em $\rho^m = 13,3$ na Figura (d) está relacionado com a capacidade das motos mudarem de faixa. Para baixas densidades de carros, existem muitas ocasiões que representam um incentivo para troca de faixa. Contudo, na outra faixa os carros se movem mais lentamente. Isso leva a uma desaceleração das motos e resulta em um menor fluxo se comparado com a situação em que nenhum veículo troca de faixa. Isso é evidenciado pelos resultados de velocidades médias das motos para a situação em que a velocidade máxima dos carros é 54 km/h e a velocidade máxima das motos é 135 km/h (Figura D1 no Apêndice F), pois existe uma queda momentânea de velocidade média para $\rho^c = 10,0$. A velocidade média das motos aumenta com densidades de carros superiores $\rho^c = 10,0$ em consequência da menor ocorrência de troca de faixa.

Além disso, o comportamento (curva do gráfico) diferente para $\rho^m = 40,0$ na Figura (d) é consequência das baixas velocidades dos carros em conjunto com a mudança de faixa das motos. Inicialmente ($\rho^m = 0,0$), as motocicletas trafegam com velocidades próximas a máxima. Entretanto, um aumento da quantidade de carros tem um efeito decrescente na velocidade média das motos (Apêndice F, Figura D1), pois os carros restringem a aceleração das motos quando há troca de faixa devido à sua menor velocidade máxima. A queda de fluxo de veículos é resultado do decréscimo de fluxo de motocicletas ser superior ao aumento de fluxo dos automóveis. Porém, um sucessivo aumento da densidade de automóveis é acompanhado pela manutenção da velocidade média de carros (Apêndice E, Figura D1), o que possibilita um relativo aumento do fluxo. Posteriormente, há uma queda de velocidade média na via com uma grande quantidade de veículos que provoca um decréscimo de fluxo de veículos.

A Tabela 3 abaixo representa um resumo dos gráficos apresentados anteriormente com foco nas características (densidades e velocidades médias) para fluxo máximo para cada combinação de velocidade máxima. Como apenas as motos mudam de faixa, existe uma tendência para que as condições de fluxo máximo sejam caracterizadas por uma maior quantidade de motocicletas. Para a situação em que a velocidade máxima das motos é baixa, o fluxo máximo de veículos ocorre sob a condição de tráfego misto com baixa densidade de carros, pois uma pequena quantidade de automóveis contribui para o aumento de fluxo total sem interferir no fluxo de motos. Para alta velocidade máxima das motos, o tráfego é máximo com apenas motos. As altas velocidades das motos requerem um maior afastamento, dessa

maneira, um aumento na quantidade de veículos pode representam uma menor velocidade média na via.

Tabela 3 - Fluxo máximo de veículos para cada combinação de velocidades máximas de carros e motos para a situação em que apenas motos mudam de faixa

$V_{MÁX}$ CARRO (km/h)	$V_{MÁX}$ MOTO (km/h)	$Q_{MÁX}$ (Veículos/h)	Q_{CARRO} (Carros/h)	Q_{MOTO} (Motos/h)	ρ^c (Carros/km)	ρ^m (Motos/km)	$V_{MÉDIA}$ CARRO (km/h)	$V_{MÉDIA}$ MOTO (km/h)
54	54	4294	411	3883	10,03	93,32	40,9	41,7
54	135	4854	0	4854	0,00	39,98	-	121,4
135	54	4298	413	3885	10,03	93,32	41,2	41,6
135	135	4854	0	4854	0,00	39,98	-	121,4

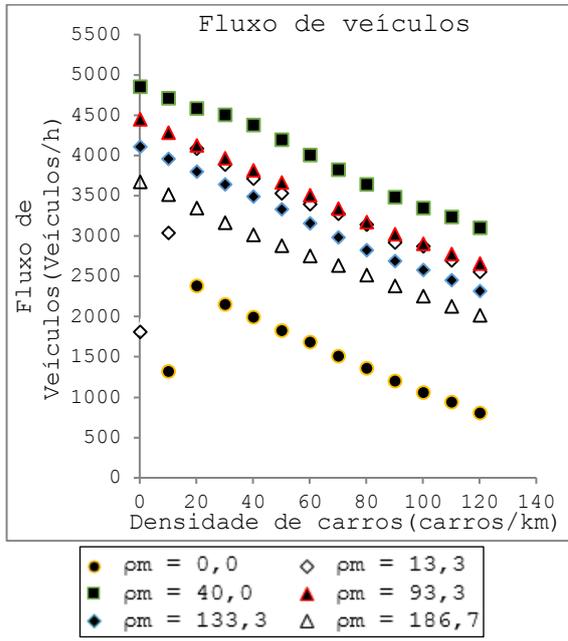
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

5.3 Estudo do caso com apenas as motos mudando de faixa: influência do modelo de tráfego utilizado

Nesta seção serão comparados os resultados das simulações que utilizam dois modelos microscópicos distintos, um é discreto e o outro é contínuo. Apenas os principais resultados serão mostrados, contudo todos os gráficos estão disponíveis nos Apêndices e Anexos.

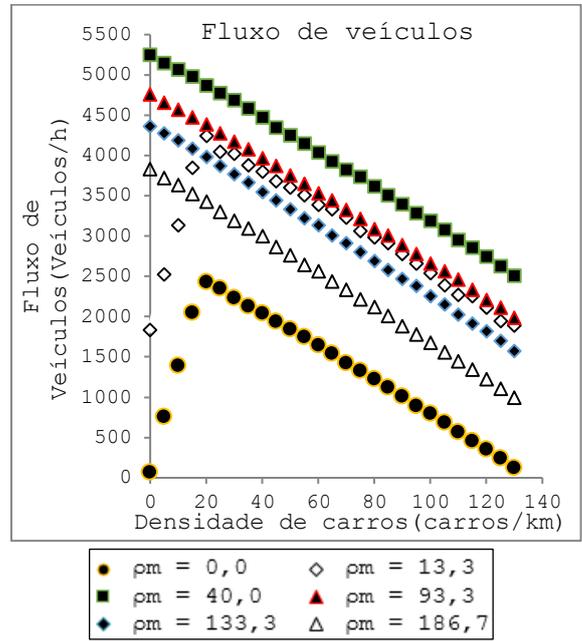
A maioria das situações simuladas possuem comportamentos semelhantes, isto é, as curvas referentes a diferentes densidades de motocicletas são parecidas. No entanto, existem diferenças relativas à magnitude do fluxo, como pode ser constatado comparando o Apêndice C (Figuras A1 a D1) e Anexo C. As Figuras 16 e 17 abaixo mostram a diferença de magnitude, para $\rho^m = 40,0$ e $\rho^m = 93,3$, e semelhança de comportamento do fluxo de veículos para o caso em que a velocidade máxima de carros e motos é 135 km/h. A via de 7,5 km utilizada como cenário neste trabalho possibilitaria a existência de aproximadamente 30% veículos a mais, pois os automóveis e motocicletas ocupam menos espaço no modelo contínuo. Uma faixa da via deste trabalho é capaz de suportar 1.304 carros (carros têm no mínimo um afastamento de 1,75 m e 4,0 m de comprimento) e 2.608 motos (motos têm no mínimo um afastamento de 0,875 m e comprimento de 2,0 m). Já o modelo discreto comparado apenas possui uma capacidade de 1.000 carros e 2.000 motos na via. Por essa razão o fluxo de veículos é menor no modelo discreto nas altas densidades de carros analisadas.

Figura 16- Fluxo de veículos no modelo contínuo (Krauss). $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$ e $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

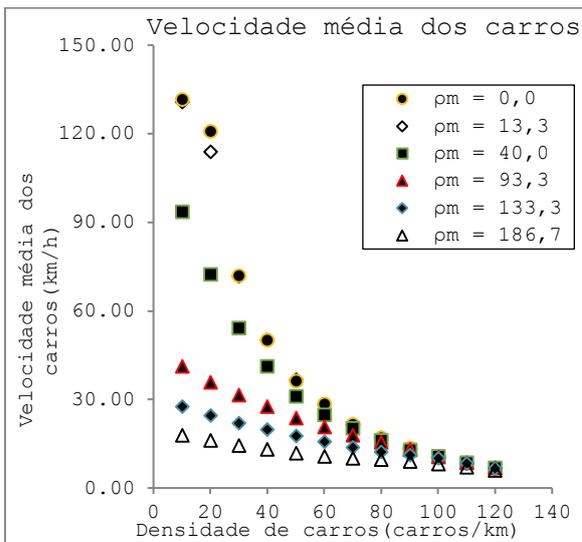
Figura 17 - Fluxo de veículos no modelo discreto (AC). $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$ e $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$



Fonte: Araújo (2017)

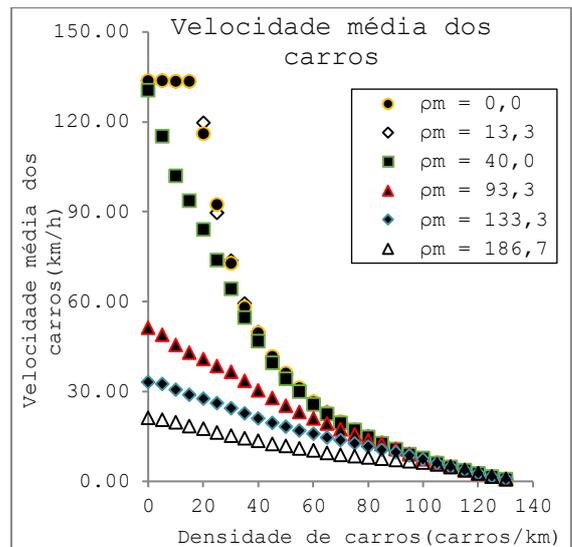
Verifica-se nas Figuras 18 e 19 que a diferença de magnitude de fluxo está relacionada à velocidade média. Na comparação entre o modelo discreto e o contínuo, a velocidade média de carros e motos são maiores em baixa e intermediárias densidades para $\rho^m = 40,0$ e $\rho^m = 93,3$.

Figura 18 - Velocidade média dos carros utilizando o modelo contínuo (Krauss). $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$ e $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 19 - Velocidade média dos carros utilizando o modelo discreto(AC). $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$ e $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$



Fonte: Araújo (2017)

A Tabela 4 abaixo possibilita uma análise mais precisa em relação ao que ocorre com a velocidade média dos carros. Em baixas densidades de carros, a velocidade média dos automóveis é inferior no modelo contínuo. Em altas densidades de carros, as velocidades médias dos automóveis no modelo contínuo tendem a ser mais altas. Os valores mais altos para o modelo contínuo provavelmente ocorrem porque existe uma ampla faixa de valores possíveis que atendem as condições de segurança para o movimento longitudinal. Contudo, no modelo discreto, a faixa de velocidades possíveis é limitada para múltiplos de 3,75 m/s.

Tabela 4 - Diferença da velocidade média dos carros, em km/h, entre o modelo contínuo e discreto em função da densidade de motos e automóveis

$\rho^c \backslash \rho^m$	0,0	13,3	40,0	93,3	133,3	186,7
10,0	-1.96	-2.78	-8.36	-4.37	-3.03	-1.68
20,0	4.77	-5.60	-11.58	-4.99	-3.03	-1.31
30,0	-0.87	-2.04	-10.02	-5.00	-2.38	-0.75
40,0	0.59	0.41	-5.41	-2.60	-1.27	-0.40
50,0	0.32	0.93	-3.13	-1.51	-0.48	0.09
60,0	2.00	1.62	-0.91	-0.41	-0.28	0.41
70,0	1.73	1.92	0.63	0.62	0.12	1.12
80,0	2.23	1.99	1.28	1.68	0.71	1.64
90,0	2.72	2.26	2.18	2.31	1.52	1.93
100,0	3.01	2.98	2.96	3.17	2.64	1.88
110	3.68	3.52	3.79	3.60	3.52	2.31
120	4.14	4.15	4.15	4.26	4.02	3.33

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Um comportamento semelhante ocorre com as motocicletas, entretanto, no geral, as velocidades médias do modelo contínuo são inferiores se comparado com o modelo discreto (Tabela 5). As menores dimensões da moto retardam o aparecimento de condições que resultem na redução de 3,75 m/s para evitar colisão no modelo discreto. Essas diferenças de magnitude, não influenciam o comportamento do tráfego. Contudo, o uso do modelo de tráfego contínuo pode significar uma queda de fluxo de 393 veículos/h em baixas densidades de motos ($\rho^c = 0,0$ e $\rho^m = 40,0$) ou um acréscimo de fluxo de 791 veículos/h em altas densidades de motos ($\rho^c = 120,0$ e $\rho^m = 186,7$).

Tabela 5 - Diferença da velocidade média das motos, em km/h, entre o modelo contínuo e discreto em função da densidade de motos e automóveis

$\rho^c \backslash \rho^m$	13,3	40,0	93,3	133,3	186,7
0,0	-1.94	23.40	-2.46	-1.72	-0.57
10,0	-2.19	4.58	-3.11	-1.64	-0.61
20,0	-2.44	-8.95	-3.81	-1.80	-0.63
30,0	-3.42	-6.56	-3.22	-1.56	-0.53
40,0	-4.44	-0.83	-3.03	-1.45	-0.59
50,0	-3.75	-0.57	-3.08	-1.56	-0.33
60,0	-2.86	-1.34	-2.84	-1.74	-0.15
70,0	-2.57	-1.79	-3.11	-1.59	0.15
80,0	-2.50	-2.39	-2.39	-1.50	0.21
90,0	-1.95	-3.86	-1.84	-1.16	0.28
100,0	-1.95	-3.82	-1.31	-0.79	0.56
110	-1.95	-1.68	-1.03	-0.11	1.13
120	-1.92	-3.13	-0.33	0.13	1.88

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Um resumo do que ocorre com o fluxo de veículos para as quatro combinações de velocidades máximas de automóveis e motocicletas é mostrado na Tabela 6. O perfil de curva diferente observado para a combinação de velocidade máxima para carros (54 km/h) e motos (135 km/h) em $\rho^m = 40,0$ foi analisado na seção anterior, 5.2. Deve-se destacar que a velocidade média das motocicletas para $\rho^c=0,0$ em $\rho^m = 40,0$ no modelo discreto é aproximadamente 23 km/h inferior, o que contribui para que só exista um pico de fluxo máximo, como observado no Anexo C (Figura D3). Essa queda de velocidade é provavelmente devido à existência de pouco carros na via. Densidade nula no modelo discreto não significa a inexistência de carros, mas que na simulação a densidade de automóveis é semelhante a esse valor. Logo, em $\rho^c = 0,0$ existe uma pequena quantidade de carros que pode restringir o movimento da moto. Porém, as velocidades médias das motocicletas nos dois modelos são semelhantes para qualquer outra densidade de carros em $\rho^m = 40,0$.

Tabela 6 - Resumo comparativo entre o fluxo de veículos do modelo contínuo, Apêndice C (Figura A1 a D1), e os resultados obtidos utilizando um modelo discreto, Anexo C

V _{máx} carro (km/h)	V _{máx} moto (km/h)	Observações
135	54	O perfil da curva e a magnitude são semelhantes nos dois modelos
135	135	O perfil da curva e a magnitude são semelhantes para a maioria das condições nos dois modelos. Contudo, quando $\rho^m = 40,0$ e $\rho^m = 93,3$ os valores máximos de fluxo de veículos são maiores para o modelo discreto.
54	54	O perfil da curva e a magnitude são semelhantes para a maioria das condições nos dois modelos. Contudo, quando $\rho^m = 93,3$ o valor máximo de fluxo de veículos é maior para o modelo discreto.
54	135	Perfil de curva diferentes para $\rho^m = 40,0$ e fluxo máximo menor para $\rho^m = 93,3$ para o modelo contínuo no espaço.

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

O desvio padrão das velocidades médias de automóveis e motocicletas são inferiores no modelo de tráfego contínuo, como mostrado pelos Apêndices G e H (Figura A1 a D1) e Anexo G e H (Figuras A3 a D3). A velocidade dos veículos no modelo contínuo pode assumir uma faixa ampla de valores de acordo com uma velocidade de segurança que considera a velocidade do veículo líder, isso significa que a velocidade atual provavelmente muda menos bruscamente com a desaceleração do veículo líder. Ainda, no modelo discreto os veículos freiam aleatoriamente em $3,75 \text{ m/s}^2$, enquanto no modelo deste trabalho a frenagem pode ocorrer de forma mais suave.

A Tabela 7 mostra as características gerais do tráfego (densidades e velocidades médias) para cada combinação de velocidade máxima de automóveis e motocicletas para o fluxo máximo possível. Nota-se que macroscopicamente os dois modelos se comportam de forma similar, pois possuem equivalentes características de tráfego que resultam em semelhantes fluxos máximos de veículos. O modelo discreto foi simulado em intervalos de 5 carros/km para cada densidade de motos. Dessa maneira, foi possível a ocorrência do fluxo máximo de veículos em $\rho^c = 15,6$ para $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$ e $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$.

Tabela 7 - Comparação das características de tráfego para fluxo máximo utilizando um modelo contínuo e discreto. Os valores em negritos representam o modelo discreto e os valores entre parênteses representam a diferença percentual em relação ao modelo contínuo

$V_{MÁX}$ CARRO (km/h)	$V_{MÁX}$ MOTO (km/h)	$Q_{MÁX}$ (Veículos/h)	Q_{CARRO} (Carros/h)	Q_{MOTO} (Motos/h)	ρ^c (Carros/km)	ρ^m (Motos/km)	$V_{MÉDIA}$ CARRO (km/h)	$V_{MÉDIA}$ MOTO (km/h)
54	54	4294 4595 (+ 7,0%)	411 17	3883 4578	10,03 0,30	93,32 93,90	40,9 49,7	41,7 48,7
54	135	4854 4761 (- 1,9%)	0 13	4854 4748	0,00 0,30	39,98 93,9	- 39,7	121,4 50,5
135	54	4298 4290 (-0,2%)	413 796	3885 3494	10,03 15,6	93,32 92,9	41,2 50,8	41,6 37,6
135	135	4854 5247 (+8,1%)	0 33	4854 5214	0,00 0,20	39,98 40,1	- 130,5	121,4 129,9

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

5.4 Estudo do caso com ambos os veículos mudando de faixa: impacto da mudança de faixa dos carros

Nesta seção serão apresentados os principais resultados para análise do impacto da mudança de faixa dos automóveis no tráfego. Todos os resultados estão presentes no Apêndice deste trabalho.

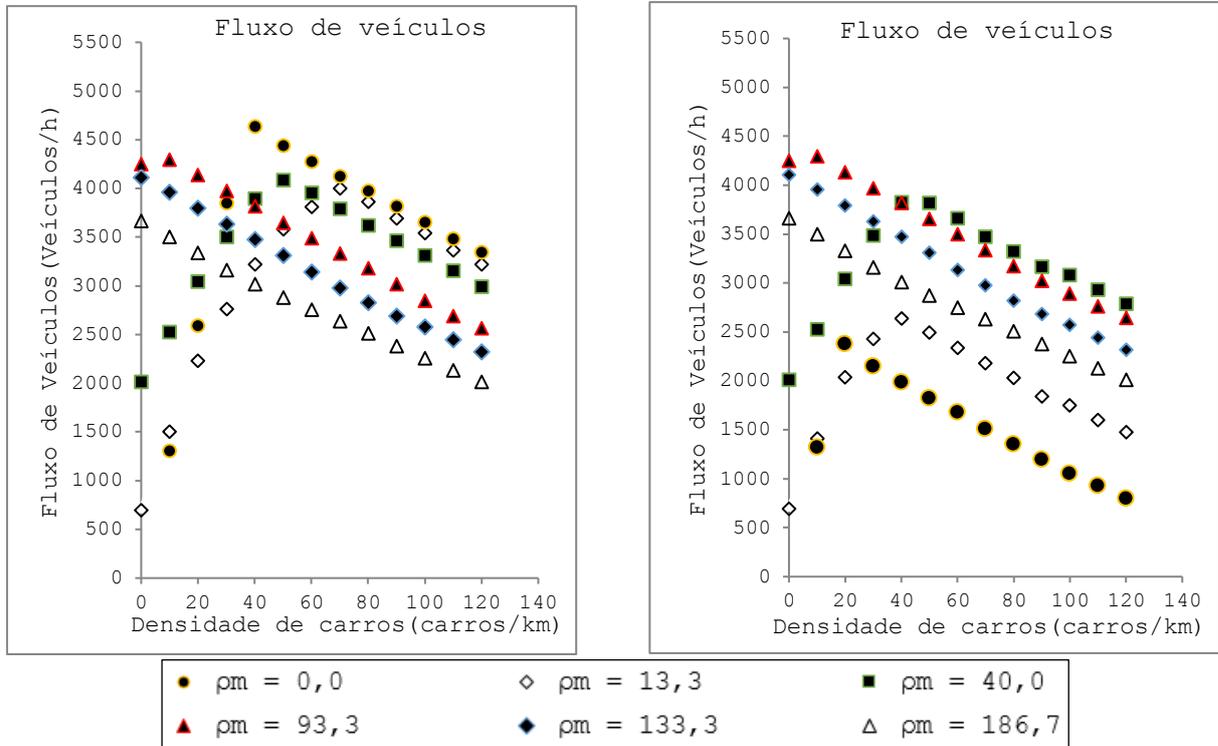
Para análise macroscópica será utilizado apenas o caso base, uma vez que foi verificado comportamento semelhante para todas as combinações de velocidades utilizadas neste trabalho. Percebe-se, na Figura 20 abaixo, que a possibilidade de automóveis mudarem de faixa não tem um grande impacto no fluxo de veículos em densidade de motos intermediárias e altas, como em $\rho^m = 40,0$; $\rho^m = 93,3$; $\rho^m = 133,3$ e $\rho^m = 186,7$. No entanto, a possibilidade de carros mudarem de faixa em densidades mais baixas significa um aumento considerável de fluxo de veículos. Em altas densidades as mudanças de faixa não ocorrem com tanta frequência (ou não ocorrem) e a velocidade apenas é influenciada pela quantidade de veículos na via.

Esse mesmo comportamento é observado para todas as outras combinações de velocidades máximas. Isso pode ser verificado comparando os resultados do Apêndice C (figuras B1 e B2; C1 e C2; D1 e D2). As comparações entre as figuras citadas anteriormente mostram que em baixa densidade de motos ($\rho^m = 0,0$ e $\rho^m = 13,3$) existe um aumento de fluxo de veículos. Porém, o fluxo de veículos é semelhante para altas densidade de motocicletas ($\rho^m = 93,3$; $\rho^m = 133,3$ e $\rho^m = 186,7$).

Figura 20 - Fluxo de veículos para as situações em que carros e motos mudam de faixa (a) e apenas motos mudam de faixa (b)

a) $V_{\text{máx,carro}}=135$ km/h; $V_{\text{máx,moto}}=54$ km/h;
carros e motos mudam de faixa

b) $V_{\text{máx,carro}}=135$ km/h; $V_{\text{máx,moto}}=54$ km/h;
apenas motos mudam de faixa



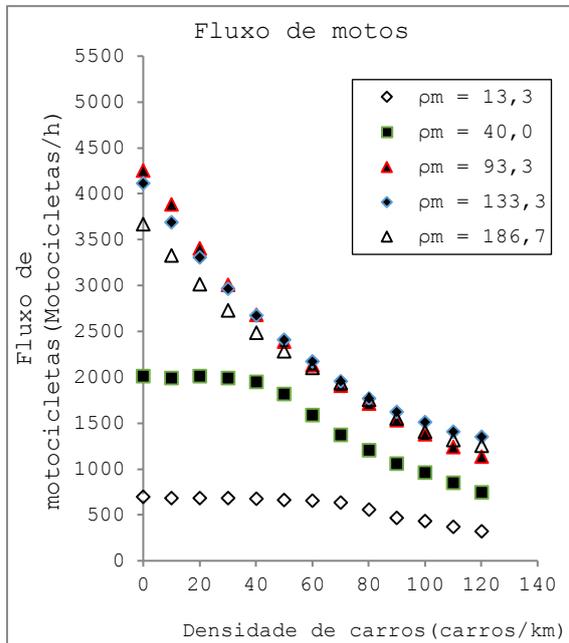
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Para baixa densidade de motos ($\rho^m = 0,0$ e $\rho^m = 13,3$), a possibilidade de troca de faixa tem grande impacto no fluxo de veículo, mesmo para situação em que as motos tem velocidade máxima inferior, como no caso base. Quando a densidade de motos é pequena, é provável que as situações de segurança para troca de faixa sejam mais facilmente satisfeitas, de maneira que a troca de faixa ocorra com mais frequência e favorecendo o tráfego de carros.

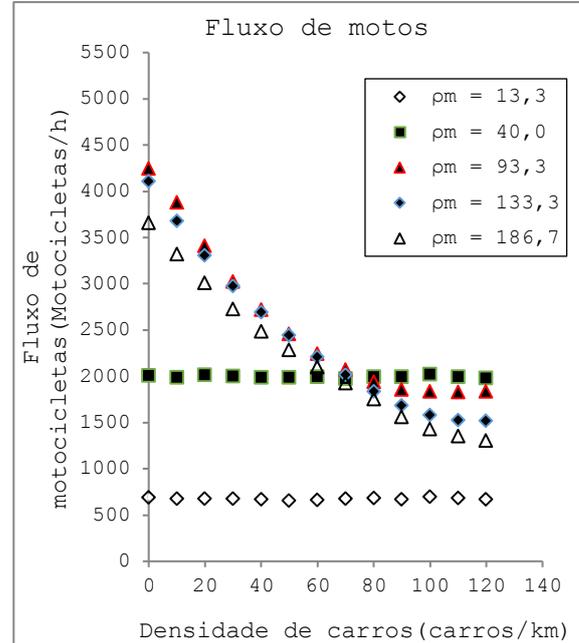
A Figura 21 mostra fluxo de motos para duas situações, carros e motos podem mudar de faixa e apenas motos mudam de faixa. Observa-se que o fluxo das motos é sempre menor quando os carros podem mudar de faixa em altas densidades de carros, principalmente em densidades mais baixas de motos. Nota-se na Figura 21b que o fluxo é constante para baixa densidades de motos ($\rho^m = 13,3$ e $\rho^m = 40,0$). Porém, com os carros mudando de faixa, Figura 21a, há decréscimo de fluxo de motos a partir de $\rho^c = 50,0$.

Figura 21 – Fluxo de motos para as situações em que carros e motos mudam de faixa (a) e apenas motos mudam de faixa (b)

a) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



b) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
apenas motos mudam de faixa



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

A possibilidade de mudança de faixa dos automóveis resulta em diferentes interações entre os veículos. Isso é evidenciado pelas diferenças entre as curvas nos gráficos de desvio padrão (Apêndice H e Apêndice G), principalmente quando o tráfego é mais complexo (densidades intermediárias de veículos). Os mecanismos de formação de congestionamento para motos em $\rho^m = 93,3$ analisados na seção 5.1 ainda ocorrem. Contudo, as relações ficam mais complexas, pois os carros também trocam de faixa quando existe vantagem. As seções menos congestionadas da via, resultantes do menor afastamento dos veículos devido às velocidades baixas em partes mais densas, estão sujeitas a troca de pista de carros e motos para prolongação do movimento em velocidades mais altas.

A Tabela 8, na próxima página, representa um resumo dos gráficos apresentados anteriormente com foco nas características para fluxo máximo para cada combinação de velocidade simulada. Essa tabela permite a comparação das características do tráfego entre os resultados da simulação em que carros trocam (valores em negrito) e não trocam de faixa. As características para tráfego máximo permanecem as mesmas para quase todas as combinações de velocidades, exceto para a situação onde a velocidade máxima dos automóveis é superior a velocidade máxima das motos. Para a situação em que carros e motos podem mudar de faixa, o

fluxo máximo de veículos ocorre com a maior quantidade de veículos com maior velocidade máxima. Contudo, uma vez que carros e motos possuam a mesma velocidade máxima, é natural que o fluxo máximo ocorra com uma menor quantidade de carros. As motocicletas ocupam menos espaço e, por isso, conseguem trafegar com menor interferência em densidades superiores.

Tabela 8 - Fluxo máximo de veículos para cada combinação de velocidades máximas para as condições em que carros e motos mudam de faixa e apenas motos trocam de faixa. Os valores em negrito correspondem a situação em que carros e motos mudam de faixa e os valores entre parênteses representam a diferença percentual em relação a situação em que apenas motos trocam de faixa

$V_{MÁX}$ CARRO (km/h)	$V_{MÁX}$ MOTO (km/h)	$Q_{MÁX}$ (Veículos/h)	Q_{CARRO} (Carros/h)	Q_{MOTO} (Motos/h)	ρ^c (Carros/km)	ρ^m (Motos/km)	$V_{MÉDIA}$ CARRO (km/h)	$V_{MÉDIA}$ MOTO (km/h)
54	54	4294 4290 (-0,1%)	411 414	3883 3876	10,03 10,03	93,32 93,32	40,9 41,2	41,7 41,6
54	135	4854 4854 (0,0%)	0 0	4854 4854	0,00 0,00	39,98 39,98	- -	121,4 121,4
135	54	4298 4630 (+7,7%)	413 4630	3885 0	10,03 39,91	93,32 0,00	41,2 116,0	37,6 -
135	135	4854 4854 (0,0%)	0 0	4854 4854	0,00 0,00	39,98 39,98	- -	121,4 121,4

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

6 CONCLUSÃO

O estudo do tráfego misto considerando diferentes modelos (discreto e contínuo), velocidades máximas dos veículos e mudanças de faixas de carros e motos possibilitou a análise do impacto das características do modelo de tráfego computacional utilizado.

Na comparação entre os modelos, o uso de um modelo de tráfego contínuo no espaço não representou diferenças significativas no comportamento macroscópico, exceto para $\rho^m = 40,0$ quando a velocidade máxima dos carros era 54 km/h e a velocidade máxima das motos era 135 km/h. Deve-se destacar que os parâmetros do modelo contínuo foram definidos para resultar uma maior equivalência com o modelo discreto comparado. Ambos os modelos têm como semelhança o tempo de atualização do sistema, 1 segundo. Porém, modelo autômato celular segue uma lista de regras que resultam no movimento longitudinal e na troca de faixa, já o modelo utilizado neste trabalho se movimenta longitudinalmente seguindo condições de segurança e a troca de faixa apenas ocorre quando existe um incentivo no momento associado a condições de segurança. Essas diferenças para o movimento longitudinal e troca de faixa não são suficientes para a mudança do comportamento dos veículos em nível macroscópico, contudo resultam em diferenças na magnitude das velocidades médias. As velocidades média de carros e motos no modelo utilizado são inferiores em situações de baixas densidades de veículos. Já em altas densidades, as velocidades são maiores.

Deve-se ser lembrado que a situação simulada é simples. Uma pista de 7,5 km com duas faixas sob condições periódicas de contorno. Apenas existem um tipo de carro e de moto sem a presença de semáforos, cruzamentos, obras ou acidentes na pista. É necessário investigar os dois modelos sob condições mais complexas, como as citadas anteriormente, para um melhor entendimento das diferenças entre os modelos.

As combinações de velocidades máximas analisadas mostraram que, em altas densidades de veículos, a velocidade máxima não influencia o fluxo de veículos. A grande quantidade de veículos em altas densidades resulta em velocidades semelhantes para as quatro combinações, sendo inferiores a 50 km/h. Em adição, a velocidade máxima para os carros não demonstrou grande influência no fluxo máximo de veículos. Contudo, para esta análise os carros não podiam mudar de faixa.

A possibilidade de troca de faixa de carros tem impacto em baixas densidades de motos ($\rho^m = 0,0$ e $\rho^m = 13,3$), evidenciando que a troca de faixa ocorre com menos frequência em densidades elevadas. Usando o caso base como exemplo, o fluxo de veículos cresce de 2.376 para 4.630 veículos/h em $\rho^m = 0,0$ e de 2.637 para 3.998 em $\rho^m = 13,3$. Embora, a maioria dos casos tenham mostrado mesmas características para o fluxo máximo de carros, essa análise permitiu verificar que o fluxo máximo ocorre naturalmente para a maior quantidade de veículos com velocidade máxima. Em adição, quando ambos os veículos possuem mesma velocidade máxima, o fluxo máximo ocorre para uma grande (ou total) quantidade de veículos com menor tamanho. Entretanto, é necessário realizar mais simulações para um maior número de combinações de velocidades para confirmar as evidências.

Além dos estudos sugeridos anteriormente para melhor entendimento do impacto da utilização de um modelo microscópico contínuo, o modelo utilizado pode se tornar mais realista. O estudo foi realizado com somente um modelo de tráfego em que as forças que atuavam nos veículos e as características do motor não foram consideradas. A edição dessas considerações permitiria o estudo do impacto dessas restrições no movimento dos veículos e uma análise relacionada ao consumo de combustível e emissão de poluentes.

REFERÊNCIAS

- ALVES, M. Prefeitura de São Paulo muda placas de velocidade nas marginais. **Folha de S.Paulo**, 25 jan. 2017.
- ANTP. **Sistema de Informações da Mobilidade Urbana - Relatório Geral 2014**. 2016a. Disponível em: <http://files.antp.org.br/2016/9/3/sistemasinformacao-mobilidade--geral_2014.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2017.
- ANTP. **Sistema de Informações da Mobilidade Urbana - Relatório Comparativo 2003-2014**. 2016b. Disponível em: <http://files.antp.org.br/2016/9/3/sistemasinformacao-mobilidade--comparativo-2003_2014.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2017.
- BARCELÓ, J. **Fundamentals of Traffic Simulation**. New York, NY: Springer New York, 2010. v. 145
- CHABINI, I.; ODONI, A. **225 J (ESD 205) Transportation Flow Systems Lecture 1 Cumulative Plots & Time - Space Diagrams Diagrams**. Disponível em: <<http://ocw.mit.edu/courses/civil-and-environmental-engineering/1-225j-transportation-flow-systems-fall-2002/lecture-notes/lecture1.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2016.
- DENATRAN. **Frota de Veículos - 2016**. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/index.php/estatistica/261-frota-2016>>. Acesso em: 15 fev. 2017.
- DEPARTAMENTO ESTADUAL DE TRÂNSITO DE GOIÁS. **Manual de primeiros socorros no trânsito**. Goiânia: DETRAN/GO, 2005.
- FRANZ, C. M.; SEBERINO, J. R. V. A história do trânsito e sua evolução. 2012.
- GALLO, R. Ensaio sobre o aperto. **Folha de S. Paulo**, 24 jan. 2015.
- GAZIS, D. C. **Traffic Theory**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002. v. 50
- GIL, J. D. M. **Cosmo Optimizing the city with collaborative route planning**. FCTUC, 2011.
- GIPPS, P. G. A behavioural car-following model for computer simulation. **Transportation Research Part B**, v. 15, n. 2, p. 105–111, 1981.
- GOMIDE, A.; MORATO, R. **INSTRUMENTOS DE DESESTÍMULO AO USO DO TRANSPORTE INDIVIDUAL MOTORIZADO: LIÇÕES E RECOMENDAÇÕES SÉRIE TEMAS EM DEBATE**.
- HENCLEWOOD, D. the Development of a Dynamic-Interactive-Vehicle Model for Modeling Traffic Beyond a Microscopic Level. n. February, 2007.
- IEMA. **EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO BRASIL (1990-2013) SETOR DE ENERGIA E PROCESSOS INDUSTRIAIS**. São Paulo. Disponível em: <https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/seeg.tracersoft.com.br/wp-content/uploads/2015/08/energia_industria_2015.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2016.
- ITS. **Integrated Corridor Management (ICM) Quarterly Newsletter – Winter 2008**. Disponível em: <http://www.its.dot.gov/icms/docs/knowledgebase/html/news_winter08.htm>.

- KANAGARAJ, V. et al. Evaluation of Different Vehicle Following Models Under Mixed Traffic Conditions. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 104, p. 390–401, 2013.
- KERNER, B. S. **Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- KESTING, A.; TREIBER, M. How reaction time, update time, and adaptation time influence the stability of traffic flow. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 23, n. 2, p. 125–137, 2008.
- KESTING, A.; TREIBER, M.; HELBING, D. General Lane-Changing Model MOBIL for Car-Following Models. p. 86–94.
- KRAJZEWICZ, D. et al. An example of microscopic car models validation using the open source traffic simulation SUMO. **Proceedings of Simulation in Industry 14th European Simulation Symposium**, n. c, p. 318–322, 2002.
- KRAJZEWICZ, D.; BONERT, M.; WAGNER, P. The open source traffic simulation package SUMO. **RoboCup 2006 Infrastructure Simulation Competition**, p. 1–5, 2006.
- KRAUSS, S. Microscopic modeling of traffic flow: Investigation of collision free vehicle dynamics. **D L R - Forschungsberichte**, n. 8, 1998.
- KRAUSS, S.; WAGNER, P.; GAWRON, C. Metastable states in a microscopic model of traffic flow. **Physical Review E**, v. 55, n. 5, p. 5597–5602, 1997.
- LUO, Y. et al. Modeling the interactions between car and bicycle in heterogeneous traffic. **Journal of Advanced Transportation**, v. 49, n. 1, p. 29–47, jan. 2015.
- MENDES, F. E. **AVALIAÇÃO DE PROGRAMAS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA POR VEÍCULOS LEVES NO BRASIL**. UFRJ, 2004.
- MENG, J. et al. Cellular automaton model for mixed traffic flow with motorcycles. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 380, p. 470–480, 2007.
- MTOI, E. T.; MOSES, R.; OZGUVEN, E. E. An Alternative Approach to Network Demand Estimation : Implementation and Application in Multi-Agent Transport Simulation (MATSim). **Procedia - Procedia Computer Science**, v. 37, p. 382–389, 2014.
- NAGEL, K.; SCHRECKENBERG, M. **A cellular automaton model for freeway traffic**. *J. Phys. I France*, 1992.
- NETO, P. D. G. **ESTUDO COMPUTACIONAL DO TRAFEGO MISTO DE MOTOCICLETAS E AUTOMOVEIS**. UFPE, 2014.
- NI, D. **Traffic Flow Theory: Characteristics, Experimental Methods, and Numerical Techniques**. Elsevier Science, 2015.
- RICARDO SILVA, A.; ALVES DA SILVA, T. DE A. O DESEMPREGO E O MOTOTAXISMO NO MUNICÍPIO DE MORENO-PE. **Revista Cadernos de Ciências Sociais da UFRPE**, p. 39–61, 2013.

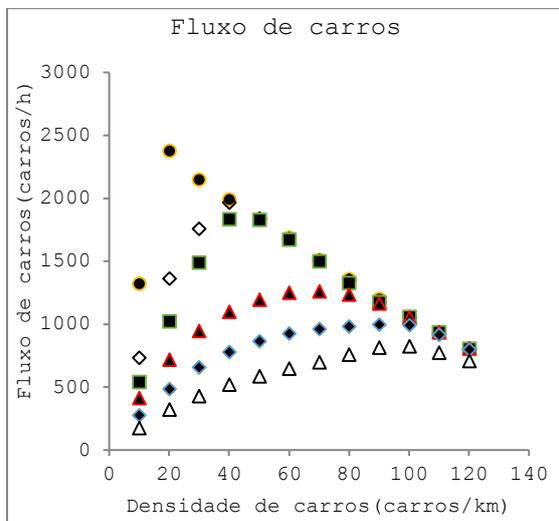
- RUSSO, R. **Mortes no trânsito caem 21% na cidade de São Paulo; Estado tem queda de 8%**. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2016/07/1793809-mortes-no-transito-caem-21-na-cidade-de-sao-paulo-estado-tem-queda-de-8.shtml>>. Acesso em: 9 dez. 2016.
- STATISTA. **Motorcycle ownership by household - by country 2014 | Statistic**. 2014a. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/516704/share-of-households-that-own-a-motorcycle-by-country/>>. Acesso em: 18 fev. 2017.
- STATISTA. **Car ownership by household - by country 2014 | Statistic**. 2014b. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/516280/share-of-households-that-own-a-passenger-vehicle-by-country/>>. Acesso em: 18 fev. 2017a.
- SUGIYAMA, Y. et al. Traffic jams without bottlenecks-experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam. **New Journal of Physics**, v. 10, 2008.
- TREIBER, M. **Microsimulation of Traffic Flow**. Disponível em: <<http://www.traffic-simulation.de/index.html>>. Acesso em: 5 jan. 2017.
- TREIBER, M.; KESTING, A. **Traffic Flow Dynamics**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- VAN WAGENINGEN-KESSELS, F. et al. Genealogy of traffic flow models. **EURO Journal on Transportation and Logistics**, v. 4, n. 4, p. 445–473, 2014.
- WHO. **WHO | Global status report on road safety 2015**. Disponível em: <http://apps.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/en/index.html>. Acesso em: 8 jun. 2016.
- WU, P.; XUE, H. Particle Filter Based Traffic Data Assimilation with Sensor Informed Proposal Distribution. **ANSS**, p. 264–271, 2015.
- ZHENG, J.; SUZUKI, K.; FUJITA, M. Evaluation of Car-following Models Using Trajectory Data from Real Traffic. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 43, p. 356–366, 2012.

Apêndice A: fluxo de automóveis versus densidade de carros (modelo contínuo)

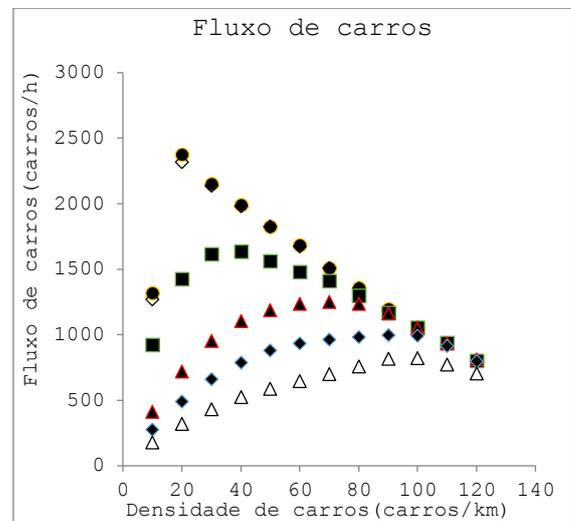
Esta seção expõe todos os diagramas fundamentais de fluxo de automóveis. Resultados em função da densidade de carros para diferentes densidades de motos em diferentes condições de simulação de velocidade máxima, $V_{m\acute{a}x}$, e possibilidade de mudança de faixa apenas para motos (Figuras A1 a D1) e possibilidade de mudança de faixa para carros e motos (Figuras A2 a D2), conforme legendas abaixo.



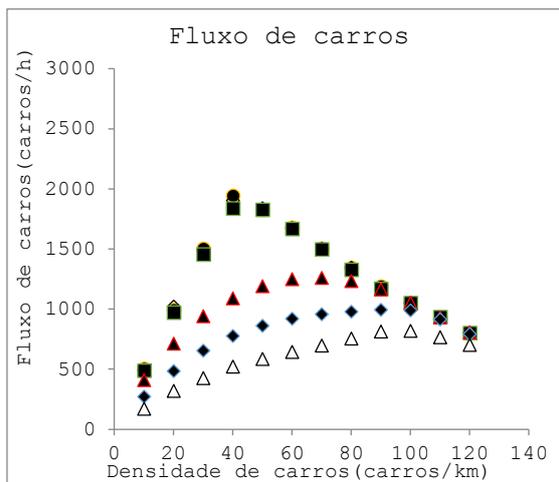
A1) $V_{m\acute{a}x,carro}=135$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=54$ km/h;
apenas motos mudam de faixa



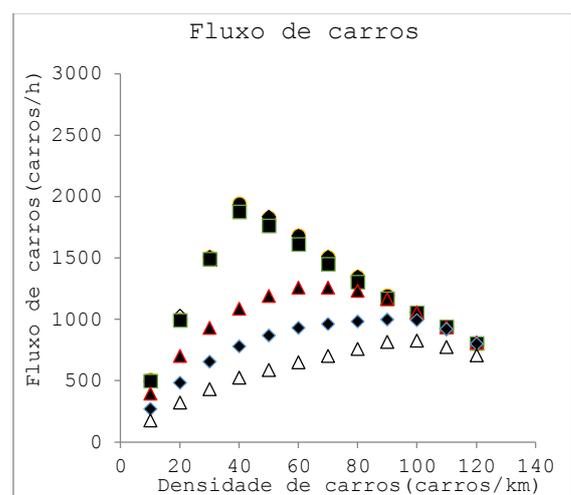
B1) $V_{m\acute{a}x,carro}=135$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=135$ km/h;
apenas motos mudam de faixa



C1) $V_{m\acute{a}x,carro}=54$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=54$ km/h;
apenas motos mudam de faixa

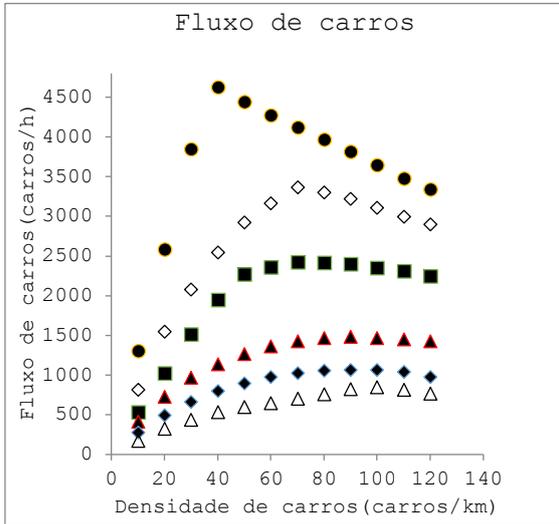


D1) $V_{m\acute{a}x,carro}=54$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=135$ km/h;
apenas motos mudam de faixa

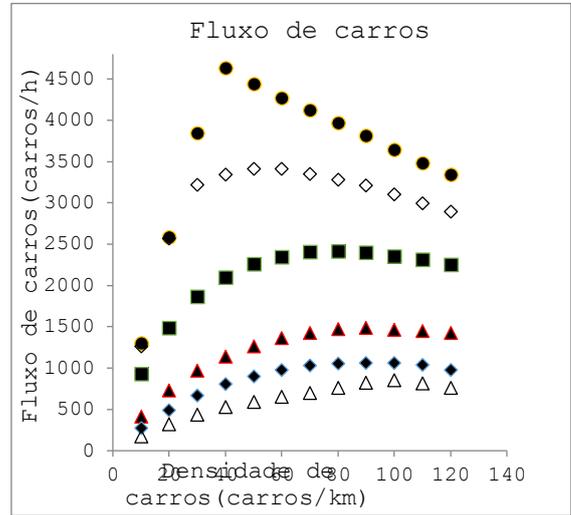




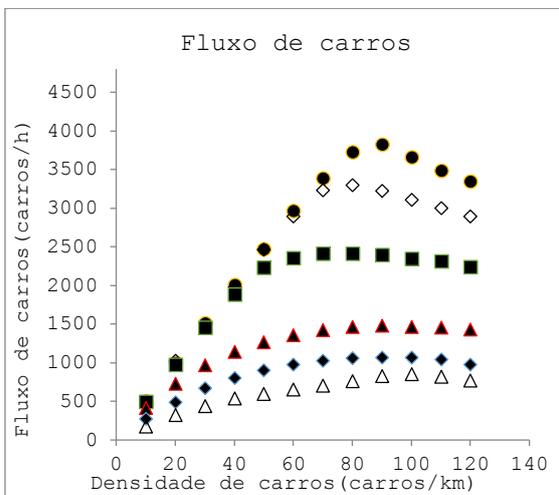
A2) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



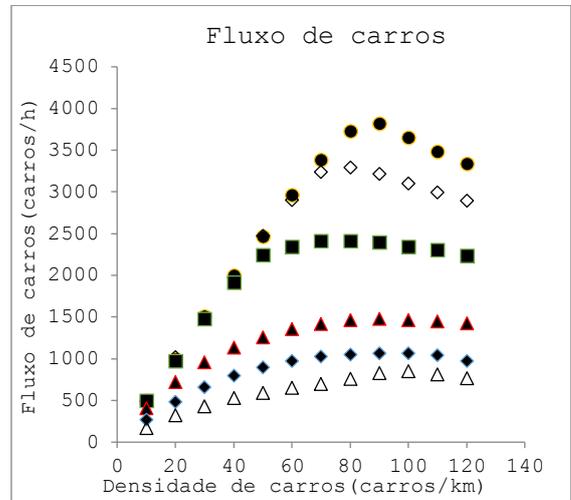
B2) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



C2) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



D2) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa

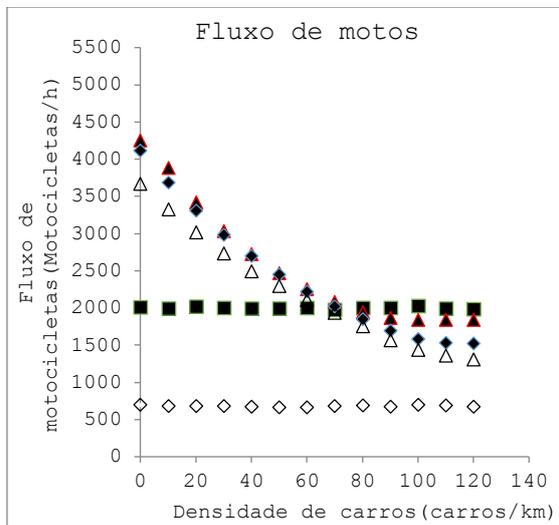


Apêndice B: fluxo de moto versus densidade de carros (modelo contínuo)

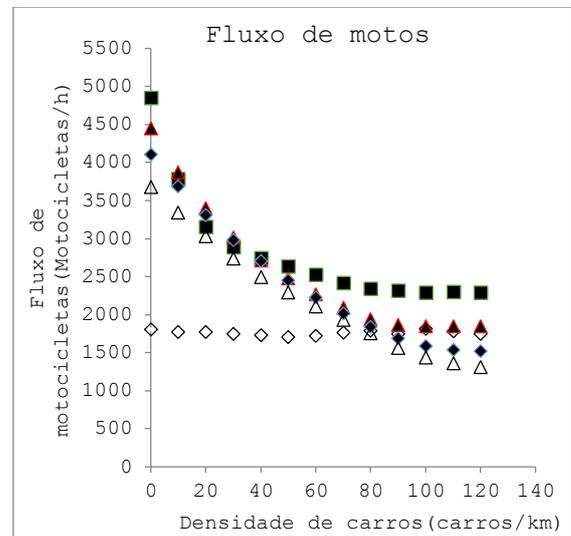
Esta seção expõe todos os diagramas fundamentais de fluxo de motocicletas. Resultados em função da densidade de carros para diferentes densidades de motos em diferentes condições de simulação de velocidade máxima, $V_{\text{máx}}$, e possibilidade de mudança de faixa apenas para motos (Figuras A1 a D1) e possibilidade de mudança de faixa para carros e motos (Figuras A2 a D2), conforme legendas abaixo.

◇ $\rho_m = 13,3$ ■ $\rho_m = 40,0$ ▲ $\rho_m = 93,3$ ◆ $\rho_m = 133,3$ △ $\rho_m = 186,7$

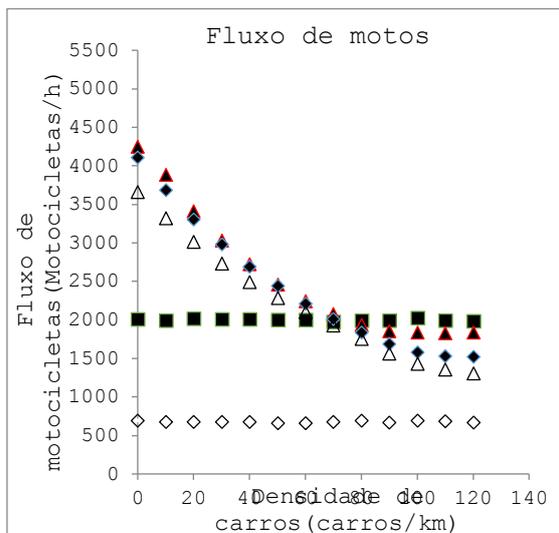
A1) $V_{\text{máx,carro}}=135$ km/h; $V_{\text{máx,moto}}=54$ km/h;
apenas motos mudam de faixa



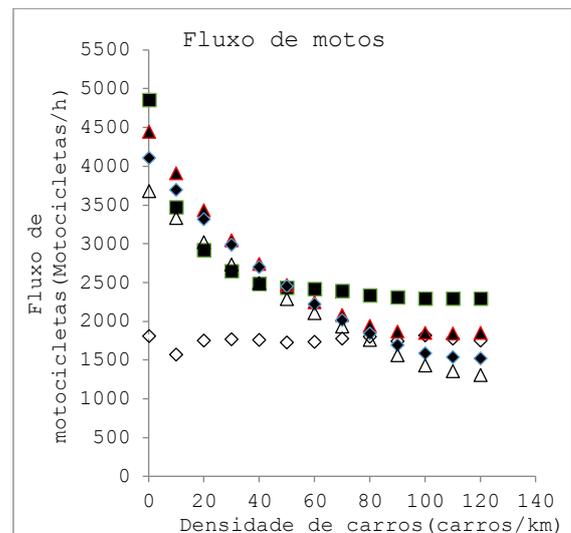
B1) $V_{\text{máx,carro}}=135$ km/h; $V_{\text{máx,moto}}=135$ km/h;
apenas motos mudam de faixa



C1) $V_{\text{máx,carro}}=54$ km/h; $V_{\text{máx,moto}}=54$ km/h;
apenas motos mudam de faixa

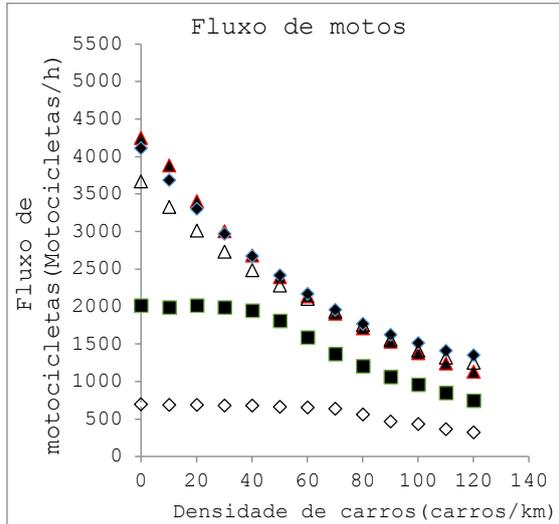


D1) $V_{\text{máx,carro}}=54$ km/h; $V_{\text{máx,moto}}=135$ km/h;
apenas motos mudam de faixa

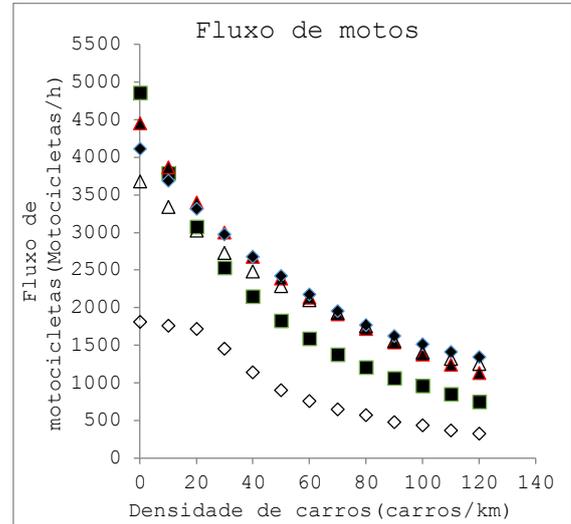


◇ $\rho_m = 13,3$ ■ $\rho_m = 40,0$ ▲ $\rho_m = 93,3$ ◆ $\rho_m = 133,3$ △ $\rho_m = 186,7$

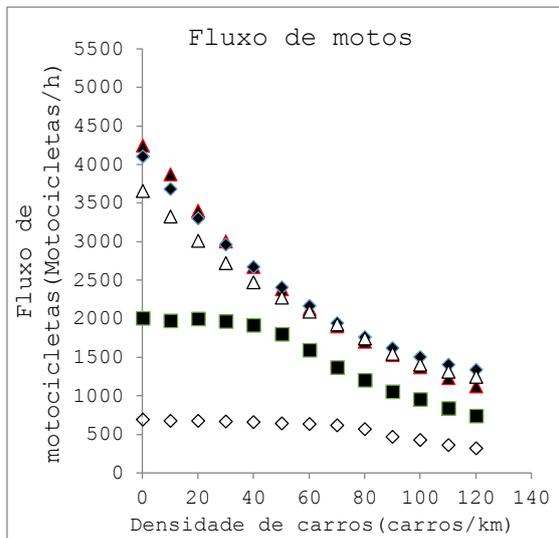
A2) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



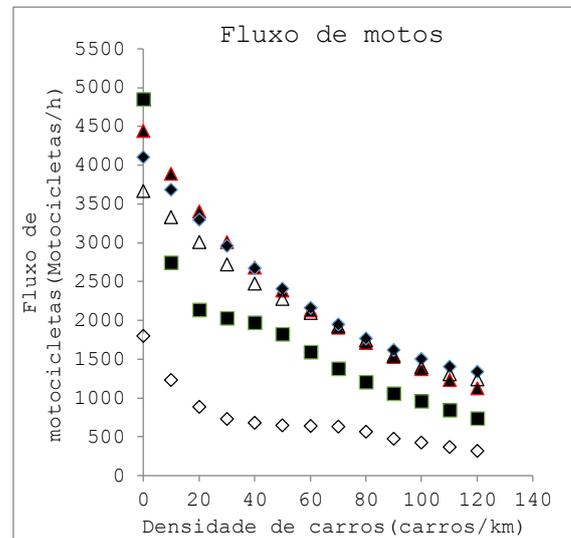
B2) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



C2) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



D2) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa

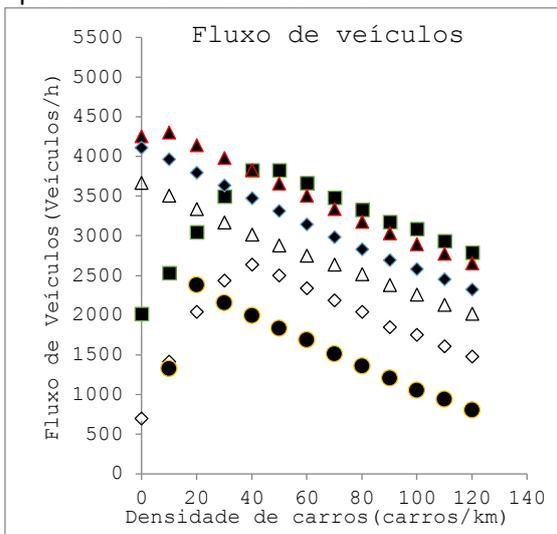


Apêndice C: fluxo de veículos versus densidade de carros (modelo contínuo)

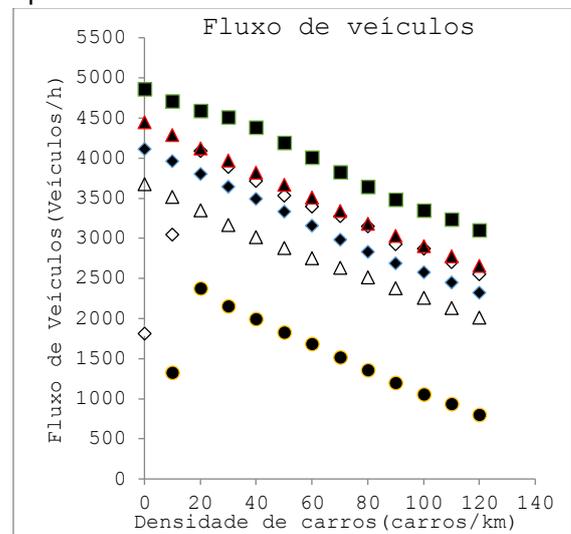
Esta seção expõe todos os diagramas fundamentais de fluxo de veículos. Resultados em função da densidade de carros para diferentes densidades de motos em diferentes condições de simulação de velocidade máxima, $V_{m\acute{a}x}$, e possibilidade de mudança de faixa apenas para motos (Figuras A1 a D1) e possibilidade de mudança de faixa para carros e motos (Figuras A2 a D2), conforme legendas abaixo.

● $\rho_m = 0,0$ ◇ $\rho_m = 13,3$ ■ $\rho_m = 40,0$ ▲ $\rho_m = 93,3$ ◆ $\rho_m = 133,3$ △ $\rho_m = 186,7$

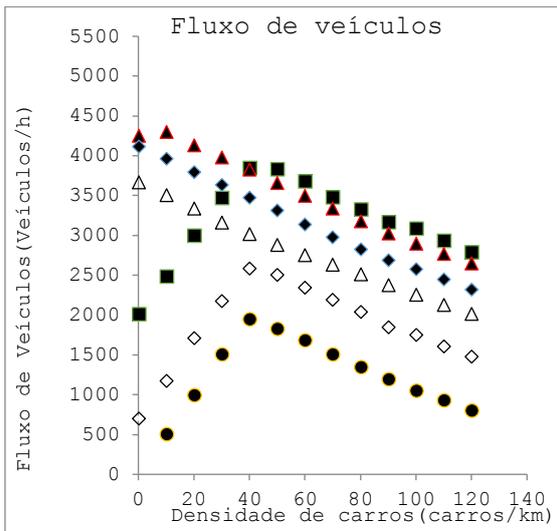
A1) $V_{m\acute{a}x,carro}=135$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=54$ km/h;
apenas motos mudam de faixa



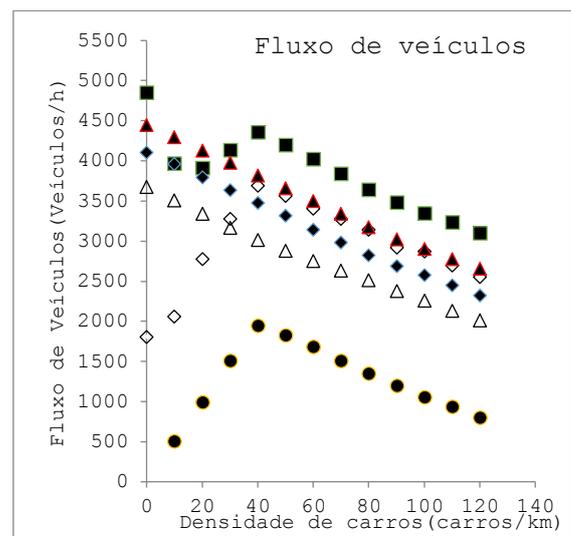
B1) $V_{m\acute{a}x,carro}=135$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=135$ km/h;
apenas motos mudam de faixa



C1) $V_{m\acute{a}x,carro}=54$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=54$ km/h;
apenas motos mudam de faixa

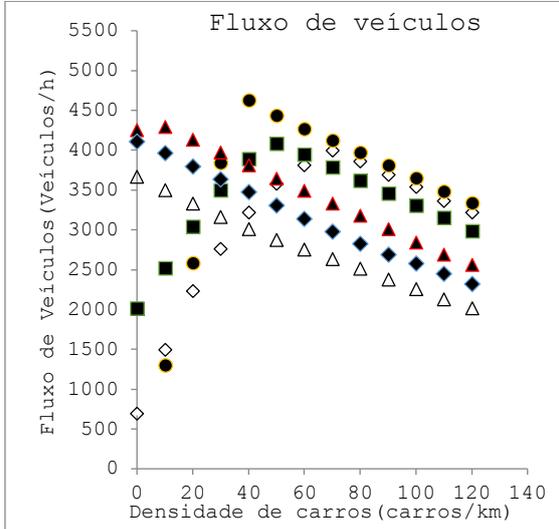


D1) $V_{m\acute{a}x,carro}=54$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=135$ km/h;
apenas motos mudam de faixa

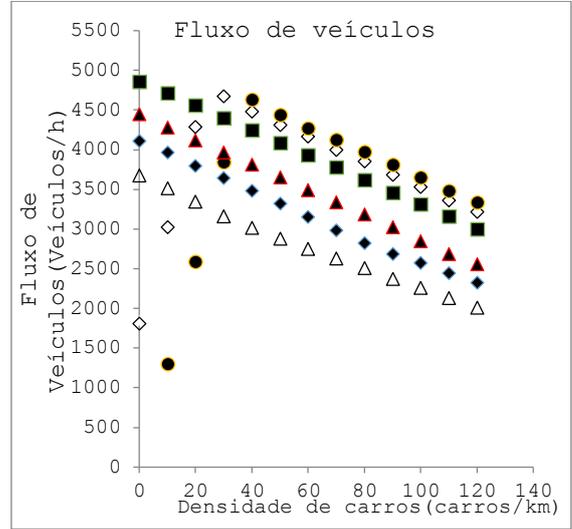


● $\rho_m = 0,0$ ◇ $\rho_m = 13,3$ ■ $\rho_m = 40,0$ ▲ $\rho_m = 93,3$ ◆ $\rho_m = 133,3$ △ $\rho_m = 186,7$

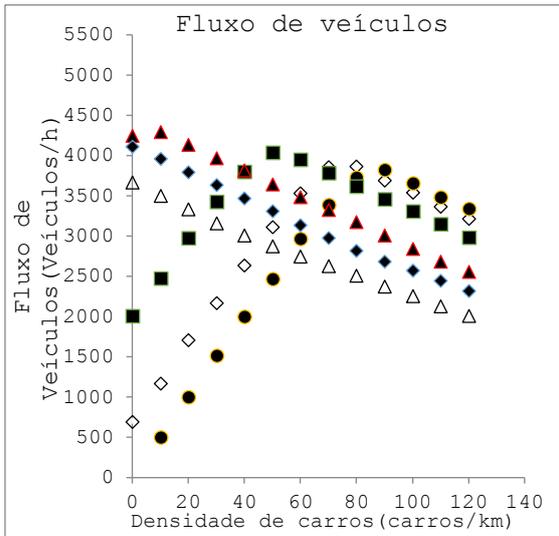
A2) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



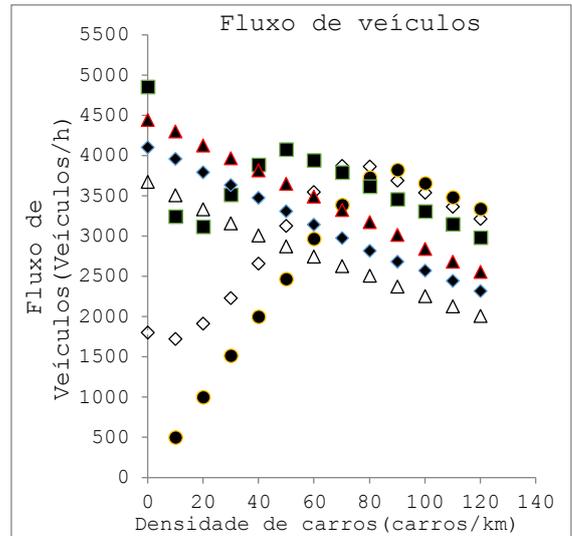
B2) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



C2) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



D2) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa

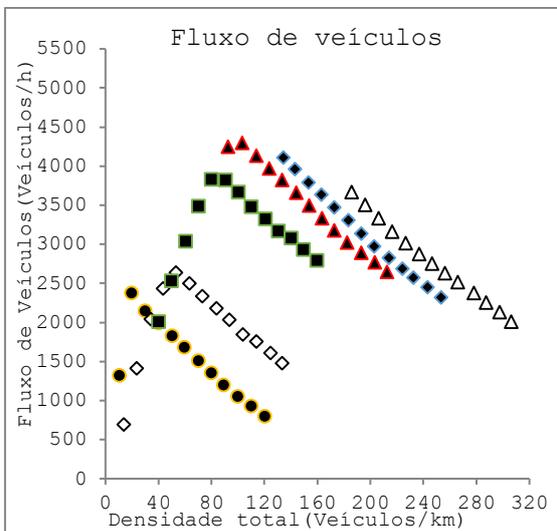


Apêndice D: fluxo total de veículos em função da densidade total (modelo contínuo)

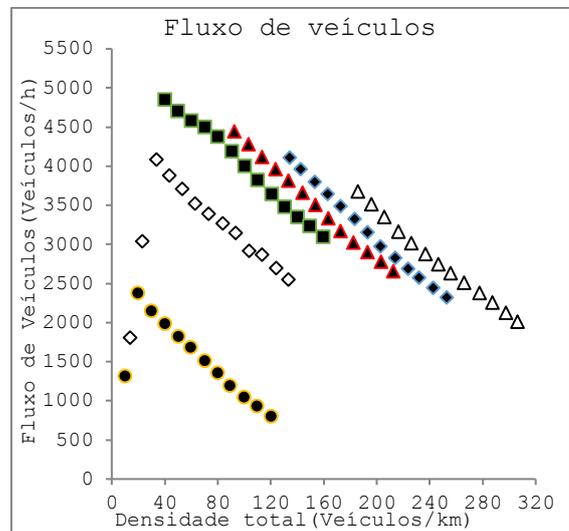
Esta seção expõe todos os diagramas fundamentais de fluxo de veículos. Resultados em função da densidade de total (carros mais motos) para diferentes densidades de motos em diferentes condições de simulação de velocidade máxima, $V_{máx}$, e possibilidade de mudança de faixa apenas para motos (Figuras A1 a D1) e possibilidade de mudança de faixa para carros e motos (Figuras A2 a D2), conforme legendas abaixo.

● $\rho_m = 0,0$ ◇ $\rho_m = 13,3$ ■ $\rho_m = 40,0$ ▲ $\rho_m = 93,3$ ◆ $\rho_m = 133,3$ △ $\rho_m = 186,7$

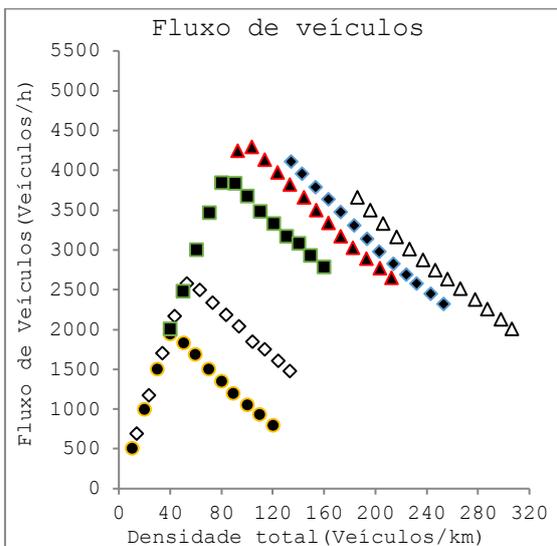
A1) $V_{máx,carro}=135$ km/h; $V_{máx,moto}=54$ km/h;
apenas motos mudam de faixa



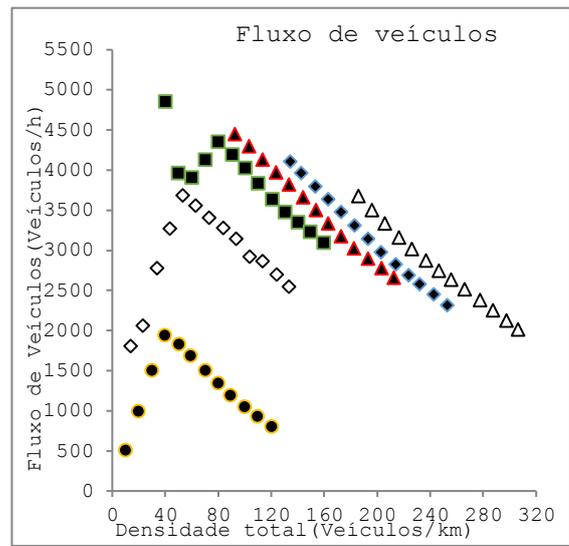
B1) $V_{máx,carro}=135$ km/h; $V_{máx,moto}=135$ km/h;
apenas motos mudam de faixa



C1) $V_{máx,carro}=54$ km/h; $V_{máx,moto}=54$ km/h;
apenas motos mudam de faixa

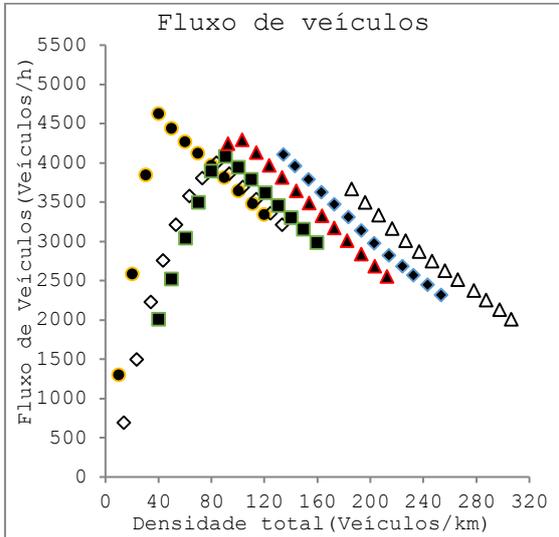


D1) $V_{máx,carro}=54$ km/h; $V_{máx,moto}=135$ km/h;
apenas motos mudam de faixa

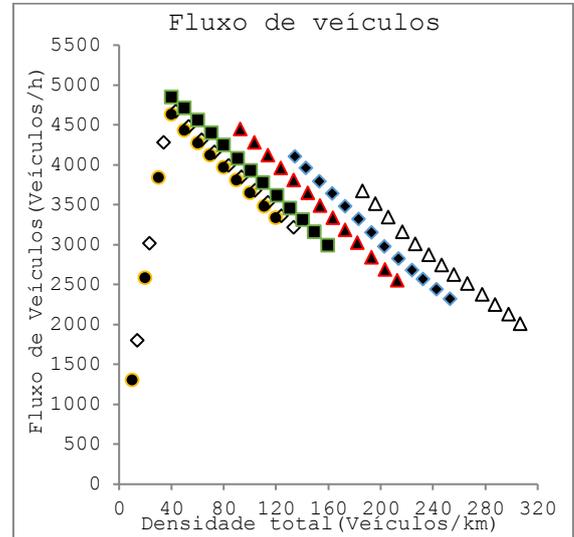




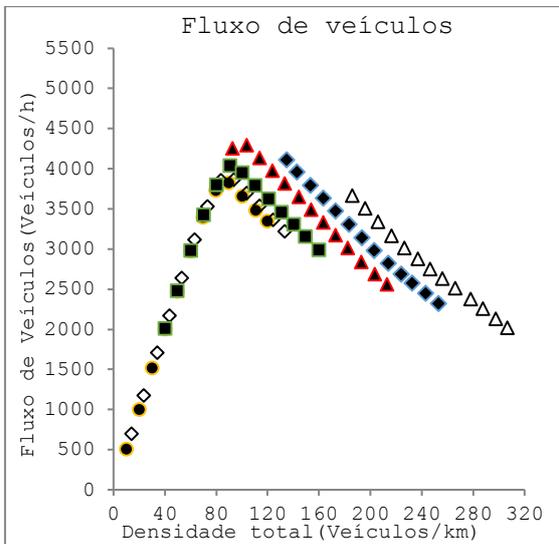
A2) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



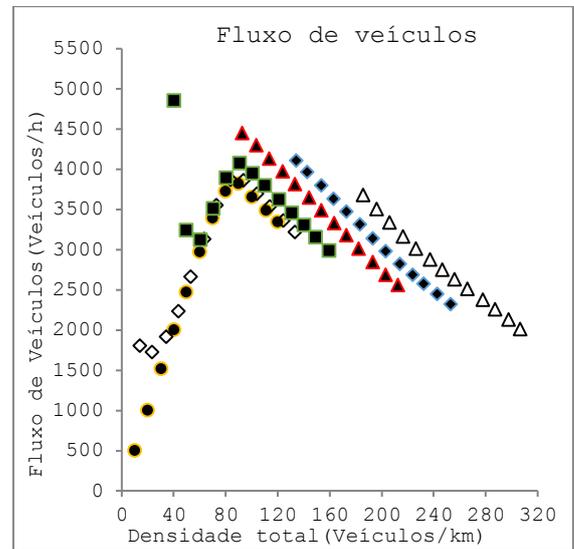
B2) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



C2) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



D2) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa

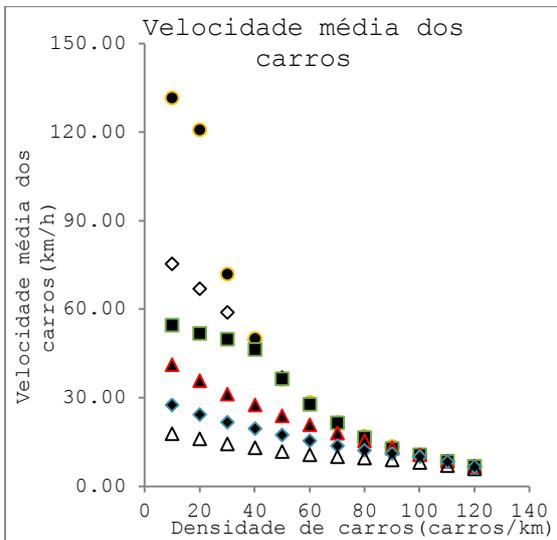


Apêndice E: velocidade média dos carros versus densidade de carros (modelo contínuo)

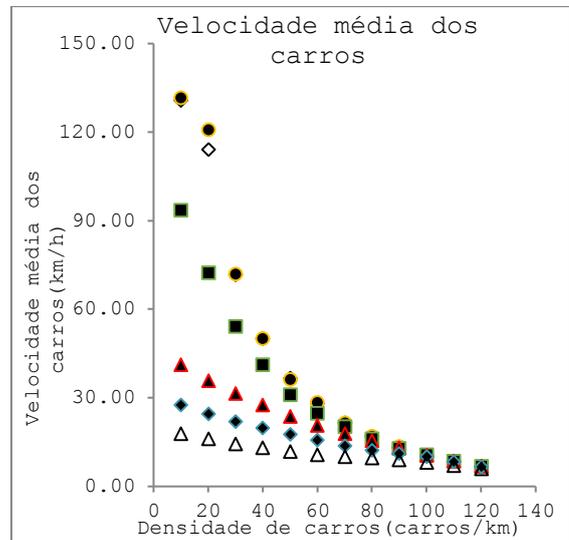
Esta seção expõe todas as velocidades médias dos carros em função de diferentes densidades de carros para diferentes densidades de motos em diferentes condições de simulação de velocidade máxima, $V_{\text{máx}}$, e possibilidade de mudança de faixa apenas para motos (Figuras A1 a D1) e possibilidade de mudança de faixa para carros e motos (Figuras A2 a D2), conforme legendas abaixo.

● $\rho_m = 0,0$ ◇ $\rho_m = 13,3$ ■ $\rho_m = 40,0$ ▲ $\rho_m = 93,3$ ◆ $\rho_m = 133,3$ △ $\rho_m = 186,7$

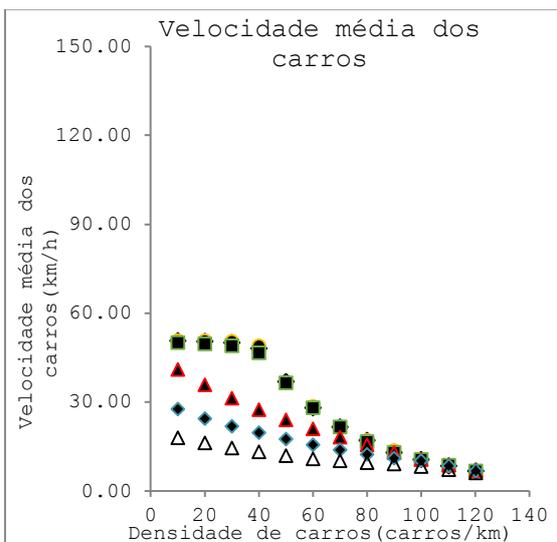
A1) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
apenas motos mudam de faixa



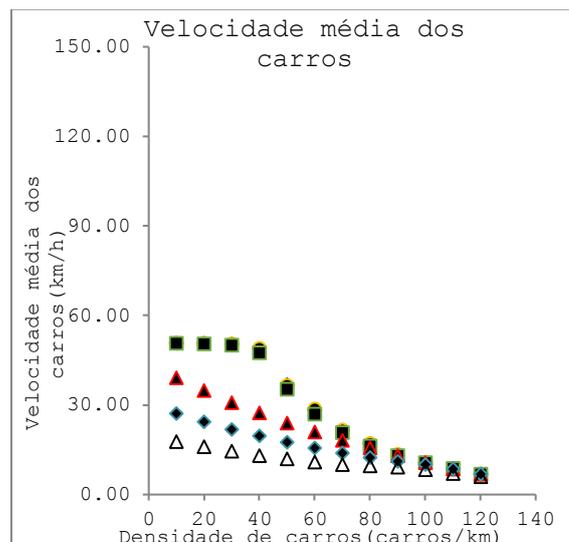
B1) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$;
apenas motos mudam de faixa



C1) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
apenas motos mudam de faixa

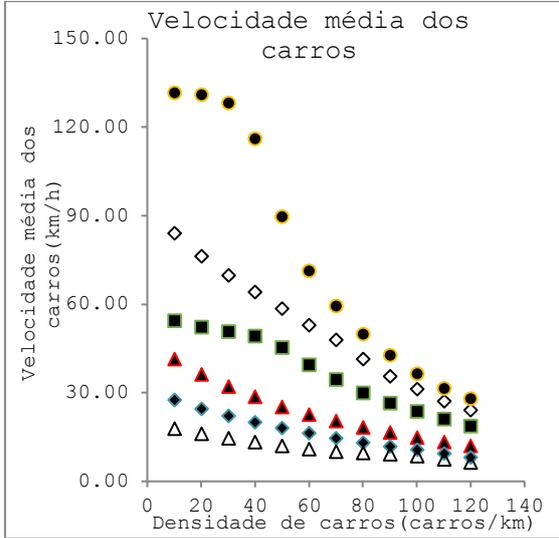


D1) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$;
apenas motos mudam de faixa

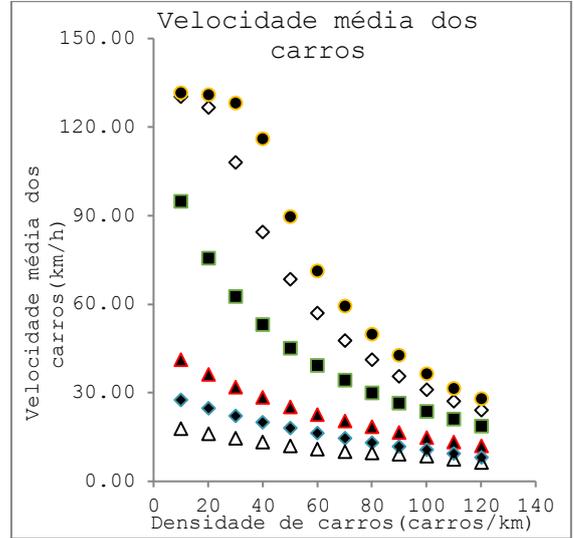




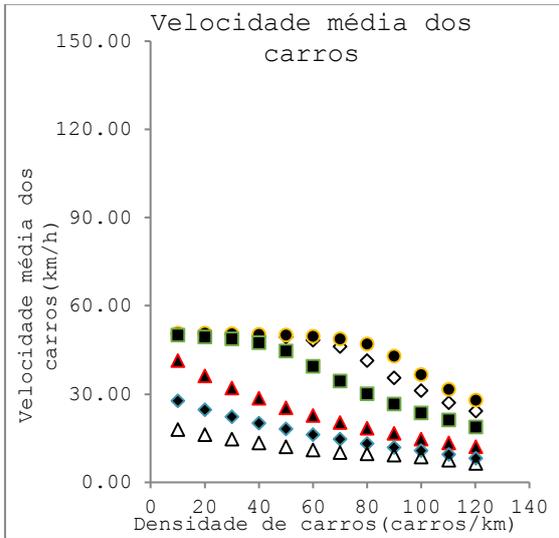
A2) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



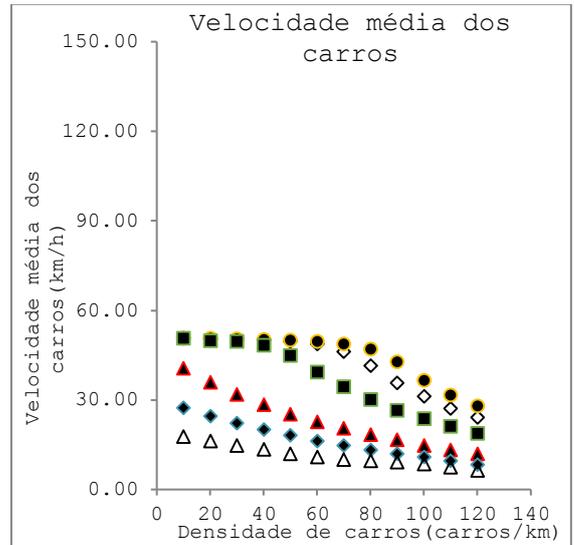
B2) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



C2) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa

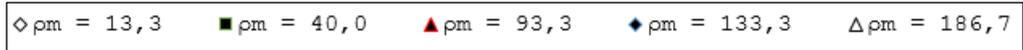


D2) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa

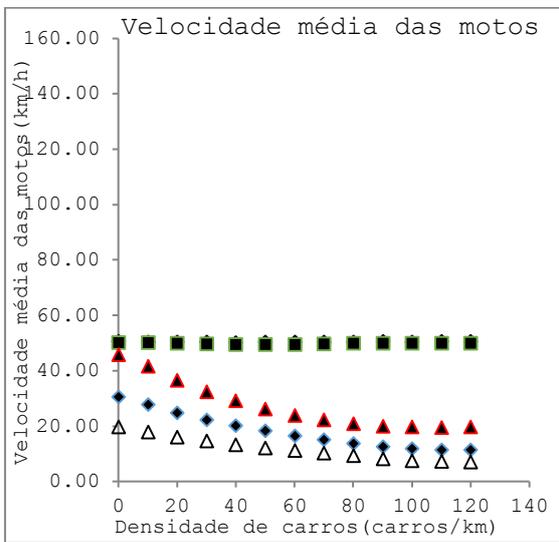


Apêndice F: velocidade média das motos versus densidade de carros (modelo contínuo)

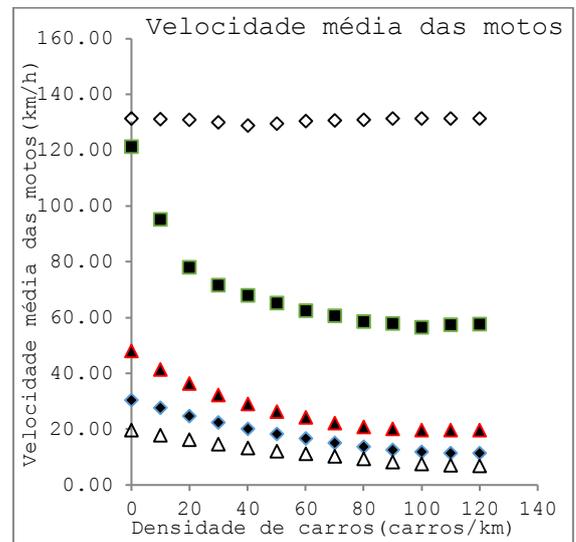
Esta seção expõe todas as velocidades médias das motocicletas em função diferentes densidades de carros para diferentes densidades de motos em diferentes condições de simulação de velocidade máxima, $V_{m\acute{a}x}$, e possibilidade de mudança de faixa apenas para motos (Figuras A1 a D1) e possibilidade de mudança de faixa para carros e motos (Figuras A2 a D2), conforme legendas abaixo.



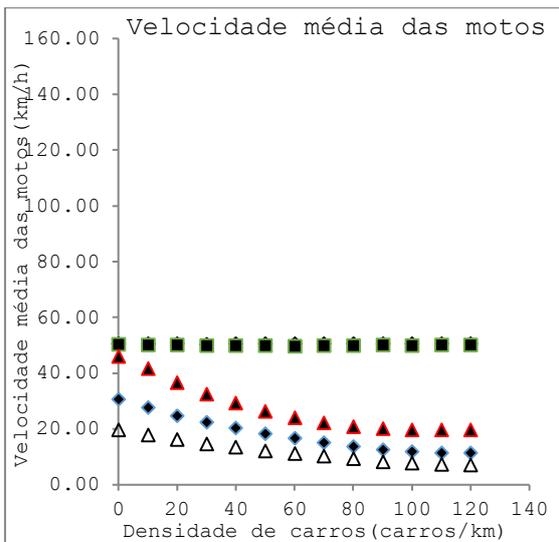
A1) $V_{m\acute{a}x,carro}=135$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=54$ km/h; apenas motos mudam de faixa



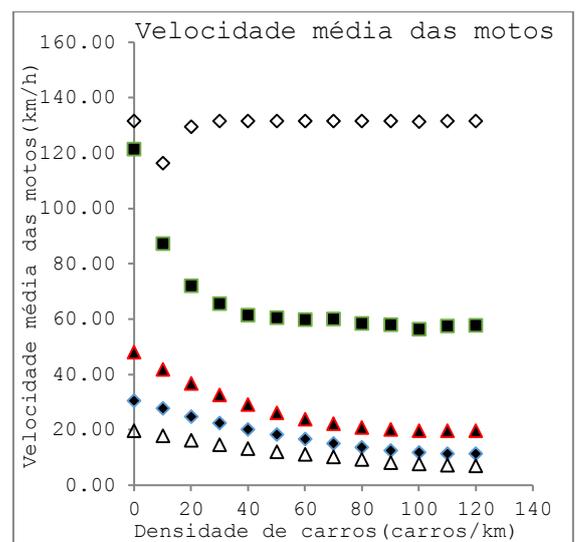
B1) $V_{m\acute{a}x,carro}=135$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=135$ km/h; apenas motos mudam de faixa

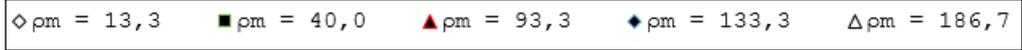


C1) $V_{m\acute{a}x,carro}=54$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=54$ km/h; apenas motos mudam de faixa

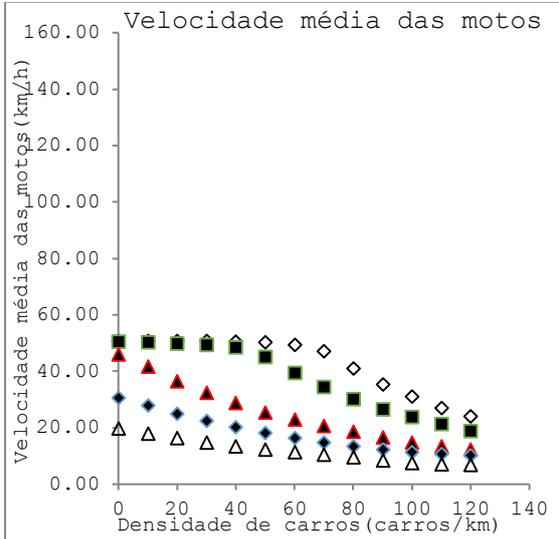


D1) $V_{m\acute{a}x,carro}=54$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=135$ km/h; apenas motos mudam de faixa

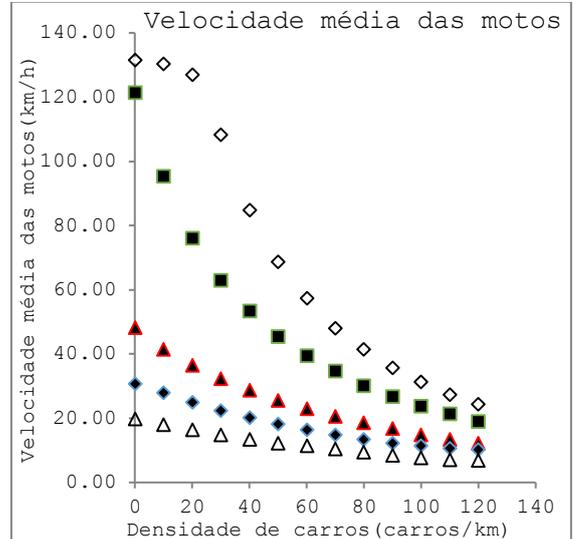




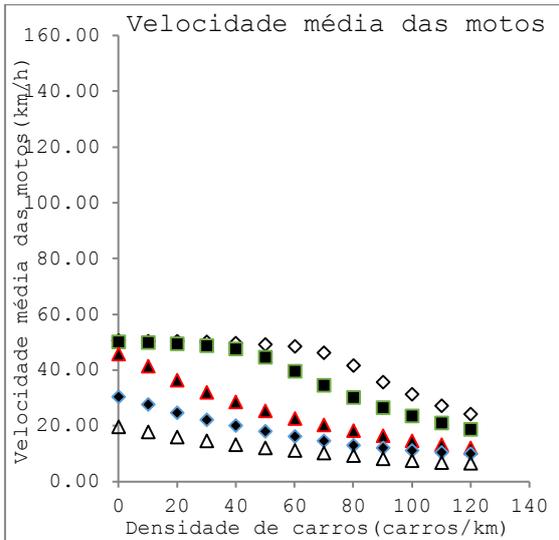
A2) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



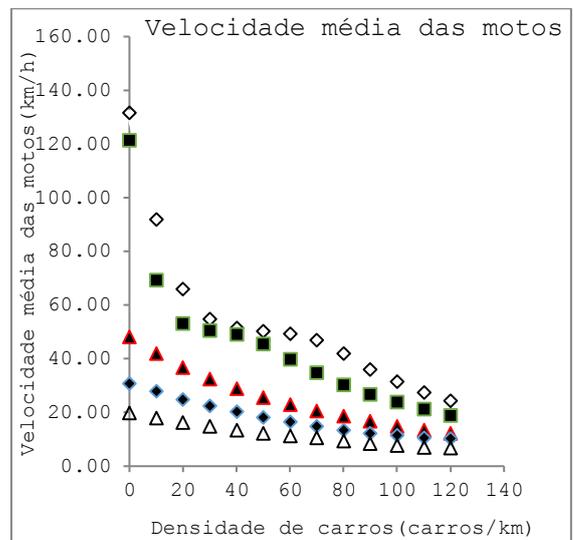
B2) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



C2) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



D2) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa

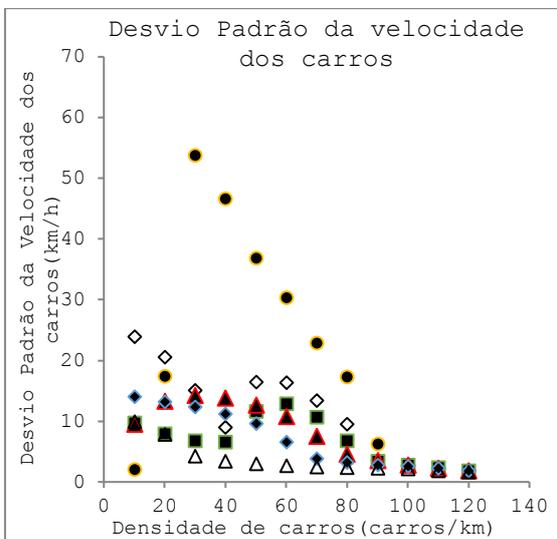


Apêndice G: desvio padrão da velocidade dos carros versus densidade de carros (modelo contínuo)

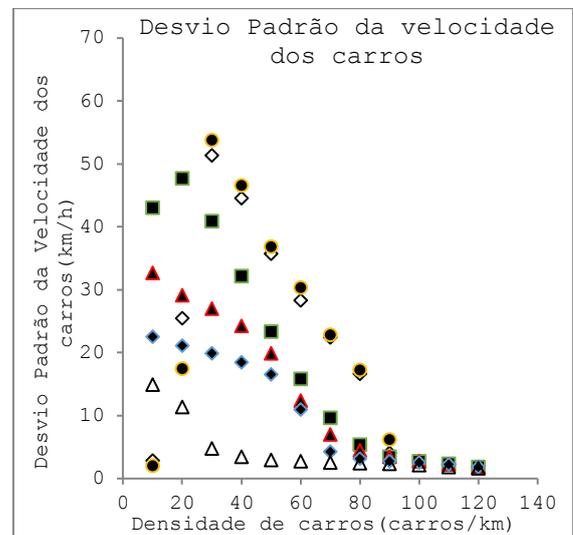
Esta seção expõe o desvio padrão das velocidades dos automóveis em função de diferentes densidades de carros para diferentes densidades de motos em diferentes condições de simulação de velocidade máxima, $V_{m\acute{a}x}$, e possibilidade de mudança de faixa apenas para motos (Figuras A1 a D1) e possibilidade de mudança de faixa para carros e motos (Figuras A2 a D2), conforme legendas abaixo.

● $\rho_m = 0,0$ ◇ $\rho_m = 13,3$ ■ $\rho_m = 40,0$ ▲ $\rho_m = 93,3$ ◆ $\rho_m = 133,3$ △ $\rho_m = 186,7$

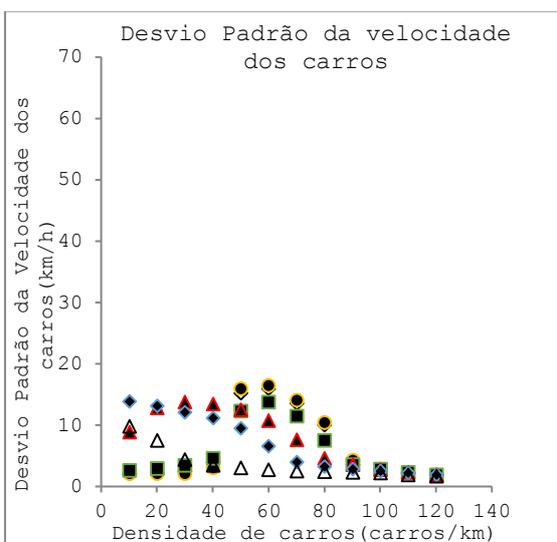
A1) $V_{m\acute{a}x,carro}=135$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=54$ km/h;
apenas motos mudam de faixa



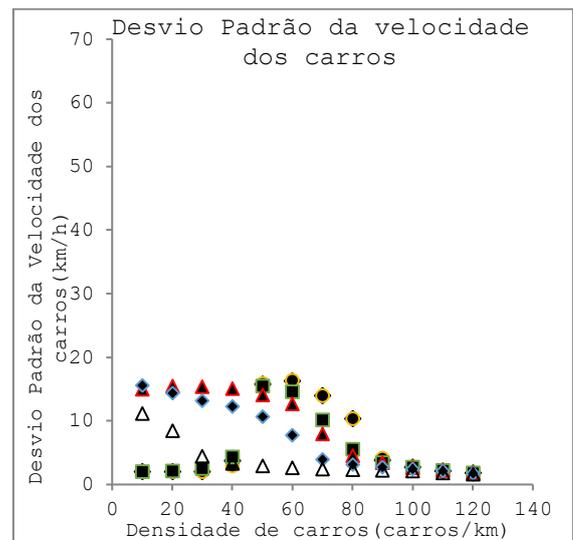
B1) $V_{m\acute{a}x,carro}=135$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=135$ km/h;
apenas motos mudam de faixa



C1) $V_{m\acute{a}x,carro}=54$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=54$ km/h;
apenas motos mudam de faixa

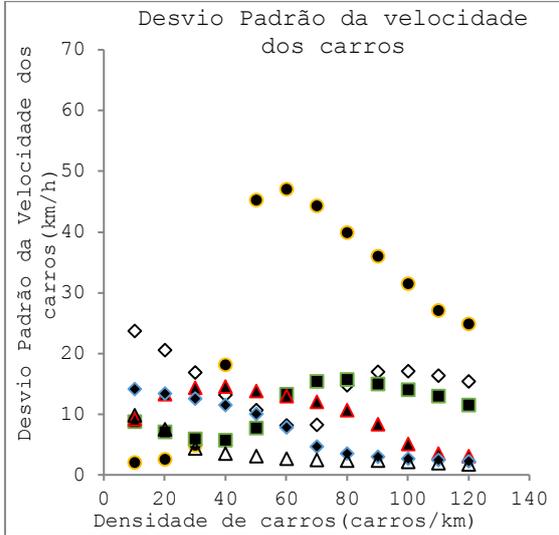


D1) $V_{m\acute{a}x,carro}=54$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=135$ km/h;
apenas motos mudam de faixa

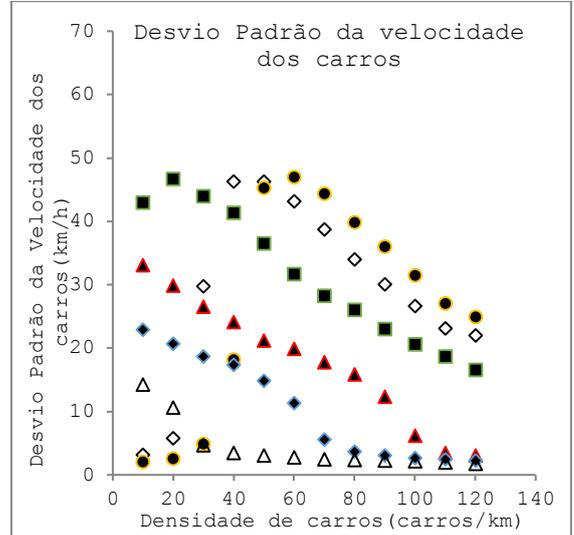




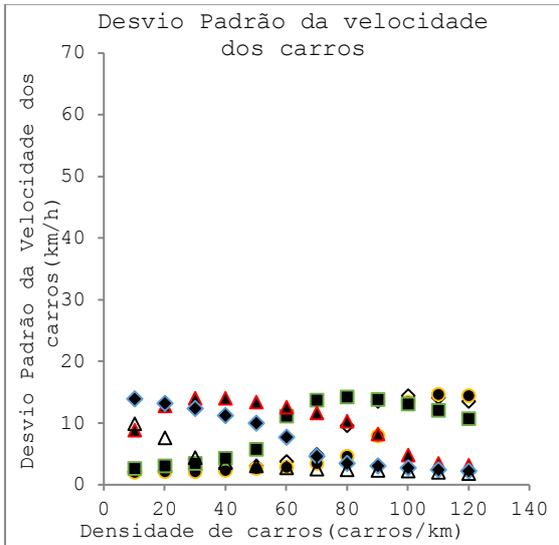
A2) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



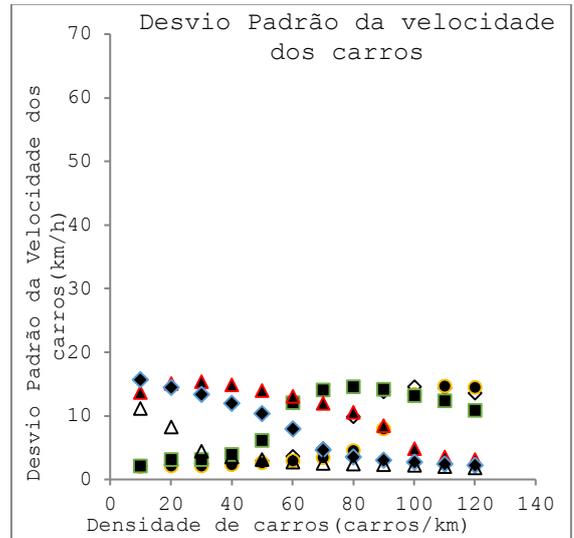
B2) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



C2) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



D2) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa

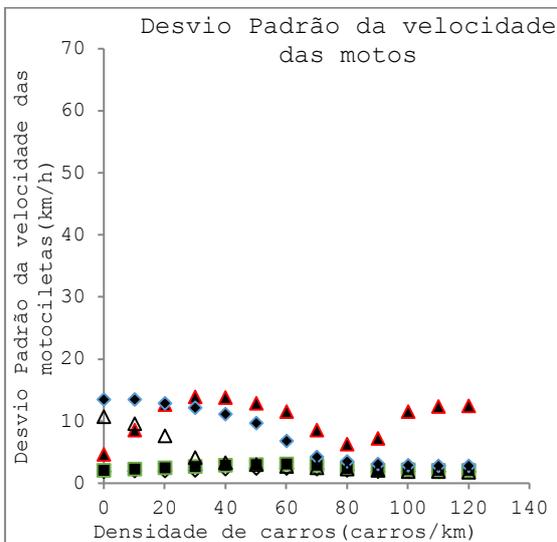


Apêndice H: desvio padrão da velocidade das motos versus densidade de carros (modelo contínuo)

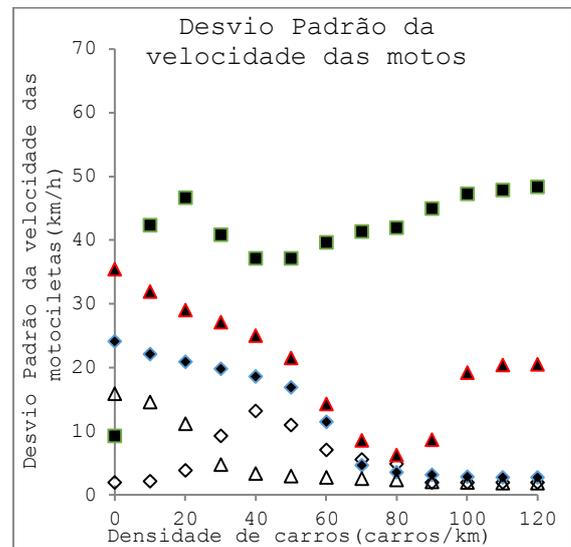
Esta seção expõe o desvio padrão das velocidades das motos em função de diferentes densidades de carros para diferentes densidades de motos em diferentes condições de simulação de velocidade máxima, $V_{\text{máx}}$, e possibilidade de mudança de faixa apenas para motos (Figuras A1 a D1) e possibilidade de mudança de faixa para carros e motos (Figuras A2 a D2), conforme legendas abaixo.

◇ $\rho_m = 13,3$ ■ $\rho_m = 40,0$ ▲ $\rho_m = 93,3$ ◆ $\rho_m = 133,3$ △ $\rho_m = 186,7$

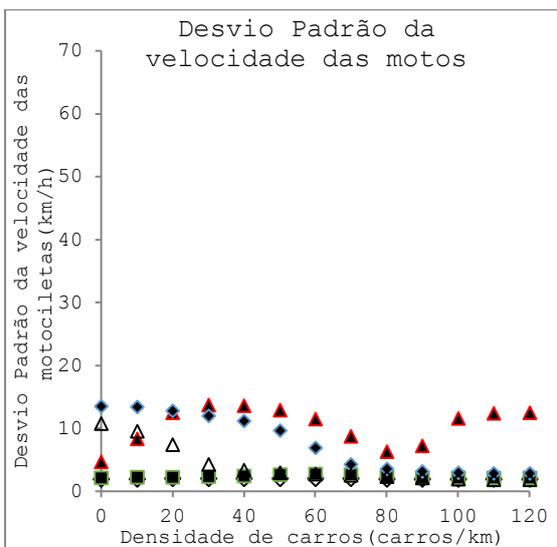
A1) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
apenas motos mudam de faixa



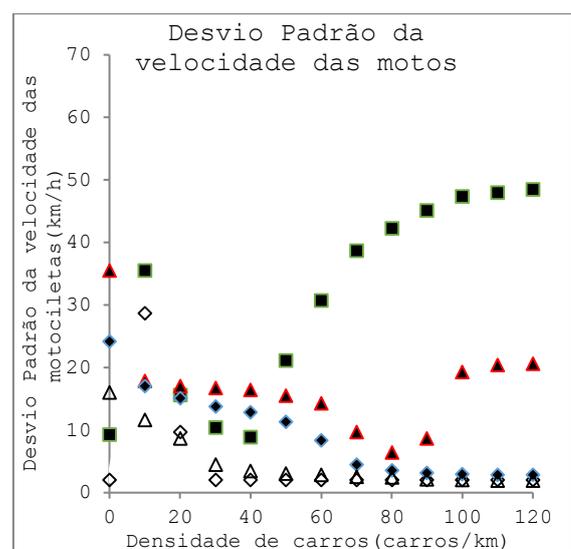
B1) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$;
apenas motos mudam de faixa

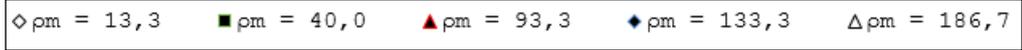


C1) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
apenas motos mudam de faixa

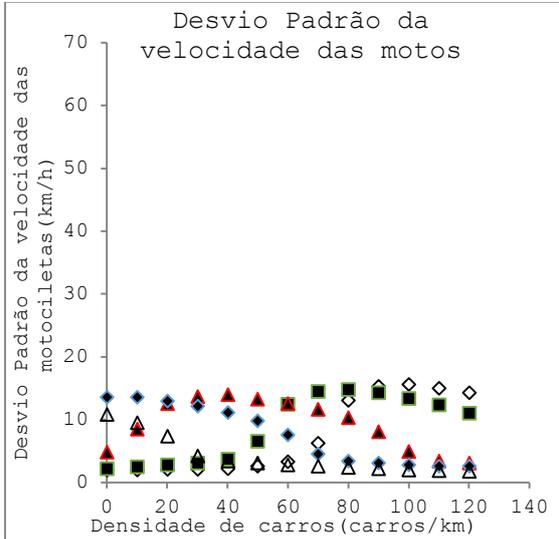


D1) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$;
apenas motos mudam de faixa

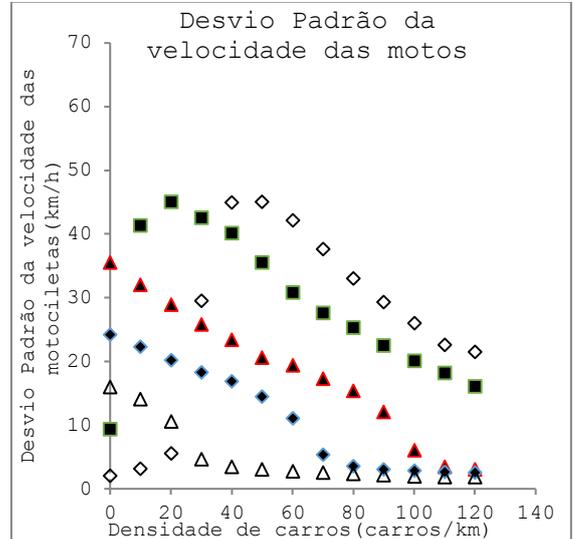




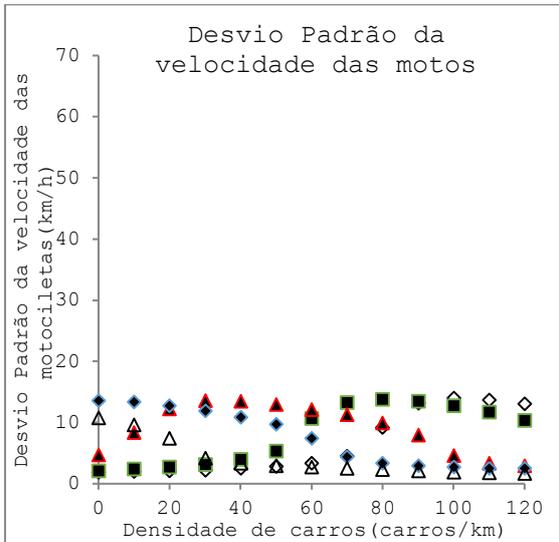
A2) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



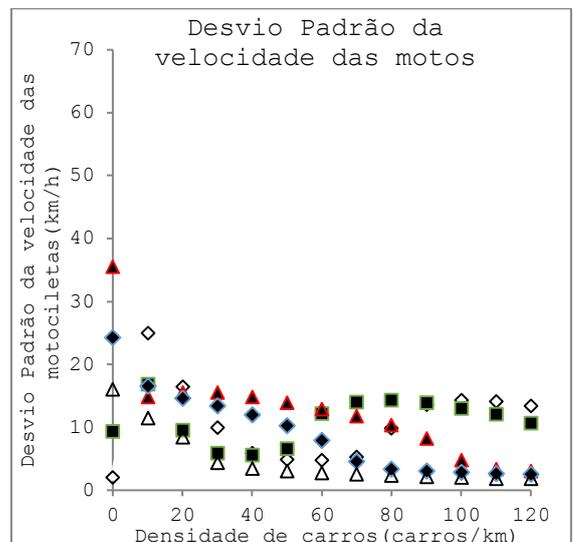
B2) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa



C2) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa

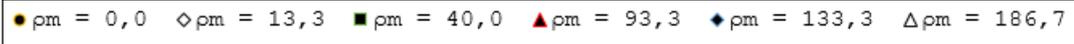


D2) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$;
carros e motos mudam de faixa

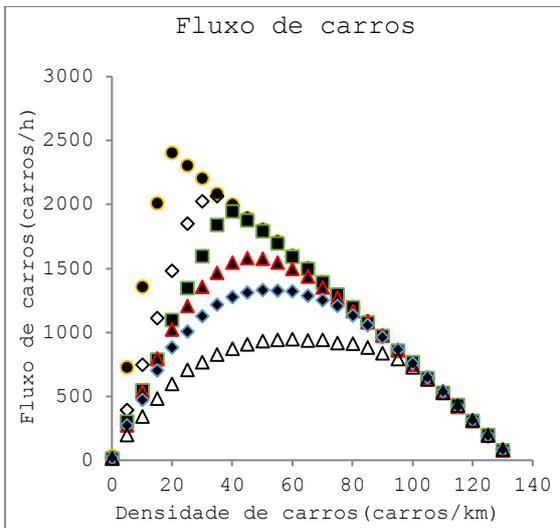


Anexo A: fluxo de automóveis versus densidade de carros (modelo discreto)

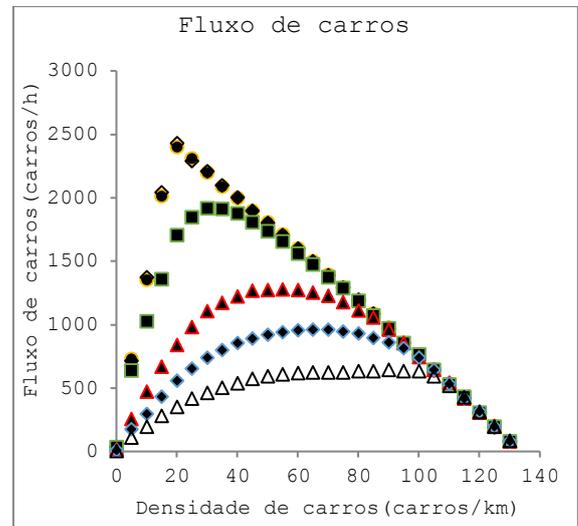
Esta seção expõe todos os diagramas fundamentais de fluxo de automóveis. Resultados em função da densidade de carros para diferentes densidades de motos em diferentes condições de simulação de velocidade máxima, $V_{\text{máx}}$, e possibilidade de mudança de faixa apenas para as motocicletas, conforme legenda abaixo. Os gráficos apresentados são resultados de Araújo (2017).



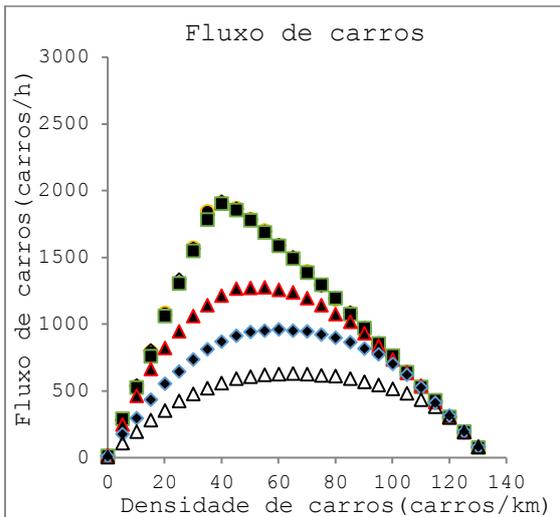
A3) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$



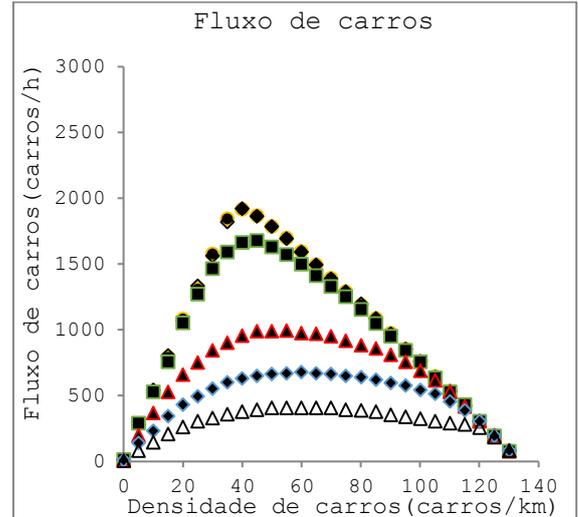
B3) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$



C3) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$



D3) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$

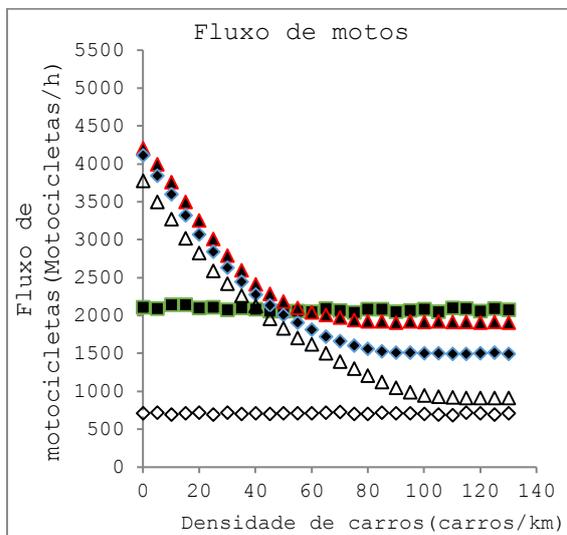


Anexo B: fluxo de moto versus densidade de carros (modelo discreto)

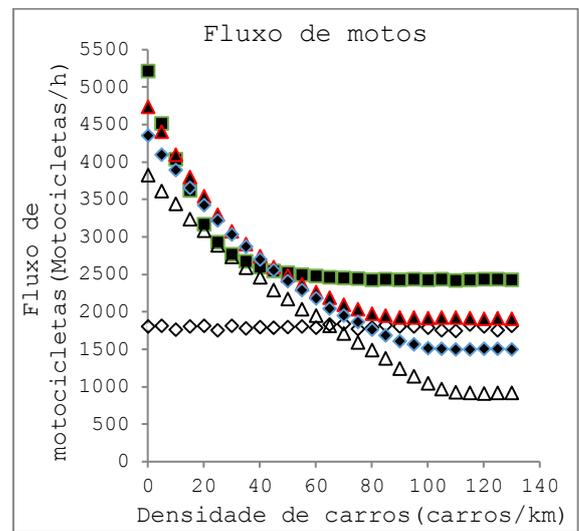
Esta seção expõe todos os diagramas fundamentais de fluxo de motocicletas. Resultados em função da densidade de carros para diferentes densidades de motos em diferentes condições de simulação de velocidade máxima, $V_{m\acute{a}x}$, e possibilidade de mudança de faixa apenas para as motocicletas, conforme legenda abaixo. Os gráficos apresentados são resultados de Araújo (2017).

● $\rho_m = 0,0$ ◊ $\rho_m = 13,3$ ■ $\rho_m = 40,0$ ▲ $\rho_m = 93,3$ ◆ $\rho_m = 133,3$ △ $\rho_m = 186,7$

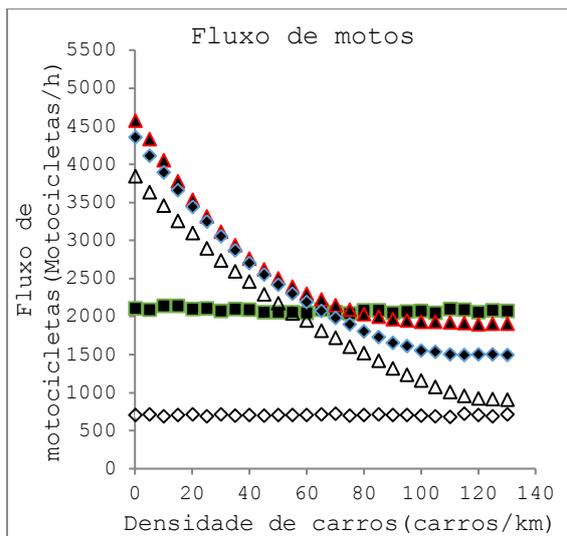
A3) $V_{m\acute{a}x,carro}=135$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=54$ km/h



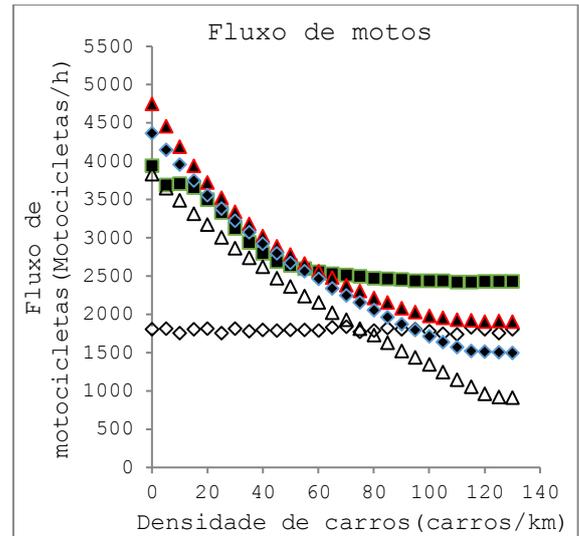
B3) $V_{m\acute{a}x,carro}=135$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=135$ km/h



C3) $V_{m\acute{a}x,carro}=54$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=54$ km/h



D3) $V_{m\acute{a}x,carro}=54$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=135$ km/h

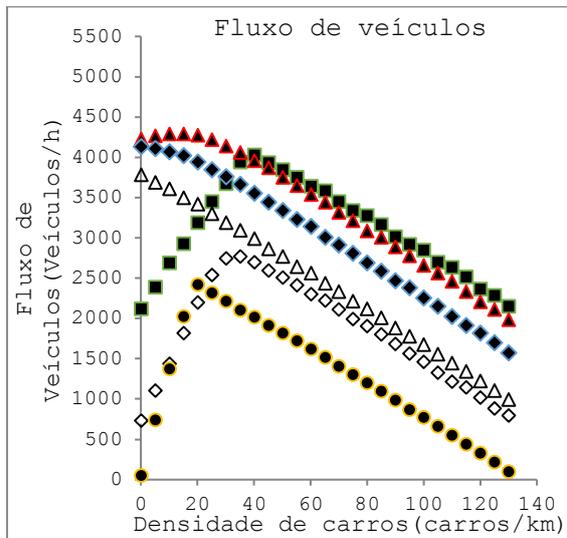


Anexo C: fluxo de veículos versus densidade de carros (modelo discreto)

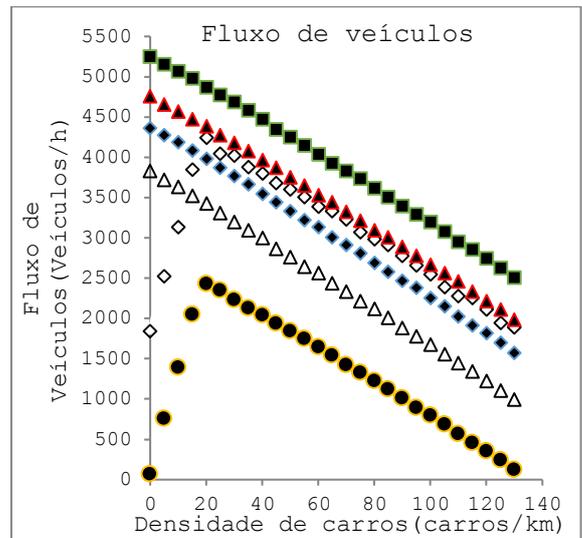
Esta seção expõe todos os diagramas fundamentais de fluxo de veículos. Resultados em função da densidade de carros para diferentes densidades de motos em diferentes condições de simulação de velocidade máxima, V_{\max} , e possibilidade de mudança de faixa apenas para as motocicletas, conforme legenda abaixo. Os gráficos apresentados são resultados de Araújo (2017).

● $\rho_m = 0,0$
 ◇ $\rho_m = 13,3$
 ■ $\rho_m = 40,0$
 ▲ $\rho_m = 93,3$
 ◆ $\rho_m = 133,3$
 △ $\rho_m = 186,7$

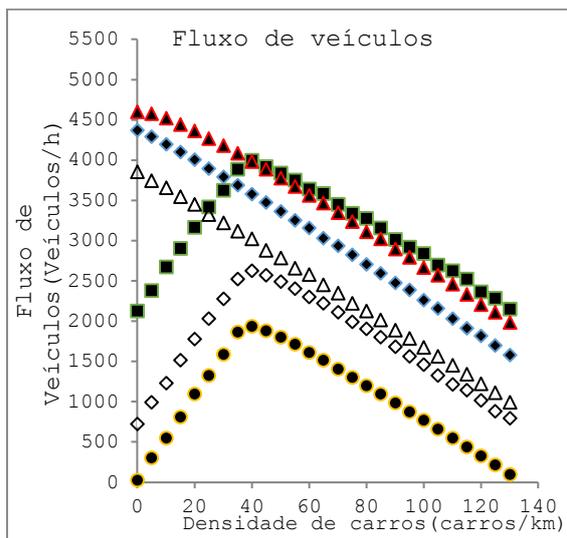
A3) $V_{\max, \text{carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\max, \text{moto}}=54 \text{ km/h}$



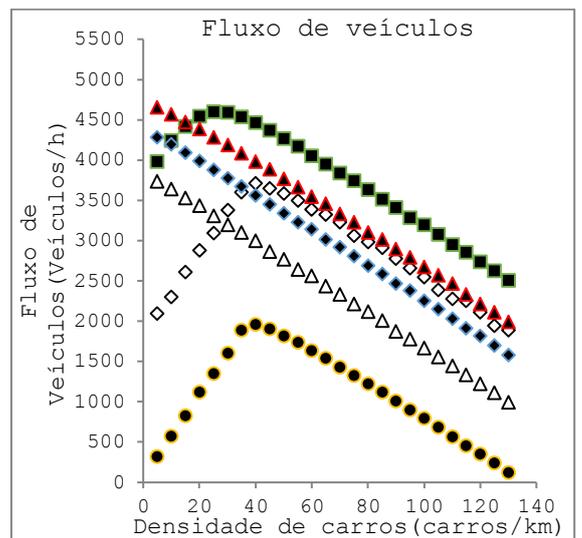
B3) $V_{\max, \text{carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\max, \text{moto}}=135 \text{ km/h}$



C3) $V_{\max, \text{carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\max, \text{moto}}=54 \text{ km/h}$



D3) $V_{\max, \text{carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\max, \text{moto}}=135 \text{ km/h}$

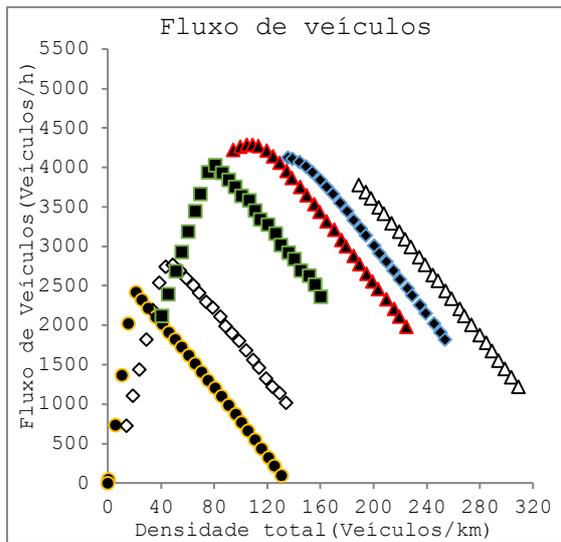


Anexo D: fluxo total de veículos em função da densidade total (modelo discreto)

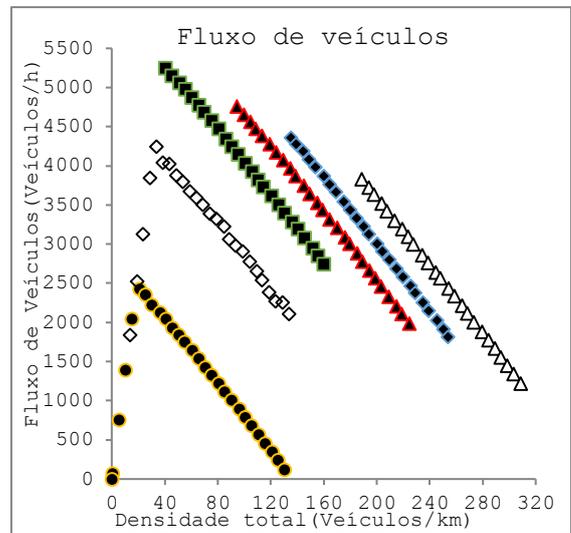
Esta seção expõe todos os diagramas fundamentais de fluxo de veículos. Resultados em função da densidade de total (carros mais motos) para diferentes densidades de motos em diferentes condições de simulação de velocidade máxima, $V_{m\acute{a}x}$, e possibilidade de mudança de faixa apenas para as motocicletas, conforme legenda abaixo. Os gráficos apresentados são resultados de Araújo (2017).

● $\rho_m = 0,0$ ◇ $\rho_m = 13,3$ ■ $\rho_m = 40,0$ ▲ $\rho_m = 93,3$ ◆ $\rho_m = 133,3$ △ $\rho_m = 186,7$

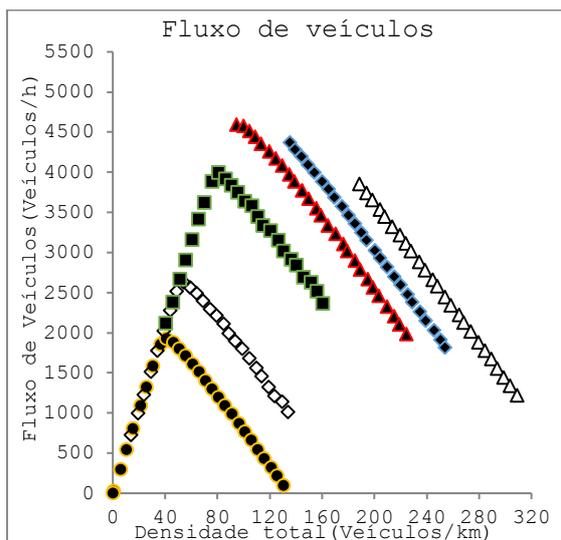
A3) $V_{m\acute{a}x,carro}=135$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=54$ km/h



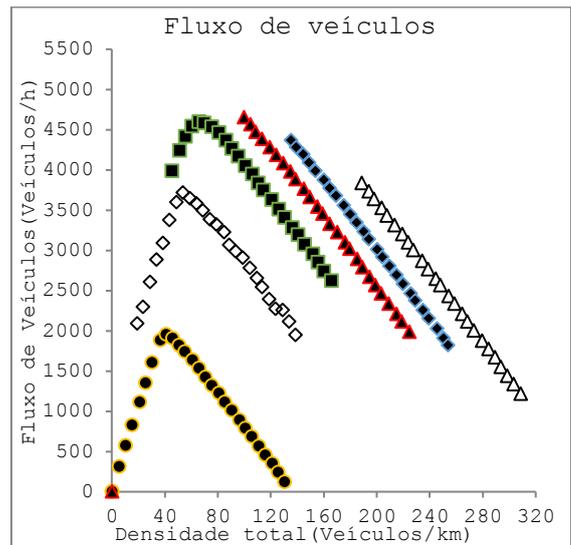
B3) $V_{m\acute{a}x,carro}=135$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=135$ km/h



C3) $V_{m\acute{a}x,carro}=54$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=54$ km/h



D3) $V_{m\acute{a}x,carro}=54$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=135$ km/h

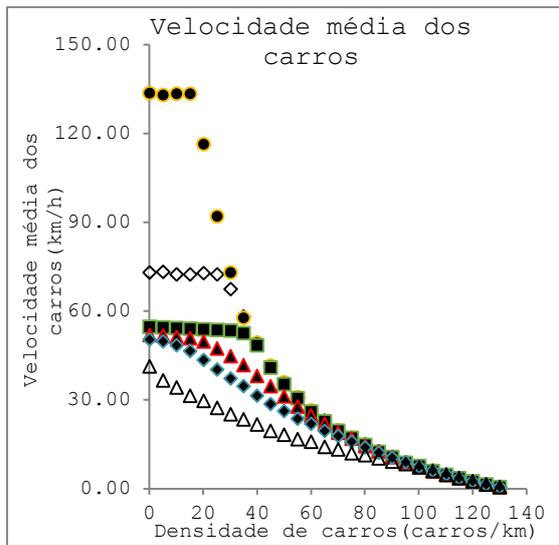


Anexo E: velocidade média dos carros versus densidade de carros (modelo discreto)

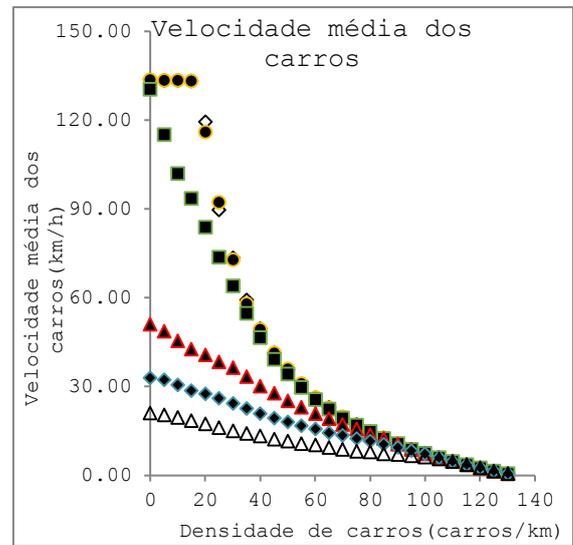
Esta seção expõe todas as velocidades médias dos automóveis em função de diferentes densidades de carros para diferentes densidades de motos em diferentes condições de simulação de velocidade máxima, $V_{m\acute{a}x}$, e possibilidade de mudança de faixa para as motocicletas, conforme legenda abaixo. Os gráficos apresentados são resultados de Araújo (2017).

● $\rho_m = 0,0$ ◇ $\rho_m = 13,3$ ■ $\rho_m = 40,0$ ▲ $\rho_m = 93,3$ ◆ $\rho_m = 133,3$ △ $\rho_m = 186,7$

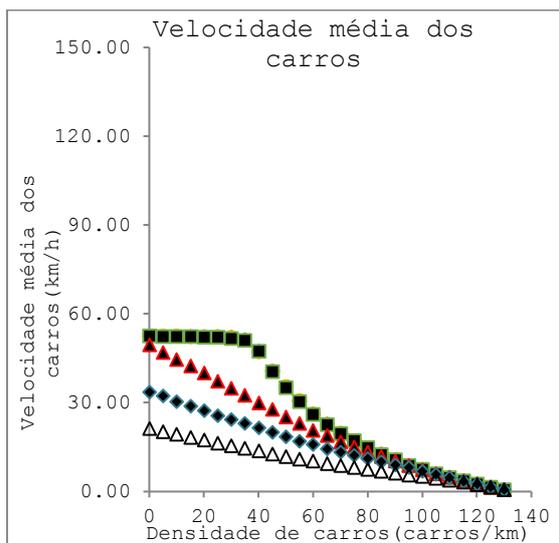
A3) $V_{m\acute{a}x,carro}=135$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=54$ km/h



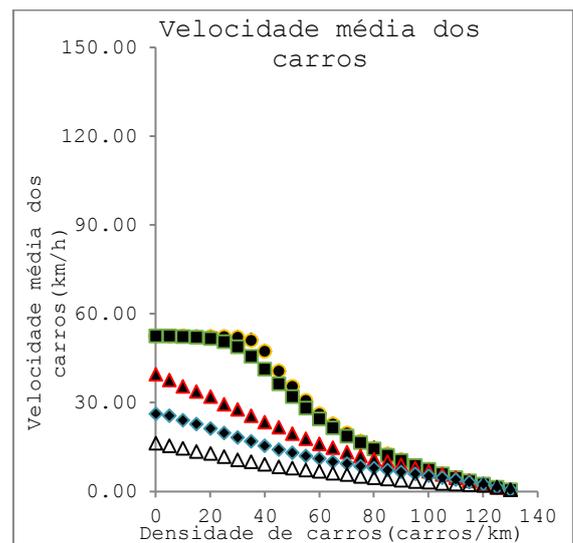
B3) $V_{m\acute{a}x,carro}=135$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=54$ km/h



C3) $V_{m\acute{a}x,carro}=54$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=54$ km/h



D3) $V_{m\acute{a}x,carro}=54$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=135$ km/h.

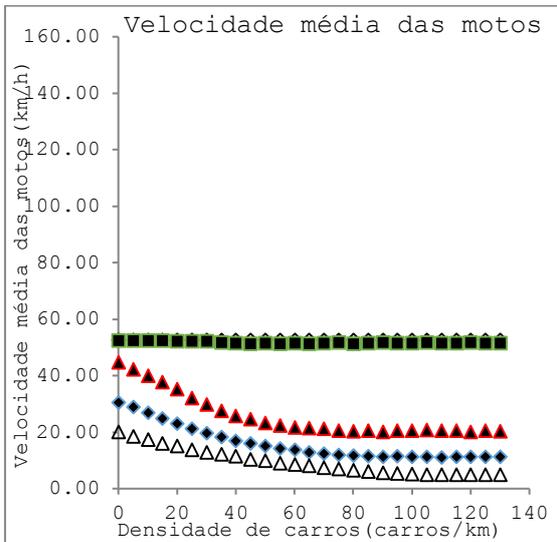


Anexo F: velocidade média das motos versus densidade de carros (modelo discreto)

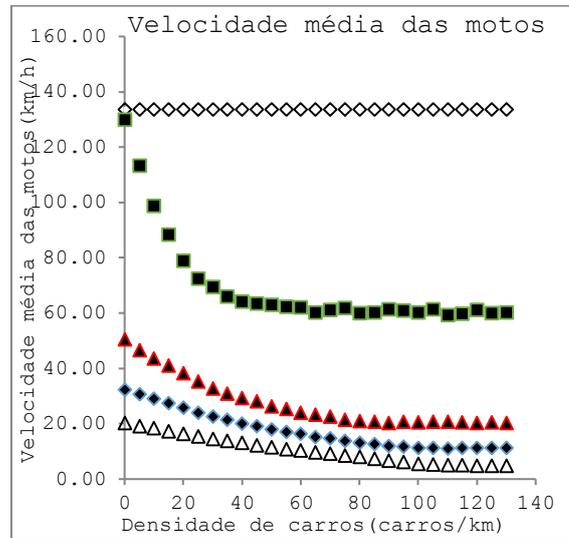
Esta seção expõe todas as velocidades médias das motocicletas em função diferentes densidades de carros para diferentes densidades de motos em diferentes condições de simulação de velocidade máxima, $V_{\text{máx}}$, e possibilidade de mudança de faixa apenas para as motocicletas, conforme legenda abaixo. Os gráficos apresentados são resultados de Araújo (2017).

◇ $\rho_m = 13,3$ ■ $\rho_m = 40,0$ ▲ $\rho_m = 93,3$ ◆ $\rho_m = 133,3$ △ $\rho_m = 186,7$

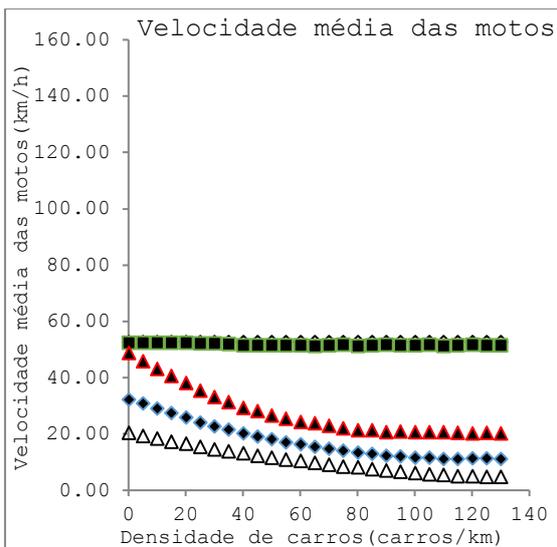
A3) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$



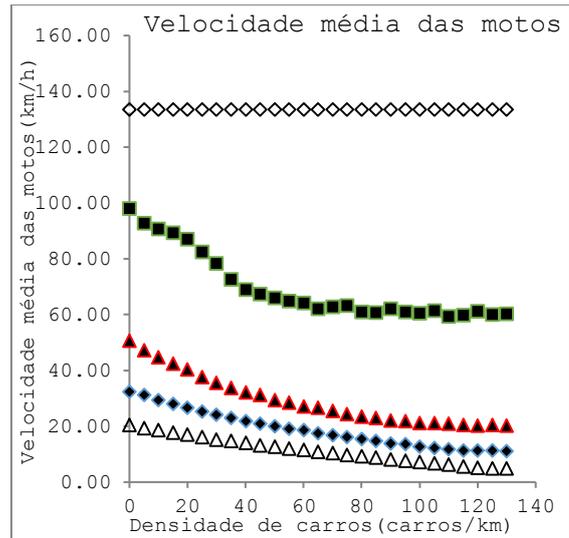
B3) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$



C3) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$



D3) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$

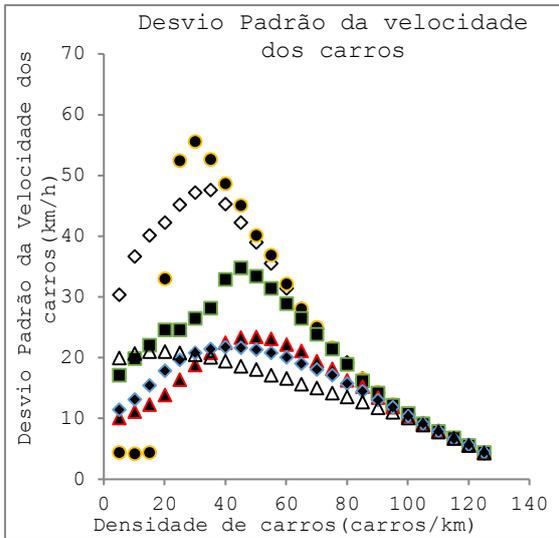


Anexo G: desvio padrão das velocidades dos carros versus densidade de carros (modelo discreto)

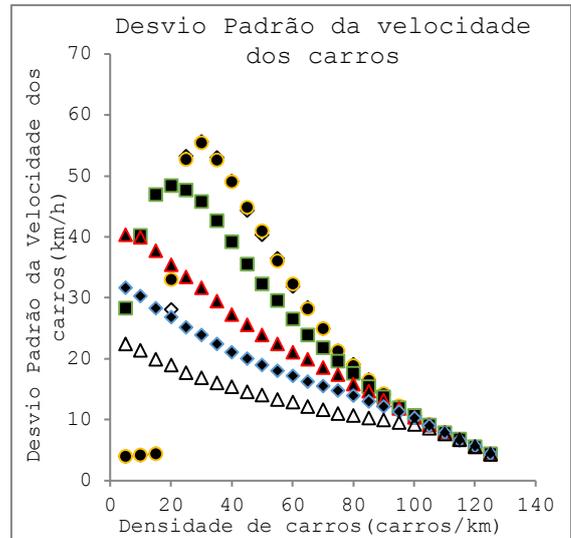
Esta seção expõe o desvio padrão das velocidades dos automóveis em função de diferentes densidades de carros para diferentes densidades de motos em diferentes condições de simulação de velocidade máxima, $V_{m\acute{a}x}$, e possibilidade de mudança de faixa apenas para as motocicletas, conforme legenda abaixo. Os gráficos apresentados são resultados de Araújo (2017).



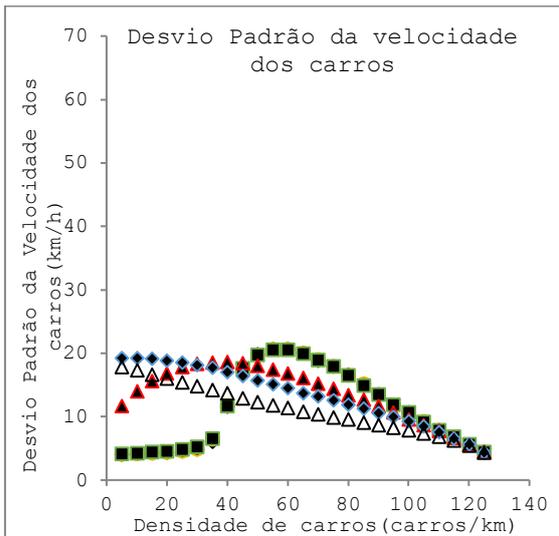
A3) $V_{m\acute{a}x,carro}=135$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=54$ km/h



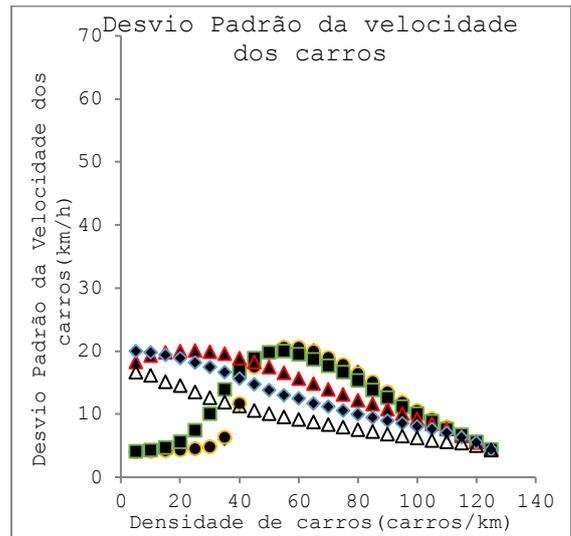
B3) $V_{m\acute{a}x,carro}=135$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=135$ km/h



C3) $V_{m\acute{a}x,carro}=54$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=54$ km/h



D3) $V_{m\acute{a}x,carro}=54$ km/h; $V_{m\acute{a}x,moto}=135$ km/h

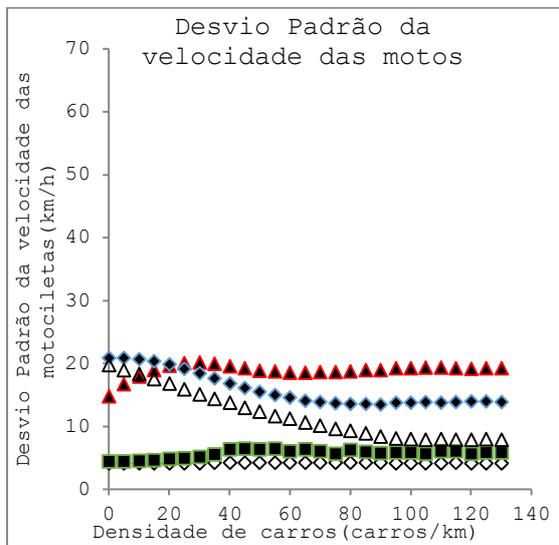


Anexo H: desvio padrão das velocidades das motos versus densidade de carros (modelo discreto)

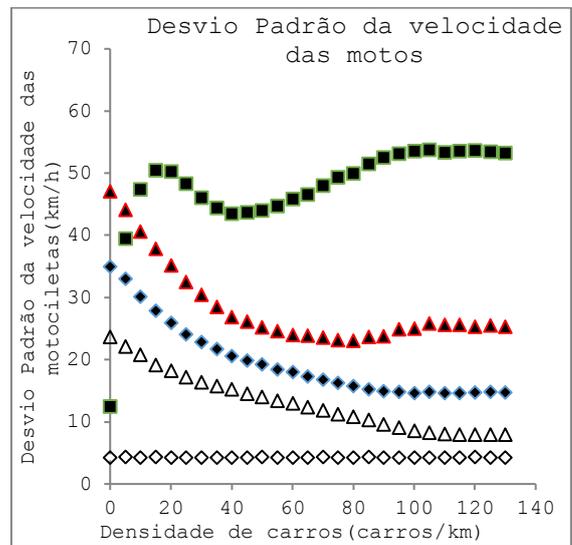
Esta seção expõe o desvio padrão das velocidades das motos em função de diferentes densidades de carros para diferentes densidades de motos em diferentes condições de simulação de velocidade máxima, $V_{\text{máx}}$, e possibilidade de mudança de faixa apenas para as motocicletas, conforme legenda abaixo. Os gráficos apresentados são resultados de Araújo (2017).

◇ $\rho_m = 13,3$ ■ $\rho_m = 40,0$ ▲ $\rho_m = 93,3$ ◆ $\rho_m = 133,3$ △ $\rho_m = 186,7$

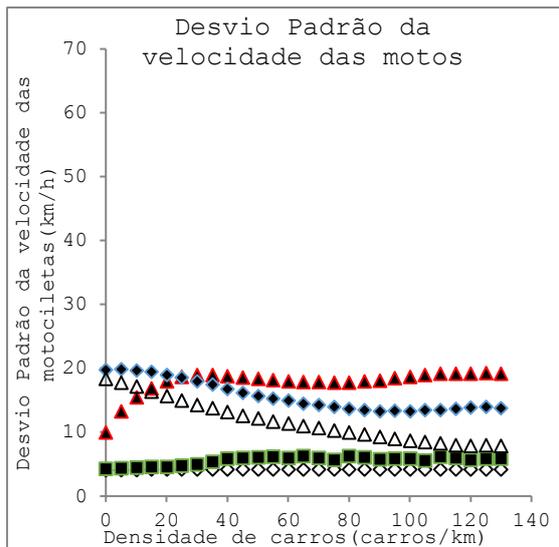
A3) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$



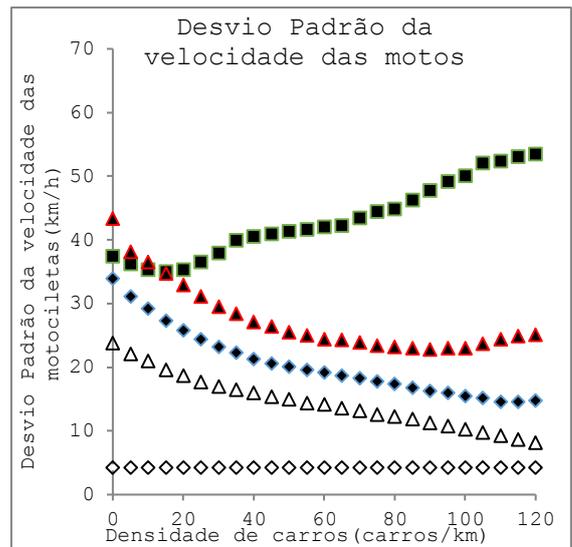
B3) $V_{\text{máx,carro}}=135 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$



C3) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=54 \text{ km/h}$



D3) $V_{\text{máx,carro}}=54 \text{ km/h}$; $V_{\text{máx,moto}}=135 \text{ km/h}$



Anexo I: sugestão de Martin Treiber para melhor representar o deslocamento dos veículos



MTGermany commented on Dec 7, 2016

Collaborator

Hello Mauricio, hi Arne,

I have found the reason which is quite intricate. It has to do with the fact that we are using the simplified Gipps without considering the additional displacement due to accelerations during the reaction time.

Naively, I thought that our ballistic update scheme,

$$x(t+dt) = x(t) + v(t)dt + \frac{1}{2}acc(t)dt^2,$$

specifically the last term, would compensate for that, however, this is not true for small minimum gaps, high deceleration parameters b , and high update time steps = reaction time. In the simplified model, the safe speed is calculated such that, after driving for one reaction time with that safe speed, and then decelerating with b would just get us at a gap s_0 to the leading car (provided that decelerates with b to a stop as well). Thus, the anticipated "reaction distance" (part of the stopping distance covered during the reaction time) is given by $v_{Safe}T$ while the "reaction distance" for the ballistic update (notice $T=dt$, reaction time = update time) is given by $0.5(v+v_{Safe})T$. Since, during the braking phase, $v_{Safe} \approx v - bT < v$, the actual stopping distance is larger than the anticipated one leading to crashes if there are not much other margins, i.e., for large b and small s_0 . This can be easily resolved by applying for the Gipps model the modified first-order positional update*

$$x(t+dt) = x(t+T) = x(t) + v_{Safe} * T \quad (1)$$

instead of $x(t+T) = x(t) + 0.5*(v+v_{Safe}) * T$

Since, in the simulator, the update is driven by the acceleration acc , this is also equivalent to

$$x(t+dt) = x(t) + v(t) * dt + acc(t) * dt^2 \quad (1a)$$

while in the normal ballistic update we use

$$x(t+dt) = x(t) + v(t) * dt + 0.5 * acc(t) * dt^2 \quad (2)$$

The two attached files show the start-stop-scenario of our book "Traffic Flow Dynamics" (cf, e.g., Fig. 11.4) for the simplified Gipps model with the parameters $s_0=1m$, $b=3 \text{ m/s}^2$, $T=dt=1$ for the conventional ballistic update Eq. (2) (crashes and chaos afterwards), and the safe-speed update (1) or (1a) (no crash, controlled deceleration)

[Gipps_startStopTestCrash_updateBallistic.pdf](#)

[Gipps_startStopTestCrash_updateVnew.pdf](#)

Fonte: <https://github.com/movsim/movsim/issues/37>