



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**PAULO D'AVILA GARCIA NETO**

**ESTUDO COMPUTACIONAL DO TRÁFEGO MISTO DE  
MOTOCICLETAS E AUTOMÓVEIS.**

RECIFE

2014

PAULO D'AVILA GARCIA NETO

**ESTUDO COMPUTACIONAL DO TRÁFEGO MISTO DE  
MOTOCICLETAS E AUTOMÓVEIS.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, para obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Processos e Sistemas Térmicos;

Orientador: Prof. Fábio Santana Magnani

Co-Orientador: Prof. Ramiro Brito Willmersdorf

**RECIFE  
2014**

Catálogo na fonte  
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

G216e Garcia Neto, Paulo D'Avila.  
Estudo computacional do tráfego misto de motocicletas e automóveis /  
Paulo D'Avila Garcia Neto. – Recife: O Autor, 2014.  
180f., il., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Santana Magnani.  
Co-Orientador: Prof. Dr. Ramiro Brito Willmersdorf.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2014.  
Inclui Referências .

1. Engenharia Mecânica. 2. Tráfego. 3. Motocicletas. 4. Fluxo de Veículos. 5. Consumo de Combustível. 6. Emissão de Dióxido de Carbono. 7. Custos de Transporte. I. Magnani, Fábio Santana (Orientador). II. Willmersdorf, Ramiro Brito (Co-Orientador). III. Título.

621 CDD (22.ed)

UFPE/BCTG-2014/ 190

18 de junho de 2014

“ESTUDO COMPUTACIONAL DO TRÁFEGO MISTO DE MOTOCICLETAS E  
AUTOMÓVEIS”

PAULO D’AVILA GARCIA NETO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSOS E SISTEMAS TÉRMICOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

---

Prof. Dr. FABIO SANTANA MAGNANI  
ORIENTADOR/PRESIDENTE

---

Prof. Dr. RAMIRO BRITO WILLMERSDORF  
CO-ORIENTADOR

---

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRÍQUEZ GUERRERO  
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. FABIO SANTANA MAGNANI (UFPE)

---

Prof. Dr. RAMIRO BRITO WILLMERSDORF (UFPE)

---

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRÍQUEZ GUERRERO (UFPE)

---

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>a</sup> MARIA DE LOURDES FLORÊNCIO DOS SANTOS (UFPE)

*Dedico este trabalho ao meu pai ( in memoriam ).*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a minha esposa, Maria Clara, pelo companheirismo e apoio no desenvolvimento deste trabalho e à nossa família por compreender a nossa ausência durante este período. Em especial, agradeço à minha mãe Maria Lenira, minhas irmãs Lenira e Paula, meus sogros Marisa e Guilherme e aos meus sobrinhos Matheus e Aline.

Agradeço à todos os meus amigos, por contribuírem significativamente para o meu sucesso e para o meu crescimento pessoal. Sou fruto da confiança e da força de cada um de vocês. Em especial, agradeço à Petrônio, Moacyr, André, Andrezza, José Junio, Héber, Marcus, Gabriela, Luciete, Ladjane, Danilo, Alvaro, Duarte, Jacek, Lídice, Ângelo, Paulo Bonfim, Marília, Rômulo, José Dásio, Clóvis, Allan, Igor, Ayislan, Beto, André Cabral, Davi, Jansen, Thiago, Renato, César, Saulo, Marcelo, Alcides, Marcel, Alana, Caio, Dário, André Luis, Ailton, Gustavo, Giovanni, Débora, Flaviano, Bartira, Emanuel, Carline, dentre outros que sempre incentivaram e acreditaram na conclusão deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Fábio Magnani, pelo incentivo, presteza no auxílio às atividades e pela amizade construída durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao meu co-orientador, Prof. Ramiro Willmersdorf, pelo apoio técnico e auxílio nas tomadas de decisões ao longo deste trabalho.

Agradeço aos professores Darlan, Charamba, José Maria, Rita, Jorge, Paulo Lyra, Silvana, Bernardo Horowitz, dentre outros que tive a oportunidade de estudar e me espelhar para ser também um educador.

Agradeço ao apoio gráfico dado pelo Sr. Iranildo e por sua equipe, em especial, Cristina e Nina.

*“Se não houver vento, reme.”*

Provérbio Romano

## RESUMO

O congestionamento nas vias urbanas é um problema que afeta toda a população, pois altera os horários habituais de suas atividades, eleva o consumo de combustível dos veículos e aumenta o custo associado ao transporte. No Brasil, o tráfego urbano é composto principalmente por automóveis e motocicletas, porém, existem poucos estudos que relacionem estes modais. Assim, este trabalho apresenta um modelo que integra motor, veículo e tráfego, realizando uma análise multiescala e multifenômeno, que relaciona o funcionamento do motor veicular, a inércia do veículo e o procedimento de troca de pistas. Trata-se também de uma análise multiobjetivo, pois calcula o consumo de combustível, a emissão de dióxido de carbono e os custos associados ao transporte. Utilizando-se autômatos celulares para analisar o tráfego misto entre automóveis e motocicletas, verificou-se que as motocicletas reduzem o fluxo de automóveis, mas elevam o fluxo total de veículos na via. Apresentando uma proporção de 90% de motocicletas para se obter o valor máximo do fluxo de veículos. Além disso, a criação de pistas exclusivas só é uma boa opção para manter o fluxo de pessoas em seu valor máximo se os veículos transitarem com sua taxa de ocupação máxima, caso contrário, é preferível que as motocicletas troquem de pistas. Outro resultado importante é que a redução na velocidade máxima dos veículos pode melhorar em 2% o valor do fluxo máximo, além de reduzir o consumo de combustível, a emissão de dióxido de carbono e os custos de transporte.

Palavras-chave: Tráfego. Motocicletas. Fluxo de veículos. Consumo de combustível. Emissão de dióxido de carbono. Custos de transporte.



## ABSTRACT

The urban traffic jam is a problem that affects the entire population, because it changes the usual schedule of activities, increases the fuel consumption and the cost of transportation. In Brazil, urban traffic is mainly composed of cars and motorcycles, however, there are few studies that analyze this mixed traffic flow on an urban road. This dissertation presents a model that integrates propulsion, vehicle and traffic through a multiscale and multiphenomenon analysis, which relates the operation of the vehicle engine, the vehicle inertia and the strategies for lane changing. It is also a multiobjective analysis because calculates fuel consumption, carbon dioxide emissions and the cost of transportation. Using cellular automata to analyze mixed traffic flow with cars and motorcycles, it was observed that motorcycles reduce the flow of cars, but increase the total traffic flow on the road. A proportion of 90% motorcycles leads to the maximum traffic flow. Furthermore, the establishment of exclusive lanes is only practicable to keep the flow of people at the maximum value if the vehicles carry their maximum capacity, otherwise, allowing motorcycles to exchange lanes gives a better traffic flow for the road. Another important result is that the reduction in the maximum vehicle speed could improve by 2% the value of the maximum traffic flow, besides reducing fuel consumption, carbon dioxide emissions and its costs.

Keywords : Traffic. Motorcycles. Vehicles flow. Fuel consumption. Emission of carbon dioxide. Costs of transportation.

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Coleta de dados do fluxo de veículos por Bruce D. Greenshields na década de trinta . . . . .	28
2.2	Modelos macroscópicos e microscópicos para análise do fluxo de veículos . . .	29
2.3	Ilustração de alta e baixa densidade de veículos . . . . .	29
2.4	Exemplos de evoluções do jogo da vida de Conway . . . . .	31
2.5	Comparação de dados de tráfego real com modelo “NaSch” para $p = 0,4$ . . . .	34
2.6	Esquema para determinar o coeficiente de rolagem . . . . .	35
2.7	Coeficiente de resistência ao rolamento em função da velocidade . . . . .	37
2.8	Coeficiente de resistência ao rolamento em função da pressão no pneu . . . . .	37
2.9	Coeficiente de resistência ao rolamento em função do tipo de solo . . . . .	38
2.10	Características físicas do pneu . . . . .	39
2.11	Coeficiente de resistência ao rolamento em função do tipo de pneu . . . . .	39
2.12	Tipos de pneus . . . . .	40
2.13	Dimensões dos pneus . . . . .	40
2.14	Evolução do coeficiente de arrasto para os veículos do século XX . . . . .	42
2.15	Área frontal de uma motocicleta . . . . .	43
2.16	Acessórios da motocicleta e a influência no coeficiente de arrasto . . . . .	44
2.17	Arrasto aerodinâmico na carenagem de uma motocicleta . . . . .	45
2.18	A influência da carenagem no arrasto aerodinâmico para motocicletas de corrida	46
2.19	Força de arrasto aerodinâmico em função da velocidade . . . . .	46
2.20	Transmissão no automóvel . . . . .	48
2.21	Transmissão na motocicleta . . . . .	49
2.22	Trocas de marchas de um automóvel . . . . .	49
2.23	Relação do torque na roda em função das marchas de um veículo . . . . .	50
2.24	Curvas de potência em função da troca de marchas . . . . .	51
2.25	Autonomia de um veículo em função de sua velocidade . . . . .	53
2.26	Curso do pistão de um motor veicular . . . . .	55
2.27	Curva de torque do motor veicular por ensaio em laboratório . . . . .	57
2.28	Curva característica do motor veicular à gasolina . . . . .	58
2.29	Efeito das condições atmosféricas para potência do motor. . . . .	59
2.30	Curvas de consumo específico de um motor à gasolina . . . . .	61

2.31	Representação da derivada de uma função num ponto . . . . .	66
2.32	Malha com pontos uniformemente espaçados . . . . .	67
3.1	Fluxo de automóveis em função da densidade de motocicletas . . . . .	69
3.2	Comparação entre os diagramas fundamentais de automóveis, bicicletas e pedestres . . . . .	71
3.3	Consumo de combustível em função da velocidade para scooter 125cc . . . . .	73
3.4	Simulador de tráfego de Martin Treiber . . . . .	74
3.5	Comparação de curvas do Honda Civic 2006 e modelo matemático parabólico para curvas de potência e torque . . . . .	78
4.1	Esquema do relacionamento entre os modelos que integram motor, veículo e tráfego . . . . .	82
4.2	Ocupação dos veículos na via utilizada para a simulação do tráfego . . . . .	83
4.3	Discretização da via utilizada para simulação do tráfego . . . . .	83
4.4	Ilustração para explicar variáveis utilizadas no “MOD_TRAF” . . . . .	85
4.5	Espelhamento inicial da pista física . . . . .	87
4.6	Espelhamento após trocas de pistas das motocicletas . . . . .	88
4.7	Espelhamento final após movimento dos veículos . . . . .	89
4.8	Fluxo de automóveis em função da densidade de motocicletas . . . . .	91
4.9	Fluxo de motocicletas vs. Densidade de automóveis . . . . .	92
4.10	Fluxo total de veículos vs. Densidade total de veículos . . . . .	93
4.11	Veículos em deslocamento com velocidade constante . . . . .	94
4.12	Modelos utilizados para integração entre motor, veículo e tráfego . . . . .	96
4.13	Análise de malha realizada no “MOD_VEIC” . . . . .	102
4.14	Exemplo de aceleração para a motocicleta . . . . .	104
4.15	Curva de potência para o automóvel . . . . .	107
4.16	Tacômetro utilizado no modelo do automóvel escolhido para a simulação . . . . .	107
4.17	Tacômetro utilizado no modelo da motocicleta escolhida para a simulação . . . . .	108
4.18	Curva de potência para motocicleta . . . . .	109
4.19	Curva de potência por marcha em função de sua velocidade para o automóvel . . . . .	109
4.20	Curva de potência por marcha em função de sua velocidade para a motocicleta . . . . .	110
4.21	Pontos de mudanças de marchas . . . . .	110
4.22	Curva de potência com trocas crescentes de marcha para o automóvel . . . . .	111
4.23	Curva de potência com trocas crescentes de marcha para a motocicleta . . . . .	112
5.1	Resultados da simulação para o fluxo de automóveis em função da densidade de automóveis . . . . .	114

5.2	Resultados da simulação para o fluxo de motocicletas em função da densidade de automóveis . . . . .	115
5.3	Resultado da simulação para o fluxo total de veículos em função da densidade total de veículos . . . . .	116
5.4	Critério para convergência - Número de nove simulações . . . . .	117
5.5	Critério para convergência - Número de vinte e oito simulações . . . . .	118
5.6	Análise do seed utilizado para gerar os números aleatórios . . . . .	119
5.7	Análise do fluxo de automóveis em função da variação da extensão da via . . .	120
5.8	Potências resistivas ao movimento da motocicleta . . . . .	122
5.9	Autonomia da motocicleta em função de sua velocidade . . . . .	123
5.10	Potências resistivas ao movimento do automóvel . . . . .	126
5.11	Autonomia do automóvel em função de sua velocidade . . . . .	126
5.12	Variação do Caso Base . . . . .	128
5.13	Potências resistivas ao movimento da motocicleta para redução pela metade das velocidades do caso base . . . . .	129
5.14	Potências resistivas ao movimento do automóvel para redução pela metade das velocidades do caso base . . . . .	131
6.1	Análise do fluxo da via do ponto de vista dos automóveis . . . . .	134
6.2	Análise do fluxo total de veículos da via . . . . .	134
6.3	Análise do fluxo de pessoas com o automóvel trasportando duas pessoas e a motocicleta uma . . . . .	135
6.4	Análise do fluxo de pessoas com o automóvel trasportando cinco pessoas e a motocicleta duas . . . . .	136
6.5	Análise do fluxo de pessoas com o automóvel trasportando cinco pessoas e a motocicleta uma . . . . .	136
6.6	Fluxo de motocicletas para densidade de automóveis igual a zero . . . . .	137
6.7	Análise do fluxo da via do ponto de vista das motocicletas . . . . .	138
6.8	Análise do fluxo total de veículos da via sem trocas de pistas . . . . .	138
6.9	Comparação do fluxo total de veículos da via para situação com e sem trocas de pistas . . . . .	139
6.10	Análise do fluxo de pessoas com o automóvel trasportando duas pessoas e a motocicleta uma, sem trocas de pista . . . . .	140
6.11	Comparação do fluxo de pessoas com o automóvel trasportando duas pessoas e a motocicleta uma, com e sem trocas de pista . . . . .	141

6.12	Análise do fluxo de pessoas com o automóvel transportando cinco pessoas e a motocicleta duas, sem trocas de pista . . . . .	141
6.13	Comparação do fluxo de pessoas com o automóvel transportando cinco pessoas e a motocicleta duas, com e sem trocas de pista . . . . .	142
6.14	Sinalização de pistas exclusivas para automóveis trafegarem com mais de dois passageiros . . . . .	142
6.15	Variação do Caso Base considerando motocicletas como bicicletas . . . . .	143
6.16	Análise do fluxo de pessoas com o tráfego composto por automóveis e bicicletas	144
6.17	Análise do fluxo de pessoas com o tráfego composto por automóveis e bicicletas sem trocas de pistas . . . . .	144
6.18	Análise da proporção de motocicletas na via para avaliação do fluxo de veículos	146
6.19	Análise da proporção de motocicletas na via para avaliação do fluxo de veículos sem trocas de pistas . . . . .	147
6.20	Análise da proporção de bicicletas na via para avaliação do fluxo de veículos .	148
6.21	Análise da proporção de motocicletas na via para avaliação do fluxo de pessoas com o automóvel transportando duas pessoas e a motocicleta com uma pessoa, para velocidades do caso base e considerando as trocas de pistas . . . . .	149
6.22	Análise da proporção de motocicletas na via para avaliação do fluxo de pessoas com o automóvel transportando cinco pessoas e a motocicleta com duas pessoas, para velocidades do caso base e considerando as trocas de pistas . . .	150
6.23	Velocidades médias desenvolvidas pelos automóveis . . . . .	151
6.24	Velocidades médias desenvolvidas pelas motocicletas . . . . .	152
6.25	Velocidades médias desenvolvidas pelos automóveis com velocidades máximas do caso base reduzidas à metade . . . . .	152
6.26	Desvio médio padrão das velocidades médias desenvolvidas pelos automóveis .	153
6.27	Fluxo de automóveis em função de seu consumo médio de combustível . . . . .	154
6.28	Fluxo total de veículos em função do consumo médio de combustível para as motocicletas . . . . .	155
6.29	fluxo total de veículos em função do consumo médio dos automóveis para velocidades máximas do caso base reduzidas à metade e sem acelerações . . . . .	158
6.30	Fluxo total de veículos em função do consumo médio de combustível dos automóveis para velocidades máximas do caso base reduzidas à metade e com acelerações . . . . .	159
6.31	Fluxo total de veículos em função do consumo médio de combustível dos automóveis para o caso base sem acelerações . . . . .	159

6.32	Emissão média de $CO_2$ dos automóveis em função de suas velocidades, para velocidades máximas do caso base, desconsiderando-se as acelerações e com trocas de pistas das motocicletas . . . . .	161
6.33	Emissão média de $CO_2$ das motocicletas em função de suas velocidades, para velocidades máximas do caso base, desconsiderando-se as acelerações e com trocas de pistas das motocicletas . . . . .	162
6.34	Emissão média total de $CO_2$ dos veículos para as velocidades máximas do caso base, desconsiderando-se as acelerações e com trocas de pistas das motocicletas	162
6.35	Emissão média total de $CO_2$ dos veículos em função da proporção de motocicletas, para as velocidades máximas do caso base, desconsiderando-se as acelerações e com trocas de pistas das motocicletas . . . . .	163
6.36	Emissão média total de $CO_2$ dos veículos, para as velocidades máximas do caso base, considerando-se as acelerações e com trocas de pistas das motocicletas .	164
6.37	Emissão média de $CO_2$ dos automóveis em função de suas velocidades, para as velocidades máximas do caso base, considerando-se as acelerações e com trocas de pistas das motocicletas . . . . .	164
6.38	Emissão média de $CO_2$ dos automóveis em função de suas velocidades, para as velocidades máximas do caso base reduzidas à metade, considerando-se as acelerações e trocas de pistas das motocicletas . . . . .	165
6.39	Emissão média total de $CO_2$ dos veículos para as velocidades máximas do caso base reduzidas à metade, considerando-se as acelerações e trocas de pistas das motocicletas . . . . .	166
6.40	Emissão média total de $CO_2$ para o trânsito com bicicletas e automóveis com velocidades máximas do caso base reduzidas à metade, considerando-se as acelerações e trocas de pistas das bicicletas . . . . .	167
6.41	Análise do fluxo total de veículos em função do custo médio com a gasolina por hora para os automóveis, para as velocidades máximas do caso base, trocas de pistas das motocicletas e desconsiderando-se as acelerações . . . . .	168
6.42	Análise da proporção de motocicletas em função do custo médio com gasolina para os veículos com uma pessoa, trafegando com as velocidades máximas do caso base, desconsiderando-se as acelerações e com trocas de pistas pelas motocicletas . . . . .	171

6.43	Análise da proporção de motocicletas em função do custo médio com gasolina para os veículos considerando as acelerações, com trocas de pistas das motocicletas, utilizando as velocidades máximas do caso base e com o automóvel transportando cinco pessoas e a motocicleta com duas pessoas . . . . .	172
------	---	-----

## LISTA DE TABELAS

1.1	Lista das dez montadoras com maior número de emplacamentos de automóveis em 2013 . . . . .	22
1.2	Lista das dez montadoras com maior número de emplacamentos de motocicletas em 2013 . . . . .	23
2.1	Regra 184 - Autômato celular elementar . . . . .	32
3.1	Dados do motor para o Honda Civic 2006 . . . . .	77
4.1	Descrição dos parâmetros utilizados no simulador de tráfego “MOD_TRAF” . . . . .	84
4.2	Descrição das variáveis utilizadas no simulador de tráfego “MOD_TRAF” . . . . .	84
4.3	Parâmetros do automóvel para simulação . . . . .	97
4.4	Parâmetros da motocicleta para simulação . . . . .	97
4.5	Relações de transmissão do automóvel . . . . .	98
4.6	Relações de transmissão da motocicleta . . . . .	99
4.7	Análise da discretização da malha para velocidades da motocicleta . . . . .	103
4.8	Análise da discretização da malha para velocidades do automóvel . . . . .	103
4.9	Dados do motor para o automóvel . . . . .	106
4.10	Dados do motor para a motocicleta . . . . .	108
5.1	Valores calculados pelo “MOD_VEIC” para velocidades constantes da motocicleta . . . . .	121
5.2	Potências resistivas ao movimento da motocicleta para velocidades constantes . . . . .	122
5.3	Tempos e distâncias necessárias para acelerar a motocicleta . . . . .	124
5.4	Consumo de combustível para acelerar a motocicleta . . . . .	124
5.5	Consumo adicional de combustível para acelerar a motocicleta . . . . .	125
5.6	Valores calculados pelo “MOD_VEIC” para velocidades constantes do automóvel . . . . .	125
5.7	Potências resistivas ao movimento do automóvel para velocidades constantes . . . . .	125
5.8	Tempos e distâncias necessárias para acelerar o automóvel . . . . .	127
5.9	Consumo de combustível para acelerar o automóvel . . . . .	127
5.10	Consumo adicional de combustível para acelerar o automóvel . . . . .	128
5.11	Valores calculados pelo “MOD_VEIC” para redução pela metade das velocidades do caso base para a motocicleta . . . . .	129
5.12	Potências resistivas ao movimento da motocicleta para velocidades do caso base reduzidas pela metade . . . . .	129



5.13	Consumo de combustível para acelerar a motocicleta com velocidades do caso base reduzidas pela metade . . . . .	130
5.14	Consumo adicional de combustível para acelerar a motocicleta para redução pela metade das velocidades do caso base . . . . .	130
5.15	Valores calculados pelo “MOD_VEIC” para redução pela metade das velocidades do caso base para o automóvel . . . . .	130
5.16	Potências resistivas ao movimento do automóvel para as velocidades do caso base reduzidas pela metade . . . . .	131
5.17	Consumo de combustível para acelerar o automóvel com as velocidades do caso base reduzidas pela metade . . . . .	132
5.18	Consumo adicional de combustível para acelerar o automóvel para as velocidades do caso base reduzidas pela metade . . . . .	132
6.1	Comparação entre os valores de fluxo máximo de pessoas para o tráfego entre automóveis e bicicletas, com e sem trocas de pistas . . . . .	145
6.2	Proporção de motocicletas para os pontos de maior fluxo da via com trocas de pistas . . . . .	146
6.3	Proporção de motocicletas para os pontos de maior fluxo da via sem trocas de pistas . . . . .	147
6.4	Proporção de bicicletas para os pontos de maior fluxo da via com trocas de pistas	148
6.5	Resumo da análise do fluxo de pessoas em função da proporção de motocicletas para os casos com e sem trocas de pistas, para as velocidades do caso base . . .	150
6.6	Consumo médio total de combustível na via dadas as densidades de motocicletas	156
6.7	Consumo médio total de combustível na via dadas as densidades de motocicletas considerando as acelerações dos veículos . . . . .	156
6.8	Diferenças de consumos médios totais para os casos com e sem acelerações dos veículos . . . . .	157
6.9	Desempenho médio dos automóveis para valores de fluxos máximos dos veículos, com as velocidades máximas do caso base, troca de pistas das motocicletas e desconsiderando-se as acelerações . . . . .	160
6.10	Comparação entre os desempenhos médios dos automóveis, para os casos com e sem acelerações, com trocas de pistas das motocicletas, nos pontos de fluxo máximo de veículos dadas as densidades das motocicletas . . . . .	160
6.11	Análise do fluxo máximo total de veículos em função do custo médio por hora com gasolina para o automóvel, para as velocidades máximas do caso base, trocas de pistas das motocicletas e desconsiderando-se as acelerações . . . . .	168

6.12	Comparação do custo médio com gasolina para velocidades máximas do caso base, considerando-se as acelerações para o automóvel . . . . .	169
6.13	Custo médio para percorrer 7,5 km pelos modais . . . . .	170

## LISTA DE SIGLAS

IBGE	Instituto brasileiro de geografia e estatística
FENABRAVE	Federação nacional da distribuição de veículos automotores
DENATRAN	Departamento nacional de trânsito
IAB	Instituto Avante Brasil
ABCR	Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias
PROCONVE	Programa de controle de emissões veiculares
ITS	Institute for transport studies
AC	Autômato celular
NaSch	Modelo de Nagel-Schreckenberg
DNIT	Departamento nacional de infraestrutura de transportes
PMS	Ponto morto superior
PMI	Ponto morto inferior
<i>sfc</i>	Consumo específico
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
CIMA	Conselho interministerial do açúcar e do álcool
IPCC	Intergovernmental panel on climate change
EDO	Equação diferencial ordinária
CENPES	Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello
KERS	Kinetic energy recovery systems

## LISTA DE SÍMBOLOS

$F_e$	Força de atrito
$r$	Raio da roda
$F_r$	Força de resistência ao rolamento
$C_r$	Coefficiente de resistência ao rolamento
$m$	Massa do veículo
$g$	Aceleração da gravidade
$d_{pneu}$	Diâmetro do pneu
$L$	Largura do pneu
$s$	Relação altura/largura do pneu
$d_{aro}$	Diâmetro do aro
$F_a$	Força de resistência aerodinâmica
$C_d$	Coefficiente de arrasto
$\rho$	Densidade do Ar
$A$	Área frontal do veículo
$w$	Velocidade do ar em sentido contrário ao movimento do veículo
$K$	Fator de arrasto
$F_g$	Força de resistência gravitacional
$F_p$	Força de propulsão
$\eta$	Eficiência mecânica do sistema de transmissão
$i$	Relação global de transmissão entre o motor e as rodas de tração do veículo
$P_{des}$	Potência desejada
$\eta_{motor}$	Rendimento do motor
$\dot{m}$	Vazão de combustível
$L_{H_2O}$	Calor latente de condensação da água
$m_{H_2O}$	Massa de água resultante por unidade de massa da mistura
$AC_{massa}$	Relação ar-combustível em base mássica
$m_{ar}$	massa de ar
$m_{comb}$	massa de combustível
$P_{max}$	Potência máxima nominal do motor
$w_p$	Rotação do motor para potência máxima
$w$	Rotação do motor
$\Gamma$	Torque do motor
$w_t$	Rotação do motor no ponto de torque máximo
$p_e$	Pressão média efetiva

$C_v$	Cilindrada unitária
$\eta_o$	Pico de eficiência do motor
$\mu_p$	Coefficiente do grau de utilização de potência do motor
$\mu_n$	Coefficiente modal de rotação do motor
$v_{max}^{(m)}$	Velocidade máxima da motocicleta
$v_{max}^{(c)}$	Velocidade máxima do automóvel
$p^{(c)}$	Probabilidade de desaceleração para o automóvel
$p^{(m)}$	Probabilidade de desaceleração para a motocicleta
$d$	Número de espaços à frente do veículo que são visíveis
$x_n^{(m)}$	Posição da $n$ -ésima motocicleta na pista 1 ou na pista 2
$x_n^{(c)}$	Posição do $n$ -ésimo automóvel
$v_n^{(c)}$	Velocidade do $n$ -ésimo automóvel
$v_n^{(m)}$	Velocidade da $n$ -ésima motocicleta na pista 1 ou na pista 2
$gap_+$	Espaços à frente de uma motocicleta na pista de destino ao trocar de pista
$gap_-$	Espaços atrás de uma motocicleta na pista de destino ao trocar de pista
$d_n^{(c)}$	Espaços entre o $n$ -ésimo automóvel e o automóvel ou motocicleta à sua frente
$d_n^{(m)}$	Espaços entre a $n$ -ésima motocicleta e o automóvel ou motocicleta à sua frente na pista 1 ou na pista 2
$gap_-^{(mc)}$	Espaços entre a $n$ -ésima motocicleta na pista 1 e o automóvel mais próximo atrás dela
$v_{pista1}$	Velocidade do automóvel ou da motocicleta na pista 1 dada a visibilidade $d$
$v_{pista2}$	Velocidade da motocicleta na pista 2 dada a visibilidade $d$
$\alpha$	Inclinação da rampa

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>21</b>
1.1	Motivação . . . . .	21
1.2	Objetivos . . . . .	25
1.2.1	Objetivo geral . . . . .	25
1.2.2	Objetivos específicos . . . . .	25
1.2.3	Metas . . . . .	26
1.3	Organização do trabalho . . . . .	26
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>27</b>
2.1	Modelagem do fluxo de veículos . . . . .	27
2.2	Autômatos celulares . . . . .	30
2.3	Relacionamento motor-veículo . . . . .	35
2.3.1	Resistência ao rolamento . . . . .	35
2.3.1.1	Pneus . . . . .	38
2.3.2	Resistência aerodinâmica . . . . .	41
2.3.3	Resistência gravitacional . . . . .	46
2.3.4	Força de Propulsão . . . . .	47
2.3.4.1	Relações de Transmissão . . . . .	48
2.3.5	Autonomia veicular . . . . .	51
2.4	Propriedades e curvas características dos motores veiculares . . . . .	55
2.5	A combustão em motores veiculares de ignição por centelha . . . . .	61
2.5.1	Poder Calorífico . . . . .	63
2.5.2	Gasolina . . . . .	64
2.5.3	Relação ar-combustível estequiométrica . . . . .	65
2.5.4	Produção de dióxido de carbono . . . . .	65
2.6	Método das diferenças finitas . . . . .	66
<b>3</b>	<b>Revisão bibliográfica</b>	<b>68</b>
3.1	Análise do tráfego com autômatos celulares . . . . .	68
3.2	Curvas características dos motores veiculares . . . . .	74
3.2.1	Modelo parabólico para curvas de potência e torque . . . . .	75

3.2.2	Curvas de consumo específico . . . . .	78
<b>4</b>	<b>Metodologia</b>	<b>81</b>
4.1	Características Gerais . . . . .	81
4.2	Modelo do tráfego (MOD_TRAF) . . . . .	82
4.3	Modelo do relacionamento motor-veículo (MOD_VEIC) . . . . .	93
4.4	Modelo do motor (MOD_PROP) . . . . .	105
<b>5</b>	<b>Análise numérica dos modelos - Discussão de resultados</b>	<b>113</b>
5.1	Resultados do modelo de tráfego “MOD_TRAF” . . . . .	113
5.2	Resultados do modelo de relacionamento motor-veículo “MOD_VEIC” . . . . .	120
<b>6</b>	<b>Estudo de Casos</b>	<b>133</b>
6.1	Análise do fluxo de veículos e passageiros . . . . .	133
6.2	Análise da proporção de motocicletas para condição de maior fluxo na via . . . . .	145
6.3	Análise das velocidades médias desenvolvidas pelos veículos . . . . .	150
6.4	Análise do consumo médio de combustível dos veículos . . . . .	154
6.5	Análise da emissão média de dióxido de carbono dos veículos . . . . .	160
6.6	Análise do custo médio dos veículos no tráfego . . . . .	167
<b>7</b>	<b>Conclusões</b>	<b>173</b>
	<b>Referências</b>	<b>177</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

O desenvolvimento das zonas urbanas sem planejamento trás consigo alguns problemas. Dentre eles, temos o aumento dos congestionamentos em suas ruas, onde vários fatores podem contribuir para que este problema venha a se agravar cada vez mais. Um desses fatores, de acordo com dados do censo 2010, realizado pelo IBGE, é a elevada concentração de pessoas nas cidades. Em 2000, 81% dos brasileiros ou 137.953.959 de pessoas viviam em áreas urbanas, agora são 84% que representam 160.879.708 de pessoas (IBGE, 2010).

Outro fator que contribui para o aumento dos congestionamentos é o aumento do poder de compra da população brasileira, em cerca de 19% nos últimos oito anos, que, aliado aos incentivos fiscais destinados as montadoras, contribui para o aumento da frota de veículos que circulam nas cidades, conforme mostram os dados da FENABRAVE (2013). Tais fatores, somados a falta de planejamento das vias e a péssima qualidade dos transportes públicos, fazem com que a população, cada vez mais, opte pelo transporte individual e agrave o problema do tráfego que não flui.

O aumento do número de veículos presos em engarrafamentos causa inúmeros prejuízos à população, pois cresce o consumo de combustível, e, conseqüentemente, tem-se uma maior emissão de poluentes na atmosfera; a população fica cada vez mais estressada; o custo de deslocamento aumenta e o tempo perdido em congestionamentos acaba afetando no modo de vida de todos, pois modificam-se os horários de realização de suas atividades habituais.

De acordo com o IPCC (2007), várias fontes, decorrentes da ação humana, contribuem para as emissões de gases do efeito estufa. As duas fontes principais são a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento de regiões tropicais, onde a queima de combustíveis fósseis ocorre principalmente pelo setor de produção de energia, as termelétricas, o setor industrial e de transporte. Logo, os motores veiculares estão entre os responsáveis pela emissão de gases do efeito estufa. Apesar de ainda não ser comprovada, uma possível causa do aquecimento global é o aumento das concentrações destes gases na atmosfera.

Segundo dados do DENATRAN, a frota de veículos no país mais que dobrou na última década. De 2001 a 2013 o crescimento do número de automóveis foi de 11,5 milhões para 44,7



milhões, e o de motocicletas, no mesmo período, foi de 4,5 milhões para mais de 21 milhões. (DENATRAN, 2013)

Tabela 1.1: Lista das dez montadoras com maior número de emplacamentos de automóveis em 2013

Posição	Marca	Quantidade	Participação
1º	FIAT	504.867	22%
2º	GM	447.848	19,7%
3º	VW	447.300	19,67%
4º	FORD	194.419	8,55%
5º	HYUNDAI	140.303	6,17%
6º	RENAULT	138.248	6,08%
7º	HONDA	106.411	4,68%
8º	TOYOTA	96.026	4,22%
9º	NISSAN	51.864	2,28%
10º	CITROEN	43.983	1,93%

Fonte: (FENABRAVE, 2013)

De acordo com a tabela 1.1, em 2013, a montadora que mais vendeu automóveis foi a Fiat. Um dos modelos com maior número de vendas desta montadora foi o modelo Palio com cerca de 148.832 emplacamentos até outubro de 2013. Foram vendidos 2.273.724 de automóveis em geral até outubro de 2013 e deste total de automóveis vendidos, 1.344.022 possuíam motorização entre 1.0 e 2.0 litros.

Em relação a venda de motocicletas, segundo a tabela 1.2, a montadora que mais vendeu motocicletas até outubro de 2013 foi a Honda. Um de seus modelos com maior número de vendas foi a CG 125, com 200.377 unidades emplacadas. Entre os dez modelos com maior número de emplacamentos, cerca de 92% das motocicletas possuíam motorização inferior a duzentas cilindradas.

Tabela 1.2: Lista das dez montadoras com maior número de emplacamentos de motocicletas em 2013

Posição	Marcas	Quantidade	Participação
1º	HONDA	1.011.140	80,71%
2º	YAMAHA	134.592	10,74%
3º	SUZUKI	23.637	1,89%
4º	DAFRA	21.706	1,73%
5º	SHINERAY	9.175	0,73%
6º	KAWASAKI	7.810	0,62%
7º	KASINSKI	7.374	0,59%
8º	H.DAVIDSON	6.641	0,53%
9º	BMW	6.316	0,50%
10º	TRAXX	5.678	0,45%

Fonte: (FENABRAVE, 2013)

De acordo com a IAB - Instituto Avante Brasil, de 2001 à 2010 houve um aumento de 40,3% no número de vítimas fatais no tráfego brasileiro, onde o número de mortes de motociclistas aumentou, nesse período, em 250% e de ciclistas aumentou em 50%.

Segundo Marcilio e Gouveia (2007), em um estudo realizado em sete capitais brasileiras, cerca de 5% do total de mortes por ano são por causas respiratórias entre idosos e crianças e tais mortes podem ser atribuídas à poluição atmosférica, grande parte desta decorrente do uso de veículos automotores. Anualmente, a quantidade de internações por problemas respiratórios supera o número de 4 mil pacientes e são decorrentes principalmente da poluição do ar. As pessoas sofrem cada vez mais com doenças respiratórias ficando mais vulneráveis ao câncer de pulmão.

Em entrevista ao Jornal Nacional (2011), especialistas afirmaram que a poluição presente no ar de São Paulo e inalada por quem mora na cidade, equivale a fumar dois cigarros por dia. Além disso, o médico e professor de medicina da Universidade de São Paulo, Paulo Saldiva, em entrevista a ABCR, alerta: (ABCR, 2011)

*“Um estudo do American Heart Association diz que o tráfego é tão causador de infarto quanto o cigarro e/ou a má alimentação. O problema é que as outras duas causas são de fórum individual, enquanto o tráfego é uma questão coletiva, fora do controle individual... Recentemente, um estudo da OECD (Organization for Economic Co-operation and Development), sobre as principais causas de morte em 2050, aponta a poluição do ar como a principal entre as causas ambientais. Hoje no mundo morrem cerca de 1,5 milhão de pessoas por ano devido à poluição. E a previsão é que esse número fique entre 3 e 5 milhões. Ou seja, subsidiamos com a nossa saúde uma política de mobilidade equivocada.”*

O problema da poluição não será resolvido somente com medidas voltadas para inspeção veicular. Ações como a do PROCONVE, que determina que os veículos novos atendam a limites máximos de emissão, em ensaios padronizados e com combustíveis de referência, foram fundamentais para redução dos poluentes em motores veiculares há 20 anos, porém outras medidas devem ser tomadas, como a gradativa redução do consumo de combustível.

As medidas taxativas em relação ao fluxo de veículos com a aplicação de rodízios também não resolvem o problema em sua totalidade. Geralmente, tais atitudes prejudicam a grande maioria da população que tem menor poder aquisitivo, e muitas vezes, pode agravar a situação, pois a parcela com maior renda poderá comprar novos veículos para não ter que depender do transporte público que é precário. Assim, é necessário uma mudança na forma de pensar sobre a mobilidade urbana.

A utilização de motocicletas e bicicletas, que ocupam menos espaço no tráfego, e que possuem uma movimentação errática, surge como uma proposta para desafogar o tráfego. É o que evidenciamos nas ruas das grandes cidades, com um número cada vez maior de motocicletas e bicicletas trafegando. Segundo Chávez e Tamara (2013), as motocicletas possuem a maior velocidade média de tráfego em comparação aos automóveis e ônibus em vias urbanas, o que daria maior mobilidade ao tráfego, mas isto acontece somente até certo ponto, necessitando-se de maiores estudos para determinar a relação ideal de veículos numa via para se ter maior mobilidade.

No Brasil não existem muitas campanhas e trabalhos efetivos para educação no tráfego que protejam os motociclistas e os ciclistas, onde, muitas vezes, segundo uma visão distorcida da população mal informada, os motociclistas aparecem como os grandes causadores de acidentes e são apontados como os grandes vilões do caos no tráfego, o que não é verdade.

Estudos que visem avaliar a influência do tráfego misto entre automóveis e motocicletas, ou com bicicletas, para redução do consumo de combustível, redução dos custos de transporte e da emissão de poluentes considerando situações ótimas de mobilidade, são fundamentais. Principalmente em relação às motocicletas, que de acordo com o crescimento nos últimos anos da sua frota no Brasil, ultrapassará em breve o número de automóveis que circulam nas grandes cidades.

Analisando o tráfego misto entre automóveis e motocicletas, ou com bicicletas, pode-se adequar as vias para uma combinação otimizada e segura destes veículos no tráfego, em função da mobilidade urbana e com o objetivo de amenizar os problemas ambientais decorrentes das emissões de poluentes dos motores veiculares, devido a redução do consumo de combustível, visando assim, melhorar a qualidade de vida em geral da população, seja reduzindo o stress decorrente de congestionamentos ou minimizando os custos associados ao transporte.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho analisa o tráfego misto entre automóveis e motocicletas, considerando também em determinados casos bicicletas, através do estudo paramétrico de um modelo de integração entre motor, veículo e tráfego.

Com a integração das principais características do funcionamento de um motor veicular e a relação motor-veículo, objetiva-se criar uma metodologia capaz de estimar o consumo de combustível e, conseqüentemente, a emissão de dióxido de carbono numa configuração de tráfego misto, dando-se ênfase no fluxo de veículos e pessoas de uma via e nos custos associados ao transporte.

O modelo utilizado para o tráfego neste trabalho é baseado no artigo “Cellular automaton model for mixed traffic flow with motorcycles” desenvolvido por Meng *et al.* (2007), que modela o tráfego misto entre motocicletas e automóveis utilizando autômatos celulares. O desenvolvimento de um simulador, com as regras contidas neste artigo, deverá ser capaz de descrever qualitativamente o tráfego misto entre esses veículos.

### 1.2.1 Objetivo geral

Como objetivo geral do trabalho, tem-se a análise multi-escala do comportamento de motocicletas no tráfego urbano ao integrar, na primeira escala, o funcionamento de motores veiculares, na segunda escala, a dinâmica veicular, e na terceira escala, a cinemática do tráfego composto por motocicletas e automóveis, visando compreender o tempo de deslocamento, o custo associado ao transporte, o consumo de combustível e o fluxo de veículos na via.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho podem ser listados da seguinte forma:

- Avaliar a influência do tráfego para o consumo de combustível e emissão de dióxido de carbono em motocicletas e automóveis;
- Estabelecer uma relação entre as densidades de motocicletas e automóveis com o intuito de otimizar o fluxo de veículos da via;
- Expor o custo para diferentes configurações de densidades de veículos numa via;
- Relacionar a velocidade média dos veículos e a mobilidade de uma via;
- Estudar a relação entre a proporção de motocicletas numa via e os custos, o consumo de combustível e o fluxo de veículos.

### 1.2.3 Metas

As metas deste trabalho são:

- Desenvolver um método que integre motor, veículo e tráfego considerando as curvas características do motor, as características físicas dos veículos e as regras que regem o tráfego composto por esses veículos.
- Desenvolver um simulador de tráfego que utiliza autômatos celulares para análise qualitativa do tráfego misto entre motocicletas e automóveis;

### 1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está estruturado em sete capítulos, sendo dispostos da seguinte maneira: No primeiro capítulo é feita a introdução, com a exposição de seus motivos, objetivos e metas. A fundamentação teórica é feita no segundo capítulo com uma abordagem dos elementos que serão utilizados ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. A revisão bibliográfica é realizada no terceiro capítulo, analisando trabalhos e artigos científicos que já trataram de alguns dos assuntos abordados neste trabalho. No quarto capítulo é exposta toda a metodologia empregada para integrar motor, veículo e tráfego, para uma configuração de tráfego misto entre automóveis e motocicletas.

Uma análise numérica dos simuladores desenvolvidos e utilizados neste trabalho e a discussão de seus resultados é feita no quinto capítulo. No sexto capítulo são desenvolvidos estudos de casos para melhor entender a relação entre as densidades de veículos numa via e o consumo de combustível, emissão de dióxido de carbono, custos associados ao transporte e fluxo de veículos. No sétimo, e último, capítulo são expostas as conclusões obtidas de todas as análises desenvolvidas e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é exposto a teoria fundamental para o entendimento deste trabalho. Esta seção abordará conceitos da modelagem do fluxo de veículos enfatizando os tipos de modelos para simulação de tráfego, o princípio do funcionamento dos autômatos celulares, os tipos de curvas dos motores veiculares e seus parâmetros, características do combustível utilizado pelos motores neste trabalho, a combustão estequiométrica e o processo de formação de dióxido de carbono. Tratará também de parâmetros relativos a dinâmica veicular e por fim, fará uma explicação do método das diferenças finitas para solução de equações diferenciais, mostrando a influência do nível de discretização para obtenção de resultados que se aproximam das soluções exatas.

### 2.1 Modelagem do fluxo de veículos

A teoria do fluxo de veículos e a sua modelagem tiveram início na década de trinta, inicialmente desenvolvida pelo americano Bruce D. Greenshields, e, posteriormente, a partir dos anos noventa, ganhando popularidade devido o aumento do fluxo de veículos. (TREIBER; KESTING, 2013)

Ao traduzir a palavra do inglês “traffic”, pode-se gerar uma confusão em relação aos termos trânsito e tráfego. O termo trânsito está associado apenas a movimentação de veículos, de forma geral e aleatória. Já quando se faz referência ao termo tráfego, tem-se a noção de que há regras ou normas de circulação entre os veículos que estão interagindo entre si. Assim, neste trabalho, será utilizado o termo tráfego para designar o fluxo de veículos.

A figura 2.1 mostra um experimento de coleta de dados realizado por Bruce D. Greenshields na década de trinta, e, assim como este, muitos outros experimentos para a coleta de dados do fluxo de veículos em locais fixos de uma via foram realizados. Hoje, com a evolução da tecnologia, o uso de câmeras de monitoramento eletrônico e/ou sensores na via auxiliam na coleta de tais dados.

Figura 2.1: Coleta de dados do fluxo de veículos por Bruce D. Greenshields na década de trinta.



Fonte: (TREIBER; KESTING, 2013)

A dinâmica do fluxo de veículos é caracterizada tanto pela sua infraestrutura fixa quanto pelas características do condutor ao dirigir um veículo no tráfego, em função de suas regras, ou seja, pela análise do comportamento humano ao acelerar, frear, trocar de pista etc. Os modelos de fluxo de veículos podem ser divididos de acordo com o seu nível de representatividade, por sua estrutura matemática ou por aspectos conceituais, como por exemplo a análise em múltiplas pistas.

De maneira geral, os modelos de simulação de tráfego podem ser divididos em macroscópicos, microscópicos ou mesoscópicos, segundo Treiber e Kesting (2013):

Os modelos macroscópicos tem como objetivo descrever a evolução no tempo e espaço de fenômenos coletivos tais como a evolução de regiões de engarrafamento. Muitas vezes são reconhecidos como modelos hidrodinâmicos, pois são aplicados de maneira análoga ao estudo do fluxo de líquidos ou gases, de acordo com a equação da continuidade para meios contínuos. Onde o número de veículos que trafegam numa via é conservado. Caracterizam assim a densidade, o volume e a velocidade dos veículos em aplicações onde o tempo computacional é um fator importante, pois estes modelos abordam o problema de fluxo de veículos de maneira geral, não havendo a necessidade do estudo individual mas sim no processo como um todo. O modelo desenvolvido por Greenshields é um modelo matemático macroscópico.

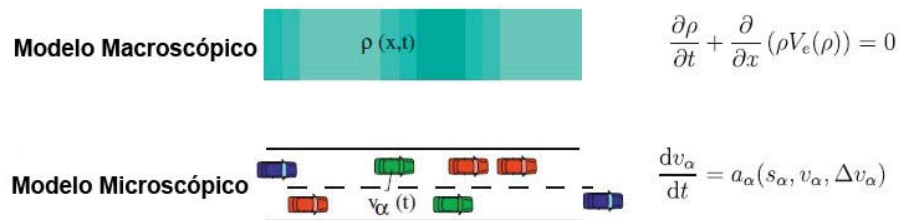
Os modelos microscópicos são utilizados em estudos que necessitam um elevado nível de detalhamento, pois são baseados na descrição do movimento de cada veículo individualmente, descrevendo tanto as características do sistema como as interações entre os veículos, implicando em modelar ações como aceleração, desaceleração e as trocas de faixas para cada veículo. Um dos tipos de modelo microscópico de simulação de tráfego mais estudado é o mo-

delo de perseguição, onde um veículo persegue outro veículo analisando a variação de sua velocidade pela diferença de velocidade entre ele e o veículo que se desloca à sua frente. Modelos microscópicos apresentam maior complexidade lógica e mais parâmetros para serem calibrados.

Em comparação à abordagem macroscópica, a aplicação de modelos microscópicos é mais complexa, pois consome maior volume de dados, maior tempo de implantação e exige maior esforço computacional, tornando-se mais cara para ser desenvolvida, implementada e mantida.

Os modelos mesoscópicos apresentam características mistas, estando num nível intermediário de agregação entre os modelos macroscópicos e microscópicos.

Figura 2.2: Modelos macroscópicos e microscópicos para análise do fluxo de veículos.

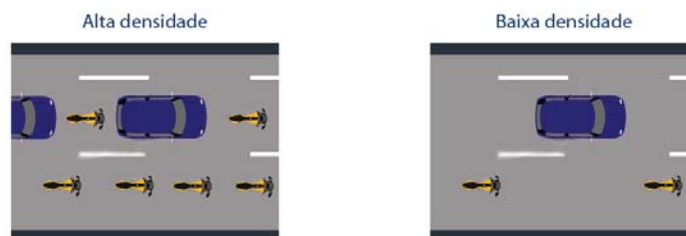


Fonte: Adaptado de (TREIBER; KESTING, 2013)

Independente do modelo utilizado, a definição de densidade e fluxo está presente. Assim, conceituando-se essas grandezas, tem-se:

- **Densidade:** A distribuição dos veículos em um trecho de via, normalmente é expressa em veículos por quilômetro. A figura 2.3 mostra uma ilustração para os casos de alta e de baixa densidade de veículos numa via.

Figura 2.3: Ilustração de alta e baixa densidade de veículos.



- **Fluxo:** É a quantidade de veículos que passa numa área da via em um determinado período de tempo. Pode-se relacionar o fluxo com o produto entre densidade e velocidade. Normalmente o fluxo é expresso em veículos por hora.



Hoje em dia, várias universidades e empresas privadas desenvolvem programas computacionais para área de fluxo de veículos. Estes simuladores de tráfego, de acordo com a ITS - Institute for transport studies, são classificados basicamente em modelos urbanos, modelos rodoviários e modelos mistos. De maneira geral, todos os modelos possuem características comuns, como o tempo de atualização em valores discretos iguais a um segundo, a definição de pontos de partida e destino, a presença de semáforos etc. Porém poucos são os modelos que consideram ciclistas ou motociclistas como parte do tráfego e o comportamento de transportes públicos definido de maneira diferenciada.(LIU; TATE, 2000)(TREIBER; KESTING, 2013)

Muitos simuladores informam, durante a sua execução, o estado da simulação, apresentando características dos veículos como velocidade, localização, tamanho do engarrafamento etc. Para otimizar o processo de simulação, aplicações distribuídas através da computação paralela também são utilizadas em alguns modelos. Os simuladores são validados comparando seus resultados com os dados coletados do tráfego real da região analisada. Para tornar a simulação mais próxima do real, as mudanças de pistas já são utilizadas em alguns modelos, sendo aplicadas para mudanças de rotas, ultrapassagens, em situações para aumento de velocidade etc.

## 2.2 Autômatos celulares

Um Autômato Celular (AC) é uma máquina de estados modelado de tal forma que tempo e espaço são variáveis discretas, composto por uma matriz, com células de mesmo tamanho e forma, formando um sistema dinâmico. Um AC altera seu estado repetidamente com base em regras de atualização que são aplicadas simultaneamente a todas suas células que interagem entre si, onde cada novo estado de uma determinada célula depende do seu estado atual e dos estados das células vizinhas.

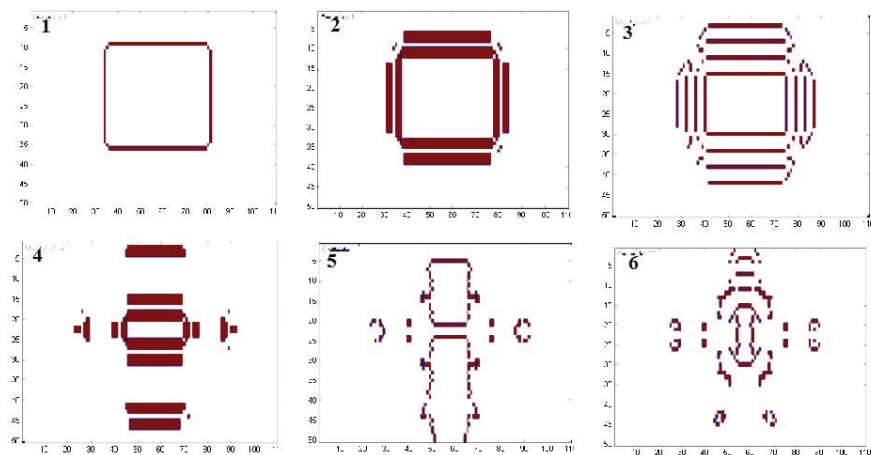
Foram propostos inicialmente para simular a auto-reprodução de organismos biológicos em trabalhos de John Von Neumann de 1940 e, posteriormente, por Jonh Horton Conway, com o jogo da vida, em 1970, que se tornou uma forma de passatempo computacional. Os AC difundiram-se bastante com inúmeras outras aplicações, diversificando-se em áreas do conhecimento humano, com estudos de sistemas econômicos, sociais, físicos etc.

O jogo da vida simula processos de nascimento, sobrevivência e morte, tendo a ideia básica que um ser vivo necessita de outros seres vivos para sobreviver, mas que em situações de densidade populacional elevada, acarretará em sua morte, supostamente devido a falta de alimentos. As regras para o jogo da vida, inventado por Conway, que determina os nascimentos, sobrevivências e mortes são:

- Regra 1: Uma célula viva com menos de dois vizinhos vivos morre.

- Regra 2: Uma célula viva com mais de três vizinhos vivos morre.
- Regra 3: Uma célula morta com exatamente três vizinhos vivos se torna uma célula viva.
- Regra 4: Uma célula viva com dois ou três vizinhos vivos continua viva para a próxima geração.

Figura 2.4: Exemplos de evoluções do jogo da vida de Conway.



Na figura 2.4, pode-se observar exemplos de evoluções dada uma condição inicial, quadro 1, do jogo da vida de Conway. Do quadro 1 ao 6, na figura 2.4, foram realizadas algumas evoluções aplicando as regras do jogo da vida. Percebe-se que a imagem no quadro 6 é bastante diferente da imagem no quadro 1. De maneira geral, os AC são muito sensíveis ao seu estado inicial, apresentando resultados bastante diferentes com pequenas mudanças em seus estados iniciais.

Segundo Treiber e Kesting (2013), os modelos de autômatos celulares são bastante utilizados para a representação do tráfego urbano, desde que Stephen Wolfram em 1983 estudou o mais simples não-trivial modelo de AC denominando de “Autômato Celular Elementar”, que consiste em sequências unidimensionais de células, onde cada célula possui apenas dois estados e interage apenas com ela mesma e com os dois vizinhos próximos. Tomando-se três células, o número de estados possíveis dadas as combinações das interações é igual a  $2^3 = 8$ , e cada estado pode ser mapeado para um dos dois possíveis novos estados do centro deste conjunto de três células, totalizando  $2^8 = 256$  regras de transições diferentes que definem o método do autômato celular elementar. Um dos membros deste método é chamado de regra 184, e segundo Treiber e Kesting (2013), pode ser tomado como o mais genérico modelo de AC para o tráfego, que é descrito da seguinte maneira:

Tabela 2.1: 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; KESTING, 2013)

Na tabela 2.1, os estados 1 e 0 significam as células ocupadas por um automóvel e as células vazias, respectivamente. A cada iteração no tempo, os carros se movem uma célula para direita se a célula destino estiver vazia ou permanecem na mesma posição que estavam. O nome regra 184 é devido a formação do número binário, que convertido para decimal é igual a:  $10111000_{(2)} = 184_{(10)}$ , conforme a segunda linha da tabela 2.1.

De um modo geral, a regra de atualização das posições para regra 184 pode ser escrita como:

- Velocidade :  $v_i = \min(d_i, 1)$
- Movimento:  $x_i = x_i + v_i$ .

Onde  $v_i$ ,  $d_i$  e  $x_i$  referem-se a velocidade, o número de células vazias à frente do veículo  $i$  à sua direita e a posição, respectivamente.

O Modelo de Fukui-Ishibashi é uma modificação da regra 184. Neste, considera-se outras velocidades além de 0 e 1, estabelecendo-se a velocidade máxima permitida para trafegar. Ou seja: (FUKUI; ISHIBASHI, 1996)

- Velocidade :  $v_i = \min(d_i, v_{max})$
- Movimento:  $x_i = x_i + v_i$ .

A velocidade do veículo indica quantas células o mesmo irá percorrer em função da iteração realizada, podendo assim ser somada com a posição do veículo para caracterizar o seu movimento, sem resultar em um erro dimensional ao somar essas variáveis.

Tanto o modelo da regra 184 como o modelo de Fukui-Ishibashi são modelos determinísticos. Porém, para simular situações reais do tráfego, é necessário considerar elementos estocásticos. Assim, em 1992, Nagel e Schreckenberg publicaram um trabalho pioneiro com autômatos celulares probabilísticos aplicado ao tráfego, tornando os modelos de autômatos celulares mais robustos para a simulação de tráfego, tanto qualitativa como quantitativamente. (TREIBER; KESTING, 2013)

Conhecido como modelo NaSch, ele possui como principal mudança o fato de um veículo, que tende sempre a andar na maior velocidade possível ou permitida, em algum momento, ter a sua velocidade modificada dada uma probabilidade  $p$ . Mantendo ou diminuindo sua

velocidade sem motivos aparentes. Pode-se entender este comportamento como uma possível distração do motorista que reduz sua velocidade ao ver algum elemento externo ao tráfego. Neste modelo, os veículos tem suas velocidades balizadas pela distância para o veículo à sua frente e também na sua própria velocidade. Sob condições de contorno periódica e mantendo o número de veículos fixo, o modelo é descrito para  $x_n$ ,  $v_n$  e  $v_{max}$  como a posição, a velocidade e a velocidade máxima de tráfego, respectivamente, do  $n$ -ésimo veículo, e  $d_n = x_{n+1} - x_n - l$  como o espaço entre o  $n$ -ésimo veículo e o veículo à sua frente no tempo  $t$ , onde cada célula possui comprimento igual a  $7,5 m$ , que segundo Nagel e Schreckenberg (1992), corresponde a ocupação média de um automóvel em um engarrafamento, considerando o tamanho do carro e a distância até o veículo da frente, e cada veículo ocupa exatamente uma célula.

O passo de tempo para atualização do modelo é igual a um segundo, pois segundo Nagel e Schreckenberg (1992), a velocidade média de tráfego sem engarrafamento é igual a  $4,5$  espaços por passo de tempo e esta corresponde a velocidade de aproximadamente  $120 km/h$  na Alemanha. Assim, o tempo de iteração em segundos por passo de tempo é igual a  $\frac{7,5 \times 4,5}{120 \div 3,6} \approx 1$ . O tempo de iteração de um segundo também é adotado como o tempo de reação humana, de acordo com Larraga *et al.* (2005).

No modelo “NaSch”, cada veículo poderá se movimentar com uma velocidade inteira dada por  $v_n \in \{0, \dots, v_{max}\}$  e uma atualização do sistema irá consistir em seguir quatro passos consecutivos que são aplicados para todos os veículos:

- Passo 1: Aceleração. Se  $v_n < v_{max}$ , a velocidade do  $n$ -ésimo veículo é incrementada em uma unidade, mas  $v_n$  permanece inalterada se  $v_n = v_{max}$ , ou seja:  $v_n \rightarrow \min(v_n + 1, v_{max})$
- Passo 2: Desaceleração ( devido aos outros veículos ). Se  $d_n < v_n$  a velocidade do  $n$ -ésimo veículo é reduzida para  $d_n$ , ou seja:  $v_n \rightarrow \min(v_n, d_n)$
- Passo 3: Aleatoriedade. Se  $v_n > 0$ , a velocidade do  $n$ -ésimo veículo é aleatoriamente decrementada em uma unidade, dada uma probabilidade  $p$  mas  $v_n$  não muda se  $v_n = 0$ , ou seja:  $v_n \rightarrow \max(v_n - 1, 0)$  dada uma probabilidade  $p$ .
- Passo 4: Movimento do veículo. Cada veículo é movimentado para frente com velocidade determinada nos passos de 1 a 3, ou seja:  $x_n \rightarrow x_n + v_n$ .

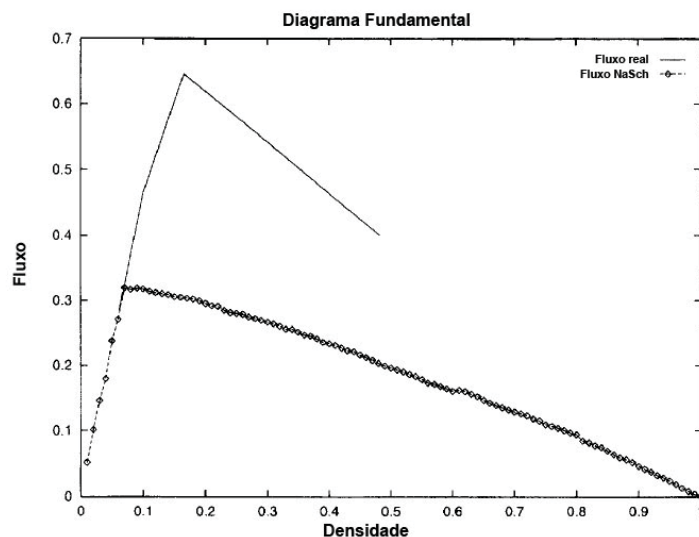
Neste modelo, um veículo com velocidade igual a 3 células por segundo estará a  $81 km/h$ . Na maioria dos modelos utilizados em estudos considera-se a velocidade máxima do veículo igual a  $135 km/h$ .

Pela figura 2.5, percebe-se que o fluxo máximo no modelo “NaSch” fica abaixo do valor real. Isto acontece porque ao se calcular a velocidade de cada veículo, num dado tempo, não

se considera que o veículo à sua frente também irá se movimentar. Acarretando em limitações ao deslocamento dos veículos, isto devido a distância à frente do veículo e não pela velocidade que este poderia alcançar. Vários estudos sugerem modificações neste modelo proposto para se assemelhar ao tráfego real. Um outro problema no modelo de “NaSch” é a desaceleração instantânea, onde um veículo poderá ter que desacelerar da  $v_{max}$  para zero em um segundo, o que é impossível fisicamente.

No trabalho desenvolvido por Hu (1999), foram feitas comparações entre o modelo “NaSch” e um novo proposto que se adequaria melhor em condições de tráfego com alta densidade de veículos. Uma das modificações foi no valor do passo de tempo, que seria feito baseado em  $v_{max}$ , sendo calculado por  $1/v_{max}$ , reduzindo assim o problema da desaceleração em situações extremas para um período de um segundo, como acontece no modelo original de “NaSch”.

Figura 2.5: Comparação de dados de tráfego real com modelo “NaSch” para  $p = 0,4$ .



Fonte: Adaptado de (EMMERICH; RANK, 1997)

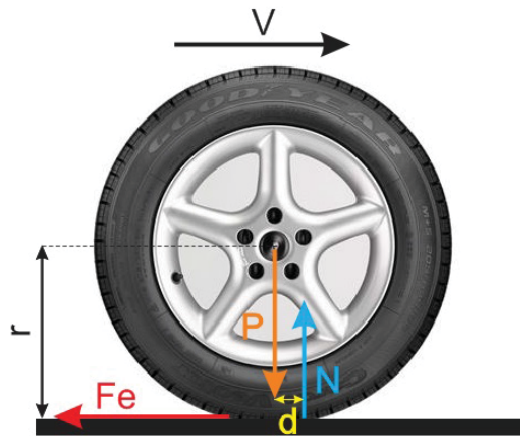
Na figura 2.5, numa comparação feita por Emmerich e Rank (1997), tem-se a diferença entre o fluxo de um tráfego real, exibido em linha contínua, e o fluxo obtido com o modelo “NaSch” para  $p = 0,4$ , que representa o parâmetro da probabilidade de desaceleração dos veículos, exibido com marcador de círculos. Evidencia-se que as regras inicialmente propostas por Nagel e Schreckenberg devem ser modificadas para que se tenham valores de fluxo iguais aos coletados em situações reais de tráfego.

## 2.3 Relacionamento motor-veículo

Um veículo ao realizar um movimento retilíneo, de maneira geral, depende de forças longitudinais trocadas entre o pneu e a pista, de forças aerodinâmicas decorrentes deste movimento e da inclinação da pista se a mesma possuir aclives ou declives. Durante o seu movimento, toda impulsão promovida pelo motor é igualada às forças que se opõe ao movimento. Ocorrerão basicamente três fenômenos durante o movimento: resistência ao rolamento, resistência aerodinâmica e quando for o caso, a resistência gravitacional dada a inclinação da pista.

### 2.3.1 Resistência ao rolamento

Figura 2.6: Esquema para determinar o coeficiente de rolagem.



Dado um veículo que trafega com velocidade constante, analisando o movimento de sua roda, tem-se de acordo com a figura 2.6 a atuação da força normal ( $N$ ) aplicada em um ponto deslocado à frente do eixo da roda.

Isto acontece porque durante o rolamento, a parte do pneu sobre a pista sofre deflexão. Na área de contato são geradas tensões devido a diferença de comprimentos que representa o comprimento da banda de rodagem do pneu. Devido a histerese do material do pneu, parte da energia que foi gasta para deformar o pneu não é restaurada na fase seguinte de relaxamento, ou é restaurada depois. Isto causa uma mudança na distribuição das pressões de contato, que não são simétricas, mas são maiores na área em frente ao eixo da roda. A resultante da pressão de contato normal fica deslocada para frente com respeito ao centro do pneu por uma distância “ $d$ ”. (COSSALTER, 2006)

Em relação ao eixo da roda, o torque resistente à rotação da roda dado por  $N.d$ , equilibra o torque da força de atrito que ocasiona a rotação da roda, dado por  $F_e.r$ , pois o veículo se desloca com velocidade constante. Assim, tem-se:

$$\begin{aligned}
 N.d &= F_e.r \\
 F_e &= \frac{d}{r}.N
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

O deslocamento da força normal ocasiona o que se denomina de resistência ao rolamento e a razão  $(\frac{d}{r})$  corresponde ao chamado coeficiente de resistência ao rolamento. Se as deformações no pneu fossem elásticas sem amortecimento e não houvesse qualquer histerese com a roda indeformável sobre o piso rígido, a pressão seria distribuída uniformemente em relação ao centro da região de contato do pneu com a pista, fazendo com que a força normal ficasse exatamente abaixo do eixo da roda, acarretando numa distância  $d$  nula. De acordo com a razão  $(\frac{d}{r})$ , um procedimento para diminuir o coeficiente de resistência ao rolamento é aumentar o raio “r” da roda.

Assim, a resistência ao rolamento depende de vários parâmetros como: pressão de calibragem do pneu, dimensões da roda, estrutura e material do pneu, carga sobre o rolamento da roda, temperatura, superfície da estrada, e especialmente da velocidade. (COCCO, 2004)

Por existir resistência ao rolamento, há perda de energia mecânica internamente no pneu, o que causa elevação de sua temperatura.

A força de resistência ao rolamento ( $F_r$ ) será determinada pela equação 2.2:

$$F_r = C_r.m.g \tag{2.2}$$

onde:

$C_r$ : Coeficiente de resistência ao rolamento - O aumento do coeficiente de resistência ao rolamento é diretamente proporcional ao nível de deformação e inversamente proporcional ao raio do pneu. Assim, o aumento deste coeficiente está relacionado a cargas maiores, velocidades mais altas e pressão mais baixa do pneu. (BOSCH, 2005).

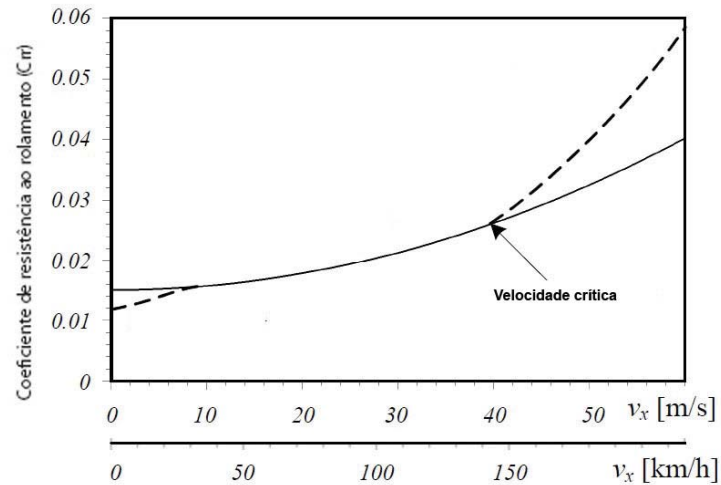
$m$ : Massa (kg)

$g$ : Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

Segundo Cocco (2004), a força de resistência ao rolamento do pneu da motocicleta é menor que 2% da força de corpo.

Quando ocorre o aumento da velocidade, a frequência de excitação do pneu amplifica as deformações na saída do contato do pneu com a pista. Pode-se perceber na figura 2.7 que o coeficiente de resistência ao rolamento cresce quase que exponencialmente para altas velocidades e para velocidades médias e baixas, pode-se considerá-la constante para efeito de cálculo.

Figura 2.7: Coeficiente de resistência ao rolamento em função da velocidade.

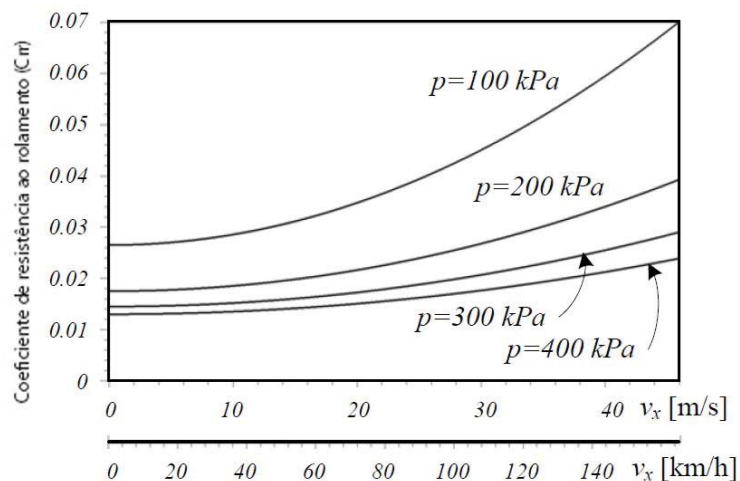


Fonte: Adaptado de (HOAG, 2006)

Segundo Cossalter (2006), valores típicos para o coeficiente de resistência ao rolamento para a motocicleta estão em torno de 0,02.

Aumentando a pressão de calibragem do pneu, reduz-se a região deformada e assim, reduz-se também a resistência ao rolamento. Na figura 2.8 pode-se perceber a influência da pressão no valor do coeficiente de resistência ao rolamento.

Figura 2.8: Coeficiente de resistência ao rolamento em função da pressão no pneu.



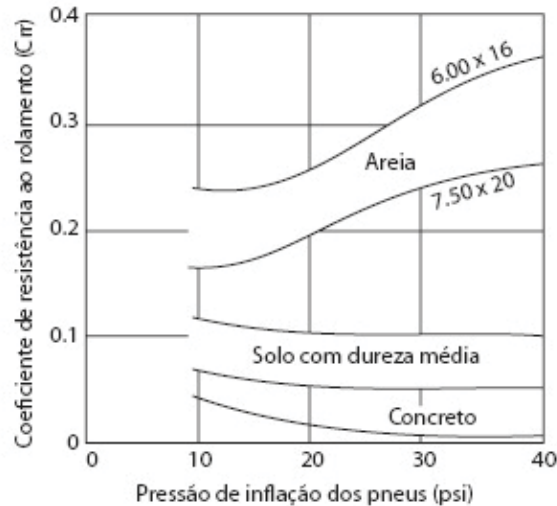
Fonte: Adaptado de (HOAG, 2006)

As características do solo vão influenciar na pressão ótima dos pneus. Para solos rígidos quanto maior a pressão interna menor a resistência ao rolamento, conforme pode ser visto na figura 2.9. Segundo Brunetti (2012), ao aumentar a pressão no pneu, o coeficiente de resistência



ao rolamento diminui mas o pneu apresenta maiores desgastes.

Figura 2.9: Coeficiente de resistência ao rolamento em função do tipo de solo.



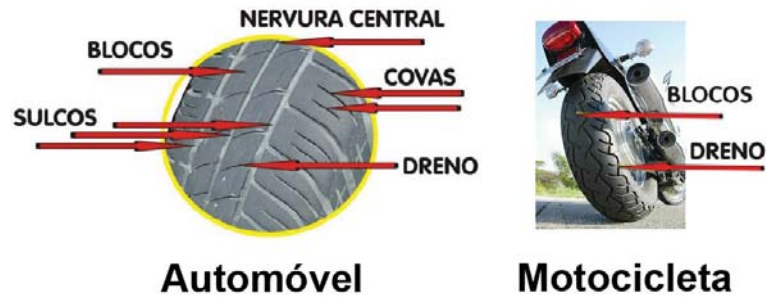
Fonte: (BRUNETTI, 2012)

### 2.3.1.1 Pneus

Um dos componentes mais importantes nos veículos é o pneu, pois ele é o responsável por fazer o veículo se movimentar ou parar, é responsável pela mudança de direção do veículo e contribui também para minimizar vibrações. Os pneus, ao sofrerem deformação, permitem o contato entre a roda e o solo e mantêm este contato mesmo com a presença de pequenos obstáculos. Além de melhorar o conforto do condutor, os pneus melhoram a aderência. De acordo com Cossalter (2006), os pneus da motocicleta possuem a função de gerar a força lateral necessária para mantê-las na curva ou ao longo de uma trajetória curva.

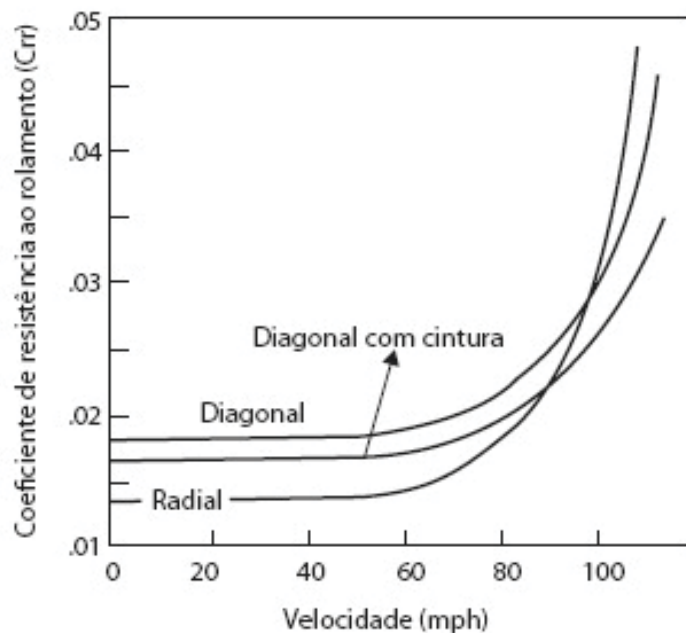
Os pneus dos automóveis possuem na sua banda de rodagem uma nervura central, além de blocos que são responsáveis pela capacidade de tracionar e frear o veículo e sulcos que são responsáveis pela drenagem da água quando utilizados em pisos molhados, conforme pode-se ver na figura 2.10. Para retirar a água da área de contato do pneu com o solo, existem drenos que são sulcos auxiliares, aumentando assim a aderência do pneu em pisos molhados. As covas são pequenas ranhuras que auxiliam na dissipação calor quando o pneu está aquecido. Quando o pneu não possui ranhuras, é chamado de pneu liso ou “slick”, e são utilizados exclusivamente em pisos secos, oferecendo maior superfície de contato com o solo do que um pneu com nervuras.

Figura 2.10: Características físicas do pneu.



De acordo com a figura 2.11, percebe-se que o pneu radial possui melhores coeficientes de resistência ao rolamento em relação aos outros tipos de pneus quando comparados à baixas velocidades. (COCCO, 2004)

Figura 2.11: Coeficiente de resistência ao rolamento em função do tipo de pneu.

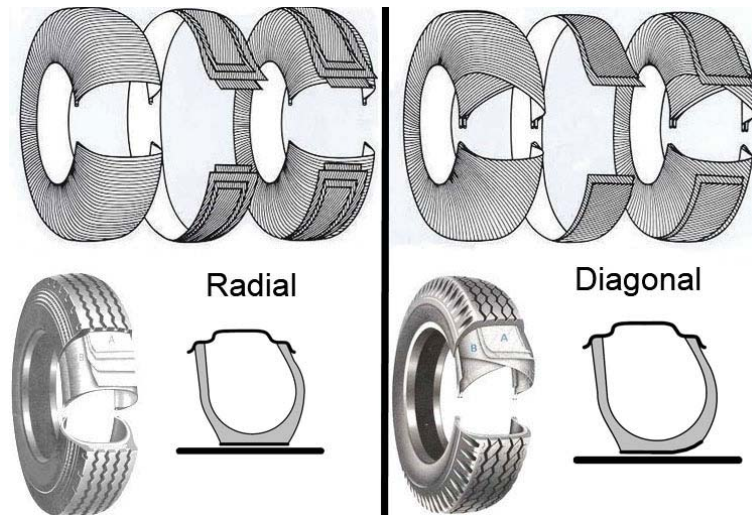


Fonte: (BRUNETTI, 2012)

Os pneus radiais geralmente são fabricados para serem usados sem câmara de ar, o que permite que os fios da carcaça sejam dispostos perpendicularmente ao plano de rodagem não causando sobreposições entre si. A construção radial leva ao pneu maior rigidez e consequentemente maior durabilidade. Suas laterais são mais flexíveis para compensar a rigidez da banda de rodagem. Possuem a característica de manter o seu formato com tiras interiores retas. O fato das lonas não se atritarem evita aquecimento dentro do pneu. São pneus mais propensos a danos laterais e a cortes, porém por conta da rigidez possuem maior durabilidade. Os pneus

diagonais ou convencionais apresentam a carcaça composta de lonas sobrepostas e cruzadas entre si, formando um aspecto diagonal. Tais características podem ser vistas na figura 2.12.

Figura 2.12: Tipos de pneus.



As dimensões dos pneus são dispostas no próprio pneu, conforme pode ser visto na figura 2.13, e seu diâmetro pode ser calculado de acordo com a equação 2.3.

Figura 2.13: Dimensões dos pneus.



$$d_{pneu} = 2 \cdot \frac{L}{10} \cdot \left(\frac{s}{100}\right) + 2,54 \cdot d_{aro} \quad (2.3)$$

onde:

$d_{pneu}$ : Diâmetro do pneu (cm).

$L$ : Largura do pneu (mm).

$s$ : Relação altura/largura do pneu (%).

$d_{aro}$ : Diâmetro do aro, em polegadas.

Por exemplo, se o pneu tiver a especificação 130/90 R16, terá o diâmetro igual a:  
 $d_{pneu} = 2 \times 13 \times (90 \div 100) + 2,54 \times 16$  que é igual a 64,04 cm.

### 2.3.2 Resistência aerodinâmica

A força de resistência aerodinâmica é também conhecida como força de arrasto e está diretamente relacionada a forma do veículo, ou seja, dos contornos da carroceria que determinam as dificuldades com que o ar passa sobre ela. (BRUNETTI, 2012).

A força de resistência aerodinâmica ( $F_a$ ) é calculada pela equação 2.4:

$$F_a = C_d \cdot \frac{\rho \cdot (v + w)^2 \cdot A}{2} \quad (2.4)$$

onde:

$C_d$ : Coeficiente de arrasto - É adimensional, indicando a eficiência do projeto aerodinâmico do veículo. Representa, basicamente, a perda de carga imposta ao fluxo de ar pela presença do veículo. Além de melhorar a aerodinâmica do veículo, é muito importante em estudos de consumo de combustível e emissão de poluentes.

$\rho$ : Densidade do ar - É a massa por unidade de volume. Apresenta valor igual a 1,2041 kg/m<sup>3</sup> para temperatura de 20°C à pressão de 1 atm.

$v$ : Velocidade do veículo - Velocidade na qual o veículo se desloca (m/s)

$A$ : Área frontal do veículo - Área vista do veículo num plano perpendicular a  $v$  (m<sup>2</sup>), no caso das motocicletas, acrescenta-se a área do piloto em sua posição de condução.

$w$ : Velocidade do ar em sentido contrário ao movimento do veículo (m/s)

Na literatura, encontra-se o termo fator de arrasto ( $K$ ) que faz menção ao produto de  $C_d \cdot \frac{\rho \cdot A}{2}$ , podendo a equação 2.4 ser escrita como:

$$F_a = K \cdot (v + w)^2 \quad (2.5)$$

onde:

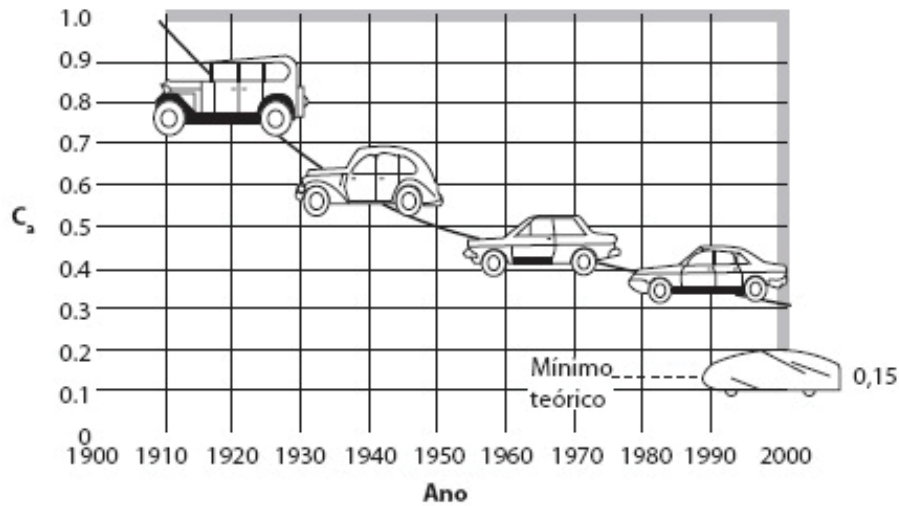
$K$ : Fator de arrasto (kg/m)

De acordo com Cocco (2004), a área frontal projetada de um automóvel geralmente varia entre os seguintes valores:

- 1,7 a 1,9 m<sup>2</sup> - carros compactos
- 2,0 a 2,2 m<sup>2</sup> - carros médios
- 1,6 a 1,8 m<sup>2</sup> - carros esporte

Com o desenvolvimento da tecnologia ao longo dos anos, o projeto aerodinâmico dos automóveis evoluiu para se conseguir menores valores para o coeficiente de arrasto. Na figura 2.14 pode-se perceber esta evolução, assim como o valor mínimo teórico para o coeficiente de arrasto de um automóvel que é igual a 0,15. (BRUNETTI, 2012)

Figura 2.14: Evolução do coeficiente de arrasto para os veículos do século XX.

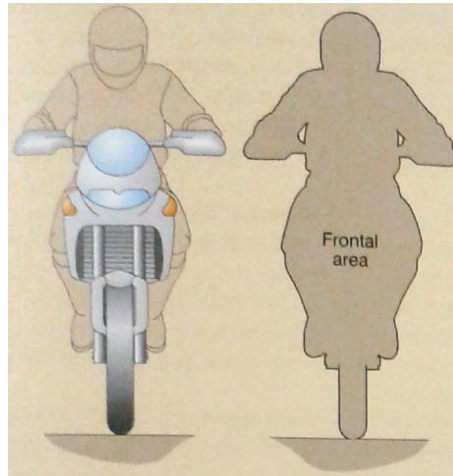


Fonte: (BRUNETTI, 2012)

Em relação as motocicletas, mesmo com uma área frontal menor que a do carro, ainda que considerando a área frontal da motocicleta acrescida da área ocupada pelo piloto, e por existir diferentes tipos de motocicletas, o arrasto aerodinâmico possui valores que variam muito.

A área frontal “A” é fortemente influenciada pelo corpo do condutor e sua posição durante a condução. Valores de referência podem variar de 0,6 a 0,9  $m^2$  para motocicletas de turismo, de 0,4 a 0,6  $m^2$  para modelos esportivos e 0,4 a 0,5  $m^2$  para motocicletas de competição. (COSSALTER, 2006)

Figura 2.15: Área frontal de uma motocicleta.



Fonte: (COCCO, 2004)

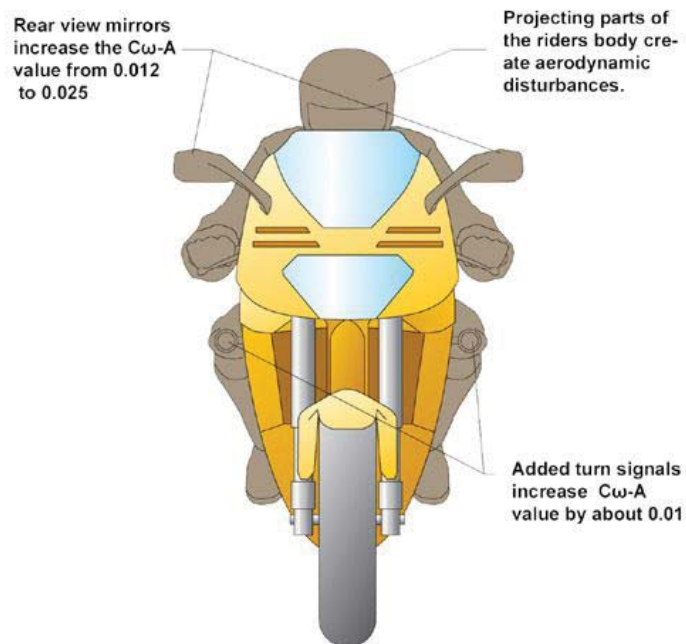
A posição do piloto ao conduzir a motocicleta é fundamental. Para o piloto agachado, a área exposta ao fluxo de ar é muito menor que se comparada com ele sentado ereto ou em pé, como acontece nas motos que fazem trilhas. Assim, para a mesma motocicleta, pilotada em diferentes posições, alcançará diferentes velocidades finais.(COCCO, 2004)

A mudança da posição de condução acarreta na redução do coeficiente de arrasto que varia de 5 a 20%, dependendo do tipo de motocicleta e da estrutura corporal do condutor. (COSSALTER, 2006)

A postura do piloto otimiza os aspectos aerodinâmicos. Em situações que necessitam otimizar a aerodinâmica, como em corridas, deve-se prestar atenção nos mínimos detalhes para reduzir a área frontal, sendo importante manter os cotovelos a frente dos calcanhares e não abertos para os lados; manter os pés nos suportes para pés evitando que os mesmos funcionem como asas; e manter o capacete pressionado no sentido do tanque de combustível, abrigando-o sob a cúpula do para-brisas. No tráfego urbano, a postura do piloto da motocicleta apresenta-se como importante elemento para reduzir o consumo de combustível, e, conseqüentemente, a emissão de dióxido de carbono, reduzir custos, manobrabilidade etc.

Roupas também possuem grande influencia. Pela figura 2.16, percebe-se que a presença de retrovisores pode aumentar o valor do produto do coeficiente de arrasto pela área frontal de 0,012 a 0,025. (COCCO, 2004)

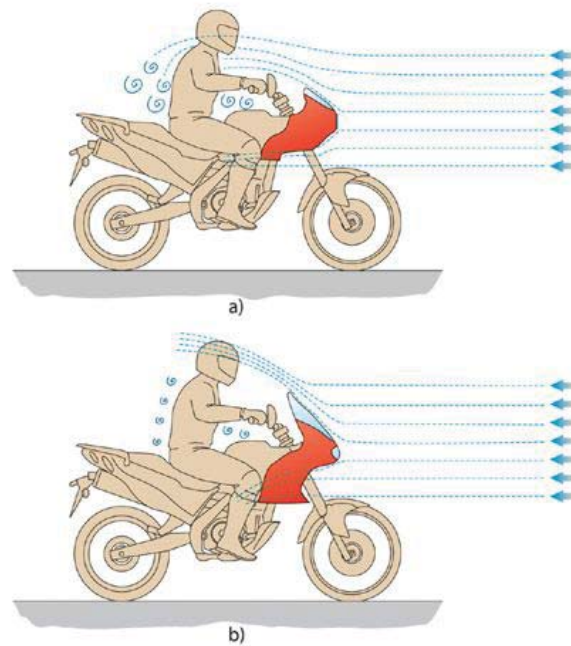
Figura 2.16: Acessórios da motocicleta e a influência no coeficiente de arrasto.



Fonte: (COCCO, 2004)

A carenagem da motocicleta tem papel fundamental na sua aerodinâmica. São projetadas para oferecer conforto, ainda quando o condutor estiver pilotando em posição ereta, e proteger de elementos externos ao mesmo tempo que permite a motocicleta atingir altas velocidades, sem entretanto, comprometer a estabilidade da mesma. (COCCO, 2004)

Figura 2.17: Arrasto aerodinâmico na carenagem de uma motocicleta.



Fonte: (COCCO, 2004)

A resistência aerodinâmica é influenciada de diferentes formas por vários componentes da motocicleta. O produto do coeficiente de arrasto pela área frontal da motocicleta, também chamada de área de arrasto, apresenta variações no seu valor em algumas situações, dentre elas: (COSSALTER, 2006)

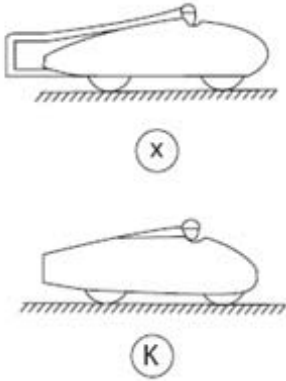
- carenagens frontais produzem um aumento de 0,02 a 0,08  $m^2$
- carenagens laterais reduzem o fator de arrasto em aproximadamente 0,015  $m^2$
- espelhos laterais aumentam a área de arrasto de 0,012 a 0,025  $m^2$
- a presença de carenagem traseira melhora o fator em 0,015  $m^2$
- bagageiros, se projetados adequadamente, melhoram em 0,02  $m^2$
- um aerofólio inferior pode melhorar o fator de arrasto por um valor que varia de 0,01 a 0,02  $m^2$

Projetos que otimizam a área de arrasto são aplicados principalmente em motocicletas de corrida. A figura 2.18 mostra a diferença de velocidade máxima alcançada por motocicletas de competição em função do tipo de carenagem utilizada.



Figura 2.18: A influência da carenagem no arrasto aerodinâmico para motocicletas de corrida.

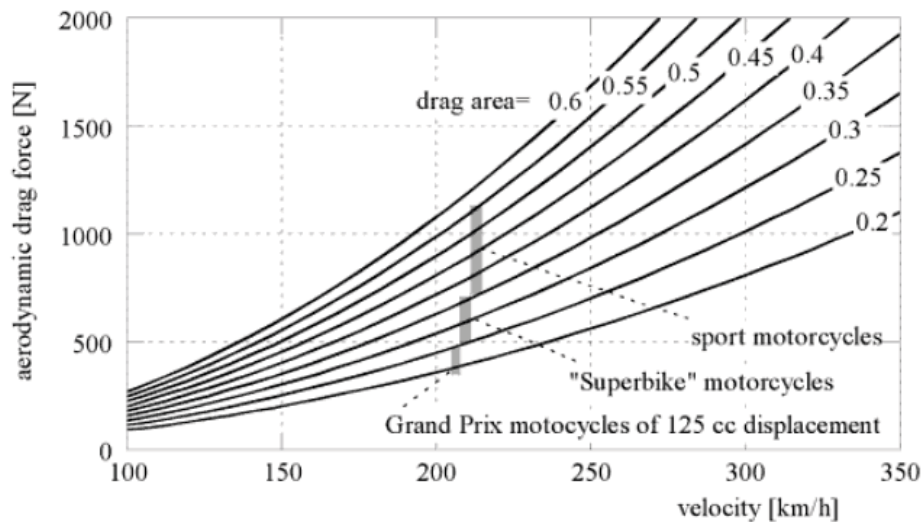
Tipo	Área de arrasto cD-A [m <sup>2</sup> ]	Velocidade máxima com 80 hp Vmax [km/h]
Sem carenagem	0,298	247
Carenagem K	0,148	314
Carenagem X	0,140	320



Fonte: (BRUNETTI, 2012)

A força de resistência aerodinâmica é fortemente influenciada pela velocidade e para cada tipo de motocicleta, dado a sua área de arrasto, se apresenta como a mais atuante força de oposição ao movimento. Pode-se ver na figura 2.19 a relação entre a força de resistência aerodinâmica e a velocidade das motocicletas com diferentes fatores de arrasto.

Figura 2.19: Força de arrasto aerodinâmico em função da velocidade.



Fonte: (COSSALTER, 2006)

### 2.3.3 Resistência gravitacional

Quando o veículo trafega numa pista com inclinação, estará sujeito a resistência gravitacional também em oposição ao seu movimento. Assim, a força de resistência gravitacional ( $F_g$ ) dada uma inclinação é a força necessária para o veículo vencer uma rampa com certa inclinação  $\alpha$ . Essa força é a componente do peso na direção do aclave, aplicada no centro de massa do

veículo, e pode ser calculada pela equação 2.6

$$F_g = m.g.\text{sen}(\alpha) \quad (2.6)$$

onde:

$m$ : Massa ( $kg$ )

$g$ : Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

$\text{sen}(\alpha)$ : Seno do ângulo de inclinação do plano

A inclinação ( $I$ ) de uma via geralmente é expressa em porcentagem, definida pela equação 2.7:

$$I(\%) = \tan(\alpha).100 \quad (2.7)$$

Assim, uma rampa com inclinação de  $16,7^\circ$ , possui  $30\%$  de inclinação.

O DNIT faz recomendações para as inclinações máximas permitidas em rodovias, onde as inclinações máximas recomendadas dependem da classe da estrada. Em vias expressas, onde o volume de tráfego é alto, recomenda-se, no máximo, inclinações de  $5\%$ , ou seja, cerca de  $3^\circ$ . Já em rodovias que possuem baixo volume de tráfego, as inclinações máximas recomendadas são de  $9\%$ , ou seja, cerca de  $5^\circ$ .

### 2.3.4 Força de Propulsão

Para um veículo se movimentando com velocidade constante, ou seja, em situação de equilíbrio dinâmico, a força de propulsão será equilibrada pelas forças de resistência ao movimento. Assim, quanto maior for o torque do motor e a relação global de transmissão entre o motor e as rodas acionadas e mais baixa forem as perdas de transmissão, maior será a força de propulsão disponível nas rodas de tração do veículo. (BOSCH, 2005)

A Força de propulsão ( $F_p$ ) será calculada pela equação 2.8:

$$F_p = \eta \cdot \frac{T \cdot i}{r} \quad (2.8)$$

onde:

$F_p$ : Força de propulsão

$\eta$ : Eficiência mecânica do sistema de transmissão.

$T$ : Torque do motor ( $N.m$ )

$r$ : Raio do pneu ( $m$ )

$i$ : Relação global de transmissão entre o motor e as rodas de tração do veículo.

A equação 2.8 muitas vezes é apresentada em função da potência desejada, sendo utilizada a equação 2.9 (BOSCH, 2005):

$$F_p = \frac{P_{des} \cdot \eta}{V} \quad (2.9)$$

onde:

$\eta$ : Eficiência mecânica do sistema de transmissão.

$P_{des}$ : Potência desejada (W)

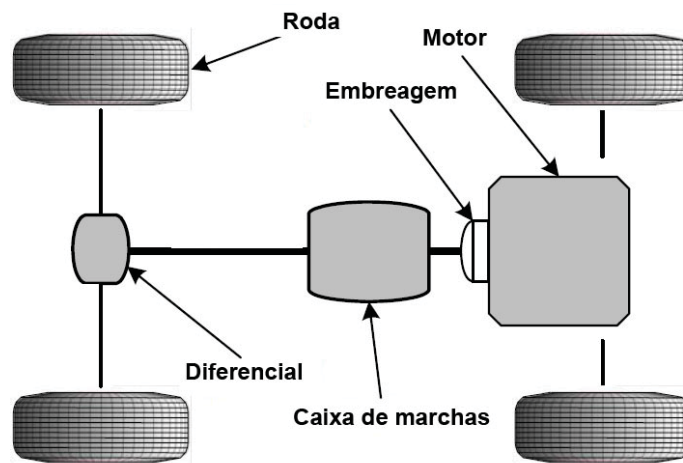
$V$ : velocidade do veículo (m/s)

### 2.3.4.1 Relações de Transmissão

A relação de transmissão é a razão entre as velocidades angulares do elemento motriz e do elemento movido. É adimensional e indica a quantidade de rotações realizadas no elemento motriz para cada rotação no elemento movido.

O sistema de transmissão do automóvel é diferente do sistema utilizado na motocicleta. A relação global de transmissão entre o motor e as rodas de tração do automóvel é calculada pelo produto entre a relação de transmissão do câmbio em uma determinada marcha e a relação de transmissão do seu diferencial, conforme pode ser visto na figura 2.20.

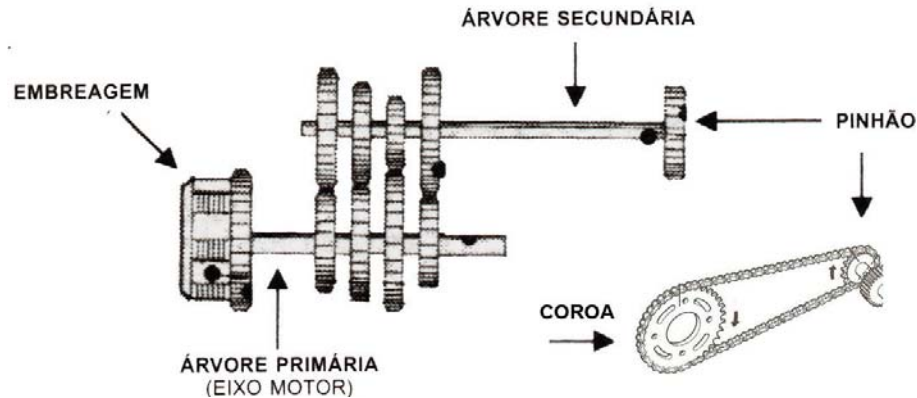
Figura 2.20: Transmissão no automóvel.



O diferencial é um conjunto de engrenagens de aço, que se combinam entre si, em movimentos rotativos, afim de permitir que as rodas motrizes do veículo desenvolvam rotações diferentes uma da outra, quando o veículo se desloca em curvas, garantindo assim, a sua estabilidade.

Para as motocicletas, a relação global de transmissão entre o motor e a roda de tração é calculada pelo produto entre a relação de transmissão do câmbio em uma determinada marcha e as relações de transmissões primárias e secundárias, conforme pode ser visto na figura 2.21.

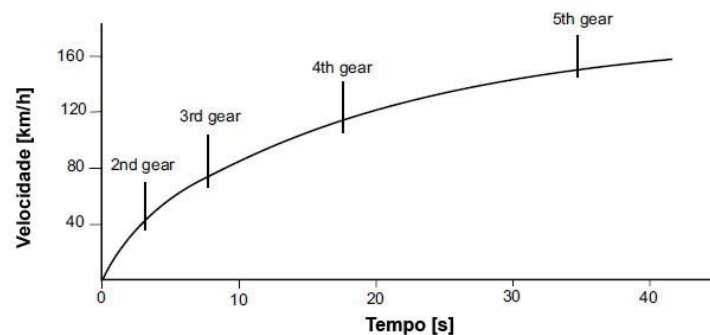
Figura 2.21: Transmissão na motocicleta.



Pode-se alterar ainda a relação global de transmissão da motocicleta alterando o número de dentes do seu pinhão e da coroa, porém tal procedimento é pouco usual por não ser prático. Porém, caso sejam feitas alterações deste tipo, quanto maior for o valor da relação de transmissão, antecipa-se cada vez mais a troca de marchas, fazendo a motocicleta ter mais facilidade em subir locais íngremes e apresentando maiores acelerações em arrancadas ou saídas de curva, e quanto menor a relação, maior a velocidade em cada marcha em menores rotações. Por exemplo, para uma relação de transmissão de 4:1, significa dizer que a engrenagem motora deverá completar 4 voltas para que a movida complete apenas uma.

Na figura 2.22, pode-se ver a troca de marchas de um automóvel que tem sua velocidade aumentada com o passar do tempo. Provavelmente foi definida uma região de rotações máximas e mínimas para trabalho do motor, sendo executadas as trocas de marchas para a rotação do motor ficar nesta região.

Figura 2.22: Trocas de marchas de um automóvel.

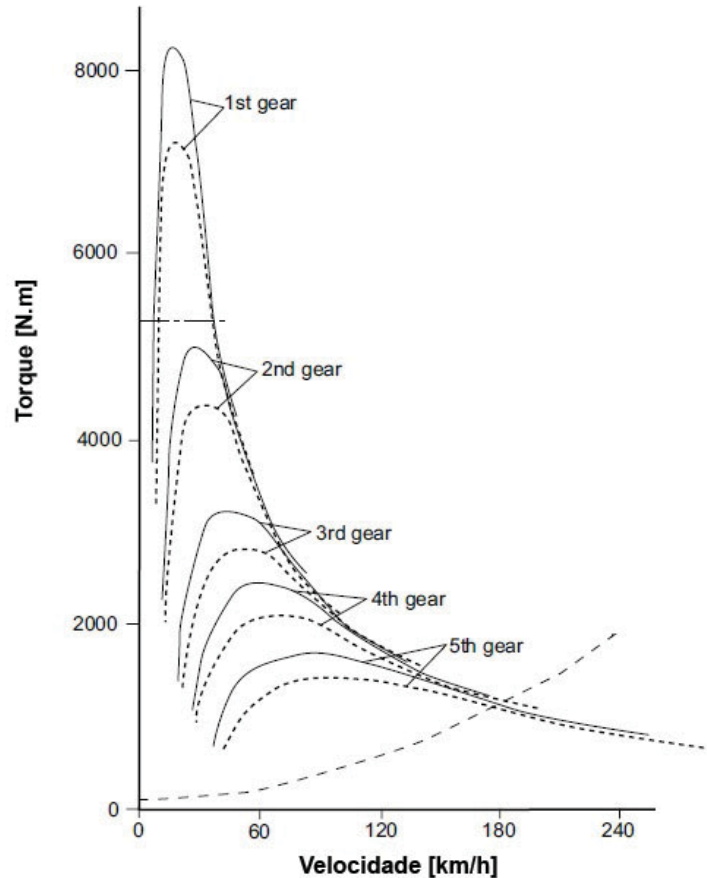


Fonte: Adaptado de (HOAG, 2006)

A figura 2.23 apresenta duas curvas de torque em função da velocidade do veículo, uma tracejada e uma contínua, onde as curvas contínuas apresentam relações de transmissão diferentes das tracejadas. A figura evidencia a influência da relação de transmissão no desenvolvimento

do torque na roda do veículo para cada marcha utilizada. Também mostra o torque na rotação máxima permitida pela roda e o torque necessário para vencer as forças resistivas ao movimento do veículo em função de sua velocidade.

Figura 2.23: Relação do torque na roda em função das marchas de um veículo.

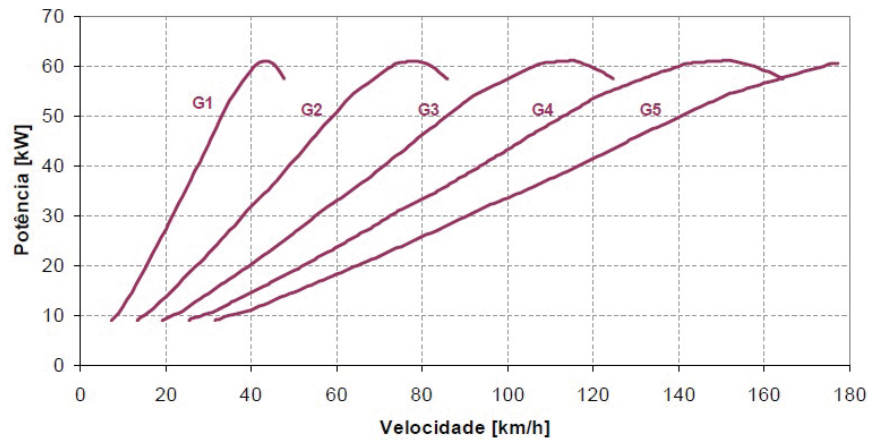


Fonte: Adaptado de (HOAG, 2006)

De modo geral, a caixa de velocidades é utilizada para ajustar a velocidade de rotação do eixo do motor para a roda motriz, podendo ser vista como um multiplicador de torque do motor. A figura 2.23 mostra a influência da relação entre as marchas e o torque aplicado nas rodas durante o aumento da velocidade do veículo.

Para cada marcha utilizada, traça-se uma curva do motor para o veículo em função da velocidade desenvolvida. A figura 2.24 mostra um exemplo das curvas de potências em função das trocas de marchas, da primeira para quinta, ou seja, de G1 para G5, quando o veículo tem sua velocidade aumentada.

Figura 2.24: Curvas de potência em função da troca de marchas.



### 2.3.5 Autonomia veicular

Vários fatores influenciam no consumo de combustível de um veículo, dentre eles, a eficiência do motor, o peso do veículo, o seu tipo, a aerodinâmica, a transmissão utilizada, utilização de componentes opcionais, como por exemplo o ar condicionado, etc. Como exposto nos tópicos anteriores dessa seção, veículos com projetos aerodinâmicos bem desenvolvidos possuem menos resistência ao movimento, logo são mais econômicos, porque a maior parte do combustível é utilizada para vencer o arrasto aerodinâmico.

Segundo Martins (2013), se um veículo estiver trafegando à velocidade constante igual a 90 km/h, consumindo cerca de 16 km/l, necessitará de 13,5 kW para vencer as forças resistentes ao seu movimento. Fazendo uma contabilidade da energia resultante da combustão da gasolina fornecida ao motor para esta situação, tem-se:

- 46% é relativo com o aumento da entalpia dos gases de escape,
- 21% é perdida para o ambiente em função da transferência de calor,
- 9% é consumida por perdas mecânicas, e
- 24% é empregado para o trabalho mecânico ( 13,5 kW )

Assim, o rendimento desse motor será de 24%. A potência mecânica é dissipada para vencer todas as resistências ao seu movimento, onde:

- 8,3 kW para vencer a resistência aerodinâmica,
- 4,3 kW para vencer a resistência ao rolamento, e
- 0,9 kW perdas decorrente da transmissão

A maior parte da potência necessária ao movimento da motocicleta é empregada para vencer a resistência aerodinâmica, restando uma parcela mínima para a resistência ao movimento, atrito dos rolamentos e outros componentes da transmissão.(COCCO, 2004)

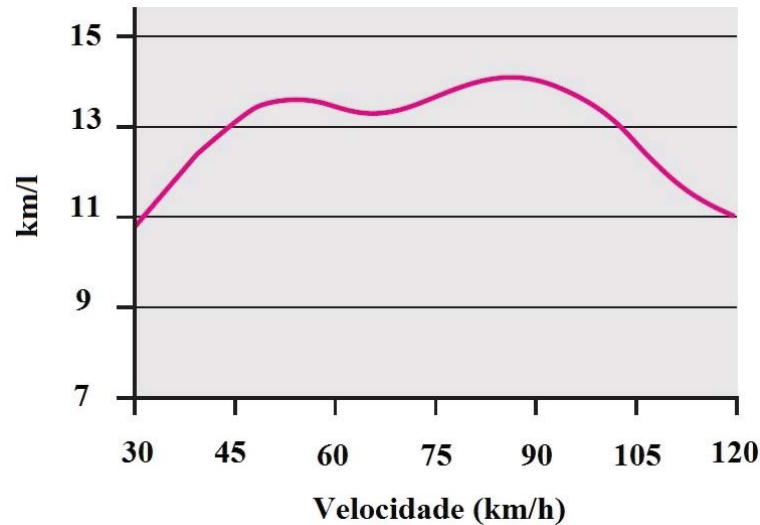
Existe uma diferença entre o rendimento do motor e o rendimento do veículo. O primeiro faz referência a capacidade do motor de transformar em trabalho útil a energia térmica contida no combustível utilizado pelo veículo. Já o rendimento do veículo leva em consideração a potência desenvolvida pelo motor que chega à roda do veículo para superar as potências resistivas ao seu movimento.

Mais de 50% da potência produzida pelo motor é utilizada para superar o arrasto aerodinâmico quando se dirige em rodovias. O arrasto aerodinâmico e, conseqüentemente, o consumo de combustível aumentam rapidamente para velocidades superiores a 90 km/h. Em média um automóvel utiliza cerca de 10% mais combustível a 100 km/h e 20% a 110 km/h do que a 90 km/h. (ÇENGEL; BOLES, 2006)

Na figura 2.25 é exibida a relação entre a autonomia de um automóvel em função de sua velocidade. Pode-se notar que a autonomia do veículo cai bruscamente para velocidades abaixo de 50 *km/h* e para velocidades acima de 90 *km/h*. Isto acontece devido às perdas térmicas do motor quando o mesmo trabalha à baixas rotações, e para altas rotações, isto acontece devido às perdas por atrito ou devido às perdas de carga dos seus coletores. Assim, o rendimento do motor é obtido em função da sua rotação de trabalho.

Nas motocicletas, o peso do motor corresponde de 30 a 35% do seu peso total. Cerca de 20 a 25% do peso total da motocicleta é representado pelas rodas e outras partes não suspensas. Outros componentes como painel, guidão, tanque de combustível, assento do carona e o descanso para os pés, representam outros 10% do peso total. O resto do peso da motocicleta é quase uniformemente distribuído ao longo do comprimento da moto, na forma de carenagem, sistema elétrico, quadro e pequenos componentes auxiliares. (COCCO, 2004)

Figura 2.25: Autonomia de um veículo em função de sua velocidade.



Fonte: (ÇENGEL; BOLES, 2006)

Usar o freio motor gasta menos combustível do que frear o veículo. A central de injeção eletrônica corta o fluxo de combustível para o motor uma vez que o acelerador não é apertado quando o veículo não está em marcha lenta, tal ação pode ser comprovada pelo seu computador de bordo. Evitar acelerações melhora a autonomia do veículo. Procurar manter a velocidade constante evita que a injeção seja forçada a responder repentinamente, minimizando o consumo de combustível.

Çengel e Boles (2006) trazem recomendações técnicas para melhorar a autonomia veicular. Algumas das medidas são citadas abaixo:

- Automóveis com transmissões manuais geralmente são mais eficientes do que os automáticos. Um automóvel com transmissão automática em geral utiliza 10% mais combustível do que um automóvel com transmissão manual, por causa das perdas associadas à conexão hidráulica entre o motor e a transmissão, e também por causa do peso adicional. Porém tal cenário pode ser invertido se o condutor for inexperiente e manter o motor em rotações ou muito baixas ou muito altas, conforme foi discutido ao analisar a figura 2.25.
- Os pneus radiais reduzem o consumo de combustível entre 5 e 10% mas é necessário verificar sua pressão regularmente. Calibrar os pneus é uma medida eficaz para melhorar a economia de combustível, e sua verificação deve ser feita com o pneu frio, pois a pressão aumenta em 7 kPa a cada 5°C na temperatura. Pneus descalibrados desgastam-se prematuramente, afetando na dirigibilidade do veículo e reduzindo a economia de combustível pois aumentam a resistência a rolagem. Recomenda-se, para economizar combustível,



verificar a pressão dos pneus pelo menos uma vez por mês. O pneu com 14 kPa a menos de pressão resulta num aumento de 1% no consumo de combustível. Pneus com baixa pressão quase sempre fazem o consumo de combustível do veículo aumentar em 5% ou 6%. Deve-se também alinhar as rodas que tracionam o veículo, pois com as rodas desalinhadas a resistência à rolagem aumentará e, portanto, o consumo de combustível será maior.

- Carga adicional no veículo aumenta o consumo. Um peso extra de 50 quilos diminui a economia de combustível de um automóvel em cerca de 1% a 2%.
- A utilização de ar condicionado no automóvel aumenta o consumo de combustível em 3% a 4% durante viagens em rodovias, e em até 10% em percursos na cidade.
- Certos óleos especiais possuem aditivos que reduzem o atrito e aumentam a economia de combustível de um veículo em 3% ou mais.
- Se o motorista puder prever as condições do tráfego à sua frente, poderá reduzir o consumo de combustível em até 10 %, pois ajustará sua velocidade de acordo com o fluxo da via, evitando colar no veículo da frente bem como realizar frenagens e acelerações desnecessárias. Na cidade, quase metade da potência do motor é utilizada para acelerar o veículo. Na seção de estudo de casos é feita uma análise da influência das acelerações dos veículos no tráfego urbano com ênfase no consumo de combustível, emissão de  $CO_2$  e custos.

De maneira geral, o consumo de combustível de um veículo habitualmente é expresso em  $km/l$  ou  $l/100km$  evidenciando a autonomia do mesmo. Ou seja, qual a distância que ele percorrerá em função do consumo de combustível. Assim, para converter o consumo específico para o consumo de combustível em  $l/100km$  de um motor, basta utilizar a conversão (2.10), e para converter de  $l/100km$  para  $km/l$ , deve-se dividir 100 pelo valor calculado em  $l/100km$ .

$$\begin{aligned}
 sfc\left(\frac{g}{kWh}\right) &\rightarrow sfc.P\left(\frac{g}{h}\right) \\
 &\rightarrow \frac{sfc.P}{1000}\left(\frac{kg}{h}\right) \\
 &\rightarrow \frac{sfc.P}{1000.\rho_f}\left(\frac{m^3}{h}\right) \\
 &\rightarrow \frac{sfc.P}{\rho_f}\left(\frac{l}{h}\right) \\
 &\rightarrow \frac{sfc.P}{\rho_f.V}\left(\frac{l}{km}\right) \\
 &\rightarrow \frac{100.sfc.P}{\rho_f.V}\left(\frac{l}{100km}\right)
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

Onde:

$P$ : Potência do motor ( $kW$ ).

$\rho_f$ : Densidade do combustível ( $kg/m^3$ ).

$V$ : Velocidade do veículo ( $km/h$ ).

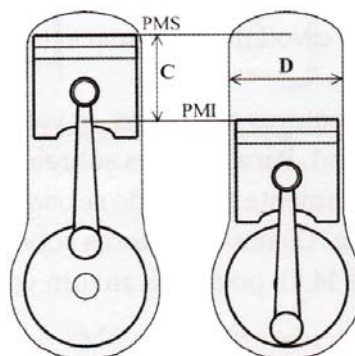
A avaliação do consumo de combustível de um veículo é afetada pelo modo como uma determinada distância é percorrida, alterada pela velocidade de cruzeiro, por acelerações, pelas frenagens, pela massa do veículo, se há inclinações na pista, o regime de rotação do motor, a relação de transmissão etc., ou seja, depende muito do percurso percorrido e da maneira de condução do veículo.

## 2.4 Propriedades e curvas características dos motores veiculares

Os motores veiculares têm objetivo converter a energia química dos combustíveis, tais como a gasolina, para gerar movimento. Na verdade, eles são responsáveis por provocar uma deflagração, ou seja, uma queima controlada e progressiva numa mistura ar-combustível e aproveitar a energia liberada nesse processo, direcionando-a até um eixo que fará a propulsão do veículo.

O motor veicular é constituído por cilindros, dentro dos quais deslizam pistões ligados a uma manivela pelas bielas. O ponto mais alto que o pistão pode atingir dentro do cilindro é chamado de ponto morto superior (PMS) e o ponto mais baixo chamando de ponto morto inferior (PMI). A distância percorrida pelo pistão entre os dois pontos mortos é chamada de curso do pistão. A figura 2.26 mostra o curso do pistão de um motor veicular.

Figura 2.26: Curso do pistão de um motor veicular.



Fonte: (MARTINS, 2013)

O volume varrido pelo curso do pistão é chamado de cilindrada e a soma dos volumes varridos de todos os cilindros de um motor caracteriza a cilindrada do motor, calculada em centímetros cúbicos mas comumente, para os automóveis, exibida em litros. A taxa de com-

pressão de um motor é definida como a relação entre o volume total por cima da cabeça do pistão quando este se encontra no PMI e o valor quando ele está no PMS, ou seja, é a relação entre o volume total do cilindro, incluída a câmara de combustão, e o volume somente da câmara de combustão. Motores com a mesma cilindrada não possuem os mesmos valores de potência, principalmente por causa da rotação, além do seus parâmetros de projeto, como número de cilindros, taxa de compressão ou o desenho da câmara de combustão, que são diferentes.

Os motores veiculares possuem um conjunto de propriedades que, além de fornecer informações relevantes sobre suas condições de funcionamento, geram curvas que irão caracterizá-los de maneiras distintas. Assim, os parâmetros de desempenho de um motor veicular estão definidos pelas suas curvas características. Estas curvas mostram a variação da potência, do torque e do consumo específico de combustível com a variação da rotação do motor e são estabelecidos, por ensaio, a carga constante e geralmente com a borboleta de admissão de ar completamente aberta, numa bancada de ensaio com um dinamômetro. Durante o ensaio é lido o torque resistente do dinamômetro, que corresponde ao torque efetivo do motor. Traçando-se assim a curva de torque por rotação para o motor.

De acordo com Golverk (1992), para se obter uma curva característica para um motor veicular, é preciso realizar entre 400 e 600 medições dos parâmetros de desempenho do motor em laboratório. O que evidencia uma atividade extremamente trabalhosa e que pode levar até dias para ser concluída, além de necessitar de profissionais altamente capacitados para a realização dos procedimentos de medições.

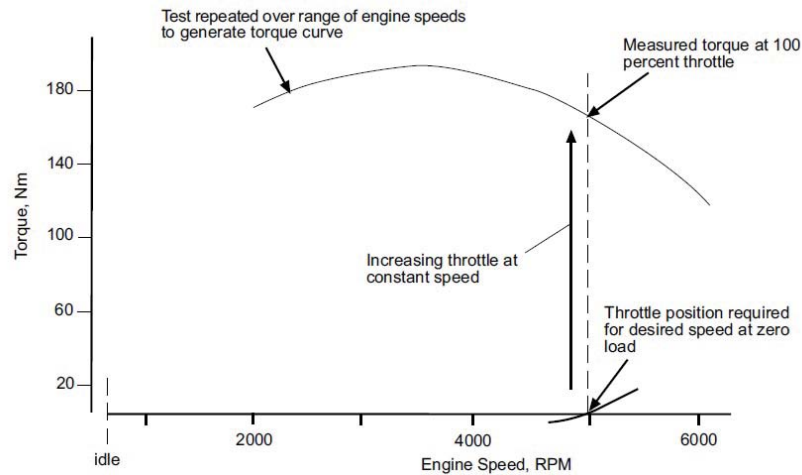
Existe uma limitação da quantidade de ar admitida por ciclo num motor veicular, pois este possui um volume varrido fixo. Em relação à essa quantidade de ar admitido, o motor precisará receber uma certa quantidade de combustível para realizar a deflagração da mistura. A relação entre essas duas quantidades é chamada de relação ar-combustível e quando ocorre a queima completa do combustível utilizando todo o ar disponível, sem que haja excesso de ar, define-se que a mistura é uma mistura estequiométrica.

O valor do torque do motor é, aproximadamente, proporcional à quantidade de ar que entra no motor em cada ciclo, que é composto por admissão, compressão, expansão e escape. Assim, com o aumento da velocidade, dada a maior abertura da borboleta de admissão e maior admissão de ar no interior do motor, o efeito dinâmico que permite maior admissão de ar em cada ciclo, leva o valor do torque até seu valor máximo. Deste ponto em diante, o aumento da rotação implicará em perdas de carga nos coletores e este comportamento é invertido. O torque do motor também sofre redução em rotações elevadas devido à perdas por atrito. (MARTINS, 2013)

Percebe-se na figura 2.27, o comportamento de crescimento inicial do torque e posteri-

ormente a sua redução com o aumento da rotação do motor.

Figura 2.27: Curva de torque do motor veicular por ensaio em laboratório.

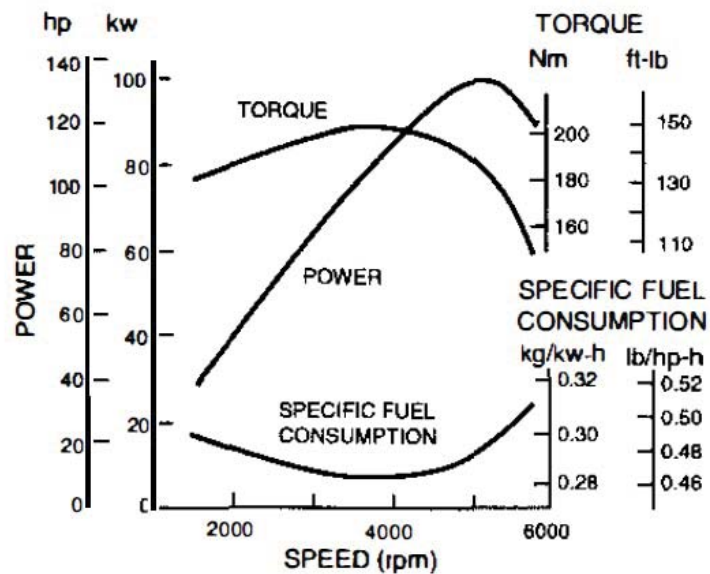


Fonte: (HOAG, 2006)

Uma vez que a potência é dada pelo produto do torque pela velocidade de rotação, a sua curva terá características da curva de torque. Durante a fase de crescimento do torque com o aumento da rotação, a curva de potência cresce rapidamente até o valor de torque máximo. Deste ponto em diante, o seu aumento é proveniente do crescimento da rotação, uma vez que o torque diminui, até atingir o seu valor máximo. A diferença entre torque e potência basicamente se dá pelo fato do torque ser função da massa da mistura de ar e combustível que entra no motor em cada ciclo, enquanto que a potência é função da vazão da mistura de ar e combustível. (MARTINS, 2013)

De acordo com a figura 2.28, percebe-se que é possível ter para uma diminuição do torque uma potência crescente, mesmo com o aumento da rotação. Isto acontece, pois mesmo que em cada ciclo entre uma menor massa da mistura de ar e combustível nos cilindros do motor, o total de vazão da mistura de ar e combustível é superior pois há mais ciclos por unidade de tempo em função da maior rotação do motor, o que acarreta numa maior potência.

Figura 2.28: Curva característica do motor veicular à gasolina.



Fonte: (GILLESPIE, 1992)

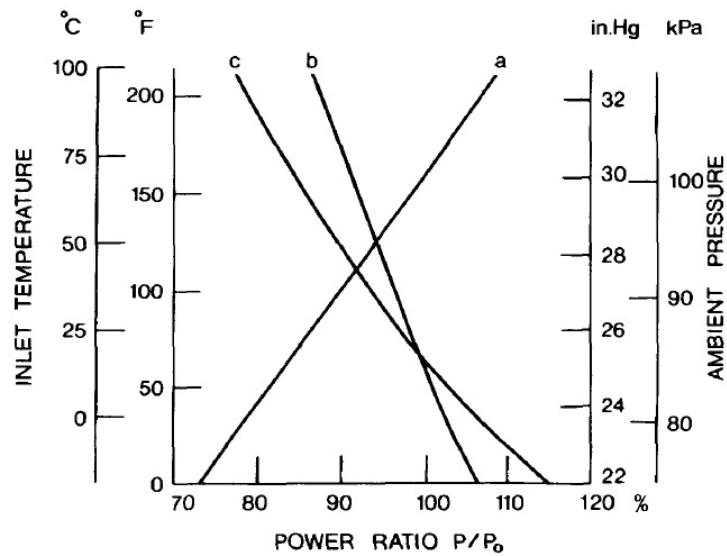
A potência desenvolvida pelo motor é função da pressão, da umidade do ambiente e da temperatura. Quando ensaiado em locais diferentes, o motor poderá não produzir os mesmos resultados, pois o resultado do ensaio dependerá das condições do ambiente, tornando-se necessário uma padronização para eliminar o efeito do ambiente nos ensaios. Para isto, conforme cita Brunetti (2012), existem várias normas, como a NBR ISO 1585/1996, SAE J1349/2008, JIS D1001/1993, DIN70020-3/2008.

Evidencia-se mais uma vez que o mapeamento das curvas características de um motor veicular tem que ser realizado por profissionais capacitados e é um trabalho bastante minucioso.

Para analisar a influência das condições atmosféricas na potência do motor veicular, a figura 2.29 exibe três curvas, onde pode-se observar:

- A curva “a” mostra a razão da potência do motor em condições atmosférica ( $P$ ) pela potência do motor normalizada medida em condições atmosférica de referência ( $P_0$ ) versus à pressão ambiente.
- A curva “b” mostra a razão da potência do motor em condições atmosférica ( $P$ ) pela potência do motor normalizada medida em condições atmosférica de referência ( $P_0$ ) versus a temperatura do ar de admissão para o motor à gasolina.
- A curva “c” mostra a razão da potência do motor em condições atmosférica ( $P$ ) pela potência do motor normalizada medida em condições atmosférica de referência ( $P_0$ ) versus a temperatura do ar de admissão para o motor à diesel.

Figura 2.29: Efeito das condições atmosféricas para potência do motor.



Fonte: (WONG, 2001)

A eficiência volumétrica é a relação entre o volume da mistura ar-combustível que cada cilindro admite e a capacidade volumétrica nominal do cilindro. Segundo Martins (2013), uma maior eficiência volumétrica implica uma maior quantidade de calor fornecida por ciclo ao motor, e o seu valor varia com a rotação do motor. Assim, na rotação em que o motor tem maior eficiência volumétrica ele desenvolve o maior torque, pois queima a maior quantidade de mistura ar combustível.

Outros parâmetros importantes que mostram a maneira como a energia do combustível é transformado em trabalho nos motores veiculares são o rendimento total e o consumo específico. Ambos os conceitos mostram a eficiência da conversão de energia num motor veicular.

As curvas de consumo específico, que complementam as curvas características do motor, indicam a quantidade de combustível utilizado pelo motor por unidade de energia, sendo uma indicação do inverso do rendimento total do motor. O consumo específico depende do ponto de funcionamento do motor (rotação, potência e torque) e o rendimento energético do motor diz a quantidade de energia mecânica que pode ser extraída da energia química contida no combustível.

Segundo Martins (2013), o desenvolvimento da curva de consumo específico não se relaciona com as curvas de potência e torque para o motor, porém seu valor mínimo geralmente aparece para rotação entre à rotação de torque máximo e à rotação de potência máxima. Para baixas rotações, o consumo é elevado em virtude de elevadas perdas térmicas, enquanto que para altas rotações, o consumo é elevado por conta das perdas mecânicas por atrito.

O rendimento do motor pode ser expresso pela equação 2.11:

$$\eta_{motor} = \frac{3600}{sfc.PCI} \quad (2.11)$$

onde:

$\eta_{motor}$ : Rendimento do motor.

$sfc$ : Consumo específico ( $g/kWh$ ).

$PCI$ : Poder calorífico inferior do combustível ( $MJ/kg$ ).

O Consumo específico do motor pode ser expresso pela equação 2.12:

$$sfc = \frac{3600.\dot{m}}{P} \quad (2.12)$$

onde:

$\dot{m}$ : Vazão de combustível ( $g/s$ ).

$P$ : Potência do motor ( $kW$ ).

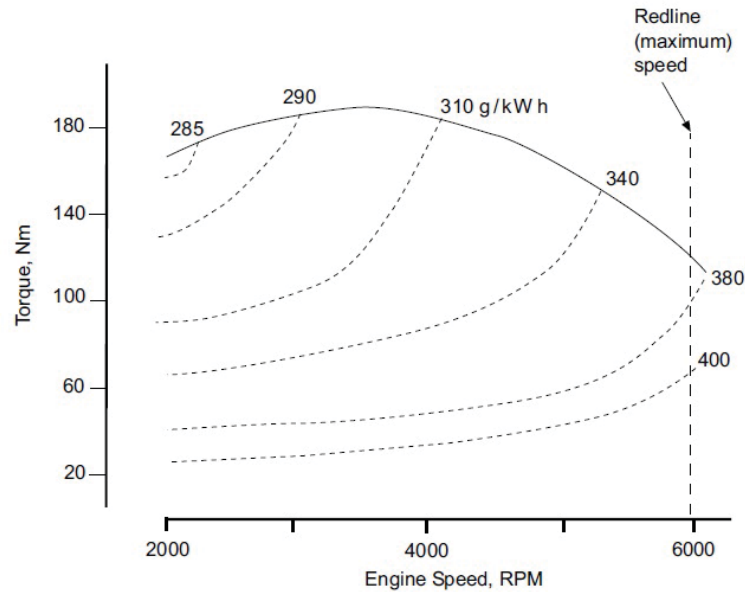
O motor de um veículo poucas vezes funcionará com carga total, exceto em casos de fortes acelerações, subidas acentuadas ou ao trafegar com velocidade máxima, sendo a carga imposta ao motor reduzida através do fechamento parcial da borboleta de admissão de ar para motores à gasolina. Assim, a carga do motor pode ser variada continuamente desde um valor zero, motor rodando em vazio ou marcha lenta, até plena carga. As curvas características vão se adaptando com o aumento ou diminuição da carga imposta ao motor, dadas as exigências do condutor.(MARTINS, 2013)

Como frequentemente o motor trabalha com carga parcial, para cada configuração, deve-se considerar como medida para obter menores consumos específicos, a regulagem e o controle da transmissão do veículo. O aumento no número de marchas reduz o consumo de combustível.(DURKOVIĆ; DAMJANOVIĆ, 2006)

O conjunto das curvas com os valores parciais de carga para determinação do consumo específico de um motor é chamado de mapa de desempenho do motor. Para obter tais curvas, é necessário realizar em laboratório inúmeras medições, similar a obtenção das curvas características do motor. Porém, existem correlações empíricas para se construir essas curvas, baseadas em poucos dados experimentais ou meramente teóricas.

A figura 2.30 mostra um exemplo de curva de consumo específico com linhas de consumo constante em função do torque e rotação do motor à gasolina.

Figura 2.30: Curvas de consumo específico de um motor à gasolina.



Fonte: (HOAG, 2006)

Segundo Martins (2013), o rendimento do motor pode melhorar em função da alteração da taxa de compressão, principalmente para funcionamento em cargas parciais.

Para alterar o valor da taxa de compressão deve-se levar em consideração aspectos construtivos do motor assim como o tipo de combustível utilizado, pois durante a compressão, no cilindro não somente ocorre o aumento da pressão motivado pela diminuição do volume mas também uma elevação de sua temperatura. Com o aumento da temperatura, pode acontecer uma antecipação na deflagração da mistura ar-combustível no interior do cilindro, comprometendo assim o desempenho do motor.

A carga do motor tem uma ligação com a abertura da borboleta de admissão de ar, porém não existe uma relação proporcional direta entre elas. Pode-se afirmar que para baixas cargas, temos a borboleta de admissão de ar praticamente fechada e para altas cargas, a mesma muito aberta. (BRUNETTI, 2012)

## 2.5 A combustão em motores veiculares de ignição por centelha

Em geral, pode-se definir combustível como todo material que reage com o oxigênio, ou outro comburente, liberando energia térmica. A combustão pode ser definida como uma reação química durante a qual um combustível é oxidado rapidamente e uma grande quantidade de energia é liberada.

O fenômeno da combustão envolve reações químicas bastante complexas, composta por vários estágios que sofrem influências de alguns parâmetros para delimitar sua extensão.



Parâmetros como o tipo de combustível, o grau de mistura do combustível com o oxigênio, a temperatura na qual é submetida esta mistura no processo de combustão etc, delimitará a extensão da combustão. (GARCIA, 2002)

Porém, colocar um combustível simplesmente em contato com o oxigênio não será suficiente para iniciar um processo de combustão. A temperatura no processo deverá ser elevada até um valor acima da temperatura de ignição do combustível para iniciar a combustão.

Quando queimamos um combustível necessitamos de uma certa quantidade de ar para que ocorra a combustão, assim quando todo o combustível é queimado usando todo o ar disponível dizemos que temos uma mistura estequiométrica. Nem sempre as misturas são estequiométricas, ou seja, podemos ter excesso ou deficiência de ar, configurando uma mistura pobre ou rica, respectivamente.

O ar seco é composto de 20,9% de oxigênio, 78,1% de nitrogênio, 0,9% de argônio e pequenas quantidades de dióxido de carbono, hélio, neônio e hidrogênio. (ÇENGEL; BOLES, 2006)

Para analisar o processo de combustão, o argônio constituinte do ar é tratado como nitrogênio e os gases que existem em pequenas quantidades são desconsiderados. Assim, o ar seco pode ser aproximado como 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio em moles ou volume. Cada mol de oxigênio que entra em uma câmara de combustão é acompanhado por  $0,79 \div 0,21 = 3,76$  moles de nitrogênio. Ou seja,



Durante o processo de combustão, o nitrogênio se comporta quase como um gás inerte mas reage com outros elementos químicos, formando uma quantidade muito pequena de óxidos nítricos. É importante na análise das emissões de poluentes veiculares, mas não interfere na potência ou rendimento do motor.

Grande parte dos combustíveis utilizados é composto essencialmente por hidrogênio e carbono, e estes são chamados de combustíveis de hidrocarbonetos e indicados pela fórmula geral  $C_nH_m$ .

O etanol é um composto orgânico líquido, tóxico, com cheiro forte e de fórmula geral  $C_xH_yO_z$ . Quando utilizado como combustível, está presente na sua forma pura ou misturado à gasolina. O etanol comumente vendido em postos aqui no Brasil é o álcool etílico hidratado, uma mistura com cerca de 96% de etanol e o restante de água. Quando misturado à gasolina, tem-se o álcool anidro, um tipo de etanol que possui pelo menos 99,6% de álcool puro.

Um fato interessante é que foi lançado exclusivamente no Brasil, em 2009, a primeira linha de motocicletas com motor bicomcombustível do mundo, que utilizam etanol e/ou gasolina.

Atualmente, os principais derivados do petróleo utilizados em motores de combustão interna são as gasolinas, os óleos diesel, o querosene de aviação e vários óleos combustíveis marítimos para motores pesados de baixa rotação. (BRUNETTI, 2012)

### 2.5.1 Poder Calorífico

O poder calorífico de um combustível é definido como a quantidade de calor despreendida por unidade de massa, quando queimado completamente numa dada temperatura. O poder calorífico é calculado a partir da quantidade de calor extraída durante a combustão, considerando as temperaturas dos reagentes iguais às dos produtos da combustão, como a temperatura de referência. (MARTINS, 2013)

Denominado de poder calorífico inferior ( PCI ) quando a água dos gases de combustão é liberada sob a forma de vapor e de poder calorífico superior ( PCS ) quando a água dos gases de combustão é completamente condensada e, portanto, o calor da vaporização também é recuperado. A diferença entre esses dois valores de poder calorífico é igual ao produto entre a quantidade de água e a entalpia de vaporização da água, formada pela queima do hidrogênio contido no combustível e da água já contida no combustível, como umidade do mesmo, à temperatura ambiente, como temperatura de referência. (ÇENGEL; BOLES, 2006)

O poder calorífico para combustíveis líquidos e sólidos é determinado em laboratório através de uma bomba calorimétrica com a temperatura controlada do banho onde está imersa a bomba em que se faz a queima do combustível. O poder calorífico inferior é obtido por meio de cálculo, pois o valor obtido em laboratório é o poder calorífico superior. Assim, normalmente, o que mais se usa é o poder calorífico inferior, uma vez que, na maioria dos processos, os gases de combustão são liberados à temperaturas altas onde a água neles contida se encontra na fase gasosa. (GARCIA, 2002)

Assim, o poder calorífico inferior é que interessa para estudos com motores de combustão interna, chegando-se ao seu valor deduzindo-se do poder calorífico superior do combustível o valor do calor latente liberado pela condensação da água. Logo, o poder calorífico inferior pode ser calculado por:

$$PCI = PCS - L_{H_2O} \cdot m_{H_2O} \quad (2.13)$$

onde:

$PCI$  : Poder calorífico inferior ( $kJ/kg$ ).

$PCS$  : Poder calorífico superior ( $kJ/kg$ ).

$L_{H_2O}$ : Calor latente de condensação da água. ( à  $18\text{ }^{\circ}C$  é igual a  $2.458,2\text{ kJ/kg}$  ).

$m_{H_2O}$ : Massa de água resultante por unidade de massa do combustível

O índice de octanagem não é uma medida da potência ou da qualidade do combustível, ele é apenas uma medida da resistência do combustível à detonação. A compra de combustível em horários com temperaturas baixas como no início da manhã minimiza as perdas com evaporação.

### 2.5.2 Gasolina

A gasolina é um produto da destilação fracionada do petróleo bruto contendo inúmeros hidrocarbonetos com temperaturas de ebulição variando entre 25 e 250 °C. (MARTINS, 2013)

A gasolina possui hidrocarbonetos com variações de 4 a 12 carbonos, sendo sua maioria entre 5 e 9 carbonos. Porém, geralmente a gasolina é tratada como um octano ( $C_8H_{18}$ ). No Brasil, as gasolinas são classificadas como “A” e “C”, onde a gasolina “A” é isenta de álcool etílico anidro, sendo sua comercialização restrita somente entre refinador e distribuidor. A gasolina “C” tem adição de 22 % do volume de álcool etílico anidro, podendo este teor ser fixado entre 18 e 25 %, em função de variação na safra de cana de açúcar, sendo comercializada nos postos de abastecimento. A proporção de álcool anidro nessa mistura com a gasolina é determinada pelo CIMA - Conselho interministerial do açúcar e do álcool.

Como os hidrocarbonetos mantêm uma proporção muito estreita entre a quantidade de carbono e de hidrogênio, o poder calorífico da gasolina varia muito pouco em função da composição, podendo, como ordem de grandeza, ser considerado igual a 44 MJ/kg. No Brasil, o álcool etílico anidro adicionado a gasolina “A” faz com que o poder calorífico da mesma seja da ordem de 39,9 MJ/kg (considerando a massa específica do etanol anidro como 0,79 e da gasolina como 0,76).

Brunetti (2012) define o motor veicular como uma máquina volumétrica. Uma máquina volumétrica é toda aquela que troca energia com o fluido através do volume deslocado em seu interior.

Logo, deve-se considerar sempre o poder calorífico inferior do combustível em volume, ou seja,  $PCI_{massa}/AC_{massa}$ , pois, assim, tem-se uma relação da energia em função da massa de ar. (BRUNETTI, 2012)

$$AC_{massa} = \frac{m_{ar}}{m_{comb}} \quad (2.14)$$

onde:

$AC_{massa}$ : Relação ar-combustível em base mássica.

$m_{ar}$ : massa de ar.

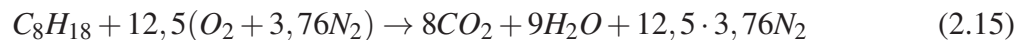
$m_{comb}$ : massa de combustível.

A massa específica das gasolinas costuma variar entre 710 e 760  $kg/m^3$  para a gasolina “A”. Sendo o PCI em massa praticamente constante, quanto maior a massa específica, menor é o consumo em volume. A massa específica mostra a relação entre a massa e o volume do produto a uma dada temperatura, que no Brasil é de 20 °C. (BRUNETTI, 2012)

Os motores veiculares de ignição por centelha são pouco eficientes. Um motor de automóvel faz somente a conversão de aproximadamente 25% da energia química da gasolina em trabalho mecânico. (ÇENGEL; BOLES, 2006)

### 2.5.3 Relação ar-combustível estequiométrica

Supondo uma combustão completa para a gasolina tendo uma composição média  $C_8H_{18}$  e o ar tendo em volume, aproximadamente, 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio, pode-se fazer o seguinte balanço:



Considerando os seguintes pesos atômicos: Carbono (C) igual a 12, Hidrogênio (H) igual a 1, Oxigênio (O) igual a 16 e Nitrogênio (N) igual a 14. Neste caso, para o combustível, temos:  $8 \times 12 + 18 \times 1 = 114$  e para o ar, temos:  $12,5 \times 32 + 47 \times 28 = 1716$ . Logo, a relação ar-combustível mássica estequiométrica para gasolina em questão é igual a  $1716/114 = 15 \frac{kg_{ar}}{kg_{C_8H_{18}}}$ .

### 2.5.4 Produção de dióxido de carbono

O dióxido de carbono ( $CO_2$ ) é um dos produtos primários de qualquer combustão de hidrocarbonetos. É um gás inodoro e incolor sem efeito direto na saúde humana. Mas, segundo estudos, o acúmulo desse gás na atmosfera pode ser um dos principais responsáveis pelo fenômeno do aquecimento global.

Medições realizadas pelo IPCC mostram que o planeta se aqueceu cerca de 0,5 °C nos últimos 50 anos, possivelmente decorrente das atividades humanas que estão aumentando a quantidade de gases do efeito estufa na atmosfera. (IPCC, 2007)

Para limitar a emissão de  $CO_2$  o recurso é investir na redução do consumo de combustível dos motores, buscando sistemas cada vez mais eficientes em termos de eficiência térmica e mecânica. (BRUNETTI, 2012)

A medição de emissões de  $CO_2$  por veículos leves no Brasil é prescrita pela norma ABNT NBR 6601 e, embora não constitua um poluente regulamentado, sua medição já é rotina estabelecida.

## 2.6 Método das diferenças finitas

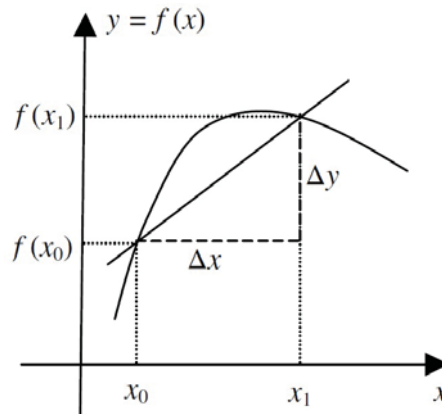
Existem muitas maneiras de se resolver analiticamente uma equação diferencial ordinária, porém nem sempre é possível obter uma solução analítica. Quando isto acontece, os métodos numéricos são utilizados para se obter uma solução aproximada. Uma equação diferencial é denominada equação diferencial ordinária (EDO) se a função da variável desconhecida depender apenas de uma única variável independente, resultando na presença apenas de derivadas ordinárias na equação diferencial. A ordem da equação diferencial é definida pela maior ordem da derivada que aparecer na equação.

O método das diferenças finitas realiza aproximação para as derivadas baseado no conceito da própria derivada, ou seja: dada uma função  $f$  que é definida em um intervalo aberto contendo  $x_0$ , então a derivada de  $f$  em  $x_0$ , denotada por  $f'(x_0)$ , é dada pela equação 2.16, se este limite existir:

$$f'(x_0) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} \quad (2.16)$$

Onde  $\Delta x = x_1 - x_0$ , conforme mostra a figura 2.31:

Figura 2.31: Representação da derivada de uma função num ponto.

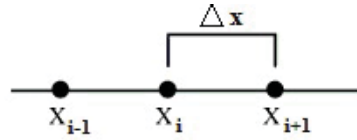


Admitindo-se que o valor de  $\Delta x$  é pequeno, pois a qualidade da aproximação dependerá deste valor, então pode-se abandonar a notação que envolve limite e escrever para a equação 2.16 a expressão:  $f'(x_0) = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x}$ , a qual representa uma aproximação algébrica para a derivada de  $f$  em  $x_0$ .

Utilizando o polinômio de Taylor, dado pela equação 2.17, pode-se determinar expressões para as derivadas numa malha formada por pontos uniformemente espaçados, conforme figura 2.32.

$$f(x_{0+\Delta x}) = f(x_0) + \frac{\partial f(x_0)}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial^2 f(x_0)}{\partial x^2} \cdot \frac{\Delta x^2}{2!} + \dots + \frac{\partial^n f(x_0)}{\partial x^n} \cdot \frac{\Delta x^n}{n!} \quad (2.17)$$

Figura 2.32: Malha com pontos uniformemente espaçados.



Assim, obtêm-se a expressão dada pela equação 2.18:

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + \frac{\partial f(x_i)}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial^2 f(x_i)}{\partial x^2} \cdot \frac{\Delta x^2}{2!} + \dots + \frac{\partial^n f(x_i)}{\partial x^n} \cdot \frac{\Delta x^n}{n!} \quad (2.18)$$

Colocando-se o termo  $\frac{\partial f(x_i)}{\partial x}$  em evidência e truncando a série nos termos de segunda ordem e superiores, tem-se uma aproximação para primeira derivada da função  $f$ . Na equação 2.19, o termo entre parênteses representa o erro de truncamento, ou seja, a medida da diferença entre o valor exato da primeira derivada e a aproximação numérica.

$$\frac{\partial f(x_i)}{\partial x} = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{\Delta x} - \left( \frac{\partial^2 f(x_i)}{\partial x^2} \cdot \frac{\Delta x^2}{2!} + \dots + \frac{\partial^n f(x_i)}{\partial x^n} \cdot \frac{\Delta x^n}{n!} \right) \quad (2.19)$$

Pelo fato dos métodos numéricos apresentarem soluções aproximadas, sempre haverá certo grau de erro e a cada passo ocorrerá a acumulação de erro. Portanto, quanto menor o tamanho do passo, ou seja, quanto mais refinada for a malha na discretização, menor o erro percentual relativo.

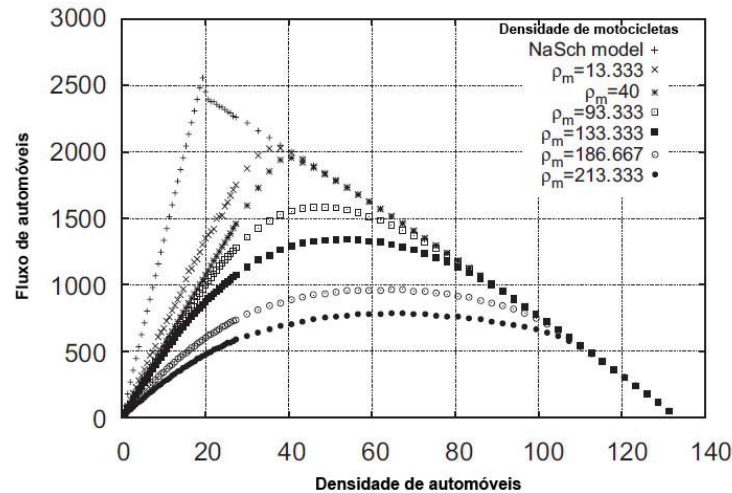
### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Nessa seção será feito um levantamento de publicações que tratam da análise do tráfego misto entre automóveis e motocicletas utilizando autômatos celulares e de artigos que auxiliem na modelagem deste tráfego de um modo geral, enfatizando o comportamento destes veículos no tráfego e o seu consumo de combustível. Além disso, será feita uma revisão na literatura acerca da obtenção das curvas características de um motor veicular, possibilitando assim, a reprodução de tais curvas através modelos matemáticos.

#### **3.1 Análise do tráfego com autômatos celulares**

Com o objetivo de estudar o tráfego misto composto por automóveis e motocicletas sob condições de contornos periódicas que estabelecem relações entre densidades e fluxos de veículos, dando ênfase principalmente ao comportamento das motocicletas, Meng *et al.* (2007) construíram um modelo utilizando autômatos celulares, sugerindo modificações ao modelo proposto originalmente por Nagel e Schreckenberg para levar em consideração o movimento lateral das motocicletas e concluíram que o fluxo máximo de automóveis diminui com o aumento da densidade de motocicletas, devido a suas trocas de pista, e por isso seria necessário criar uma pista exclusiva para as motocicletas visando melhorar o fluxo total de veículos. A figura 3.1 mostra o resultado das simulações do estudo desenvolvido evidenciando a redução do fluxo de automóveis em função do aumento da densidade de motocicletas na via.

Figura 3.1: Fluxo de automóveis em função da densidade de motocicletas.



Fonte: Adaptado de (MENG *et al.*, 2007)

Meng *et al.* (2007), para reproduzir alguns fenômenos reais encontrados no tráfego, fizeram alterações na versão original do modelo de “NaSch”. Uma vez que o modelo original era baseado em pista única, eles propuseram algumas regras para permitir a troca de pistas e assim modelar o tráfego com múltiplas pistas, tornando o modelo mais fiel às características encontradas no tráfego real.

Segundo Meng *et al.* (2007), existem apenas alguns poucos artigos com estudos sobre motocicletas neste contexto, o que dificulta a caracterização do problema. Para algumas informações não existem estudos, como por exemplo o tráfego de várias motocicletas lado a lado trafegando com segurança em pista única. Assim, foram feitas algumas considerações para estabilizar o modelo utilizado.

De acordo com Ren *et al.* (apud MENG *et al.*, 2007), a largura da via para três bicicletas circularem lado a lado de maneira segura deve ser de 3,5 m e como as motocicletas são mais largas que as bicicletas, determinou-se que apenas duas motocicletas poderiam andar lado a lado com segurança em pista única. Em outro estudo, onde o tráfego com bicicletas é analisado, Vasic e Ruskin (2012) tratam as ocupações dos veículos na via considerando o tamanho da bicicleta igual à metade do tamanho do automóvel.

Considerando o movimento errático das motocicletas no tráfego misto composto por automóveis e motocicletas, Lan *et al.* (2010) desenvolveram um modelo de autômato celular refinado onde, além dos tradicionais movimentos de avançar e trocar de pistas, também consideraram saídas laterais dos automóveis, saídas laterais das motocicletas, movimento das motocicletas entre dois automóveis em movimento e o comportamento das motocicletas que passam entre carros que estão parados em engarrafamentos. Comparando seus estudos ao mo-



delo proposto por Nagel e Schreckenberg, chegaram a conclusão que o fluxo máximo de automóveis diminui com o aumento da densidade de motocicletas, similar a conclusão de Meng *et al.* (2007).

Para verificar o comportamento das motocicletas ao interagirem com outros veículos em condições de tráfego misto para duas diferentes larguras de pistas, Lan e Chang (2003) simularam, utilizando autômatos celulares, a trajetória dos veículos ao longo do tempo e estabeleceram o fluxo máximo de motocicletas e automóveis em variadas situações, e, com dados provenientes de observações feitas no tráfego em Taipei, na China, conseguiram validar o modelo por eles desenvolvido.

De acordo com Meng *et al.* (2007) e Minh *et al.* (2005), são poucos os estudos sobre motocicletas utilizando autômatos celulares.

Porém, alguns trabalhos podem ser citados relativos ao tráfego envolvendo motocicletas ou que de alguma maneira ajudem na sua modelagem, como por exemplo estudos que utilizam bicicletas como objeto de análise. Por exemplo, Vasic e Ruskin (2012) desenvolveram um trabalho de modelagem do tráfego baseado no tráfego misto entre automóveis e bicicletas em áreas urbanas. Utilizando autômatos celulares unidimensionais, baseados no modelo proposto por Nagel e Schreckenberg, analisaram situações de divisão da pista com automóveis baseado em uma disciplina posicional que levam as bicicletas a se manterem próximas do meio-fio, investigando as interações laterais no compartilhamento da pista.

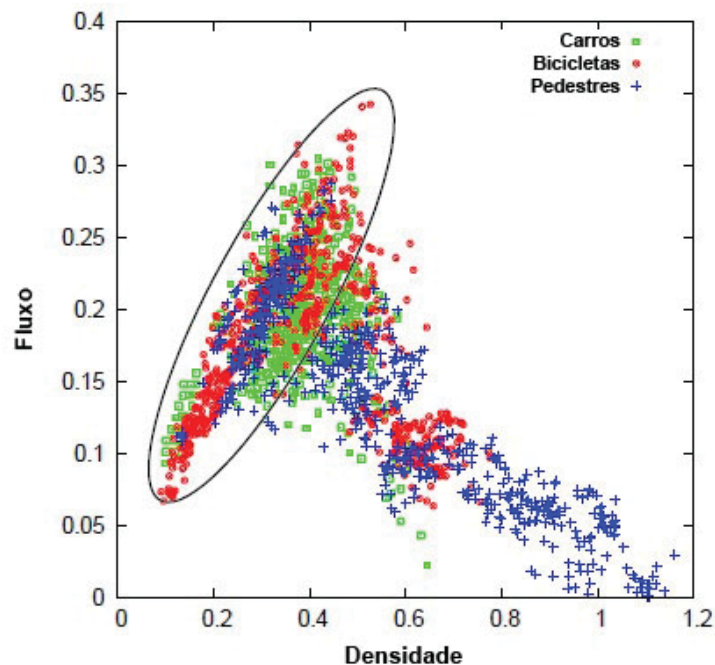
Ao estudar o tráfego composto por veículos motorizados e não motorizados, situação mais comum nas áreas urbanas, Cho e Wu (2004) propuseram um modelo de fluxo de motocicletas levando em consideração o seu movimento longitudinal e lateral que são influenciados por características do piloto, por outros veículos e pelo ambiente. Para simplificar o estudo, não levaram em conta cruzamentos ou semáforos. Eles enfatizaram que este trabalho pode ser referência para futuros estudos do fluxo de bicicletas ou pedestres.

Com o auxílio de vídeos feitos em quatro estradas de Hanói, Vietnã, Minh *et al.* (2005) estudaram o comportamento de motocicletas no tráfego. Este estudo permitiu a compreensão básica das características do tráfego de motocicletas. A análise estatística dos dados empíricos foram utilizados para demonstrar as características de velocidade da motocicleta bem como fornecer os dados necessário para desenvolver um modelo de simulação com motocicletas. Analisaram como o comportamento das motocicletas diferem entre os fluxos de tráfego homogêneo e heterogêneo e entre estradas divididas e não divididas. Como resultado, o valor da velocidade média do fluxo homogêneo para motocicletas trafegando em pistas com largura de 3,7 m foi igual a 32,5 km/h, com desvio padrão de 5,5 km/h.

A relação entre fluxo e densidade, também conhecido como diagrama fundamental, é

uma característica quantitativa essencial para descrever com eficiência um sistema complexo como tráfego em vias urbanas. Zhang *et al.* (2012), autores que desenvolveram estudos experimentais com pista única para bicicletas e compararam os resultados com dados de estudos com carros e pedestres com configurações similares, verificaram que, independente do sistema estudado, existem três regiões distintas nos diagramas de tempo-espaço e em comum para todos os sistemas, sendo estes de fluxo livre, engarrafamentos e ondas de para-e-vai. Eles propuseram assim um diagrama universal que leva em conta o tamanho do veículo e sua velocidade máxima de tráfego.

Figura 3.2: Comparação entre os diagramas fundamentais de automóveis, bicicletas e pedestres.



Fonte: Adaptado de (ZHANG *et al.*, 2012)

A figura 3.2 mostra os diagramas fundamentais redimensionados para análise de três modais diferentes, mostrando o fluxo em função das densidades. Consideram-se as velocidades máximas para o automóvel, bicicleta e pedestre iguais a 40 km/h, 20 km/h e 5 km/h, respectivamente. A região inscrita na elipse é para o regime de fluxo livre dos modais. Com o aumento das densidades, tem-se uma gradativa diminuição dos fluxos e a transição da região de fluxo livre para a região de engarrafamentos.

Com intuito de desenvolver modelos matemáticos que representem o movimento das motocicletas no tráfego, Lee *et al.* (2010) desenvolveram três modelos. A calibração dos modelos desenvolvidos foi feita em função dos dados coletados na Victoria Embankment em Londres. Construíram assim um simulador que reproduz possíveis padrões de comportamento para car-

ros e motocicletas e inúmeras aplicações para este simulador no gerenciamento do tráfego misto em áreas urbanas são apresentadas em seus estudos.

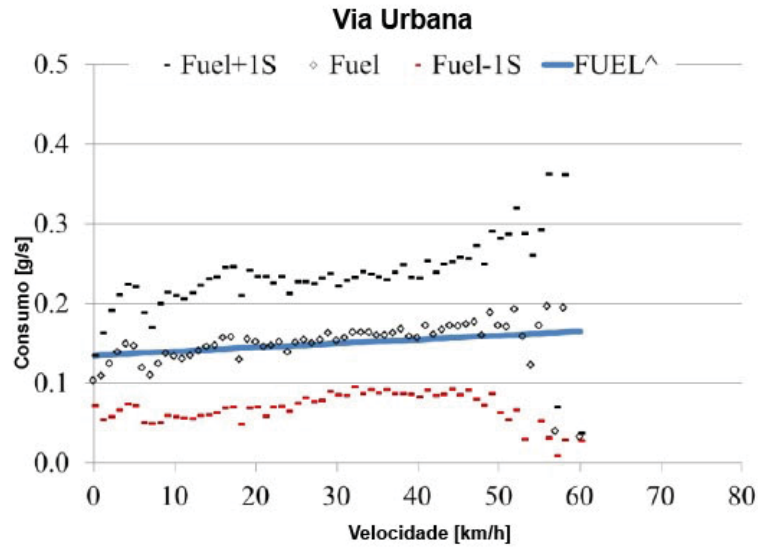
Rongviriyapanich e Suppattrakul (2005) e Rongviriyapanich *et al.* (2010) estudaram os efeitos das motocicletas no tráfego em cruzamentos sinalizados. Baseados em observações de campo, analisaram a influência da motocicleta no tráfego após a fase em que o semáforo fica verde, onde as motocicletas geralmente partem à frente dos outros veículos. Os autores desenvolveram um simulador de tráfego com abordagem microscópica para auxiliar no planejamento das vias urbanas de Bangkok considerando este comportamento das motocicletas. Utilizando câmeras em um semáforo de uma rua na cidade de Bangkok, para analisar a influência das motocicletas quando o semáforo fica verde, validaram o simulador desenvolvido quando compararam os resultados com os dados reais.

Outro estudo baseado no fluxo de automóveis e motocicletas foi desenvolvido por Shiomi *et al.* (2013), onde o objetivo era desenvolver um modelo baseado em dados de trajetórias dos veículos que foram observados em Hanói, no Vietnã. Como resultado, verificaram que enquanto um piloto de motocicleta toma muito cuidado com os automóveis ao redor, o motorista do automóvel tem menos cuidado com as motocicletas circundantes. Esta relação assimétrica pode causar situações de perigo para o motociclista se o mesmo não perceber a presença de um automóvel, porém, enfatizaram que tal análise necessitará de maiores investigações.

Preocupados com acidentes envolvendo motocicletas, Law e Sohadi (2005), apontam que as motocicletas participam de quase 60% dos acidentes fatais na Malásia. Uma solução para amenizar este problema seria a criação de pistas exclusivas para motocicletas. Assim, visando especificar distâncias de segurança para motocicletas que trafegam lado a lado, os autores desenvolveram um estudo que determina a largura de pista para motocicletas trafegarem com segurança, sendo estabelecida a largura igual a 3,81 metros. Nguyen e Hanaoka (2013) também desenvolveram estudos dos movimentos seguros para motocicletas visando a redução de acidentes.

Alguns estudos voltados para consumo e emissão de motocicletas no tráfego foram desenvolvidos. Por exemplo, Wen *et al.* (2013) mostra o consumo de uma scooter 125cc no tráfego de Taiwan, apresentando um consumo variando de 0,1 a 0,2 g/s para um trecho urbano com velocidade máxima de 60 km/h, conforme pode-se ver na figura 3.3:

Figura 3.3: Consumo de combustível em função da velocidade para scooter 125cc.



Fonte: Adaptado de (WEN *et al.*, 2013)

Outro estudo foi desenvolvido por Kumar *et al.* (2012), com o intuito de analisar o controle das emissões de uma motocicleta. Utilizando um modelo microscópico para o tráfego e considerando aspectos do movimento lateral e longitudinal da motocicleta, aplicados em campo e validados na cidade de Edimburgo, Escócia, os autores fizeram interações entre veículos e considerações climáticas, utilizando o simulador VISSIM 5.10 e simularam as influências do motorista no tráfego.

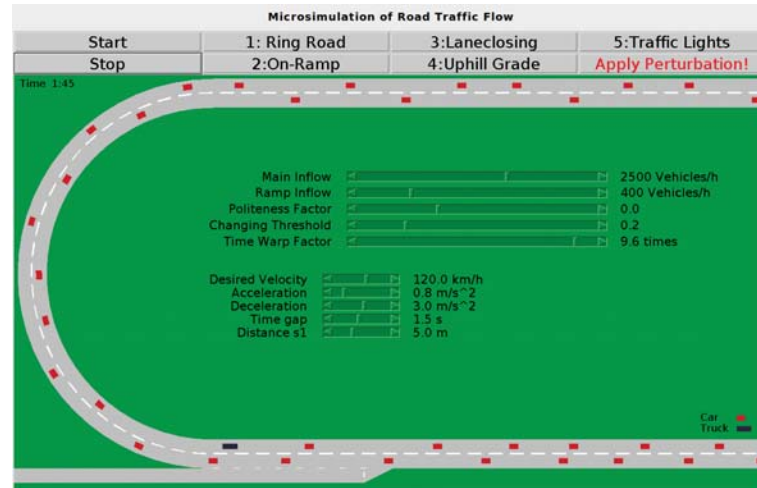
De maneira geral, o fluxo das motocicletas no tráfego urbano pode ser considerado constante para velocidades médias baixas segundo afirmam os estudos de Azis *et al.* (2013) que utilizaram um gps em uma scooter no tráfego urbano, trafegando com velocidade média de 40 km/h, da cidade de Makassar, Indonésia. Os estudos mostraram o ciclo de condução da motocicleta na cidade e apontaram acelerações e desacelerações de  $1 \text{ m/s}^2$ . Os autores esperam que em função dos resultados obtidos, sejam realizados trabalhos futuros visando prever as emissões das motocicletas.

Uma análise interessante foi desenvolvida por Arafah *et al.* (2013) quando foi exposto que as características do tamanho do motor e a distância percorrida pelas motocicletas se mostraram insignificantes no aumento da emissão de gás carbônico, fenômeno similar estudado para emissões de automóveis na cidade, ficando evidenciado que as emissões aumentam de acordo com a idade da motocicleta e não por outros supostos motivos.

Para que o leitor tenha uma melhor noção da simulação do tráfego, uma boa ferramenta didática foi desenvolvida por Martin Treiber e pode ser utilizada em <http://www.traffic-simulation.de/>. A figura 3.4 mostra uma tela do simulador que analisa o tráfego composto por

automóveis e caminhões em uma pista oval, levando em consideração a densidade de veículos na pista, aceleração e desaceleração dos veículos, inclinações na pista, trocas de pistas etc.

Figura 3.4: Simulador de tráfego de Martin Treiber.



De acordo com a figura 3.4, ao utilizar este simulador, o usuário pode melhor compreender, ao menos qualitativamente, a influência das variáveis que afetam no tráfego dos veículos, como por exemplo, o que acontece com o fluxo na via quando se modificam as velocidades máximas dos veículos, ou qual a influência no fluxo quando se realiza trocas de pistas etc.

Algumas referências sobre dinâmica veicular podem ser citadas, como por exemplo, obras que tratam da dinâmica de motocicletas, têm-se os livros “Motorcycle Dynamics”, de Vittore Cossalter, e “Motorcycle Design and Technology”, de Gaetano Cocco. Em relação a dinâmica de automóveis, pode-se citar os livros “Motor Vehicle Dynamics”, de Giancarlo Genta ; “Vehicle Dynamics: Theory and Application”, de Reza N. Jazar e “Fundamentals of Vehicle Dynamics”, de Thomas D. Gillespie. Porém, existem vários outros autores e trabalhos publicados sobre este tema.

### 3.2 Curvas características dos motores veiculares

Dada a complexidade para se obter as curvas características do motor, Genta (1997) apresenta uma análise para obtê-las através de um modelo matemático polinomial bem simples que aproxima os valores entre potência e rotação, necessitando apenas da potência máxima com sua respectiva rotação neste ponto. Dado pela equação 3.1:

$$P = \sum_{i=0}^3 C_i \cdot w^i \quad (3.1)$$

De acordo com Artamonov *et al.* (apud GENTA, 1997), os valores para os coeficientes  $C_i$  para todos os tipos de motores de combustão interna, são iguais a:

- $C_0 = 0$
- $C_1 = \frac{P_{max}}{w_p}$
- $C_2 = \frac{P_{max}}{w_p^2}$
- $C_3 = -\frac{P_{max}}{w_p^3}$

onde:

$P_{max}$ : Potência máxima nominal do motor ( $W$ ).

$w_p$ : Rotação do motor para potência máxima ( $rad/s$ ).

$w$ : Rotação do motor ( $rad/s$ ).

Para o torque, basta aplicar os mesmo valores dos coeficientes  $C_i$  na equação 3.2:

$$\Gamma = \sum_{i=0}^3 C_i \cdot w^{1-i} \quad (3.2)$$

Jazar (2009) também faz menção a um polinômio de terceiro grau similar ao apresentado por Genta (1997) para obter as curvas características de um motor veicular. Embora este modelo estime os valores para as curvas características do motor, o mesmo apresenta erro médio absoluto percentual, em alguns casos, maior que 18% (NI; HENCLEWOOD, 2008).

Ni e Henclewood (2008) desenvolveram um estudo para obter um modelo matemático que construísse as curvas de torque e potência para um motor de combustão interna com maior exatidão. No artigo, eles apresentam três modelos, os dois últimos destes desenvolvidos pelos próprios autores. O primeiro modelo apresentado, é o mesmo utilizado por Genta (1997).

Dentre os três modelos, após comparação com dados empíricos de torque e potência de alguns motores, o segundo modelo foi o que apresentou melhores resultados, com erro médio absoluto percentual entre 3 e 7 %.

### 3.2.1 Modelo parabólico para curvas de potência e torque

O modelo parabólico apresentado nesta seção é o segundo modelo apresentado no artigo de Ni e Henclewood (2008) que diz:

Seja a curva de torque aproximada por uma parábola com equação dada por:

$$\Gamma = C_1 + C_2(w - w_t)^2 \quad (3.3)$$

onde:

$\Gamma$ : Torque do motor( $N.m$ ).

$C_1$  e  $C_2$  : Constantes.

$w_t$  : Rotação do motor no ponto de torque máximo ( $rad/s$ ).

$w$  : Rotação do motor ( $rad/s$ ).

Para garantir que a curva de potência tenha valor máximo em  $w_p$ , ponto de rotação para potência máxima do motor, reescreve-se  $C_1$  com outro coeficiente,  $C_3$ :

$$P = C_3.w + C_2(w - w_t)^2.w \quad (3.4)$$

onde:

$P$  : Potência do motor ( $W$ ).

De posse dos pontos  $P_{max}$  em  $w_p$  e  $\Gamma_{max}$  em  $w_t$  tem-se:

$$\Gamma_{max} = C_1 + C_2(w_t - w_t)^2 = C_1 \quad (3.5)$$

onde:

$\Gamma_{max}$  : Torque máximo do motor( $N.m$ ).

$$P_{max} = C_3.w_p + C_2(w_p - w_t)^2.w_p \quad (3.6)$$

onde:

$P_{max}$  : Potência máxima do motor ( $kW$ ).

$w_p$  : Rotação do motor no ponto de potência máxima ( $rad/s$ ).

$$\left. \frac{dP}{dw} \right|_{w=w_p} = (C_3 + C_2(w - w_t)^2 + 2C_2w(w - w_t)) \Big|_{w=w_p} = 0 \quad (3.7)$$

Resolvendo as equações 3.6 e 3.7, temos:

$$C_2 = -\frac{P_{max}}{2w_p^2(w_p - w_t)} \quad (3.8)$$

e

$$C_3 = \frac{P_{max}}{2w_p^2}(3w_p - w_t) \quad (3.9)$$

Assim,

$$\Gamma = \Gamma_{max} - \frac{P_{max}}{2w_p^2(w_p - w_t)}(w - w_t)^2 \quad (3.10)$$

e

$$P = \frac{P_{max}}{2w_p^2}(3w_p - w_t)w - \frac{P_{max}}{2w_p^2(w_p - w_t)}(w - w_t)^2w \quad (3.11)$$

Logo, basta ter os pontos de torque máximo, e sua respectiva rotação, e potência máxima, e sua respectiva rotação, para construir a curva de potência e torque para um motor. Tais dados, são facilmente coletados junto aos fabricantes, porém maiores informações sobre os motores, não são disponibilizados pelas montadoras que alegam sigilo industrial.

Ni e Henclewood (2008), para validar o modelo aqui reproduzido, compararam os valores calculados com dados empíricos de alguns motores, como por exemplo o motor do Honda Civic ano 2006. A figura 3.5 mostra os resultados desta comparação. A tabela 3.1 mostra os valores para o motor deste modelo.

Tabela 3.1: Dados do motor para o Honda Civic 2006

Especificações	Honda Civic 2006
Potência Máxima [kW]	103
Rotação na Potência Máxima [rpm]	6300
Torque Máximo [N.m]	174
Rotação no Torque Máximo [rpm]	4300

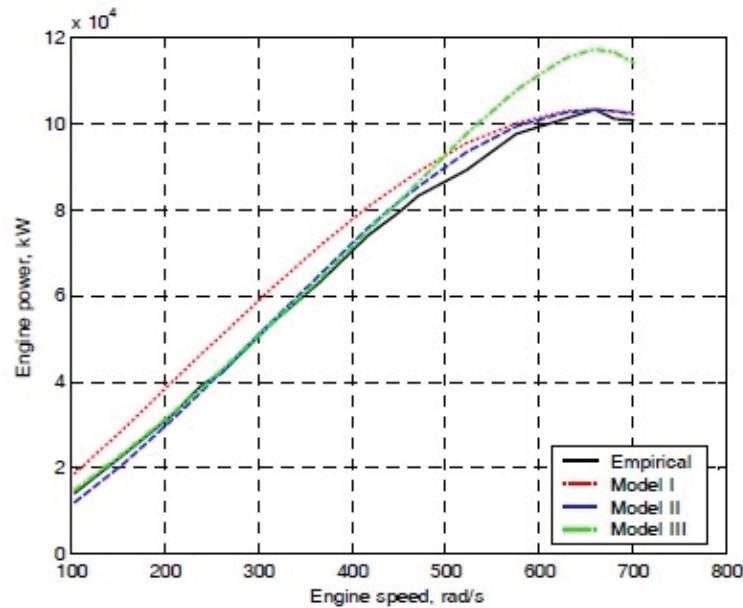
Onde: 1 rpm = 0,105 rad/s

Fonte: (NI; HENCLEWOOD, 2008)

Na figura 3.5, tem-se a curva que foi traçada de acordo com os dados da tabela 3.1, e as curvas geradas pelos modelos I, II e III são baseadas no trabalho desenvolvido por Ni e Henclewood (2008) considerando-se a abertura total da borboleta de admissão de ar do motor, onde o modelo I utiliza a equação 3.1, o modelo II utiliza a equação 3.11 e o modelo III utiliza uma modelagem baseada no princípio de Bernoulli para gerar a curva de potência do motor.



Figura 3.5: Comparação de curvas do Honda Civic 2006 e modelo matemático parabólico para curvas de potência e torque.



Fonte: (NI; HENCLEWOOD, 2008)

### 3.2.2 Curvas de consumo específico

Durković e Damjanović (2006) desenvolveram um modelo de regressão para se obter as curvas de consumo específico baseado em alguns dados experimentais. O modelo é função dos parâmetros de trabalho do motor, como pressão média efetiva e rotação, e se apresenta como um polinômio de terceiro grau, dado pela equação 3.12:

$$sfc_e = a_1 + a_2 p_e + a_3 w + a_4 p_e w + a_5 p_e^2 + a_6 w^2 + a_7 p_e w^2 + a_8 p_e^3 + a_9 w^3 + a_{10} p_e^2 w \quad (3.12)$$

onde:

$sfc_e$ : Consumo específico ( $g/kWh$ ).

$a_j, (j = 1 \dots 10)$  : Coeficientes do modelo de regressão.

$p_e$  : Pressão média efetiva - Definida como o trabalho efetuado por unidade de volume varrido pelo motor.

A pressão média efetiva( $p_e$ ), é determinada pela equação 3.13 (MARTINS, 2013):

$$p_e = \frac{P}{C_v \cdot w} \cdot T \quad (3.13)$$

onde:

$P$ : Potência ( $kW$ ).

$C_v$ : Cilindrada unitária ( $l$ ).

$T$ : Número de tempos do motor.

$w$ : Rotação do motor (  $rad/s$  ).

Assim, informando os valores provenientes de um experimento em laboratório com o consumo específico, a rotação, a potência e a cilindrada do motor, pode-se determinar os valores dos coeficientes e assim calcular o valor do consumo específico para uma outra configuração qualquer. O limitante para utilização deste modelo é o fato de ser necessário dados experimentais para se obter os valores dos coeficientes do modelo de regressão.

Outro modelo que necessita de dados experimentais é o proposto no artigo de Golverk (1992). Neste, a correlação pode ser expressa por um polinômio de segunda ordem, e de acordo com estudos do autor, o cálculo do erro com este método fica abaixo de 1 %. O modelo é dado pela equação 3.14:

$$sfc = K_1 + K_2 \cdot w + K_3 \cdot \Gamma + K_4 \cdot w^2 + K_5 \cdot w \cdot \Gamma + K_6 \cdot \Gamma^2 \quad (3.14)$$

onde:

$sfc$ : Consumo específico ( $g/kWh$ ).

$K_i, (i = 1 \dots 6)$  : Coeficientes do modelo de regressão.

$\Gamma$  : Torque do motor ( $N.m$ )

$w$  : Rotação do motor ( $rpm$ )

Golverk (1992) diz que o regime mais eficiente consiste em reduzir a rotação do motor para cerca de 0,7 a 0,8 da rotação do motor para potência máxima, com carga parcial de 0,85 a 0,92 do valor nominal. Segundo Durković e Damjanović (apud TOMIĆ; PETROVIĆ, 2004), o ponto de menor consumo específico geralmente aparece no valor médio das rotações máxima e mínima do motor, com a carga do motor em 90 % do seu valor máximo. Para Miller (2004), os motores veiculares são mais eficientes na faixa dos 1.500 aos 2.500 rpm com nível de torque próximo a 70% do valor de torque máximo. Fora dessa faixa, o consumo de combustível aumenta em função de perdas internas, por exemplo, fricção e combustão incompleta. À medida que o ponto de operação do motor se afasta dessa região ótima, o consumo de combustível aumenta.

Como muitas vezes não é possível o uso de dados experimentais, ou estes podem apresentar erros de coleta, foram desenvolvidas técnicas para estimar o consumo específico de um motor por modelos matemáticos que não precisam de dados experimentais prévios de consumo. Um exemplo é o artigo desenvolvido por Ben-Chaim *et al.* (2013) onde o rendimento do motor é função da potência e da rotação, calculado através da equação 5.1:

$$\eta(P, w) = \eta_o \cdot \mu_p \cdot \mu_n \quad (3.15)$$

onde:

$\eta_o$ : Pico de eficiência do motor. Para motores à gasolina, seu valor é igual a 0,3.

$\mu_p$ : Coeficiente do grau de utilização de potência do motor.

$\mu_n$ : Coeficiente modal de rotação do motor.

O coeficiente do grau de utilização de potência do motor é calculado em função da potência do motor, numa dada rotação  $i$ , pela potência máxima nominal do motor na rotação  $i$ . Ou seja,  $\mu_p = f(P_i/P_e)$ . Onde:  $P_i$  é a potência na rotação  $i$  e  $P_e$  é a potência máxima do motor na rotação  $i$ .  $\mu_p$  para motores à gasolina é calculado de acordo com a equação 3.16:

$$\mu_p = 0,234 + 1,0592 \left( \frac{P_i}{P_e} \right) + 0,8149 \left( \frac{P_i}{P_e} \right)^2 - 1,2121 \left( \frac{P_i}{P_e} \right)^3 \quad (3.16)$$

O coeficiente modal de rotação do motor é calculado em função da rotação do motor, pela rotação correspondente à potência máxima nominal do motor. Ou seja,  $\mu_n = f(n_i/n_p)$ . Onde:  $n_i$  é a rotação do motor e  $n_p$  é a rotação na potência máxima do motor.  $\mu_n$  para motores à gasolina é calculado de acordo com a equação 3.17:

$$\mu_n = 0,7107 + 0,9963 \left( \frac{n_i}{n_p} \right) - 1,0582 \left( \frac{n_i}{n_p} \right)^2 + 0,3124 \left( \frac{n_i}{n_p} \right)^3 \quad (3.17)$$

Segundo Ben-Chaim *et al.* (2013), o erro associado a aplicação deste método matemático em comparação com dados experimentais fica entre 2 e 7 %.

## 4 METODOLOGIA

Nesse capítulo é realizada a descrição dos modelos utilizados para integrar motor, veículo e tráfego para, através das simulações, obter as relações entre fluxo de veículo e consumo de combustível, e assim, calcular a emissão de dióxido de carbono e os custos associados ao tráfego misto entre automóveis e motocicletas, objeto de estudo deste trabalho.

### 4.1 Características Gerais

Os modelos e simuladores utilizados neste trabalho foram desenvolvidos pelo grupo de pesquisa “LOST - Laboratório de Otimização de Sistemas Térmicos”, da Universidade Federal de Pernambuco.

Com o intuito de desenvolver um estudo qualitativo que integra motor, veículo e tráfego, foram desenvolvidos três modelos que resultaram na criação de: um programa para simular o tráfego entre automóveis e motocicletas, chamado de “MOD\_TRAF”; um programa para simular o relacionamento motor-veículo, chamado de “MOD\_VEIC”; e um programa para construir a curva de potência dos motores, chamado de “MOD\_PROP”.

A figura 4.1 exibe uma representação esquemática de como esses modelos se relacionam e quais são os resultados de seus programas. Onde, o “MOD\_PROP” fornece a potência e o rendimento do motor, em função de sua rotação, para o “MOD\_VEIC”, que fornece o consumo de combustível em função das velocidades dos veículos para o “MOD\_TRAF” que faz a simulação do tráfego misto entre automóveis e motocicletas, fornecendo os valores de fluxo e consumo médio de combustível dos veículos para cada combinação das densidades dos veículos na pista. Detalhamentos do funcionamento e aspectos técnicos desses programas serão expostos nas seções seguintes.

Figura 4.1: Esquema do relacionamento entre os modelos que integram motor, veículo e tráfego.



## 4.2 Modelo do tráfego (MOD\_TRAFF)

O modelo desenvolvido para simular o tráfego entre automóveis e motocicletas nesse trabalho, utilizando autômatos celulares, foi baseado no artigo “Cellular automaton model for mixed traffic flow with motorcycles” desenvolvido por Meng *et al.* (2007). O modelo proposto nesse artigo estuda o tráfego misto de automóveis e motocicletas, sob condições de contorno periódicas, relacionando as densidades e fluxos dos veículos com ênfase principalmente no comportamento das motocicletas.

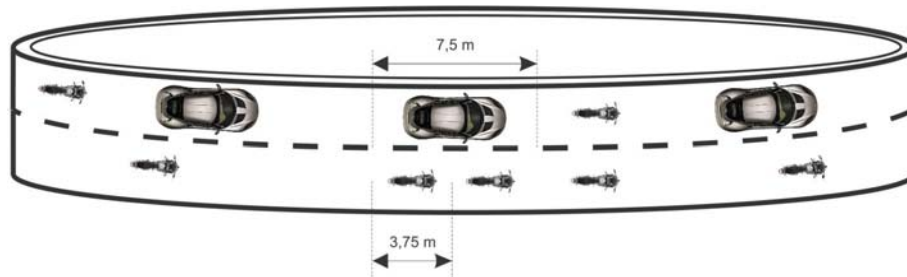
Como visto na revisão bibliográfica, outros estudos já foram desenvolvidos com foco no comportamento dos automóveis, sejam esses trafegando em pista única ou múltiplas. A utilização de autômatos celulares para modelos de fluxo de veículos foi proposta por Nagel e Schreckenberg em 1992 e é utilizado até hoje. O modelo é conhecido como modelo “NaSch”, sendo empregado para reproduzir alguns fenômenos básicos encontrados em situações reais de tráfego.

A análise desenvolvida por Meng *et al.* (2007) foi baseada no tráfego da China, onde as motocicletas não podem trafegar pelo lado esquerdo da via. Assim, considerando o comprimento de uma motocicleta, com cerca de 2 m, e levando-se em consideração uma distância de

segurança entre as mesmas, determinou-se que a motocicleta ocupa  $3,75\text{ m}$  da via e que este valor será o equivalente à metade do espaço ocupado por um automóvel.

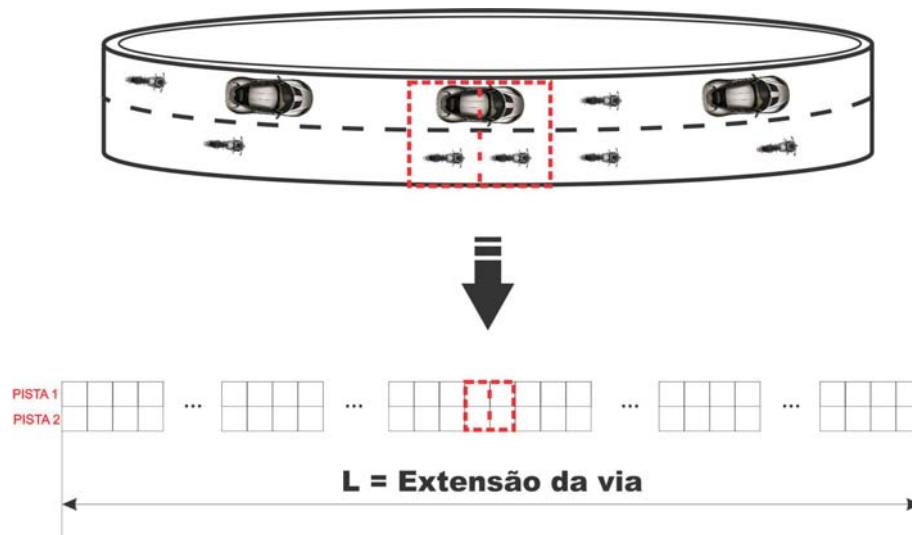
Na figura 4.2, tem-se um esquema da via que é utilizada nas simulações e os espaços ocupados pela motocicleta e pelo automóvel. Pode-se perceber nessa figura que apenas duas motocicletas podem trafegar lado a lado. Pode acontecer também de metade de um automóvel, seja a parte da frente ou de trás, trafegar ao lado de uma motocicleta, ou de se ter espaços vazios ao lado tanto da motocicleta como do automóvel.

Figura 4.2: Ocupação dos veículos na via utilizada para a simulação do tráfego.



Realizando-se uma discretização na via, em função dos espaços ocupados por cada veículo, pode-se ver na figura 4.3 que a mesma pode ser considerada como uma matriz de tamanho “L” igual a sua extensão, e com duas posições, denominadas de pista 1 e pista 2, onde cada espaço possui tamanho igual a  $3,75\text{ m}$ .

Figura 4.3: Discretização da via utilizada para simulação do tráfego.



O tráfego no simulador “MOD\_TRAF” utiliza regras para se assemelhar de um tráfego urbano real. Uma dessas regras é a troca de pistas para as motocicletas, uma vez que esses veículos possuem uma movimentação errática. A tabela 4.1 lista todos os parâmetros que são

utilizados para as regras de movimentação dos veículos no “MOD\_TRAF” e a tabela 4.2 lista todas as variáveis.

Para as motocicletas realizarem as trocas de pista, deverá haver espaço suficiente na pista de destino, garantido assim a segurança na manobra. Ou seja, deve haver um espaço do tamanho  $gap_- + 1 + gap_+$ . No artigo, Meng *et al.* (2007) utilizou  $gap_+ = v_n^{(m)}$  e  $gap_- = v_{max}^{(m)}$  para trocar para a pista 2 ou  $gap_- = v_{max}^{(c)}$  se a troca for para pista 1.

Tabela 4.1: Descrição dos parâmetros utilizados no simulador de tráfego “MOD\_TRAF”

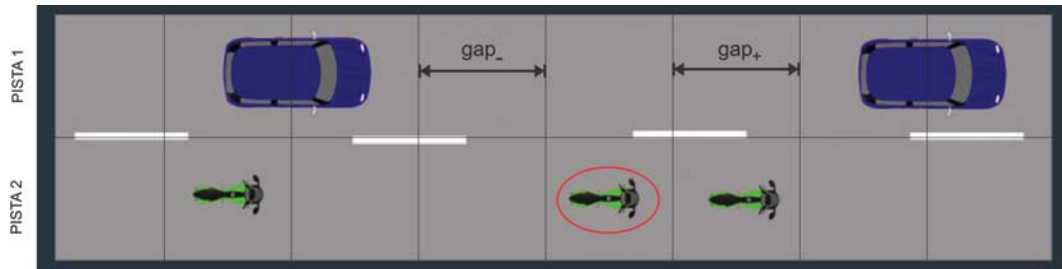
Parâmetro	Descrição
$v_{max}^{(m)}$	Velocidade máxima da motocicleta
$v_{max}^{(c)}$	Velocidade máxima do automóvel
$p^{(c)}$	Probabilidade de desaceleração para o automóvel
$p^{(m)}$	Probabilidade de desaceleração para a motocicleta
$d$	Número de espaços à frente do veículo que são visíveis

Tabela 4.2: Descrição das variáveis utilizadas no simulador de tráfego “MOD\_TRAF”

Variável	Descrição
$x_n^{(m)}$	Posição da $n$ -ésima motocicleta na pista 1 ou na pista 2
$x_n^{(c)}$	Posição do $n$ -ésimo automóvel
$v_n^{(c)}$	Velocidade do $n$ -ésimo automóvel
$v_n^{(m)}$	Velocidade da $n$ -ésima motocicleta na pista 1 ou na pista 2
$gap_+$	Espaços à frente de uma motocicleta na pista de destino ao trocar de pista
$gap_-$	Espaços atrás de uma motocicleta na pista de destino ao trocar de pista
$d_n^{(c)}$	Espaços entre o $n$ -ésimo automóvel e o automóvel ou motocicleta à sua frente
$d_n^{(m)}$	Espaços entre a $n$ -ésima motocicleta e o automóvel ou motocicleta à sua frente na pista 1 ou na pista 2
$gap_-^{(mc)}$	Espaços entre a $n$ -ésima motocicleta na pista 1 e o automóvel mais próximo atrás dela
$v_{pista1}$	Velocidade do automóvel ou da motocicleta na pista 1 dada a visibilidade $d$
$v_{pista2}$	Velocidade da motocicleta na pista 2 dada a visibilidade $d$

A figura 4.4 apresenta uma ilustração para melhor compreensão das variáveis  $gap_+$  e  $gap_-$  utilizadas na decisão da motocicleta em trocar de pista. A motocicleta em destaque na figura 4.4 pretende trocar da pista 2 para pista 1, assim, o  $gap_+$  é dado pelos espaços vazios à frente da posição da referida motocicleta já considerando-a na pista destino e o  $gap_-$  pelos espaços vazios atrás dela, também na pista destino.

Figura 4.4: Ilustração para explicar variáveis utilizadas no “MOD\_TRAF”.



A troca de pista no “MOD\_TRAF” é motivada pelo fato de existir à frente de uma motocicleta mais rápida, em sua mesma pista, uma outra motocicleta mais lenta, e, na pista destino, existir uma motocicleta ou automóvel mais rápidos que esta motocicleta que está na frente da motocicleta que irá trocar de pista. Matematicamente, pode-se escrever:  $v_{pista2} \leq v_n^{(m)}$  e  $v_{pista1} \leq v_{pista2}$ .

Após trocar de pista, a regra para retornar à pista 2 dá prioridade aos automóveis, pois quando um automóvel estiver obstruído por uma motocicleta, por exemplo  $gap_-^{(mc)} = 0$ , a motocicleta deverá tentar mudar de pista dando passagem ao automóvel. Assim, em resumo, a condição para retornar à pista 2 é dada por:  $gap_-^{(mc)} = 0$  ou  $v_{pista2} \geq v_n^{(m)}$  ou  $v_{pista2} \geq v_{pista1}$ .

De maneira geral, o modelo do tráfego utilizado no “MOD\_TRAF” pode ser dividido em duas partes: Primeiramente é feita a troca de pistas das motocicletas e depois o movimento para frente é executado. A troca de pistas para as motocicletas no artigo desenvolvido por Meng *et al.* (2007) é caracterizada simplesmente com o movimento lateral e o tempo que o motociclista necessita para trocar de pista é negligenciado e as motocicletas não se movem para frente na troca de pistas. Porém este comportamento é irreal e somente em conjunto com a regra de movimento para frente que as regras de atualização de posição dos veículos farão sentido fisicamente.

As regras para o tráfego utilizado no “MOD\_TRAF” podem ser resumidas em alguns passos e aplicadas concomitantemente para todos os automóveis e motocicletas da seguinte maneira:

- Passo 1: Trocas de pista para as motocicletas
  - Trocar da pista 2 para pista 1:



Se  $v_n^{(m)} \leq gap_+$  e  $gap_- \geq v_{max}^{(c)}$  e  $v_{pista2} \leq v_n^{(m)}$  e  $v_{pista2} \leq v_{pista1}$ , então a motocicleta trocará de pista.

– Trocar da pista 1 para pista 2:

Se  $(v_n^{(m)} \leq gap_+$  e  $gap_- \geq v_{max}^{(m)})$  e  $(gap_-^{(mc)} = 0$  ou  $v_{pista2} \geq v_n^{(m)}$  ou  $v_{pista2} \geq v_{pista1})$ , então a motocicleta trocará de pista.

● Passo 2: Aceleração dos veículos (todos os veículos tentam atingir a velocidade máxima)

– Para os automóveis:

$$v_n^{(c)} \rightarrow \min(v_n^{(c)} + 1, v_{max}^{(c)}).$$

– Para as motocicletas:

$$v_n^{(m)} \rightarrow \min(v_n^{(m)} + 1, v_{max}^{(m)}).$$

● Passo 3: Desaceleração dos veículos (veículos desaceleram para evitar colisão com o veículo à sua frente)

– Para os automóveis:

$$v_n^{(c)} \rightarrow \min(v_n^{(c)}, d_n^{(c)}).$$

– Para as motocicletas:

$$v_n^{(m)} \rightarrow \min(v_n^{(m)}, d_n^{(m)}).$$

● Passo 4: Aleatoriedade (redução aleatória da velocidade de alguns veículos simulando obstáculos na pista, distração do motorista, etc.)

– Para os automóveis:

$$v_n^{(c)} \rightarrow \max(v_n^{(c)} - 1, 0), \text{ com probabilidade } p^{(c)}.$$

– Para as motocicletas:

$$v_n^{(m)} \rightarrow \max(v_n^{(m)} - 1, 0), \text{ com probabilidade } p^{(m)}.$$

● Passo 5: Movimento dos veículos

– Para os automóveis:

$$x_n^{(c)} \rightarrow x_n^{(c)} + v_n^{(c)}.$$

– Para as motocicletas:

$$x_n^{(m)} \rightarrow x_n^{(m)} + v_n^{(m)}.$$

O procedimento de inicialização dos veículos na via é descrito da seguinte maneira:

● 1) Os automóveis são inicializados aleatoriamente com uma dada densidade na pista 1.

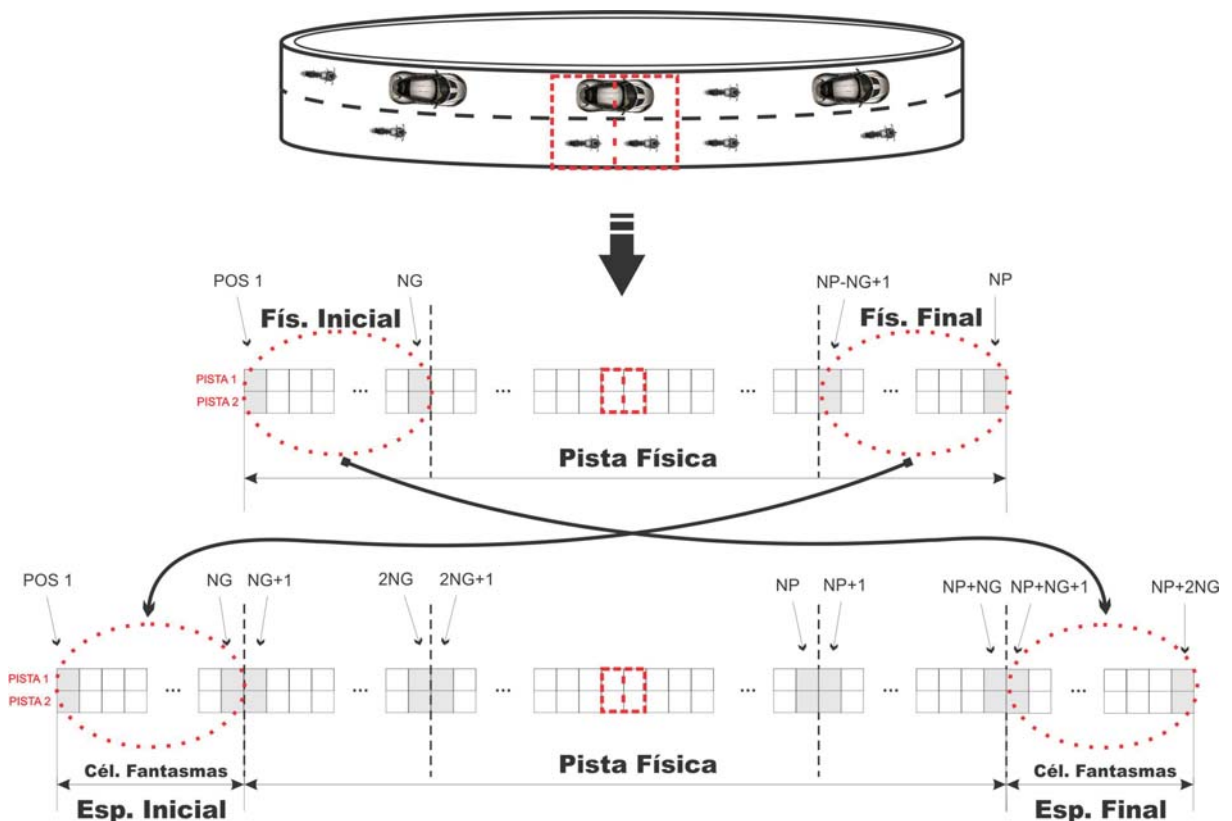
- 2) As motocicletas são inicializadas aleatoriamente com uma dada densidade na pista 2.

A via utilizada na simulação para manter as condições de contorno periódicas terá um tráfego cíclico de veículos e em função das regras que permitem as motocicletas trocarem de pista, no desenvolvimento do simulador será necessária a inclusão de duas novas regiões, denominadas de células fantasmas, que permitirão a motocicleta verificar os tamanhos dos  $gap_+$  e  $gap_-$ , e, em função de sua velocidade e das velocidades dos outros veículos, decidir se realizará a troca de pistas, conforme exposto no passo 1 das regras para o tráfego.

As regiões para as células fantasmas são formadas pelas partes iniciais e finais da pista física de tamanho  $L$ . Desse jeito, um veículo na pista física final, ao olhar para frente estará vendo a pista física inicial e um veículo na pista física inicial, ao olhar pelo retrovisor, estará vendo a pista física final.

A figura 4.5 mostra um esquema do espelhamento inicial realizado para criação das células fantasmas.

Figura 4.5: Espelhamento inicial da pista física.

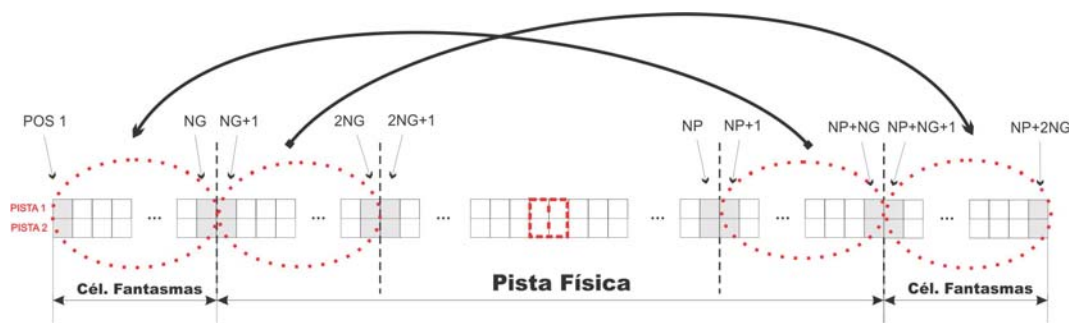


O tamanho de cada região das células fantasmas é dado por “NG” que é calculado no simulador em função do maior valor entre a velocidade máxima dos veículos e a distância  $d$ . Assim, o espelhamento inicial e final possuem a mesma quantidade de células, igual a “NG”.

A sigla “NP” corresponde ao número de divisões da pista física de extensão igual a  $L$ , e, após o seu espelhamento, a via que é utilizada nas simulações é representada por uma nova matriz de tamanho igual a “NP+2NG” de duas posições, onde a pista física agora compreende a região que vai de “NG + 1” à “NP + NG”, conforme pode-se ver na figura 4.5.

Após a troca de pistas, realizadas pelas motocicletas, a parte final da pista física, ou seja, de “NP + 1” à “NP + NG”, é copiada para o início de uma nova matriz, também de tamanho “ $L + 2NG$ ”, e a parte inicial da pista física, ou seja, de “NG + 1” à “2NG”, é copiada para compor o término dessa nova matriz, conforme pode-se ver na figura 4.6.

Figura 4.6: Espelhamento após trocas de pistas das motocicletas.



Assim, os passos 2,3 e 4 das regras de simulação para o tráfego são aplicados após a troca de pistas das motocicletas e do espelhamento realizado após essas trocas, para as células de “POS1” à “NP”.

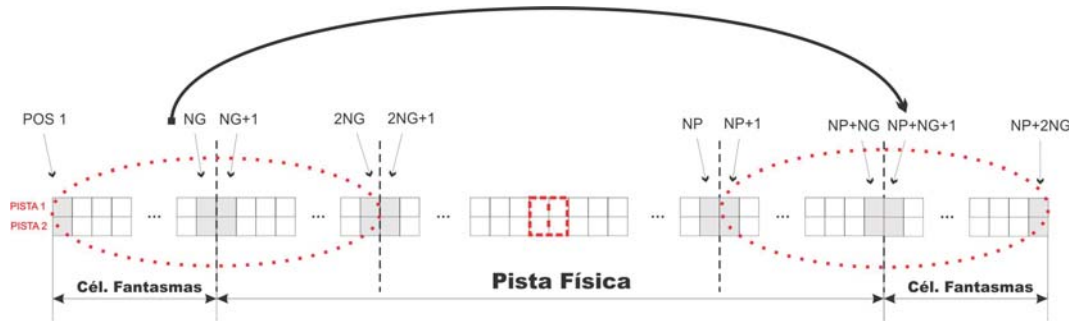
Para aplicar o passo 4, como esse é um procedimento estocástico que modifica a velocidade do veículo, será utilizado uma semente (“seed”) para realização das simulações.

Deve-se ressaltar que a determinação do valor de  $d$  é fundamental para o fluxo de veículos e se nenhum automóvel ou motocicleta for detectado na região de visibilidade  $d$  do veículo em sua pista, a velocidade  $v_{pista1}$  ou  $v_{pista2}$  é adotada como infinita ( $\infty$ ). O valor de  $d$  utilizado por Meng *et al.* (2007) é igual a 6 células, e os valores máximos para as velocidades do automóvel e da motocicleta são iguais a 10 e 4 células/passo-de-tempo, respectivamente.

A movimentação dos veículos descrita no passo 5 das regras para simulação do tráfego também é aplicado de “POS1” à “NP” e somente após todos os outros passos executados. Ao movimentar os veículos, esses são salvos numa nova matriz, com as mesmas dimensões da matriz onde foram inicializados, e colocados em suas novas posições. O veículo que ultrapassar a posição “NP”, ao se movimentar, é colocado no início dessa nova matriz, a partir de “POS1”, e quando o passo 5 é finalizado, um espelhamento final é realizado para que uma nova iteração de passo-de-tempo do simulador seja executada. Esse último espelhamento copia os veículos da “POS1” à “2NG” colocando-os na parte final dessa nova matriz que recebeu os veículos após a movimentação, ou seja, os veículos de sua parte inicial são copiados para a região que vai de

“NP+1” à “NP+2NG”, conforme pode-se ver na figura 4.7.

Figura 4.7: Espelhamento final após movimento dos veículos.



No simulador de tráfego utilizado nesse trabalho, a via de extensão “ $L$ ” é representada por uma matriz de 2.000 células com duas posições, onde cada célula equivale a um espaço com  $3,75\text{ m}$ . Assim, a via simulada possui extensão igual a  $7,5\text{ km}$ .

A densidade de automóveis e a densidade de motocicletas são quantidades conservadas. Pois,  $\rho^{(c)} = N^{(c)}/L$ ,  $\rho^{(m)} = N^{(m)}/L$  onde  $N^{(c)}$  e  $N^{(m)}$  são o número de automóveis e motocicletas, respectivamente, e  $L = 7,5\text{ km}$ .

Uma iteração de passo-de-tempo para o simulador é dada em  $1\text{ s}$ . Como a velocidade máxima do automóvel é igual a 10 espaços/passo-de-tempo, tem-se a velocidade máxima do automóvel igual a  $135\text{ km/h}$  e a velocidade máxima da motocicleta igual a 4 espaços/passo-de-tempo, ou seja,  $54\text{ km/h}$ . Esses valores, para as velocidades máximas dos veículos, configuram o caso base que é utilizado nas análises de fluxo, consumo de combustível, emissão de  $CO_2$  e custos associados ao tráfego nesse trabalho.

De acordo com Meng *et al.* (2007), para desconsiderar a influência da inicialização nas simulações, uma vez que os autômatos celulares são bastantes sensíveis as suas condições iniciais, são descartados os valores iniciais das velocidades médias dos veículos visando estabilizar o modelo utilizado no simulador. Assim, após um período de transição  $t_0 = 10.000$  passos-de-tempo, são armazenadas as médias das velocidades dos automóveis e das motocicletas a cada passo-de-tempo num período de  $T = 1.000$  passos-de-tempo, calculando-se a média para os valores dessas velocidades. Obtendo-se a média das velocidades para uma simulação. Ou seja, têm-se as equações 4.1 e 4.2 para as velocidades médias das motocicletas e dos automóveis, respectivamente, em uma simulação.

$$\bar{v}^{(m)} = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0+1}^{t_0+T} \left( \frac{1}{N^{(m)}} \sum_{i=1}^{N^{(m)}} v_i^{(m)}(t) \right) \quad (4.1)$$

$$\bar{v}^{(c)} = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0+1}^{t_0+T} \left( \frac{1}{N^{(c)}} \sum_{i=1}^{N^{(c)}} v_i^{(c)}(t) \right) \quad (4.2)$$

O simulador de tráfego do “MOD\_TRAF” também calcula o desvio padrão das velocidades de acordo com a equação 4.3

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2} \quad (4.3)$$

O cálculo do consumo médio de combustível para os veículos é realizado de maneira similar ao cálculo para a velocidade média, ou seja, após um período de transição  $t_0 = 10.000$  passos-de-tempo, são armazenadas as médias dos consumos dos automóveis e das motocicletas a cada passo-de-tempo num período de  $T = 1.000$  passos-de-tempo, calculando-se a média para os valores desses consumos. O consumo médio de combustível para os automóveis e motocicletas nas iterações de passo-de-tempo é função das velocidades e acelerações desenvolvidas. Os valores dos consumos de combustível para os veículos em cada velocidade desenvolvida considerando-se as acelerações ou não, são calculados pelo modelo de relacionamento motor-veículo denominado nesse trabalho de “MOD\_VEIC”, exposto na próxima seção, e utilizados no simulador de tráfego de acordo com a equação 4.4, dados em litros por segundo.

$$\bar{C} = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0+1}^{t_0+T} \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_i(t) \right) \quad (4.4)$$

Meng *et al.* (2007) executam 30 simulações para se obter um valor médio de um ponto que irá compor o diagrama fundamental para o fluxo de automóveis e motocicletas com  $p^{(c)} = p^{(m)} = 0.1$ . Assim, todos os valores calculados para velocidade, consumo de combustível, emissão de dióxido de carbono etc, são médias de trinta simulações realizadas, onde cada simulação é média de um período de mil passos de tempo.

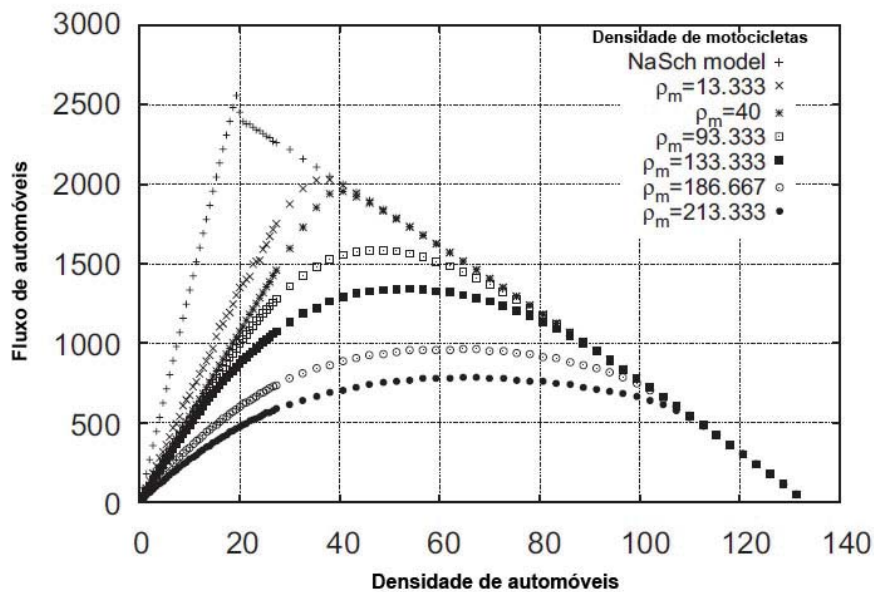
No simulador de tráfego do “MOD\_TRAF”, ao realizar uma simulação, tem-se que informar as densidades de automóveis e motocicletas e a extensão da via. Meng *et al.* (2007) consideram as densidades de motocicletas especificadas iguais a  $\rho^{(m)} = 0$  e intitulada de modelo “NaSch”,  $\rho^{(m)} = 13,333$ ,  $\rho^{(m)} = 40$ ,  $\rho^{(m)} = 93,333$ ,  $\rho^{(m)} = 133,333$ ,  $\rho^{(m)} = 186,667$  e  $\rho^{(m)} = 213,333$  durante as simulações, e as densidades de automóveis variando de 0 a 140. As densidades das motocicletas nas simulações desse trabalho são as mesmas do trabalho desenvolvido por Meng *et al.* (2007), mas as densidades dos automóveis, que variam de 0 a 140,

possuem intervalos de 10 em 10, devido ao custo computacional.

Estabelece-se a unidade “veículos/km” para densidade e “veículos/h” para o fluxo. O fluxo é calculado pela multiplicação da densidade pela velocidade média para cada veículo. Ou seja,  $Q = \rho \cdot \bar{v}$ .

Como resultado das regras contidas no artigo desenvolvido por Meng *et al.* (2007) e aplicadas ao tráfego composto por motocicletas e automóveis, a figura 4.8 mostra a relação do fluxo de automóveis em relação a densidade de motocicletas dado o incremento da densidade de automóveis na via. Pode-se perceber nessa figura que o aumento da densidade de motocicletas levará o fluxo de automóveis para valores inferiores do que aquele que possui somente automóveis na via, representado nas curvas da figura 4.8 como modelo “NaSch”. Isto é devido a troca de pistas por parte das motocicletas que interfere assim no fluxo dos automóveis.

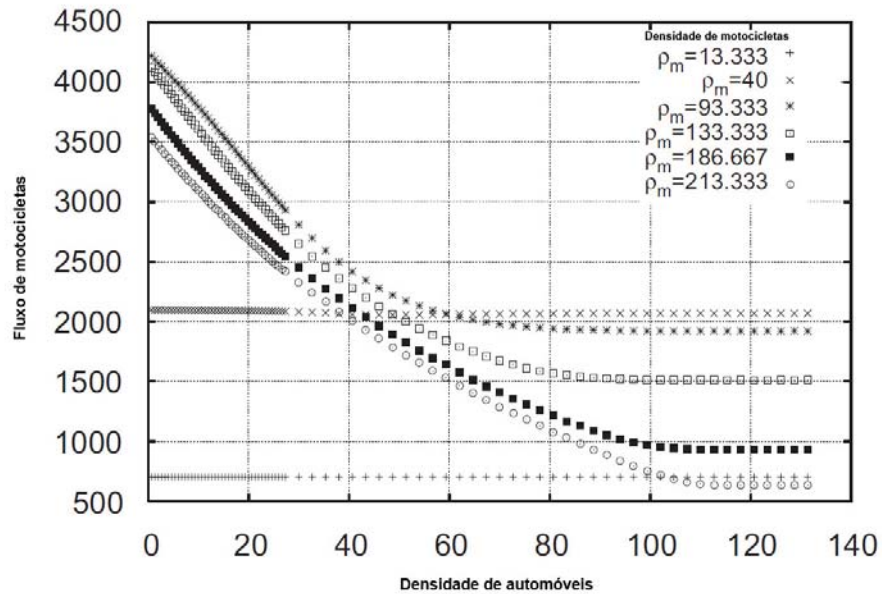
Figura 4.8: Fluxo de automóveis em função da densidade de motocicletas.



Fonte: Adaptado de (MENG *et al.*, 2007)

Em contrapartida, o fluxo de motocicletas para o caso da densidade de automóveis ser igual a zero apresenta maior fluxo quando comparado ao fluxo somente de automóveis, conforme pode ser visto na figura 4.9. Isto mostra que o fato das motocicletas trocarem de pista influi no aumento do fluxo da via. E, como acontece com os automóveis, para até uma determinada configuração das densidades dos veículos, com o aumento da densidade na via, o fluxo diminuirá.

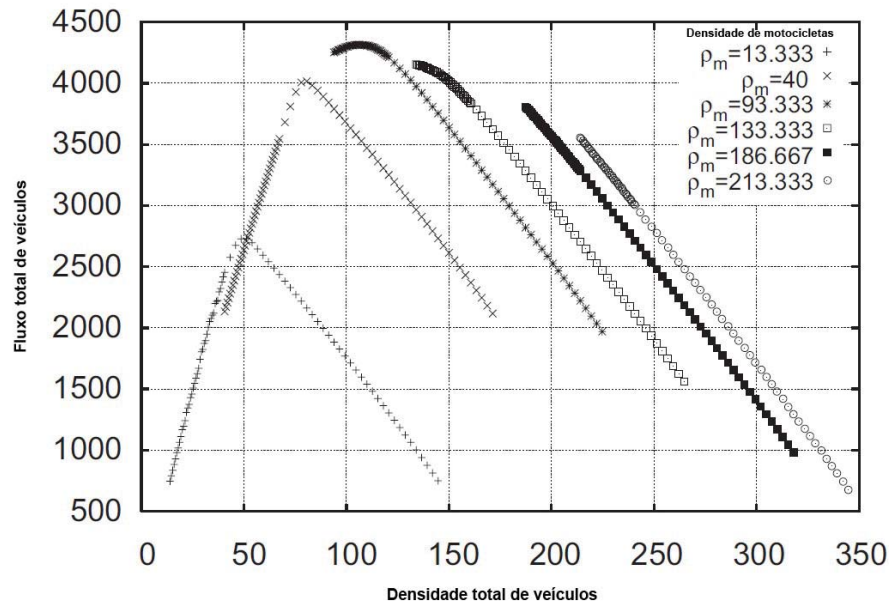
Figura 4.9: Fluxo de motocicletas vs. Densidade de automóveis.



Fonte: Adaptado de (MENG *et al.*, 2007)

Assim, é preciso analisar o fluxo total da via em função da densidade total de veículos que trafegam na mesma. A figura 4.10, mostra a relação do fluxo total de veículos em função da densidade total de veículos. O valor de maior fluxo aparece na combinação da densidade de motocicletas igual a 93,333 motocicletas por quilômetro e a densidade de automóveis igual a 12 automóveis por quilômetro, ou seja, a combinação de 700 motocicletas com 90 automóveis, para uma extensão de 7,5 km.

Figura 4.10: Fluxo total de veículos vs. Densidade total de veículos.



Fonte: Adaptado de (MENG *et al.*, 2007)

O fluxo total de veículos na via será então decorrência do número total de veículos, das regras aplicadas em relação as trocas de pistas e das velocidades médias desenvolvidas pelos veículos.

### 4.3 Modelo do relacionamento motor-veículo (MOD\_VEIC)

Adotou-se um modelo que serve de base para o cálculo dos esforços atuantes num veículo em movimento com velocidade constante desprezando os efeitos das curvas em sua trajetória. Visando um modelo para atender tanto as simulações com automóveis como as simulações com motocicletas, foram feitas algumas simplificações para construção deste modelo. Uma simplificação diz respeito ao momento de inércia da roda do veículo que não é levada em consideração. Isto porque o peso das rodas é bem inferior ao peso total do veículo já com o seu condutor.

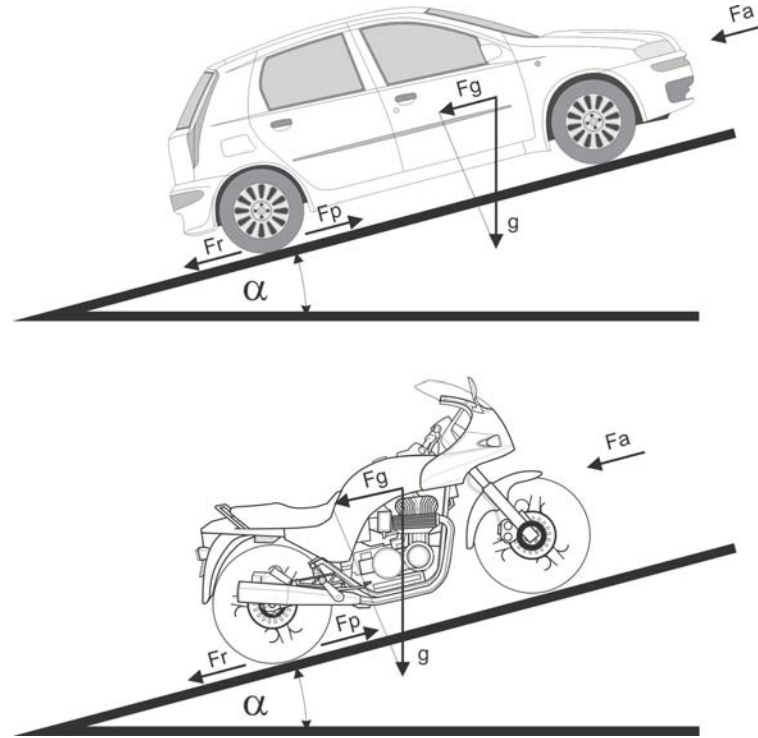
O modelo é descrito assim: Seja um automóvel ou uma motocicleta em movimento com velocidade constante numa rampa com inclinação  $\alpha$ , conforme a figura 4.11, onde são apresentadas as forças resistentes ao movimento deste veículo, que são:

- $F_a$ : Força de resistência aerodinâmica.
- $F_r$ : Força de resistência ao rolamento.
- $F_g$ : Força de resistência gravitacional dada inclinação  $\alpha$ .



- $F_p$ : Força de propulsão.

Figura 4.11: Veículos em deslocamento com velocidade constante.



Aplicando a segunda lei de Newton na direção longitudinal para o modelo apresentado na figura 4.11, temos:

$$\sum F_x = m \cdot a_x \quad (4.5)$$

onde:

$F_x$  : Forças na direção x.

$m$  : Massa equivalente do veículo (kg)

$a_x$ : Aceleração na direção x ( $m/s^2$ )

Decompondo a equação 4.5, tem-se:

$$m \cdot \frac{dV}{dt} = F_p - F_a - F_r - F_g \quad (4.6)$$

onde:

$V$ : velocidade na direção x do veículo ( $m/s$ )

Utilizando a definição das forças de resistência ao movimento discutidas no capítulo da fundamentação teórica, pode-se então reescrever a equação 4.6 conforme a equação 4.7, em função da posição  $x$  do veículo:

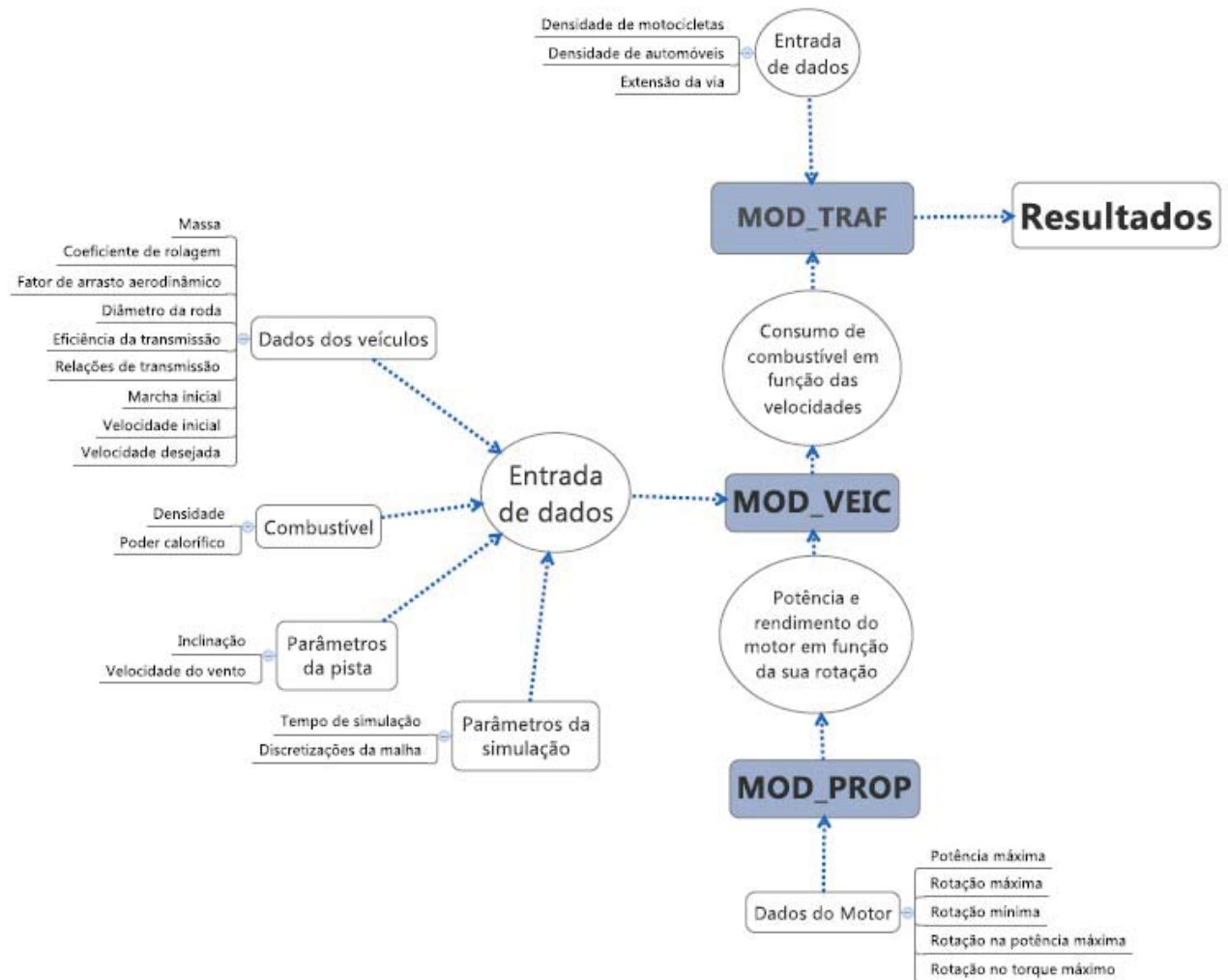
$$m \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{P \cdot \eta}{V} - K \cdot (V + w)^2 - C_r \cdot m \cdot g - m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (4.7)$$

Para as simulações, será preciso calcular a velocidade num instante  $t + 1$ , determinando assim a potência necessária do motor para vencer as forças de resistência ao movimento para uma dada velocidade, sendo esta a única variável desconhecida nesta equação diferencial ordinária. Esta equação pode ser resolvida analiticamente, porém será utilizado o método numérico das diferenças finitas, que já foi apresentado no capítulo da fundamentação teórica, pois dependendo dos parâmetros utilizados em função de  $x$ , a equação teria que ser resolvida várias vezes. A aproximação da solução pelo método numérico será tal que o erro em relação a resposta exata seja tão pequeno quanto possível, conseguindo-se isto através de uma malha adequada, resultante de um estudo de convergência de malha. Como este modelo é qualitativo, não é necessário uma alta precisão nos resultados encontrados.

Este modelo é implementado com código desenvolvido em MATLAB<sup>®</sup>, e o seu simulador é chamado de “MOD\_VEIC” nesse trabalho. Este simulador será responsável por integrar os dados dos veículos com o modelo utilizado para os motores, fornecendo assim os valores dos consumos de combustível dos veículos para serem utilizados no simulador de tráfego “MOD\_TRAF”.

A figura 4.12, exibe um esquema de como é feita a integração entre motor, veículo e tráfego através dos simuladores desenvolvidos nesse trabalho, mostrando também os parâmetros necessários para cada modelo.

Figura 4.12: Modelos utilizados para integração entre motor, veículo e tráfego.



Para realizar as simulações com os veículos, é necessário definir os parâmetros que são utilizados no “MOD\_VEIC”. Assim, são estabelecidos tais parâmetros de acordo com estudos realizados e em função da literatura existente. Os valores para estes parâmetros para o automóvel, modelo Fiat Palio 1.0, e para motocicleta, modelo Honda CG 125 cc, são expostos nas tabelas 4.3 e 4.4, respectivamente.

Tabela 4.3: Parâmetros do automóvel para simulação

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Fator de arrasto	0,34 $kg/m$
Coefficiente de rolagem	0,02
Massa	940 $kg$
Eficiência da Transmissão	0,95
Rendimento máximo do motor	30%

O valor do fator de arrasto aerodinâmico para o automóvel foi determinado em função do produto  $C_d \cdot \frac{\rho \cdot A}{2}$ . Segundo (BRUNETTI, 2012), a área frontal de um automóvel popular varia de 1,3 a 2  $m^2$  e o valor do coeficiente de arrasto apresenta valor médio, para um automóvel popular no Brasil, segundo tese desenvolvida por Schmitt (2010), igual a 0,34. Considerando-se a densidade do ar igual a 1,204  $kg/m^3$  para temperatura de 20°C à pressão de 1 atm, têm-se os valores para o fator de arrasto, para um automóvel popular no Brasil, variando de 0,27 a 0,41  $kg/m$ . Assim, fazendo-se uma média entre os valores máximos e mínimos para esses fatores de arrasto, tem-se o valor igual a 0,34  $kg/m$ .

O coeficiente de rolagem foi determinado em função da figura 2.7 e considerado constante. O rendimento da transmissão e o rendimento do motor foram obtidos baseado no artigo desenvolvido por Ben-Chaim *et al.* (2013), que determina os seus valores para motores à gasolina de quatro tempos e transmissão manual. A massa do automóvel foi obtida do manual do proprietário do veículo e refere-se a massa do veículo vazio. Logo, a massa do automóvel é somada à massa do condutor que, segundo o IBGE (2010), apresenta valor médio para o brasileiro, entre 21 e 30 anos, igual a 70  $kg$ .

Tabela 4.4: Parâmetros da motocicleta para simulação

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Fator de arrasto	0,7 $kg/m$
Coefficiente de rolagem	0,02
Massa	105 $kg$
Eficiência da Transmissão	0,95
Rendimento máximo do motor	30%

Cossalter (2006), referência quando o assunto é dinâmica da motocicleta, informa que, para uma motocicleta que não possui carenagem e com o piloto em posição ereta, tem-se uma

área de arrasto igual a 0,7. Logo, tomando-se a densidade do ar igual a  $1,204 \text{ kg/m}^3$  para temperatura de  $20^\circ\text{C}$  à pressão de 1 atm, o valor do fator de arrasto para a motocicleta é igual a 0,42. Porém, o valor do fator de arrasto aerodinâmico para a motocicleta, nas simulações desse trabalho, não foi determinado em função do produto  $C_d \cdot \frac{\rho \cdot A}{2}$ . O valor considerado para a motocicleta, e utilizado nas simulações, é 66% maior do que o valor calculado neste produto. A intenção de aumentar o fator de arrasto da motocicleta, aumentando assim a potência resistiva aerodinâmica, foi de considerar um caso extremo de perdas aerodinâmicas para uma motocicleta que trafega em vias urbanas.

O coeficiente de rolagem para a motocicleta foi determinado em função da figura 2.7 e também referenciado por Cossalter (2006) como valor típico encontrado. O rendimento da transmissão e o rendimento do motor foram estabelecidos de maneira similar ao do automóvel, baseando-se no artigo desenvolvido por Ben-Chaim *et al.* (2013) para motores de quatro tempo à gasolina. A massa da motocicleta foi obtida do manual do proprietário do veículo, e também faz referência ao valor de sua massa com a motocicleta sem o piloto. Assim, a sua massa também será acrescida da massa do piloto, com valor igual a 70 kg, conforme dados do IBGE (2010).

As relações de transmissão para o automóvel, com câmbio mecânico, são exibidas na tabela 4.5.

Tabela 4.5: Relações de transmissão do automóvel

Parâmetro	Valor
Relação de transmissão	1º Marcha: 4,273
	2º Marcha: 2,238
	3º Marcha: 1,520
	4º Marcha: 1,156
	5º Marcha: 0,872
Diferencial	4,357

As relações finais por marcha para o automóvel são calculadas multiplicando-se as relações localizadas por marcha, expostas na tabela 4.5, pelo valor da redução realizada pelo diferencial do veículo. Por exemplo, a relação final para terceira marcha do automóvel utilizado nas simulações do “MOD\_VEIC” é igual a  $1,520 \times 4,357 = 6,623$ .

O pneu utilizado pelo automóvel é o de referência 165/70 R13, com o diâmetro da roda utilizado para as simulações igual a 0,5612 m.

As relações de transmissão para a motocicleta, com câmbio mecânico, são exibidas na tabela 4.6.

Tabela 4.6: Relações de transmissão da motocicleta

Parâmetro	Valor
Relação de transmissão	1º Marcha: 2,785
	2º Marcha: 1,789
	3º Marcha: 1,350
	4º Marcha: 1,120
	5º Marcha: 0,958
Redução Primária	3,350
Redução Final	3,071

As relações finais por marcha para a motocicleta são calculadas multiplicando-se as relações localizadas por marcha, expostas na tabela 4.6, pelos valores das reduções primária e final. Por exemplo, a relação final para segunda marcha da motocicleta utilizada nas simulações do “MOD\_VEIC” é igual a  $1,789 \times 3,350 \times 3,071 = 18,405$ .

A motocicleta utiliza no pneu traseiro o modelo Pirelli 90/90-18 M/C 57P. Adotando-se como diâmetro da roda para as simulações com a motocicleta o valor igual a  $0,6192 \text{ m}$ . O seu pinhão possui 14 dentes e a sua coroa 43 dentes.

Ao executar o simulador “MOD\_VEIC”, após a entrada de dados de todos os parâmetros do veículo, pista, combustível e referentes à simulação, conforme exposto na figura 4.12, é calculado a rotação da roda do veículo pela equação 4.8 e a potência desejada para o veículo vencer as potências resistentes ao seu movimento pela equação 4.9.

$$Rot_{rod} = \frac{60.V}{\pi.d_{rod}} \quad (4.8)$$

Onde:

$Rot_{rod}$ : Rotação da roda do veículo ( $rpm$ )

$d_{rod}$ : diâmetro da roda do veículo ( $m$ )

$$P_{des} = \frac{1}{\eta}.V. \left[ K.(V + w)^2 + m.g.(C_r + \text{sen}(\alpha)) + m.\frac{dV}{dt} \right] \quad (4.9)$$

Onde:

$P_{des}$ : Potência desejada para vencer as potências resistentes ao movimento do veículo ( $W$ )

$\eta$ : Eficiência da transmissão

$K$ : Fator de arrasto

$V$ : Velocidade do veículo ( $m/s$ )

$w$ : Velocidade do vento ( $m/s$ )

$C_r$ : Coeficiente de rolagem

$\alpha$ : Inclinação da via

Em função da potência desejada para o veículo vencer as potências resistentes ao seu movimento, o simulador “MOD\_VEIC” calcula o valor da abertura da borboleta de admissão de ar dividindo esse valor pela potência do motor na respectiva rotação, conforme pode-se ver na equação 4.10.

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{se } P_{des} < 0 \\ \frac{P_{des}}{P(rot_{mot})} & \text{se } 0 \leq P_{des} \leq P_{rot_{mot}} \\ 1 & \text{se } P_{des} > P_{rot_{mot}} \end{cases} \quad (4.10)$$

Onde:

$\beta$ : Abertura da borboleta de admissão de ar.

$P(rot_{mot})$ : Potência do motor para a rotação do motor igual a rotação da roda vezes a relação final de transmissão numa dada marcha.

O cálculo da potência máxima de frenagem do veículo é realizado pela equação 4.11:

$$P_{freio} = V \cdot \mu \cdot m \cdot g \quad (4.11)$$

Onde:

$\mu$ : Coeficiente de atrito do pneu com a pista.

O cálculo do rendimento do motor é feito utilizando o procedimento descrito na revisão bibliográfica para o artigo desenvolvido por Ben-Chaim *et al.* (2013) e o consumo específico é calculado em função deste valor pela equação 2.11, ou seja  $\eta_{motor} = \frac{3600}{sfc \cdot PCI}$ . Assim, o consumo, em litros, do veículo é calculado pela equação 4.12.

$$C_{comb} = \frac{3600 \cdot E_{mot} \cdot sfc}{\rho_{comb}} \quad (4.12)$$

Onde:

$C_{comb}$ : Consumo de combustível do veículo (l)

$E_{mot}$ : Energia gasta pelo motor do veículo, calculada por  $\int P_{mot} dt$  (kJ)

$\rho_{comb}$ : Densidade do combustível (g/l)

A autonomia do veículo é calculada em função de sua velocidade e do consumo específico calculado na equação 2.11, conforme pode-se ver na equação 4.13.

$$Aut_{veic} = \frac{\rho_{comb} \cdot V}{sfc \cdot P_{mot}} \quad (4.13)$$

Onde:

$Aut_{veic}$ : Autonomia do veículo ( $km/l$ )

$V$ : Velocidade do veículo ( $km/h$ )

$P_{mot}$ : Potência do motor ( $kW$ )

O simulador “MOD\_VEIC” para calcular a energia, potência e consumo de combustível do motor em função das velocidades desenvolvidas pelos veículos, como consequência das características da pista, dos parâmetros dos veículos e dos parâmetros dos motores, utiliza o método das diferenças finitas, calculando a cada passo de tempo o valor das velocidades destes veículos.

A equação 4.6 então precisa ser discretizada em função do números de nós que a malha adotada pelo método das diferenças finitas terá, podendo o diferencial  $\frac{dV}{dt}$  dessa equação ser reescrito conforme mostra a equação 4.14

$$\frac{dV_{i-1}}{dt} = \frac{(V_i - V_{i-1})}{h} + O(h) \quad (4.14)$$

onde:

$h$ : Tamanho do passo na discretização da malha.

$O(h)$ : Ordem do erro de aproximação.

Assim, a velocidade no tempo  $i$  será calculada conforme a equação 4.15. E para o erro da aproximação ser pequeno o suficiente, será necessário realizar um refinamento na malha da discretização.

$$V_i = V_{i-1} + h \cdot \frac{dV_{i-1}}{dt} \quad (4.15)$$

A aceleração no tempo anterior, ou seja  $\frac{dV_{i-1}}{dt}$ , é calculada pela equação 4.7. Sendo reescrita conforme a equação 4.16.

$$\frac{dV_{i-1}}{dt} = \frac{\left( \frac{P_{i-1} \cdot \beta_i \cdot \eta}{V_{i-1}} - K \cdot (V_{i-1} + w_{i-1})^2 - C_r \cdot m \cdot g - m \cdot g \cdot \text{sen}(\alpha_{i-1}) \right)}{m} \quad (4.16)$$

Onde:

$P_{i-1}$ : Potência do motor ( $W$ )

$\beta_i$ : Abertura da borboleta de admissão de ar no motor.

O valor da abertura da borboleta de admissão de ar, conforme já exposto, varia de 0 a 1, onde 1 representa a borboleta completamente aberta. Este valor é tomado no tempo  $i$  pois quando multiplicado pela potência do motor no tempo  $i - 1$  indicará a potência desejada no

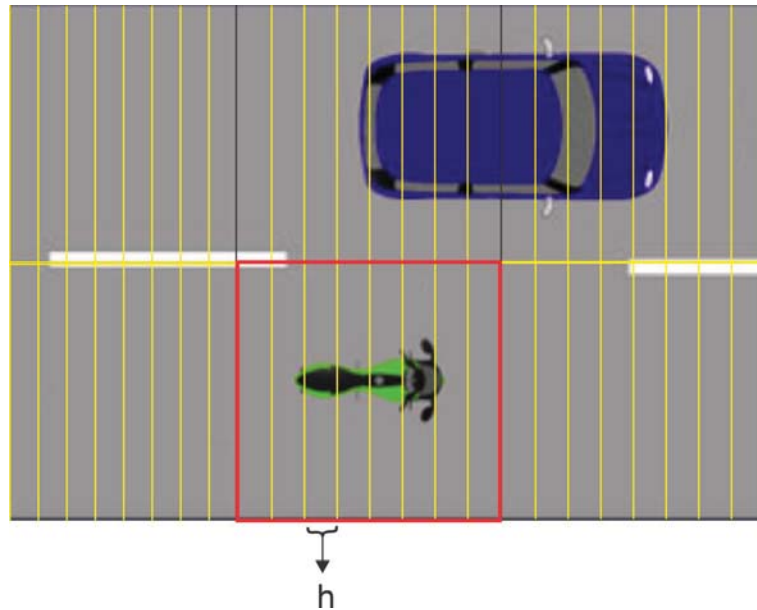


tempo  $i$  necessária para superar as forças de resistência ao movimento do veículo.

Conforme discutido na seção da fundamentação teórica sobre o método das diferenças finitas, é necessário um estudo no refinamento da malha para se obter uma boa aproximação da solução, aproximando-a assim de sua solução analítica.

A figura 4.13 mostra como cada célula no simulador de tráfego “MOD\_TRAF” é discretizada para o simulador “MOD\_VEIC” calcular os valores de energia, potência e consumo de combustível em função de cada velocidade para os veículos.

Figura 4.13: Análise de malha realizada no “MOD\_VEIC”.



Realizando a análise da malha para as velocidades da motocicleta, tomando por exemplo a variação de velocidade de 0 para  $13,5 \text{ km/h}$  com o tempo de um segundo, tem-se pela tabela 4.7 que o valor da discretização superior a 3.000 nós, ou seja  $h \leq 3.000$ , já não apresenta valores diferentes para distância percorrida e o tempo necessário para se alcançar a velocidade desejada. Assim, no “MOD\_VEIC”, utiliza-se o valor de 3.000 nós para a discretização da malha quando forem realizadas as análises de velocidades para as motocicletas.

Tabela 4.7: Análise da discretização da malha para velocidades da motocicleta

Nós	Tempo = 1 s	
	Distância[m]	Tempo[s]
10	0,21	0,11
50	0,04	0,02
100	0,02	0,01
500	1,84	0,77
1.000	1,97	0,91
2.000	1,99	0,94
3.000	1,99	0,95
3.500	1,99	0,95
10.000	1,99	0,95

Uma análise similar desenvolvida para os automóveis pode ser vista na tabela 4.8. Definindo-se o valor da discretização para malha nas simulações de velocidades para o automóvel igual a 5.000 nós, pois acima deste valor, não há diferença entre a distância percorrida e o tempo necessário para se alcançar a velocidade desejada.

Tabela 4.8: Análise da discretização da malha para velocidades do automóvel

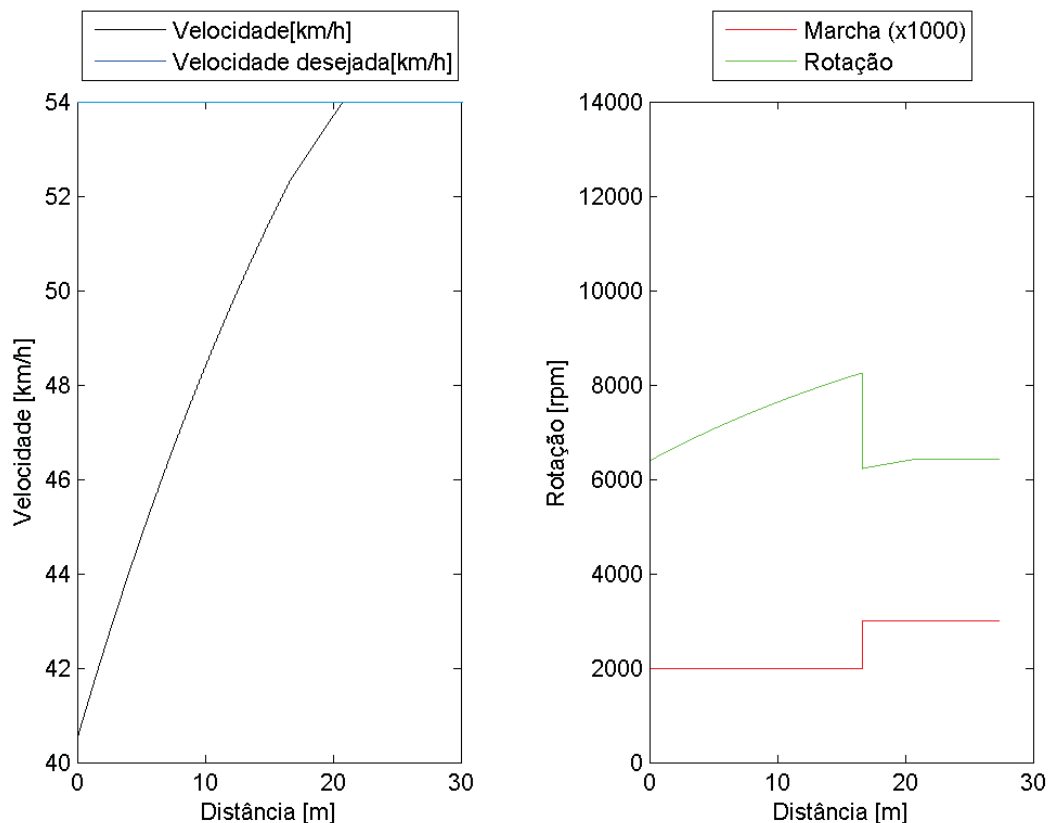
Nós	Tempo = 1 s	
	Distância[m]	Tempo[s]
3.000	1,81	0,88
3.500	1,81	0,88
4.000	1,81	0,88
5.000	1,81	0,89
5.500	1,81	0,89
6.000	1,81	0,89
7.000	1,81	0,89
10.000	1,81	0,89
30.000	1,81	0,89

Quando os veículos não se movimentam com velocidade constante, é necessário realizar um procedimento para determinar o consumo de combustível em função da energia utilizada para acelerar o veículo. Sabe-se que em alguns casos, apenas um segundo não é tempo suficiente para que o veículo saia da velocidade inicial e alcance a velocidade desejada. O tempo de um

segundo é importante nessa análise porque é o tempo utilizado pelo “MOD\_TRAF” como passo-de-tempo de cada iteração.

Por exemplo, considerando-se que a motocicleta possua velocidade inicial igual a 40,5 *km/h* e a sua velocidade desejada seja de 54 *km/h*, a mesma levará 1,54 s para alcançar 99% dessa velocidade desejada. O valor de 99% da velocidade desejada deve-se ao fato do processo ser um processo numérico de limite que possui erros maiores quando se deseja obter 100% da velocidade desejada, ou seja, o erro associado ao cálculo da velocidade para 99% da velocidade desejada apresenta menores valores do que os que consideram 100%, condicionando o simulador “MOD\_VEIC” a fazer uma aproximação do valor para 99% da velocidade desejada. Pode-se ver na figura 4.14 a evolução da velocidade da motocicleta para o exemplo exposto. No lado esquerdo da figura 4.14 tem-se o gráfico da evolução de sua velocidade para alcançar a velocidade desejada em função da distância percorrida, e no lado direito, a troca de marchas realizadas e a evolução da rotação do seu motor.

Figura 4.14: Exemplo de aceleração para a motocicleta.



Para o veículo, seu deslocamento, velocidade, potência, consumo, rotação do motor etc são calculadas no “MOD\_VEIC” como grandezas instantâneas, ou seja, calculados para um intervalo de tempo que tende a zero.

Quando o veículo encontra-se parado, o simulador “MOD\_VEIC” considera a potência

do motor igual a potência na sua rotação mínima de trabalho com a borboleta de admissão de ar completamente aberta, ou seja,  $P_{idle} = P_{(rot_{min})}$ , onde  $P_{idle}$  é a potência consumida pelo motor com o automóvel parado, ou como é comumente chamado, à marcha lenta. Nessa situação à marcha lenta, o automóvel possui uma potência do motor igual a  $4,23 \text{ kW}$ , e a motocicleta igual a  $0,82 \text{ kW}$ .

O cálculo do consumo de combustível para os veículos em marcha lenta no simulador “MOD\_VEIC” utiliza esses valores de potências. Pode-se entender esses valores de potência como as perdas associadas ao atrito das partes móveis do motor, as perdas por calor ou devido aos acessórios utilizados no veículo.

Para o cálculo do consumo de combustível, o combustível utilizado é a gasolina, com valor do PCI igual a  $44 \text{ MJ/kg}$  e com massa específica igual a  $735 \text{ g/l}$ .

#### 4.4 Modelo do motor (MOD\_PROP)

Para determinar quais seriam os veículos utilizados nas análises, e conseqüentemente realizar a análise dos parâmetros de seus motores, foram feitas consultas à algumas montadoras, com o intuito de saber quais eram os modelos que disponibilizavam, para os seus motores, as suas curvas características, principalmente para ter acesso a curva de consumo específico. Infelizmente, a resposta de todas as montadoras contactadas foi praticamente a mesma, independente de ser fabricante de automóveis ou de motocicletas: “Curvas características dos motores não são disponibilizadas por serem tratadas como segredo industrial e o cliente final não tem acesso”. Independente de alegar que se tratava de um estudo científico, muitas vezes ignoraram o pedido e não responderam às solicitações.

Assim, para obter as curvas de potência dos motores dos veículos utilizados neste trabalho, foi utilizado o modelo matemático exposto na revisão bibliográfica, que reproduz a curva de potência através de um modelo parabólico, ou seja, utiliza a equação 4.17 em função da rotação do motor.

$$P(w) = \begin{cases} P(w_{min}) & \text{se } w < w_{min} \\ \frac{P_{max}}{2w_p^2} (3w_p - w_t)w - \frac{P_{max}}{2w_p^2(w_p - w_t)} (w - w_t)^2 w & \text{se } w_{min} \leq w \leq w_{max} \\ 0 & \text{se } w > w_{max} \end{cases}$$

(4.17)

Onde:

$P_{(w)}$ : Potência para uma dada rotação do motor ( $W$ )

$w_{min}$ : Rotação mínima de funcionamento do motor ( $rad/s$ )

$w_{max}$ : Rotação máxima de funcionamento do motor ( $rad/s$ )

Para o automóvel, os dados foram extraídos do manual do proprietário do modelo Fiat Palio 1.0 fornecido pelo fabricante. Este veículo representa, de maneira significativa, o número total de vendas de automóveis com motorização 1.0 aqui no Brasil em 2013, segundo dados da FENABRAVE (2013). Este veículo possui motor Flex, ou seja, utiliza tanto etanol como gasolina, ignição por centelha, 4 portas e câmbio manual. As características de seu motor são descritas na tabela 4.9.

Tabela 4.9: Dados do motor para o automóvel

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Potência máxima	53,69 kW
Rotação na Potência máx.	6.250 rpm
Rotação no Torque máx.	4.500 rpm
Rotação marcha lenta	$850 \pm 50$ rpm

A figura 4.15 , mostra a curva de potência para este veículo gerada pelo modelo matemático parabólico adotado, que necessita apenas da potência máxima, rotação na potência máxima, a rotação no torque máximo, a rotação máxima do motor e a rotação mínima. Uma vez que o fabricante não disponibilizou a sua curva nem forneceu a rotação máxima para o motor, fora estabelecido a sua rotação máxima igual a 6.500 rpm, em função do seu tacômetro, conforme figura 4.16.

Figura 4.15: Curva de potência para o automóvel.

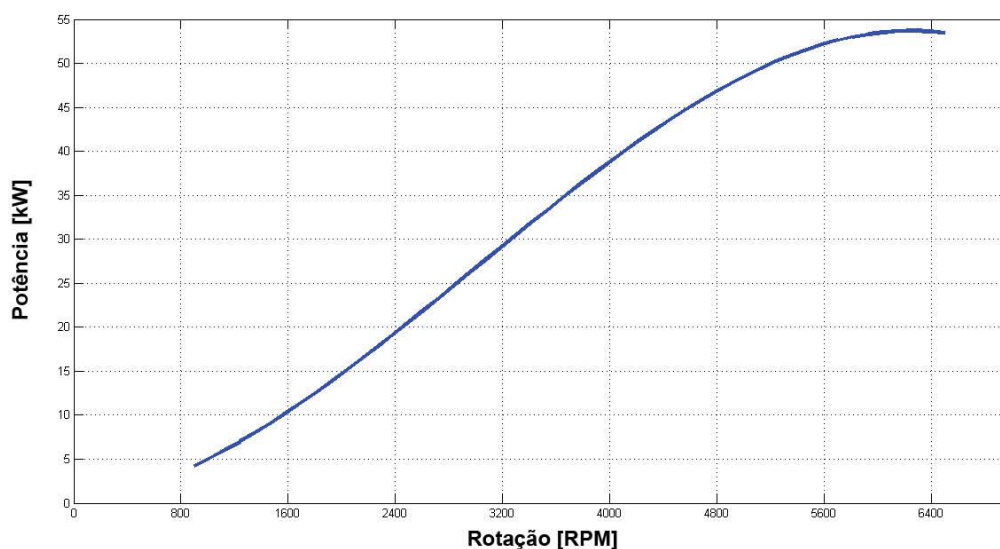
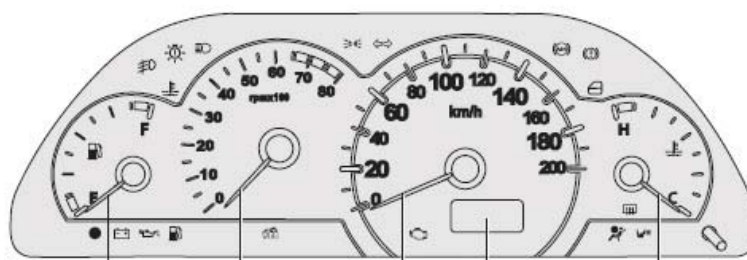


Figura 4.16: Tacômetro utilizado no modelo do automóvel escolhido para a simulação.



Quando o motor do automóvel apresenta rotação superior a sua rotação máxima, o sistema de injeção do veículo corta a alimentação de combustível condicionando seu funcionamento para rotações sempre inferiores a máxima. No caso da rotação ser inferior a sua rotação mínima, a embreagem, que faz o acoplamento suave entre o motor e o sistema de transmissão, permite que o motor continue funcionando com rotação acima deste valor mínimo.

Para traçar a curva de potência para a motocicleta que será utilizada nas simulações, também será utilizado o modelo parabólico, necessitando definir os parâmetros de seu motor. A moto escolhida para ser utilizada nas simulações é uma motocicleta popular de 125cc com boa representatividade nas vendas do mercado brasileiro. Infelizmente a montadora não confirmou a rotação máxima do motor. A tabela 4.10 exhibe as informações para o seu motor.

Tabela 4.10: Dados do motor para a motocicleta

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Potência máxima	8,53 kW
Rotação na Potência máx.	8.250 rpm
Rotação no Torque máx.	6.000 rpm
Rotação marcha lenta	1.400 ± 100 rpm

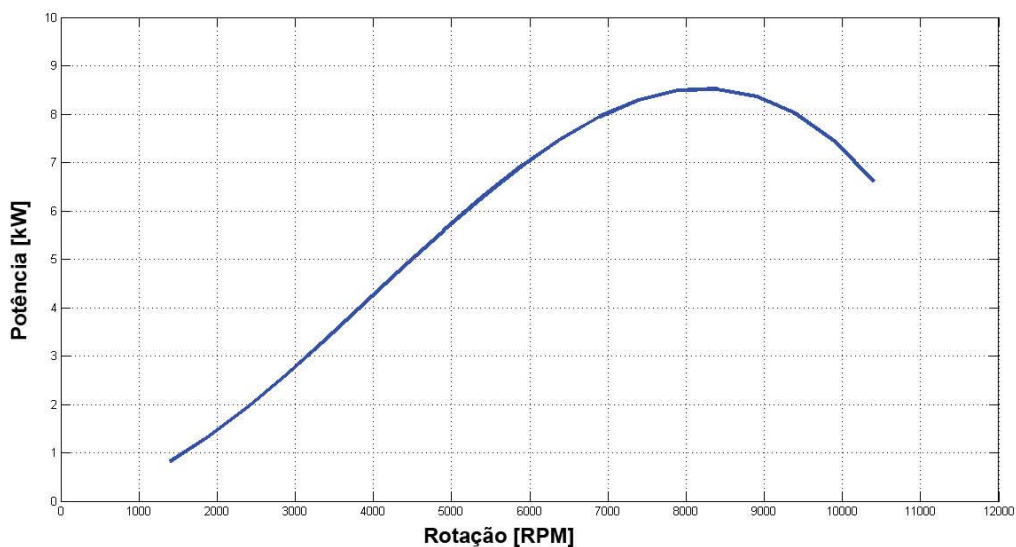
O valor para a rotação máxima do motor da motocicleta foi estabelecido em função do seu tacômetro, com valor igual a 10.500 rpm. Pode-se verificar na figura 4.17 a foto de um tacômetro similar ao utilizado como referência para a escolha desse valor.

Figura 4.17: Tacômetro utilizado no modelo da motocicleta escolhida para a simulação.



A curva de potência para motocicleta, utilizando esses parâmetros, pode ser vista na figura 4.18:

Figura 4.18: Curva de potência para motocicleta.



As curvas de potência por marchas em função da velocidade dos veículos utilizados neste trabalho podem ser vistas nas figuras 4.19 e 4.20. Porém, o motorista ou o piloto não têm conhecimento destas curvas, logo não conseguem estabelecer pontos específicos, seja qual for o seu interesse, para realizarem as trocas de marchas em seus veículos. Assim, a troca de marchas será definida de maneira a simular um condutor que não tem conhecimento da curva do motor, nem tão pouco sabe a faixa de rotação que apresenta melhor rendimento.

Figura 4.19: Curva de potência por marcha em função de sua velocidade para o automóvel.

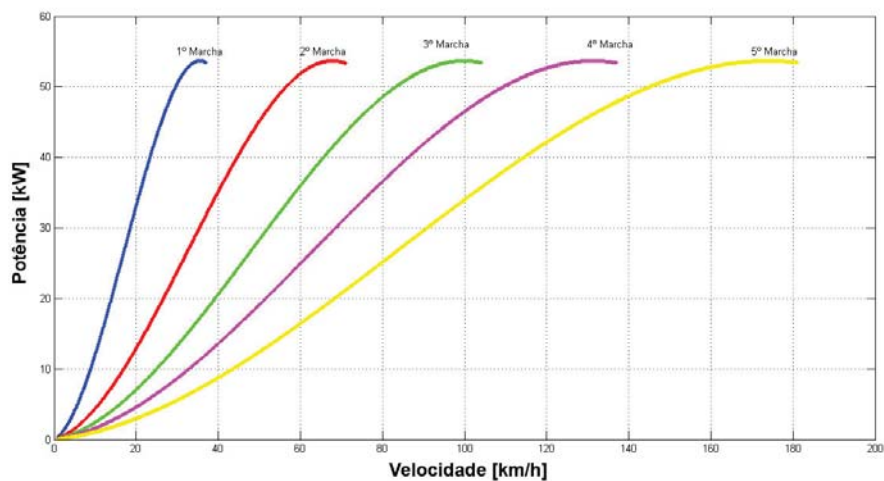
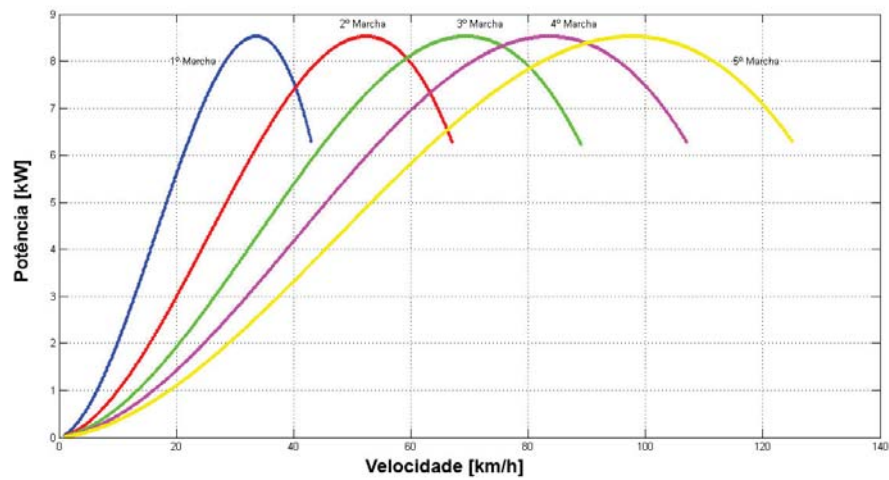




Figura 4.20: Curva de potência por marcha em função de sua velocidade para a motocicleta.

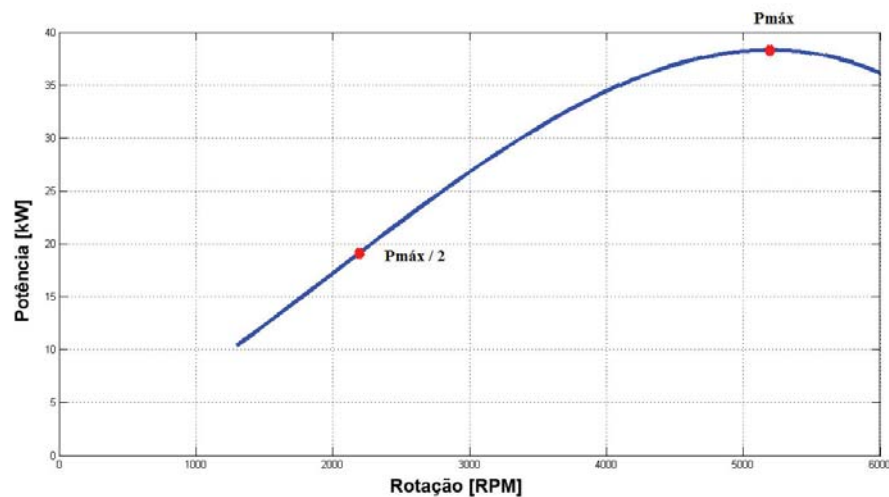


Deste modo, será estabelecido que os pontos de trocas de marchas estarão dentro dos intervalos definidos para cada veículo por:

- Rotação de passagem mínima: Localizado no ponto de rotação da potência máxima pela metade. Valores abaixo deste ponto farão a troca de marcha, diminuindo-a em uma unidade.
- Rotação de passagem máxima: Localizado no ponto de rotação da potência máxima. Valores acima deste ponto farão a troca de marcha, aumentando-a em uma unidade.

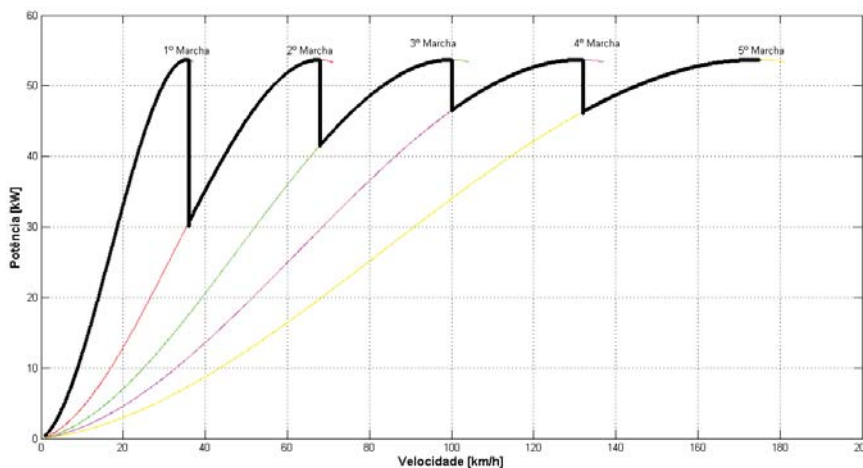
Ou seja, de acordo com a figura 4.21, identificam-se os pontos vermelhos referentes aos pontos de passagens para as marchas de um veículo através desse procedimento adotado.

Figura 4.21: Pontos de mudanças de marchas.



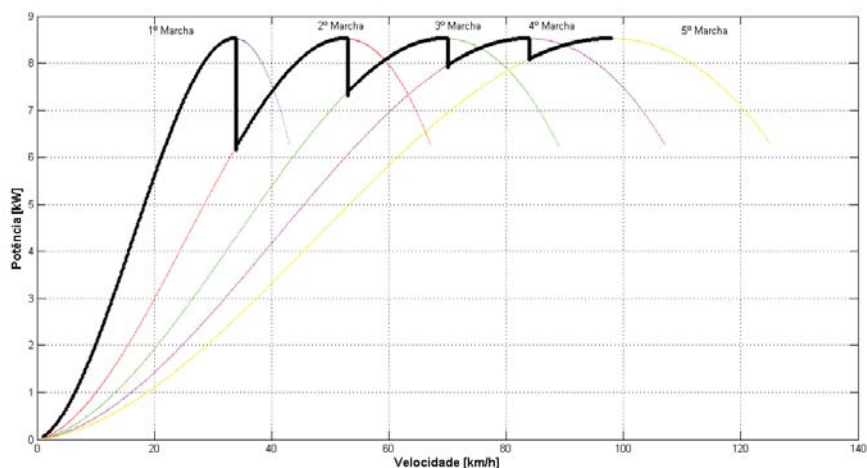
Em função das relações de transmissões para o automóvel e para motocicleta, expostos nas tabelas 4.5 e 4.6, respectivamente, e baseado no procedimento adotado na figura 4.21 para realizar a troca de marchas, as figuras 4.22 e 4.23 mostram as curvas de potência com trocas de marchas crescentes para o automóvel e para a motocicleta.

Figura 4.22: Curva de potência com trocas crescentes de marcha para o automóvel.



De acordo com o manual do proprietário do automóvel, as velocidades máximas obtidas em cada marcha com o veículo utilizando gasolina são: 1ª marcha = 35,9 km/h, 2ª marcha = 68,6 km/h, 3ª marcha = 101,0 km/h, 4ª marcha = 132,8 km/h e 5ª marcha = 156,0 km/h. Em relação a figura 4.19, a velocidade em função da marcha utilizada só difere dos valores apresentados no manual do proprietário do veículo para 5ª marcha, muito provavelmente por algum sistema no veículo que corte a alimentação de combustível quando a velocidade do veículo é superior a velocidade máxima especificada no manual para essa marcha ou porque a potência do motor não é suficiente para superar o arrasto aerodinâmico.

Figura 4.23: Curva de potência com trocas crescentes de marcha para a motocicleta.



Os pontos de interseções encontrados na curva 4.23 poderiam ser utilizados para especificar as velocidades de trocas das marchas com o objetivo de se conseguir sempre potências crescentes para a motocicleta. Porém, como já dito anteriormente, o piloto muitas vezes não tem acesso a estas informações, e assim este não será um dos critérios utilizados para realizar a troca de marchas neste trabalho.

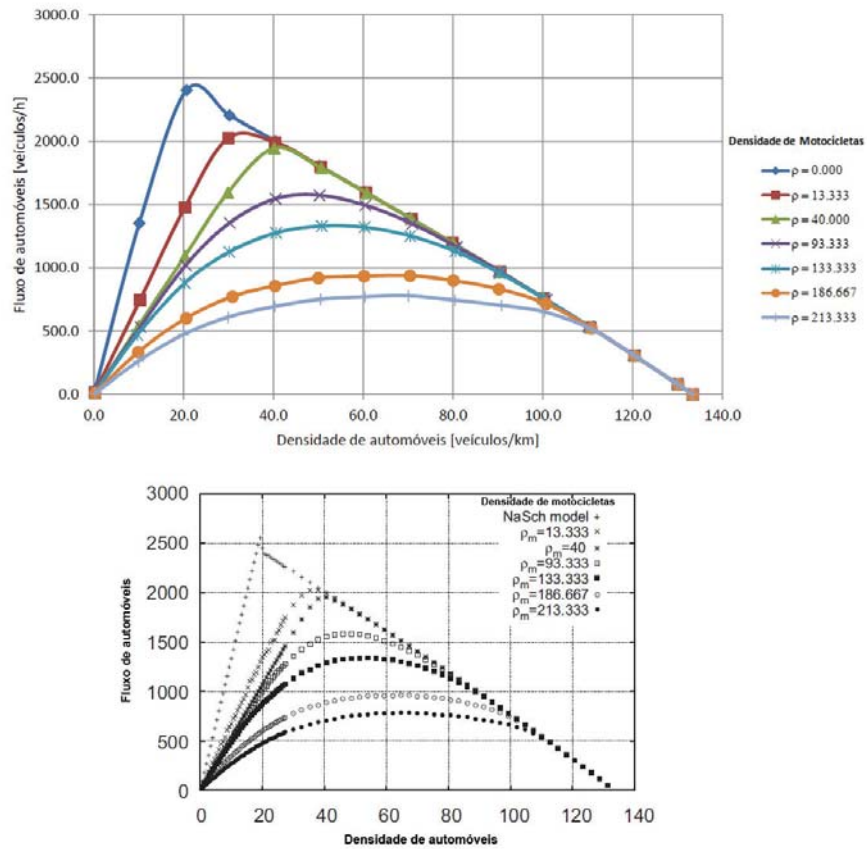
## **5 ANÁLISE NUMÉRICA DOS MODELOS - DISCUSSÃO DE RESULTADOS**

Neste capítulo é feita a análise dos resultados dos simuladores utilizados nesse trabalho, assim como a integração dos seus valores para compreensão dos fenômenos multi-escalar que envolvem motor, veículo e tráfego. Analisa-se os resultados obtidos ao reproduzir os gráficos do artigo que serviu como base para desenvolver o simulador de tráfego e os valores calculados em função do relacionamento motor-veículo para cada configuração de velocidade, seja considerando as acelerações ou não.

### **5.1 Resultados do modelo de tráfego “MOD\_TRAF”**

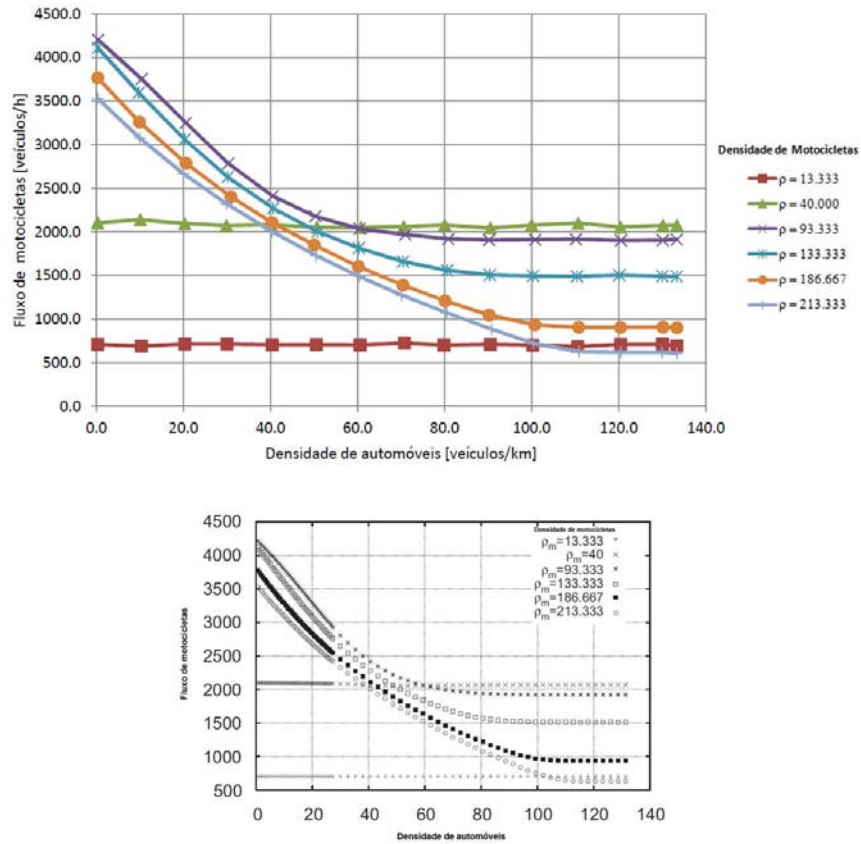
Após desenvolvimento do simulador de tráfego composto por motocicletas e automóveis baseado nas regras contidas no artigo desenvolvido por Meng *et al.* (2007), foram analisados os resultados das simulações comparando-se os gráficos de fluxo de automóveis em função da densidade de automóveis, o fluxo de motocicletas em função da densidade de automóveis e o fluxo total de veículos em função da densidade total de veículos, com os gráficos presentes no artigo. As figuras 5.1, 5.2 e 5.3 exibem os gráficos frutos da simulação no “MOD\_TRAF” para os casos respectivamente citados.

Figura 5.1: Resultados da simulação para o fluxo de automóveis em função da densidade de automóveis.



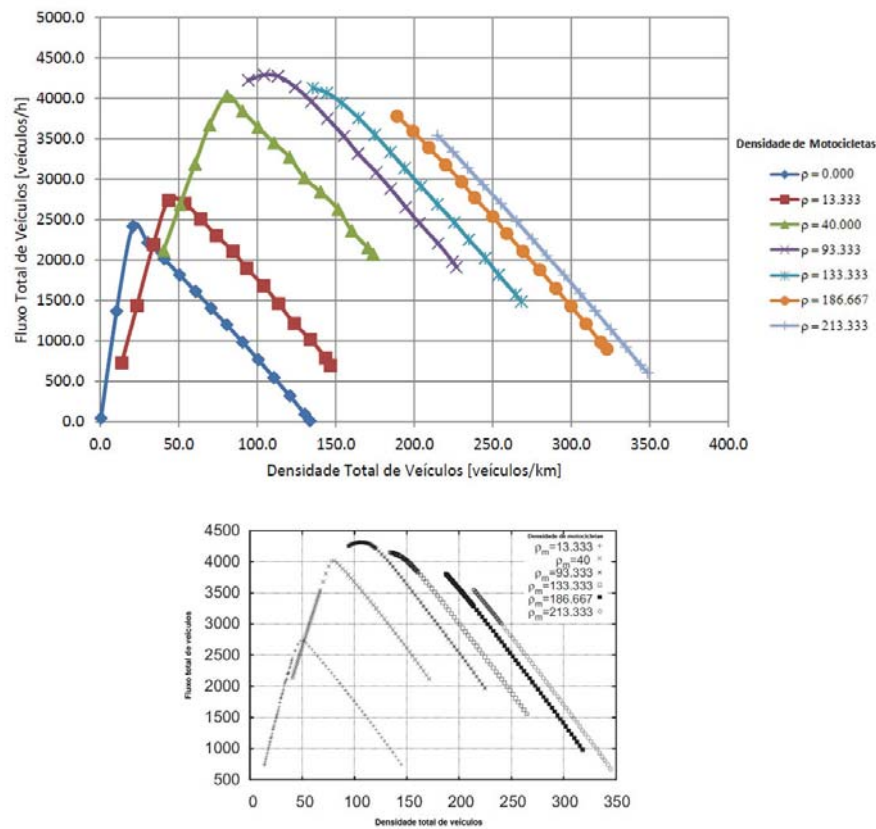
Na figura 5.1, os valores para as densidades de motocicletas são exibidos com o identificador “ $\rho$ ”, e estes apresentam-se com os mesmos valores utilizados pelo artigo para as análises de fluxos. Mas estes são valores aproximados, pois na inicialização das motocicletas na pista, dada uma taxa de ocupação para se obter a densidade desejada, o simulador muitas vezes considerou valores próximos aos indicados para as densidades das motocicletas, uma vez que as mesmas são inicializadas de maneira aleatória na via.

Figura 5.2: Resultados da simulação para o fluxo de motocicletas em função da densidade de automóveis.



A figura 5.2 apresenta pequenas oscilações quando comparados os gráficos de fluxo de motocicletas em função da densidade de automóveis de Meng *et al.* (2007) e do gerado pelo “MOD\_TRAF”, conforme pode-se ver para a densidade de motocicletas igual a 40. Isto acontece, conforme já foi explicado, porque quando os veículos são inicializados na pista, é feita a distribuição para que o valor das densidades sejam as mesmas utilizadas pelo artigo, porém em alguns casos, os valores não são iguais, mas para traçar as curvas, são enquadrados como da mesma família de densidade. Realizando interpolações, pode-se verificar que os valores gerados pelo “MOD\_TRAF” são iguais aos coletados no artigo quando isto acontece.

Figura 5.3: Resultado da simulação para o fluxo total de veículos em função da densidade total de veículos.



Combinando-se os resultados dos fluxos de automóveis e motocicletas, pode-se ver na figura 5.3 o fluxo total de veículos em função da densidade total de veículos, apresentando-se valores iguais aos coletados do artigo. Como no simulador foram utilizados intervalos de 10 em 10 para a variação da densidade de automóveis, os gráficos gerados pelo “MOD\_TRAF” possuem menos pontos nas curvas traçadas.

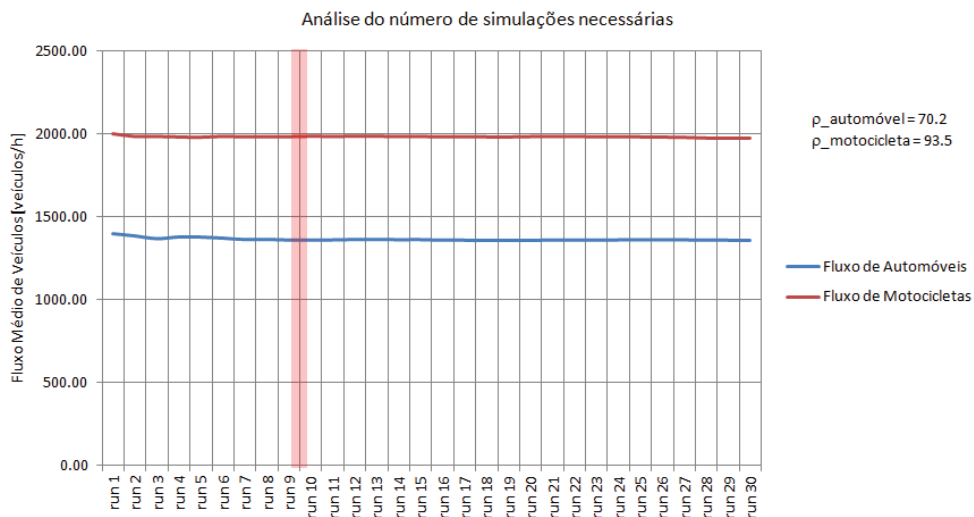
O simulador de tráfego foi desenvolvido inicialmente em MATLAB e este levava cerca de 30 horas para realizar uma simulação, com um determinado valor de densidade de motocicletas, em um computador com processador intel i5 com 4 Gb de memória. Posteriormente, o simulador foi traduzido para a linguagem C++, levando cerca de 6,5 h para realizar todas as simulações, de acordo com todas as densidades de motocicletas analisadas, tornando a simulação muito mais rápida e viabilizando o uso do “MOD\_TRAF” para as análises propostas aqui neste trabalho.

Durante o desenvolvimento do “MOD\_TRAF”, foram feitos testes para verificar a necessidade de realizar 30 simulações para se obter os valores médios calculados pelo programa em cada caso estudado para densidades das motocicletas e dos automóveis, conforme especifica o artigo desenvolvido por Meng *et al.* (2007). Assim, tomando-se algumas densidades de mo-

motocicletas e de automóveis, verificou-se que em certos casos, os valores estabilizavam-se com cerca de 9 simulações porém em outros casos, eram necessários 28 simulações. Por este motivo, foi mantido o número fechado de 30 simulações para todos os casos analisados neste trabalho, assim como recomenda o artigo.

A figura 5.4 mostra a evolução do fluxo de veículos, por valor médio das simulações, para o caso da densidade de automóveis igual a 70,2 e a densidade de motocicletas igual a 93,5. Os valores coletados nos gráficos do artigo mostram um fluxo para automóveis igual a 1.367 para esta configuração e um fluxo para as motocicletas igual a 1.978, valores alcançados com apenas 9 simulações.

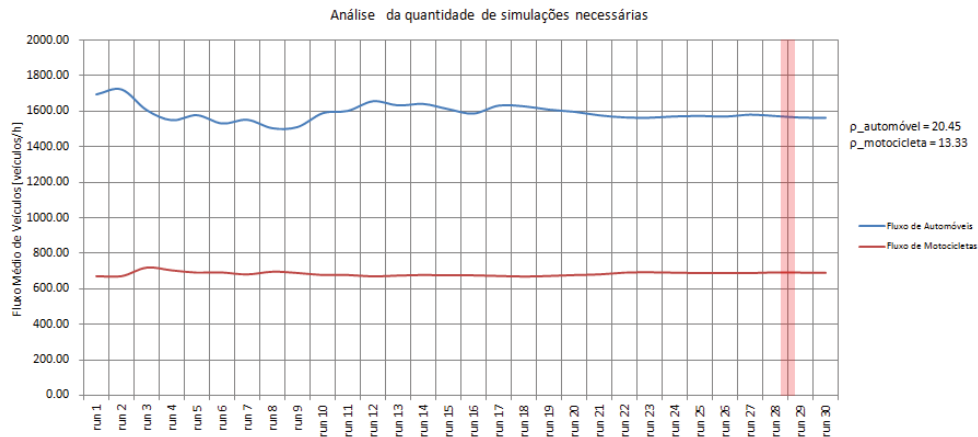
Figura 5.4: Critério para convergência - Número de nove simulações.



A figura 5.5 mostra a necessidade de mais simulações que a realizada anteriormente para se estabilizar o valor médio calculado do fluxo de veículos. Tem-se nesse caso a densidade de automóveis igual a 20,45 e a densidade das motocicletas igual a 13,33, encontrando-se o valor do fluxo de automóveis igual a 1.348 e o fluxo de motocicletas igual a 698, valores de acordo com dados coletados dos gráficos do artigo, somente quando se realiza a média de 28 simulações.

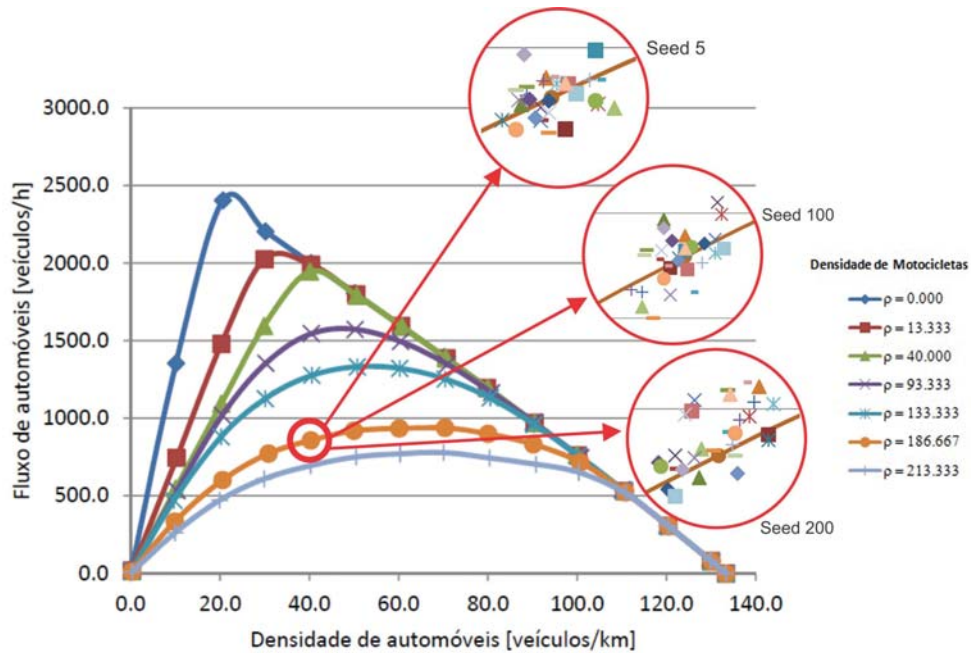


Figura 5.5: Critério para convergência - Número de vinte e oito simulações.



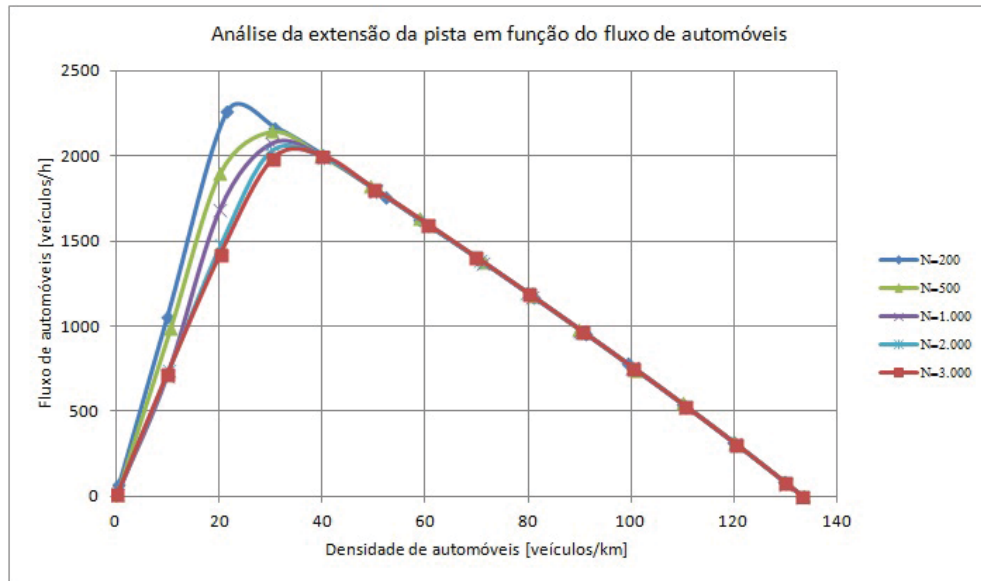
A influência da semente para gerar os números aleatórios, utilizada para realizar as simulações de tráfego, também foi avaliada, uma vez que um dos itens para determinar a velocidade dos veículos era função de um número aleatório para desacelerar o veículo dada uma probabilidade  $p$ . Verificou-se que a utilização de sementes diferentes apresentavam resultados diferentes, porém estes divergiam muito pouco uns dos outros, e com a média de 30 simulações para cada caso, o efeito decorrente da escolha da semente para criação dos números aleatórios não surtia efeito algum para o resultado final do fluxo dos veículos. A figura 5.6 mostra a diferença dos valores de seeds para cálculo do fluxo de veículos para o caso da densidade do automóvel igual 40 e a densidade da motocicleta igual a 186,667. Os pontos em cada desenho representado pelo seed corresponde ao valor calculado em cada uma das trinta simulações, totalizando assim trinta pontos que serão utilizados para calcular a média do ponto que irá compor o gráfico de fluxo médio para o veículo.

Figura 5.6: Análise do seed utilizado para gerar os números aleatórios.



Outra análise realizada para verificar os parâmetros utilizados no “MOD\_TRAF” foi desenvolvida em relação a extensão da via, que no artigo é de 7,5 km, com 2.000 células de 3,75 m. Foram simuladas situações com 200, 500, 1.000, 2.000 e 3.000 células, para comprovar a necessidade de se utilizar uma via com 2.000 células, como indica o artigo, e assim poder reduzir o tempo computacional para cada caso a ser estudado. Como dito anteriormente, utilizando-se 2.000 células, o tempo de simulação fica em torno de 6,5 h em um computador com processador i5 e 4 GB de memória. Para 200 células, utilizando o mesmo computador, a simulação foi realizada em 22 minutos. Para comparar os resultados das simulações com extensões diferentes, escolheu-se a densidade de motocicletas igual a 13,333 para as variações das quantidades de células utilizadas, e foi traçado o gráfico do fluxo de automóveis em função da densidade de automóveis, conforme pode-se ver na figura 5.7.

Figura 5.7: Análise do fluxo de automóveis em função da variação da extensão da via.



Como resultado da análise da variação da extensão da via, verificou-se que para valores inferiores a 2.000 células, o erro associado a simulação aumenta consideravelmente, chegando a ser superior a 46%, para baixas densidades de automóveis, quando se comparam os resultados da via com 200 e 3.000 células. Quando se verifica a variação da extensão da via para densidades mais altas de motocicletas, percebe-se que o aumento da extensão da via não acarreta em valores diferentes para o fluxo de veículos. Assim, utilizando-se 2.000 células tem-se um erro inferior a 4% para baixas densidades de automóveis, em relação a via com 3.000 células, e um menor custo computacional, mantendo-se, assim, este valor para as demais simulações realizadas neste trabalho.

## 5.2 Resultados do modelo de relacionamento motor-veículo “MOD\_VEIC”

Em função das velocidades do caso base utilizado pelo “MOD\_TRAF”, com a velocidade máxima para motocicleta igual a 54 *km/h* e para o automóvel igual a 135 *km/h*, foram analisadas as potências necessárias para manter o veículo em velocidade constante ou a potência adicional necessária para acelerá-lo, calculando assim, para cada caso, o seu consumo de combustível.

A tabela 5.1 mostra os valores calculados pelo “MOD\_VEIC” para a motocicleta nas velocidades do caso base utilizado pelo “MOD\_TRAF”, e para a mesma quando está parada.

Tabela 5.1: Valores calculados pelo “MOD\_VEIC” para velocidades constantes da motocicleta

Vel.[km/h]	Pot. do motor[kW]	$\eta_{motor}$ [%]	Consumo [l/s] $\times 10^6$	sfc[g/kWh]	Autonomia[km/l]
0	0,82	23%	110,8	357,7	-
13,5	0,17	8%	63,8	967,8	58,8
27	0,58	9%	190,5	866,2	39,4
40,5	1,46	14%	327,0	594,4	34,4
54	3,03	21%	440,8	385,0	34,0

Onde: 1 CV = 0,735 kW

O rendimento do motor é calculado utilizando a equação 5.1 em função da rotação e potência do motor, ou seja:

$$\eta(P, w) = \eta_o \cdot \mu_p \cdot \mu_n$$

onde:

$\eta_o$ : Pico de eficiência do motor. Para motores à gasolina, seu valor é igual a 0,3.

$\mu_p$ : Coeficiente do grau de utilização de potência do motor.

$\mu_n$ : Coeficiente modal de rotação do motor.

O cálculo do consumo de combustível, exposto na tabela 5.1 em  $l/s \times 10^6$ , é dado pela expressão 5.1:

$$Q_{comb} = \frac{Pot_{mot} \cdot sfc \cdot 10^6}{3.600 \rho_{gas}} \quad (5.1)$$

Onde:

$Q_{comb}$  : Consumo de combustível ( $l/s \cdot 10^6$ )

SFC : Consumo específico ( $g/kWh$ )

$Pot_{mot}$  : Potência do motor ( $kW$ )

$\rho_{gas}$  : Densidade da gasolina ( $= 735 g/l$ )

O valor calculado para o consumo de combustível quando a motocicleta está parada é elevado, maior até para situações com a motocicleta se movimentando à baixas velocidades, conforme pode-se ver na tabela 5.1, devido ao critério utilizado para o cálculo da potência consumida pelo motor em marcha lenta, onde considera-se a rotação mínima do motor com a borboleta de admissão de ar completamente aberta.

A autonomia em  $km/l$  exposta na tabela 5.1 é calculada pela equação 4.13, ou seja,  $Aut_{veic} = \frac{\rho_{comb} \cdot V}{sfc \cdot P_{mot}}$ .

A potência do motor, exposta na tabela 5.1, para cada velocidade constante, é igual a soma das respectivas potências resistivas ao seu movimento, conforme mostra a tabela 5.2.

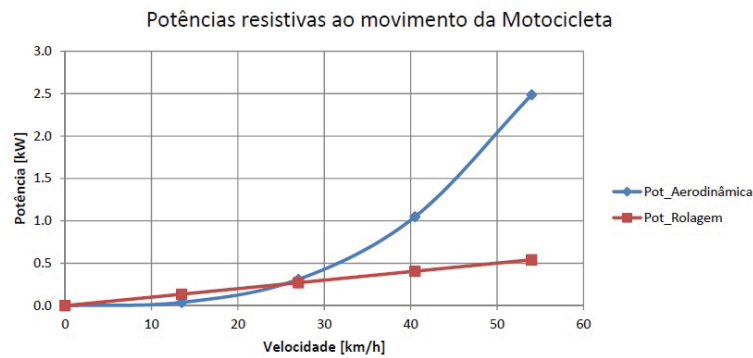
Tabela 5.2: Potências resistivas ao movimento da motocicleta para velocidades constantes

Vel.[km/h]	Pot. Inercial [kW]	Pot. Aerodinâmica [kW]	Pot. Rolagem [kW]	Pot. Gravitacional [kW]
13,5	0	0,03	0,14	0
27	0	0,31	0,27	0
40,5	0	1,05	0,41	0
54	0	2,49	0,54	0

Onde: 1 CV = 0,735 kW

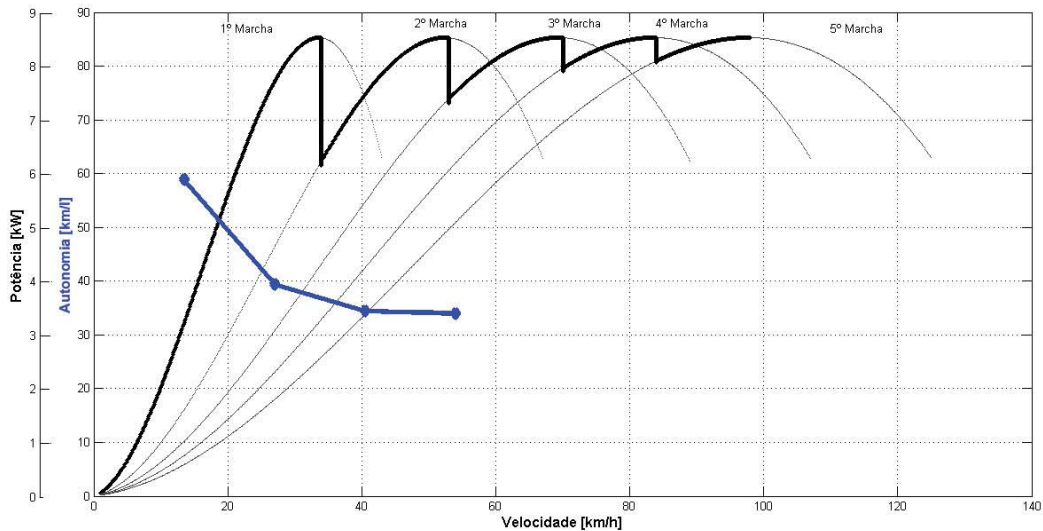
Pode-se ver na figura 5.8 a relação entre as potências resistivas para o movimento da motocicleta em função das velocidades utilizadas pelo “MOD\_TRAF”. Nota-se que próximo a 30 km/h, os valores das potências resistivas começam a se distanciar. Isto acontece porque a potência aerodinâmica é função do cubo da velocidade do veículo.

Figura 5.8: Potências resistivas ao movimento da motocicleta.



Ao analisar a tabela 5.1, percebe-se que, embora a potência do motor para velocidade de 54 km/h seja praticamente o dobro da potência para velocidade de 40,5 km/h, os valores de suas autonomias estão próximos. Isto acontece devido ao valor do rendimento do motor em cada caso, onde para 54 km/h, tem-se o valor igual a 21% e para 40,5 km/h, tem-se o valor de 14%. A figura 5.9 mostra a relação da velocidade da motocicleta com a sua autonomia, resultado do critério de troca de marchas que já foi explicado no capítulo de metodologia.

Figura 5.9: Autonomia da motocicleta em função de sua velocidade.



Porém, se estes valores forem comparados utilizando-se um mesmo parâmetro para o rendimento do motor, por exemplo, considerando-se o rendimento do motor para ambas as velocidades igual a 25 %, os valores das autonomies serão diferentes. Ou seja, para velocidade de  $40,5 \text{ km/h}$ , o consumo seria de  $(1,46/0,25)/(0,735 \times 44.000) = 180,6 \text{ (l/s)} \times 10^6$  de gasolina, com uma autonomia de  $62,3 \text{ km/l}$ , e, para a velocidade de  $54 \text{ km/h}$ , o consumo seria de  $(3,03/0,25)/(0,735 \times 44.000) = 374,7 \text{ (l/s)} \times 10^6$  de gasolina com uma autonomia de  $40 \text{ km/l}$ .

Ao comparar o consumo de combustível em função das velocidades para um veículo, tem-se que levar em consideração a sua distância percorrida. Fazendo-se uma análise em função das distâncias percorridas, baseando-se nos valores da tabela 5.1, consome-se  $1,43 \text{ l}$  de gasolina para andar  $50 \text{ km}$  à  $40,5 \text{ km/h}$  e consome-se  $1,48 \text{ l}$  de gasolina à  $54 \text{ km/h}$  para andar a mesma distância, ou seja, o consumo à  $54 \text{ km/h}$  é aproximadamente 3,38% maior que o consumo à  $40,5 \text{ km/h}$ , e não 27,5%, como poderia-se pensar ao calcular o consumo por hora à  $40,5 \text{ km/h}$  igual a  $1,16 \text{ l/h}$  e à  $54 \text{ km/h}$  igual a  $1,6 \text{ l/h}$ . Como o rendimento do motor é diferente para cada velocidade, os valores de suas autonomies podem aparecer com valores próximos, assim como foi exibido na tabela 5.1. Se o critério para trocas de marchas fosse diferente, por exemplo, estabelecendo-se uma região de rotação para o motor próxima dos pontos de maiores rendimento, a autonomia da motocicleta melhoraria e a curva da figura 5.9 teria menores reduções de autonomia em função do aumento de sua velocidade.

No artigo desenvolvido por Meng *et al.* (2007), não se consideram as acelerações dos veículos. Porém, para fazer um estudo, mesmo que qualitativo, do consumo de combustível no

tráfego urbano, deve-se levar em consideração que os veículos consomem mais combustível em função das acelerações do que em situações onde trafegam em velocidades constantes. Assim, o caso base não levará em consideração as acelerações, para ficar de acordo com o artigo, mas serão realizados os cálculos do consumo de combustível para a motocicleta quando a mesma acelera, possibilitando comparações de resultados nos estudo de casos para os dois casos.

Tabela 5.3: Tempos e distâncias necessárias para acelerar a motocicleta

Variação de Velocidades [km/h]	Tempo [s]	Distância [m]
0 - 13,5	0,91	1,89
13,5 - 27	0,74	4,10
27 - 40,5	1,01	9,65
40,5 - 54	1,54	20,44

Os valores do consumo de combustível para acelerar a motocicleta de uma velocidade inicial para 99% da velocidade desejada são exibidos na tabela 5.4. Percebe-se na tabela 5.3 que o tempo para realizar essa aceleração, assim como a distância percorrida pela motocicleta, em alguns casos são maiores que 1 s e 3,75 m, respectivamente. Isto acarreta num problema para lançar os valores adicionais de consumo devido a aceleração da motocicleta no “MOD\_TRAF”, pois 1 s e 3,75 m são os parâmetros do passo de tempo e do tamanho da célula, respectivamente, utilizados no simulador. Logo, além do cálculo do consumo de combustível para a motocicleta sair de sua velocidade inicial e alcançar 99% da velocidade desejada, também será feito o cálculo considerando o consumo para o tempo de um segundo, conforme pode-se ver também na tabela 5.4, pois, ao fazer a análise do consumo adicional devido as acelerações, será utilizado o maior valor do consumo adicional entre esses dois casos. Esta regra visa aproximar o consumo de combustível para a motocicleta, considerando as suas acelerações, em relação as configurações utilizadas pelo simulador de tráfego “MOD\_TRAF”, e, mesmo que seja necessário mais que 3,75 m para acelerar a motocicleta, será considerado que a aceleração ocorreu neste espaço.

Tabela 5.4: Consumo de combustível para acelerar a motocicleta

Variação de Velocidades [km/h]	Consumo em 1s [l/s]x10 <sup>6</sup>	Consumo à 99%V <sub>des</sub> [l/s]x10 <sup>6</sup>
0 - 13,5	180,6	174,7
13,5 - 27	524,4	474,3
27 - 40,5	862,9	868,8
40,5 - 54	945,5	1.456,2

Onde:  $1.000([l/s] \times 10^6) = 32,34 \text{ kW}$  ( PCI = 44 MJ/kg ,  $\rho_{gas} = 0,735 \text{ kg/l}$  )

Assim, os consumos adicionais de combustível devido as acelerações da motocicleta são expostos na tabela 5.5.

Tabela 5.5: Consumo adicional de combustível para acelerar a motocicleta

Varição de Velocidades [km/h]	Adicional em 1s [l/s]x 10 <sup>6</sup>	Adicional à 99%V <sub>des</sub> [l/s]x 10 <sup>6</sup>	Adicional Máx(1s, 99%V <sub>des</sub> ) [l/s]x 10 <sup>6</sup>
0 - 13,5	116,9	110,9	116,9
13,5 - 27	333,9	283,9	333,9
27 - 40,5	535,9	541,7	541,7
40,5 - 54	504,7	1015,4	1015,4

Onde:  $1.000(l/s \times 10^6) = 32,34 \text{ kW}$  ( PCI = 44 MJ/kg ,  $\rho_{gas} = 0,735 \text{ kg/l}$  )

Realizando-se uma análise similar para o automóvel, na tabela 5.6 são exibidos os valores dos consumos de combustível para velocidades constantes.

Tabela 5.6: Valores calculados pelo “MOD\_VEIC” para velocidades constantes do automóvel

Vel.[km/h]	Pot. do motor[kW]	$\eta_{motor}$ [%]	Consumo [l/s]x10 <sup>6</sup>	sfc[g/kWh]	Autonomia[km/l]
0	4,23	22%	584,0	365,3	-
13,5	0,80	8%	309,4	1021,8	12,1
27	1,72	8%	648,9	1000,9	11,6
40,5	2,86	10%	915,2	847,8	12,3
54	4,34	10%	1347,6	822,2	11,1
67,5	6,27	11%	1831,1	772,7	10,2
81	8,77	13%	2064,1	622,8	10,9
94,5	11,95	15%	2543,7	563,3	10,3
108	15,92	18%	2685,5	446,3	11,2
121,5	20,80	21%	3132,1	398,5	10,8
135	26,70	26%	3172,0	314,4	11,8

Onde: 1 CV = 0,735 kW

O cálculo do rendimento do motor e do consumo de combustível para o automóvel é similar ao utilizado pela motocicleta, e a potência do motor do automóvel, quando este se move à velocidade constante, também será igual as potências resistivas ao seu movimento. A tabela 5.7 mostra as potências resistivas ao movimento do automóvel para as velocidades constantes que serão utilizadas no simulador “MOD\_TRAF”.

Tabela 5.7: Potências resistivas ao movimento do automóvel para velocidades constantes

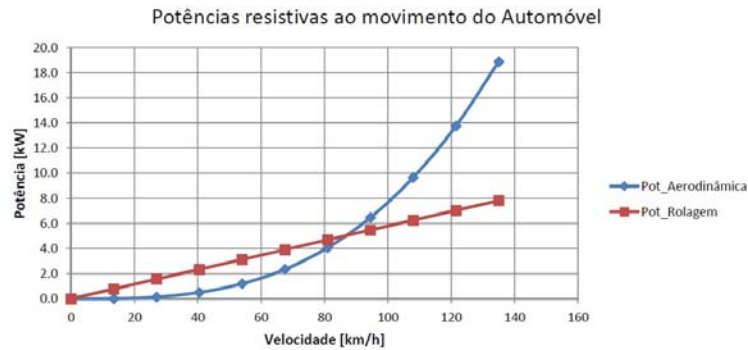
Vel.[km/h]	Pot. Inercial [kW]	Pot. Aerodinâmica [kW]	Pot. Rolagem [kW]	Pot. Gravitacional [kW]
13,5	0	0,02	0,78	0
27	0	0,16	1,56	0
40,5	0	0,51	2,35	0
54	0	1,21	3,13	0
67,5	0	2,36	3,91	0
81	0	4,08	4,69	0
94,5	0	6,48	5,48	0
108	0	9,66	6,26	0
121,5	0	13,76	7,04	0
135	0	18,87	7,83	0

Onde: 1 CV = 0,735 kW



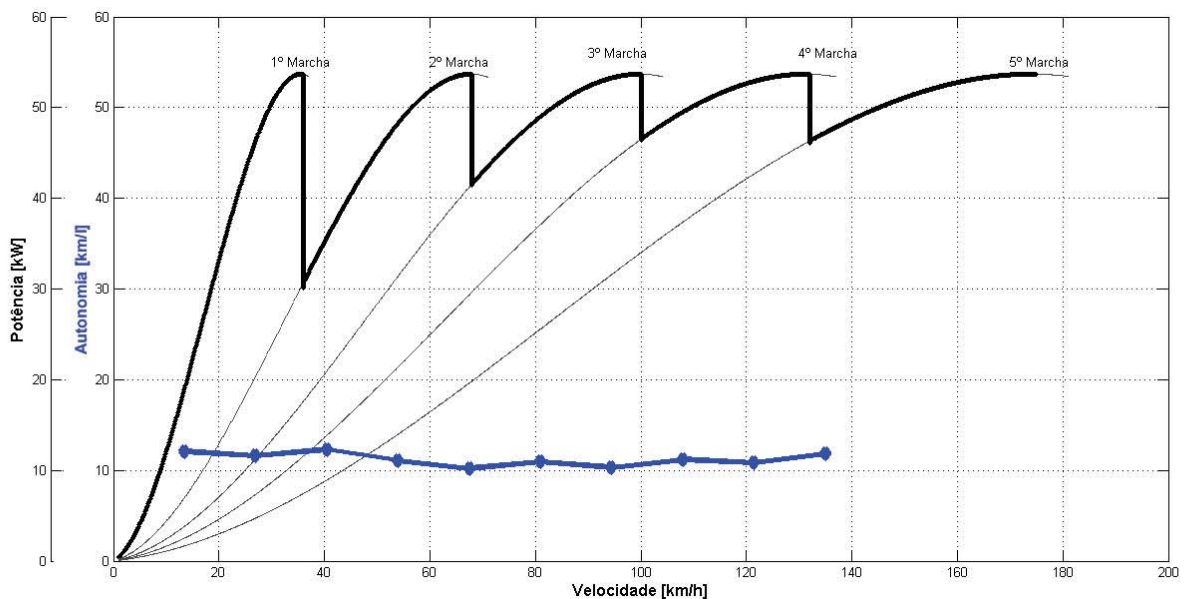
Pode-se ver na figura 5.10 a relação entre as potências resistivas para o movimento do automóvel em função das velocidades utilizadas pelo “MOD\_TRAF”. Nota-se que para a velocidade até 80 *km/h*, a potência de rolagem é maior que a potência aerodinâmica, porém para velocidades superiores, o crescimento cúbico da potência aerodinâmica a faz superar o valor da potência de rolagem e se distanciar bastante desse.

Figura 5.10: Potências resistivas ao movimento do automóvel.



A figura 5.11 mostra a autonomia do automóvel em função de sua velocidade. A autonomia do automóvel oscila principalmente em função da regra para trocas de marchas empregada considerando que o motorista não tem conhecimento da curva do motor e a troca de marchas é realizada em determinados pontos, em função da rotação do motor, conforme foi explicado no capítulo da metodologia.

Figura 5.11: Autonomia do automóvel em função de sua velocidade.



Assim como foi desenvolvido para a motocicleta, tem-se na tabela 5.8 os valores dos tempos e distâncias necessárias para acelerar o automóvel.

Tabela 5.8: Tempos e distâncias necessárias para acelerar o automóvel

Varição de Velocidades [km/h]	Tempo [s]	Distância [m]
0 - 13,5	0,91	1,85
13,5 - 27	0,70	3,89
27 - 40,5	0,94	9,13
40,5 - 54	1,33	17,48
54 - 67,5	1,43	24,16
67,5 - 81	2,13	44,02
81 - 94,5	2,33	56,92
94,5 - 108	3,09	87,22
108 - 121,5	3,80	121,13
121,5 - 135	5,20	186,15

Tem-se na tabela 5.9, os valores dos consumos de combustível para as acelerações do automóvel.

Tabela 5.9: Consumo de combustível para acelerar o automóvel

Varição de Velocidades [km/h]	Consumo em 1s [l/s] $\times 10^6$	Consumo à 99% $V_{des}$ [l/s] $\times 10^6$
0-13,5	1.036,9	1.009,2
13,5-27	2.867,1	2.673,3
27-40,5	4.624,1	4.572,5
40,5-54	4.891,9	6.524,0
54-67,5	6.098,2	8.715,8
67,5-81	5.277,7	11.261,9
81-94,5	6.043,8	14.101,9
94,5-108	5.844,1	18.055,2
108-121,5	6.029,9	22.892,5
121,5-135	6.008,6	31.237,4

Onde:  $1.000([l/s] \times 10^6) = 32,34 \text{ kW}$  (  $PCI = 44 \text{ MJ/kg}$  ,  $\rho_{gas} = 0,735 \text{ kg/l}$  )

Assim, os consumos adicionais de combustível devido as acelerações do automóvel são expostos na tabela 5.10.

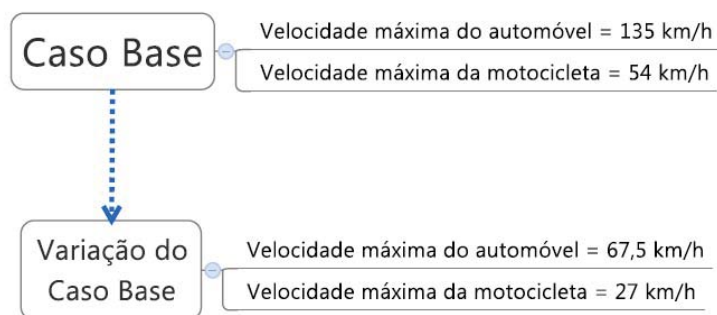
Tabela 5.10: Consumo adicional de combustível para acelerar o automóvel

Varição de Velocidades [km/h]	Adicional em 1s [l/s]x 10 <sup>6</sup>	Adicional à 99%V <sub>des</sub> [l/s]x 10 <sup>6</sup>	Adicional Máx(1s, 99%V <sub>des</sub> ) [l/s]x 10 <sup>6</sup>
0-13,5	727,5	699,8	727,5
13,5-27	2.218,3	2.024,4	2.218,3
27-40,5	3.708,8	3.657,3	3.708,8
40,5-54	3.544,3	5.176,4	5.176,4
54-67,5	4.267,1	6.884,7	6.884,7
67,5-81	3.213,6	9.197,8	9.197,8
81-94,5	3.500,1	11.558,2	11.558,2
94,5-108	3.158,6	15.369,8	15.369,8
108-121,5	2.897,8	19.760,5	19.760,5
121,5-135	2.836,7	28.065,4	28.065,4

Onde:  $1.000([l/s] \times 10^6) = 32,34 \text{ kW}$  ( PCI = 44 MJ/kg ,  $\rho_{gas} = 0,735 \text{ kg/l}$  )

Os valores calculados para as autonomias dos veículos pelo “MOD\_VEIC” estão de acordo com os valores encontrados na literatura para esses veículos. Na tese, por exemplo, desenvolvida por Schmitt (2010) são expostos valores de autonomias baseados em estudos do CENPES para automóveis com motor 1.0 flex que trafega em ciclo urbano, apresentando valor da autonomia é igual a 13,6 km/l, porém não é especificado à qual velocidade se encontra o automóvel neste caso.

Figura 5.12: Variação do Caso Base.



As velocidades máximas encontradas no caso base desse trabalho são bem maiores do que aquelas encontradas no tráfego urbano real. Assim, realizando uma análise no “MOD\_VEIC” para as velocidades do caso base reduzidas à metade, ou seja, calculando o consumo de combustível para os automóveis trafegando com velocidades máximas iguais à 67,5 km/h e para as motocicletas com velocidades máximas iguais à 27 km/h, conforme pode-se ver no esquema 5.12, têm-se os resultados expostos a seguir, tanto para o caso que consideram as velocidades constantes, como para os casos que consideram as acelerações dos veículos, assim como foi realizado anteriormente.

Na tabela 5.11 tem-se o consumo de combustível calculado pelo “MOD\_VEIC” para a

motocicleta trafegando com velocidade máxima igual a  $27 \text{ km/h}$ .

Tabela 5.11: Valores calculados pelo “MOD\_VEIC” para redução pela metade das velocidades do caso base para a motocicleta

Vel.[km/h]	Pot. do motor[kW]	$\eta_{motor}$ [%]	Consumo [l/s] $\times 10^6$	sfc[g/kWh]	Autonomia[km/l]
0	0,8	23%	110,8	357,7	-
6,75	0,07	8%	27,8	1.014,4	67,3
13,5	0,17	8%	63,8	967,8	58,8
20,25	0,33	9%	115,9	917,2	48,5
27	0,58	9%	190,5	866,2	39,4

Onde:  $1 \text{ CV} = 0,735 \text{ kW}$

Da mesma forma que foram calculados os consumos para as velocidades do caso base, com as velocidades da motocicleta reduzidas pela metade será utilizada a mesma equação 5.1. Lembrando que a potência do motor para cada velocidade constante é igual a soma das respectivas potências resistivas ao seu movimento, conforme mostra a tabela 5.12 para este caso.

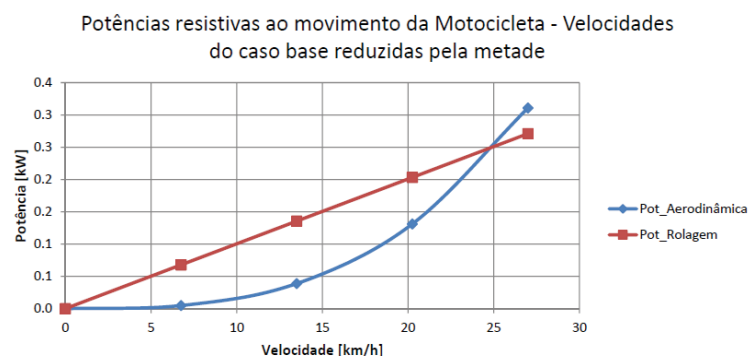
Tabela 5.12: Potências resistivas ao movimento da motocicleta para velocidades do caso base reduzidas pela metade

Vel.[km/h]	Pot. Inercial [kW]	Pot. Aerodinâmica [kW]	Pot. Rolagem [kW]	Pot. Gravitacional [kW]
6,75	0	0,005	0,068	0
13,5	0	0,039	0,136	0
20,25	0	0,131	0,203	0
27	0	0,311	0,271	0

Onde:  $1 \text{ CV} = 0,735 \text{ kW}$

Pode-se ver na figura 5.13 a relação entre as potências resistivas quando se consideram as velocidades do caso base reduzidas pela metade. Devido aos baixos valores das velocidades desenvolvidas, o principal elemento resistivo ao movimento da motocicleta neste caso é a força de rolamento. Pode-se enquadrar a motocicleta nesta situação como uma bicicleta para efeito geral de análise do tráfego.

Figura 5.13: Potências resistivas ao movimento da motocicleta para redução pela metade das velocidades do caso base.



Os consumos de combustível para acelerar a motocicleta considerando-se as velocidades do caso base reduzidas pela metade são expostos na tabela 5.13.

Tabela 5.13: Consumo de combustível para acelerar a motocicleta com velocidades do caso base reduzidas pela metade

Varição de Velocidades [km/h]	Consumo em 1s [l/s]x10 <sup>6</sup>	Consumo à 99%V <sub>des</sub> [l/s]x10 <sup>6</sup>
0-6,75	64,1	47,4
6,75-13,5	157,9	126,4
13,5-20,25	269,4	197,9
20,25-27	399,8	276,9

Onde:  $1.000([l/s] \times 10^6) = 32,34 \text{ kW}$  ( PCI = 44 MJ/kg ,  $\rho_{gas} = 0,735 \text{ kg/l}$  )

Assim, os consumos adicionais de combustível devido as acelerações da motocicleta quando se considera a redução pela metade das velocidades utilizadas no caso base são expostos na tabela 5.14.

Tabela 5.14: Consumo adicional de combustível para acelerar a motocicleta para redução pela metade das velocidades do caso base

Varição de Velocidades [km/h]	Adicional em 1s [l/s]x 10 <sup>6</sup>	Adicional à 99%V <sub>des</sub> [l/s]x 10 <sup>6</sup>	Adicional Máx(1s,99%V <sub>des</sub> ) [l/s]x 10 <sup>6</sup>
0-6,75	36,3	19,5	36,3
6,75-13,5	94,1	62,6	94,1
13,5-20,25	153,5	81,9	153,5
20,25-27	209,3	86,4	209,3

Onde:  $1.000([l/s] \times 10^6) = 32,34 \text{ kW}$  ( PCI = 44 MJ/kg ,  $\rho_{gas} = 0,735 \text{ kg/l}$  )

Realizando-se uma análise similar para o automóvel, com a redução pela metade das velocidades utilizadas para ele no caso base, na tabela 5.15 são exibidos os valores dos consumos de combustível.

Tabela 5.15: Valores calculados pelo “MOD\_VEIC” para redução pela metade das velocidades do caso base para o automóvel

Vel.[km/h]	Pot. do motor[kW]	$\eta_{motor}$ [%]	Consumo [l/s]x10 <sup>6</sup>	sfc[g/kWh]	Autonomia[km/l]
0	4,2	22%	584,0	365,3	-
6,75	0,39	8%	156,1	1.049,9	12,01
13,5	0,80	8%	309,4	1.021,8	12,12
20,25	1,24	8%	468,9	1.002,9	12,00
27	1,72	8%	648,9	1.000,9	11,56
33,75	2,25	8%	853,9	1.004,0	10,98
40,5	2,86	10%	915,2	847,85	12,29
47,25	3,55	10%	1.121,2	836,44	11,71
54	4,34	10%	1.347,6	822,20	11,13
60,75	5,24	10%	1.588,9	802,37	10,62
67,5	6,27	11%	1.831,1	772,71	10,24

Onde: 1 CV = 0,735 kW

A tabela 5.16 mostra as potências resistivas ao movimento do automóvel para as velocidades reduzidas pela metade do caso base.

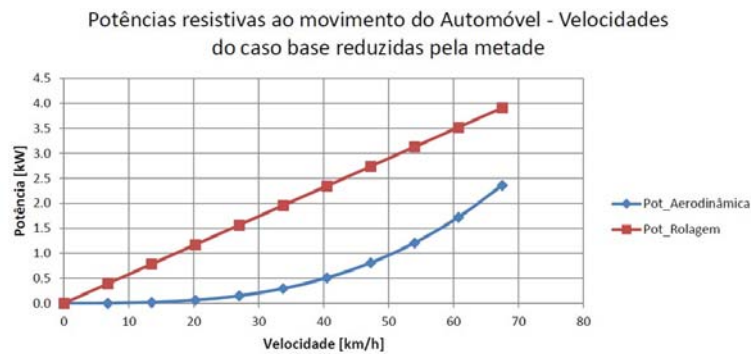
Tabela 5.16: Potências resistivas ao movimento do automóvel para as velocidades do caso base reduzidas pela metade

Vel.[km/h]	Pot. Inercial [kW]	Pot. Aerodinâmica [kW]	Pot. Rolagem [kW]	Pot. Gravitacional [kW]
6,75	0	0	0,39	0
13,5	0	0,02	0,78	0
20,25	0	0,06	1,17	0
27	0	0,15	1,56	0
33,75	0	0,29	1,96	0
40,5	0	0,51	2,35	0
47,25	0	0,81	2,74	0
54	0	1,21	3,13	0
60,75	0	1,72	3,52	0
67,5	0	2,36	3,91	0

Onde: 1 CV = 0,735 kW

Pode-se ver na figura 5.14 a relação entre as potências resistivas quando se consideram as velocidades do caso base reduzidas pela metade para o automóvel.

Figura 5.14: Potências resistivas ao movimento do automóvel para redução pela metade das velocidades do caso base.



Tem-se na tabela 5.17, os valores dos consumos de combustível para as acelerações do automóvel considerando-se as velocidades que foram utilizadas no caso base para o automóvel reduzidas pela metade.

Tabela 5.17: Consumo de combustível para acelerar o automóvel com as velocidades do caso base reduzidas pela metade

Varição de Velocidades [km/h]	Consumo em 1s [l/s]x10 <sup>6</sup>	Consumo à 99%V <sub>des</sub> [l/s]x10 <sup>6</sup>
0-6,75	365,3	275,2
6,75-13,5	887,5	728,2
13,5-20,25	1.424,2	1.127,9
20,25-27	1.979,5	1.546,7
27-33,75	2.583,7	2.022,2
33,75-40,5	2.913,4	2.551,2
40,5-47,25	3.390,4	3.017,7
47,25-54	3.958,8	3.509,0
54-60,75	4.546,4	4.052,0
60,75-67,5	5.140,2	4.666,0

Onde:  $1.000([l/s] \times 10^6) = 32,34 \text{ kW}$  ( PCI = 44 MJ/kg ,  $\rho_{gas} = 0,735 \text{ kg/l}$  )

Assim, os consumos adicionais de combustível devido as acelerações do automóvel para este caso são expostos na tabela 5.18.

Tabela 5.18: Consumo adicional de combustível para acelerar o automóvel para as velocidades do caso base reduzidas pela metade

Varição de Velocidades [km/h]	Adicional em 1s [l/s]x 10 <sup>6</sup>	Adicional à 99%V <sub>des</sub> [l/s]x 10 <sup>6</sup>	Adicional Máx(1s, 99%V <sub>des</sub> ) [l/s]x 10 <sup>6</sup>
0-6,75	209,2	119,12	209,2
6,75-13,5	578,2	418,86	578,2
13,5-20,25	955,4	659,06	955,4
20,25-27	1.330,6	897,83	1.330,6
27-33,75	1.729,8	1.168,27	1.729,8
33,75-40,5	1.998,2	1.635,99	1.998,2
40,5-47,25	2.269,2	1.896,47	2.269,2
47,25-54	2.611,2	2.161,39	2.611,2
54-60,75	2.957,5	2.463,09	2.957,5
60,75-67,5	3.309,1	2.834,86	3.309,1

Onde:  $1.000([l/s] \times 10^6) = 32,34 \text{ kW}$  ( PCI = 44 MJ/kg ,  $\rho_{gas} = 0,735 \text{ kg/l}$  )

## 6 ESTUDO DE CASOS

Nesse capítulo são realizados estudo de casos para avaliar o fluxo em uma via, o consumo de combustível, a emissão de dióxido de carbono dos veículos e o custo associado ao tempo que se perde quando se está num engarrafamento de um tráfego composto por automóveis e motocicletas, simulando uma via urbana de uma grande cidade brasileira.

### 6.1 Análise do fluxo de veículos e passageiros

Com os resultados gerados pelo “MOD\_TRAF”, foram criados outros gráficos para auxiliar no entendimento do comportamento de motocicletas e automóveis trafegando em uma via sob regras específicas. Como um dos objetivos deste trabalho é analisar o fluxo de uma via com tráfego misto, primeiramente foi avaliada a situação onde o automóvel e a motocicleta transportam, respectivamente, apenas o condutor.

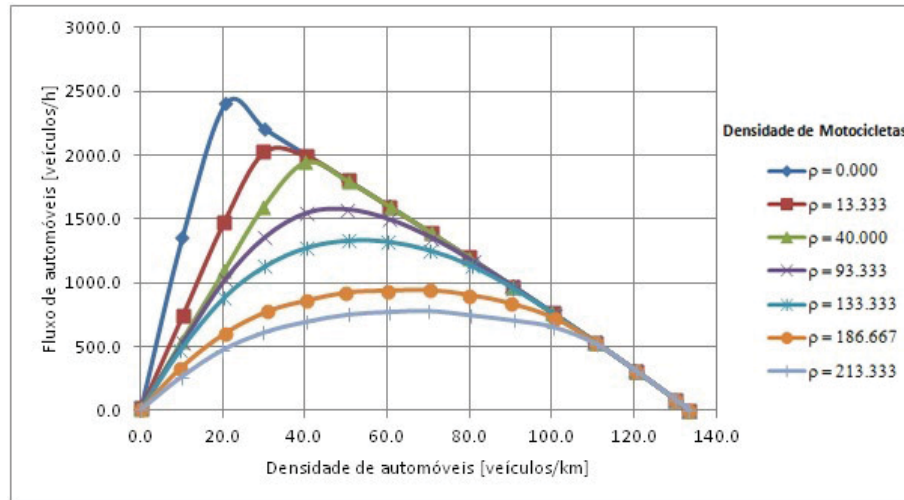
A figura 6.1 mostra a relação do fluxo de automóveis em função do aumento de sua densidade para cada configuração da densidade de motocicletas na via. Pode-se ver que, para a densidade de motocicletas igual a zero, ou seja, considerando o modelo original de Nagel e Schreckenberg, o fluxo de automóveis aumenta até o valor da densidade de automóveis próximo de 20 automóveis por quilômetro, atingindo o seu valor máximo, e depois diminui em função do aumento da densidade de automóveis, atingindo o valor igual a zero quando a densidade de automóveis é igual a 133,333.

Quando se considera a presença de motocicletas, percebe-se na figura 6.1 que com o aumento da densidade de motocicletas tem-se um menor fluxo de automóveis. Ou seja, quão maior for a densidade de motocicletas, mais motocicletas ocuparão a pista onde os automóveis trafegam, e isto contribuirá juntamente com o aumento da densidade de automóveis para que o fluxo de automóveis diminua.

Na figura 6.1, procura-se entender a influência das motocicletas para o fluxo de automóveis e percebe-se que pelo fato dos carros compartilharem a sua pista com as motocicletas, os mesmos reduzem o seu fluxo, o que sugere que as motocicletas trafeguem em pistas isoladas para que o fluxo de automóveis não sofra influência das mesmas. Porém, pode ser que o fluxo total de veículos piore para determinadas densidades de veículos.

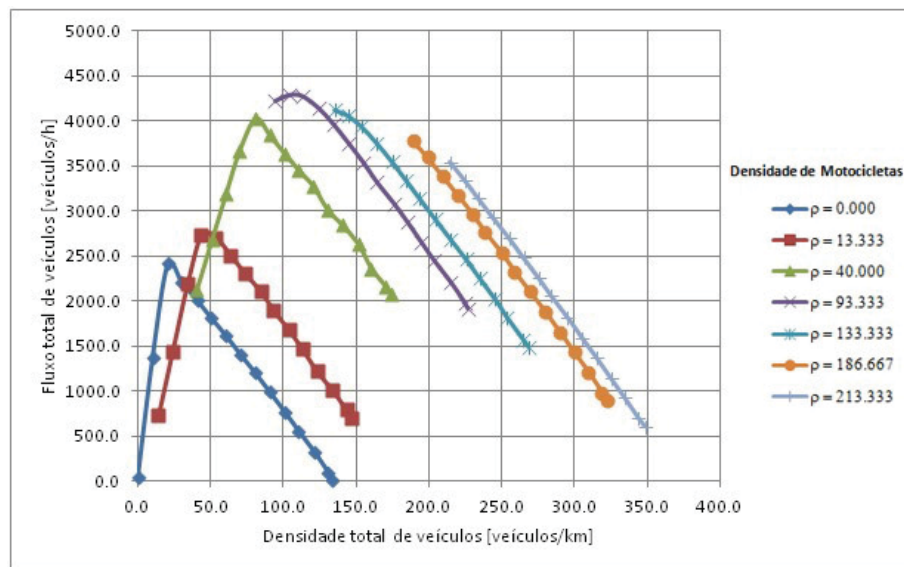


Figura 6.1: Análise do fluxo da via do ponto de vista dos automóveis.



Analisando o fluxo da via não do ponto de vista do fluxo de automóveis mas do fluxo total de veículos, tem-se, na figura 6.2, a relação do fluxo total de veículos em função do aumento da densidade de veículos na via para cada composição das densidades de motocicletas.

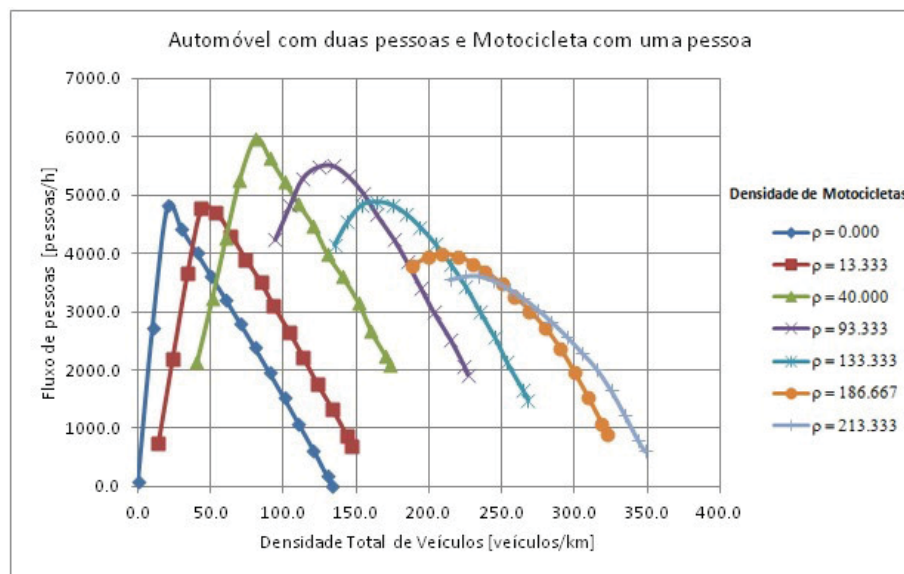
Figura 6.2: Análise do fluxo total de veículos da via.



Na figura 6.2, nota-se que com o aumento das motocicletas na via, o fluxo total de veículos, até certo ponto, também aumenta, tendo o seu valor máximo para a densidade total de veículos igual a 105, onde destes, 93.333 são de motocicletas. Apesar das motocicletas atrapalharem o fluxo de automóveis em decorrência do aumento de veículos na via, assim como pelo fato delas trocarem de pista, por outro lado, elas também contribuem para o fluxo total de veículos. Se for feita uma análise do fluxo em função das pessoas transportadas por esses veículos, fica evidente que a composição do trânsito misto entre automóveis e motocicletas é im-

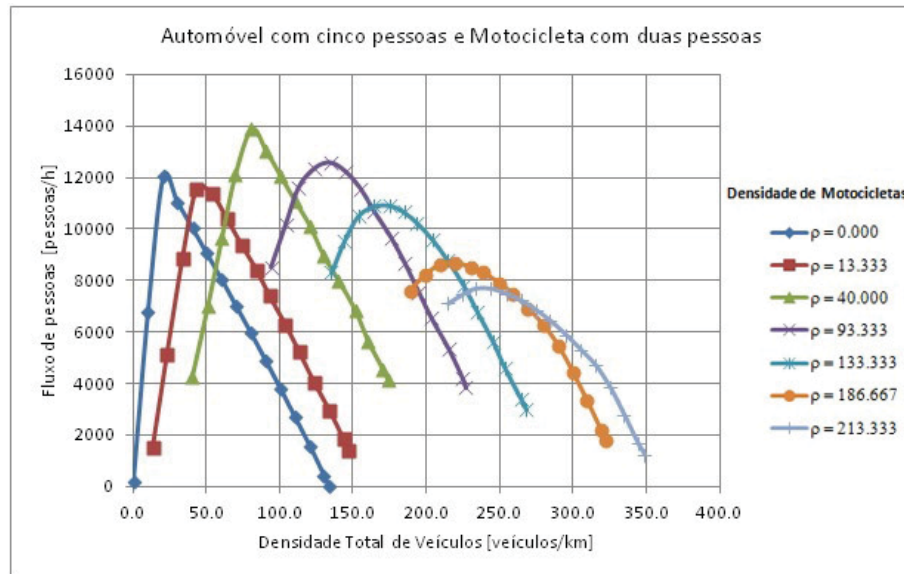
portante para o aumento do fluxo de pessoas. Porém, neste caso, deve-se levar em consideração a capacidade de transporte de cada veículo e o seu grau de utilização, ou seja, considerando-se que tanto o automóvel como a motocicleta só transportem o condutor, é necessário que se tenha mais motocicletas do que automóveis na via, cerca de 90 % de motocicletas e 10 % de automóveis, para que se atinja o valor máximo de fluxo. Mas, se o automóvel transportar duas pessoas e a motocicleta apenas uma, o cenário muda, pois utilizando melhor a capacidade de transportar pessoas do automóvel, são necessárias menos motocicletas na via para se alcançar o valor máximo de fluxo, cerca de 50 % de motocicletas, conforme pode-se ver na figura 6.3.

Figura 6.3: Análise do fluxo de pessoas com o automóvel transportando duas pessoas e a motocicleta uma.



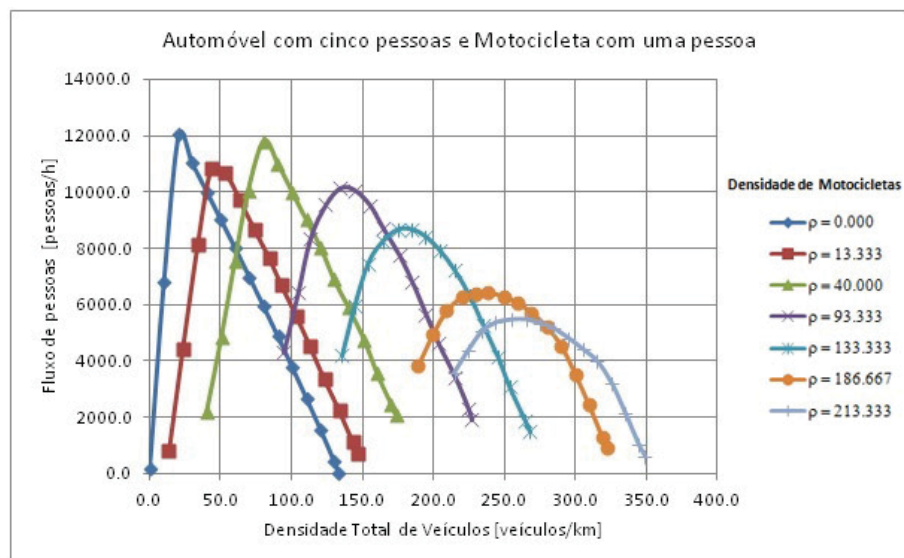
Se for considerada a capacidade de transporte máxima dos veículos, ou seja, o automóvel com cinco pessoas e a motocicleta com duas, o fluxo máximo de pessoas transportadas mudará, mas a proporção entre os veículos para se alcançar o valor de fluxo máximo de pessoas irá se manter em 50 % de motocicletas na via, conforme pode-se ver na figura 6.4. Logo, as motocicletas são necessárias para se alcançar o valor máximo de fluxo de pessoas. Para esta configuração, as motocicletas aumentam o fluxo máximo de pessoas em cerca de 15 % em comparação com o fluxo somente de automóveis.

Figura 6.4: Análise do fluxo de pessoas com o automóvel transportando cinco pessoas e a motocicleta duas.



Mesmo considerando uma situação extrema, onde se pode supor que o automóvel transporte cinco pessoas e a motocicleta apenas uma, a relação de 50% de motocicletas em relação aos veículos totais da via, apresenta resultado de mobilidade muito próximo do valor considerando apenas automóveis trafegando, como mostra a figura 6.5. Ou seja, nesta configuração, com 50% dos veículos sendo motocicletas, consegue-se 98% do valor máximo do fluxo de pessoas para somente automóveis trafegando. Porém, provavelmente, esta configuração apresente maior custo e emissão de  $CO_2$ , situação que será investigada nas próximas seções.

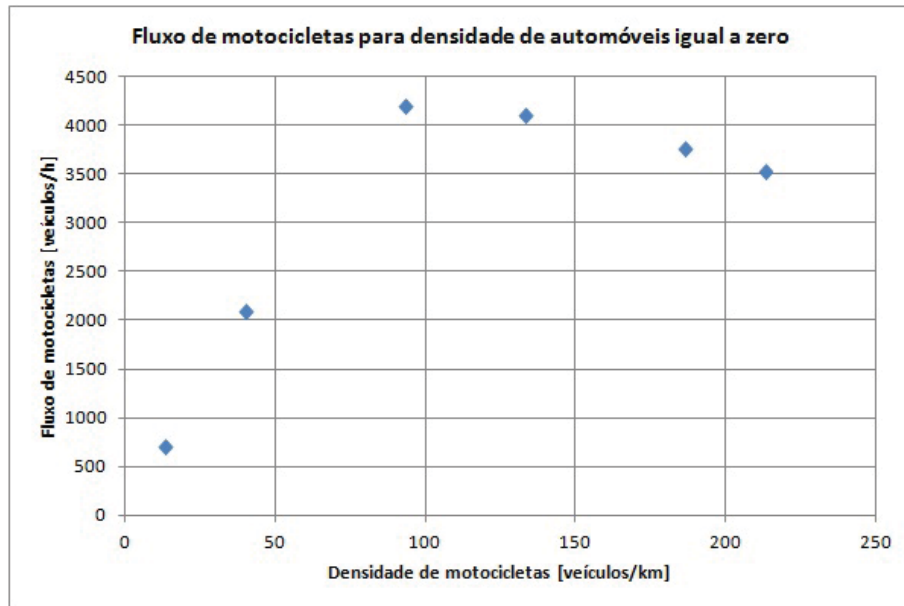
Figura 6.5: Análise do fluxo de pessoas com o automóvel transportando cinco pessoas e a motocicleta uma.



A figura 6.6 mostra o fluxo de motocicletas em função do aumento de sua densidade

para a situação onde a densidade de automóveis é igual a zero, ou seja, para a via somente com motocicletas trafegando.

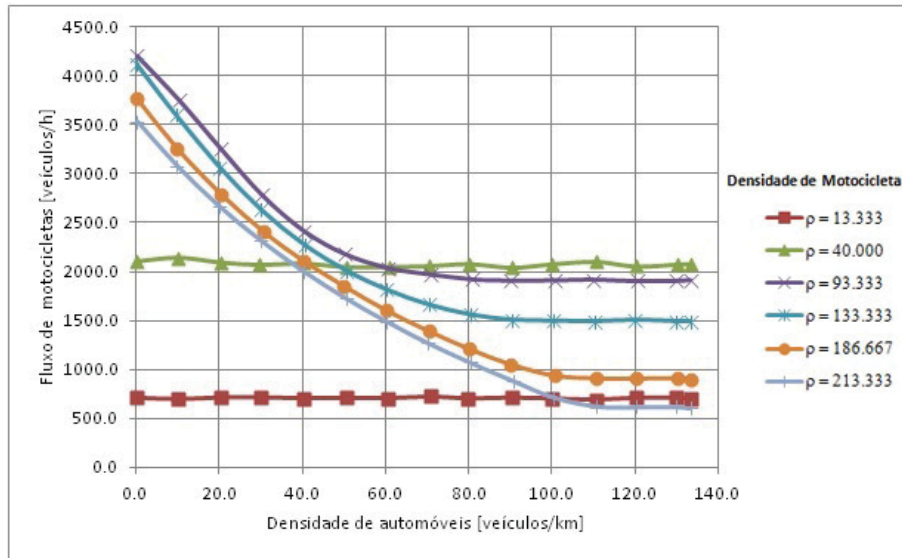
Figura 6.6: Fluxo de motocicletas para densidade de automóveis igual a zero.



Quando se analisa o fluxo do ponto de vista das motocicletas, percebe-se, conforme mostra a figura 6.7, que, em situações com poucas motocicletas, os automóveis não influenciam no seu fluxo, ou seja, em situações com densidade inferior a 40 motocicletas por quilômetro, independente da densidade de automóveis, o valor do fluxo de motocicletas praticamente não se altera. Para os casos onde a densidade de motocicletas é maior que 40, com a densidade de automóveis fixada num valor pequeno, percebe-se que as motocicletas por si só se atrapalham em função do aumento da sua densidade, acarretando em fluxos menores dado este aumento.

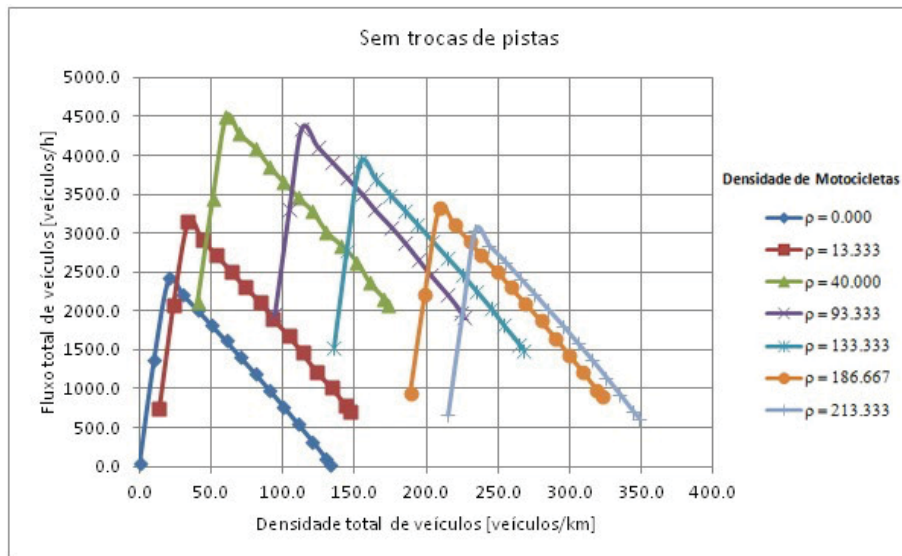
Assim como acontece para as baixas densidades de motocicletas, chega-se num ponto em que os automóveis não influenciam mais no fluxo das motocicletas, independente do valor da densidade de automóveis. Antes deste ponto, os automóveis influenciam no fluxo das motocicletas, conforme pode-se ver na figura 6.7. Nota-se que para densidades de automóveis superiores a 110, o fluxo de motocicletas praticamente não se altera, independente da densidade de motocicletas na via.

Figura 6.7: Análise do fluxo da via do ponto de vista das motocicletas.



Conclui-se assim que a troca de pistas das motocicletas afeta o fluxo dos automóveis. Assim, realizando uma análise do fluxo sem considerar as trocas de pistas por parte das motocicletas, tem-se na figura 6.8 a relação do fluxo total de veículos da via com pistas exclusivas para automóveis e motocicletas.

Figura 6.8: Análise do fluxo total de veículos da via sem trocas de pistas.



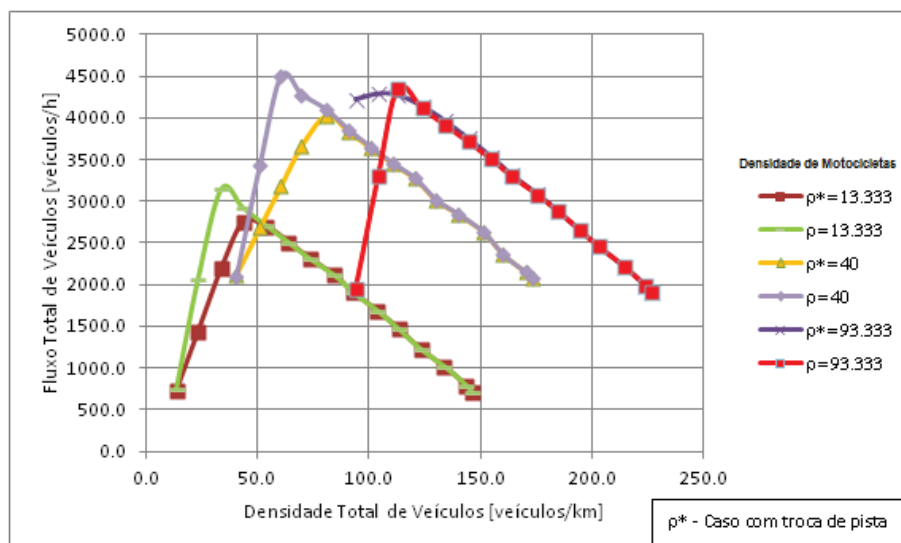
Quando não se consideram as trocas de pista, o fluxo total de veículos aumenta para baixas densidades de motocicletas, com valores inferiores a 93,333, conforme mostra a figura 6.8 e pode-se comparar seus valores com a figura 6.2. Nesta situação, como nem o automóvel interfere no fluxo da motocicleta e nem a motocicleta interfere no fluxo do automóvel, são os veículos de sua pista os responsáveis pelas reduções dos respectivos fluxos. Porém, para valores

acima de 93,333 da densidade de motocicletas, devido ao fato delas não trocarem de pista, têm-se valores inferiores para o fluxo total de veículos quando se compara com o caso que contempla mudanças de pista. Neste caso, o que chama a atenção é que, quando se tem a troca de pista, a relação que apresenta maior fluxo total de veículos é a que tem cerca de 90% dos veículos sendo motocicletas. Porém, agora com o fato das motocicletas não trocarem de pista, o maior fluxo de veículos acontece quando se tem 67% dos veículos na pista sendo motocicletas, considerando que tanto o automóvel como a motocicleta transportam apenas seu condutor. O que leva a acreditar que seria melhor ter pistas exclusivas para automóveis e motocicletas, porém, quando se aumenta a densidade de motocicletas para valores acima de 93,333, o fluxo total de veículos cai de 5 a 14 % em função do aumento da densidade de motocicletas na via.

O uso de faixas exclusivas para motocicletas em São Paulo apresentou um índice de acidentes elevado, não evidenciando um aumento na segurança dos motociclistas, segundo dados da CETSP (2011). Segundo os dados estatísticos, houve um aumento de 152% na quantidade de acidentes com vítima compreendendo motocicletas na região com motofaixas. Porém, ressaltasse que grande parte dos acidentes tiveram dois principais motivos: pedestres que atravessaram fora da faixa ou motoristas que realizaram conversões proibidas.

Sobrepondo-se os dados para as densidades das motocicletas iguais a 13,333 ,40 e 93,333, das figuras 6.8 e 6.2, gera-se a figura 6.9, permitindo-se analisar com mais detalhes as diferenças de fluxos totais citados. Os itens na legenda com asterisco são para os casos onde as motocicletas realizaram trocas de pista.

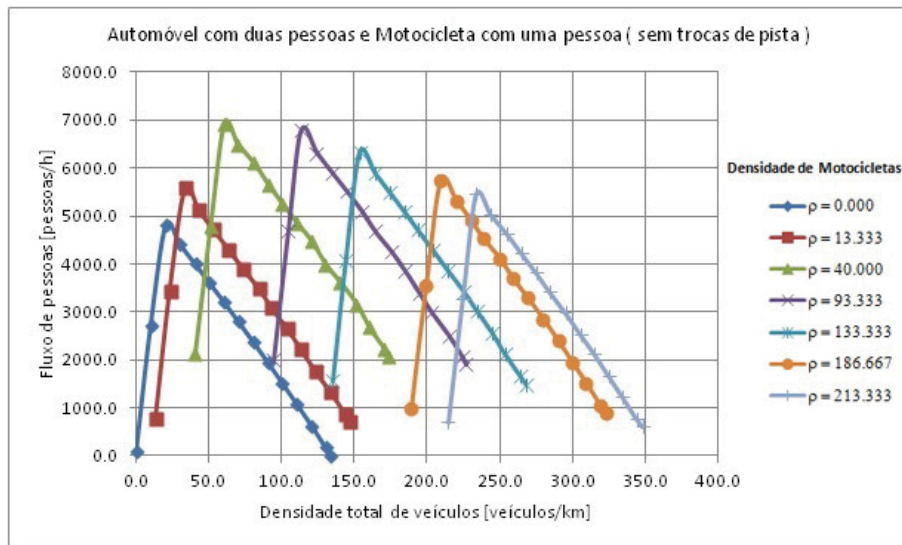
Figura 6.9: Comparação do fluxo total de veículos da via para situação com e sem trocas de pistas.



No tráfego real, encontra-se um número elevado de motocicletas na via e tanto as motocicletas como os automóveis trocam de pista, porém no “MOD\_TRAF” somente as motocicletas podem trocar de pista. O intuito de limitar o movimento de troca de pista para o automóvel é

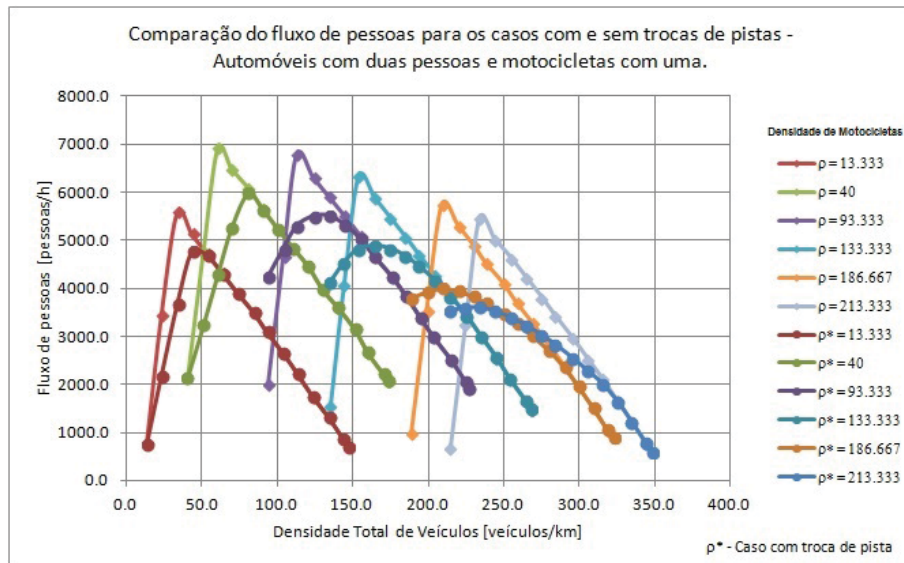
justamente para analisar a influência da troca de pistas das motocicletas no tráfego misto composto por esses veículos. É necessário analisar para qual situação a não troca de pista configurará como melhor opção para se obter o maior fluxo de pessoas na via. Assim, a figura 6.10 mostra o gráfico do fluxo total de veículos em função da densidade total considerando que os veículos não trocam de pista e o automóvel transporta duas pessoas e a motocicleta transporta apenas uma.

Figura 6.10: Análise do fluxo de pessoas com o automóvel transportando duas pessoas e a motocicleta uma, sem trocas de pista.



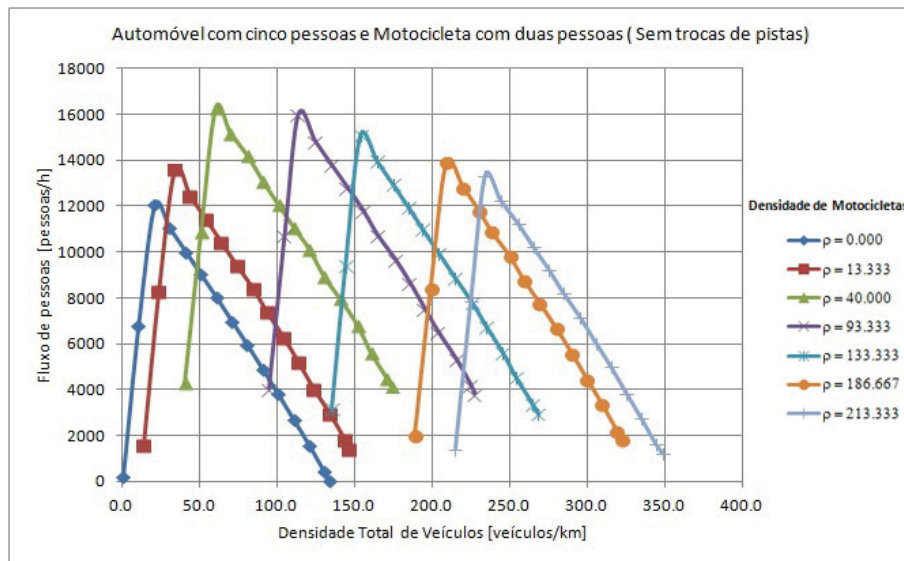
A figura 6.10 mostra que para todos os casos de densidades, quando não se tem troca de pistas, o automóvel transportando duas pessoas e a motocicleta transportando apenas uma, tem-se sempre o valor do fluxo total de veículos maior em relação a situação com troca de pistas. Comparando-se os valores do fluxo de pessoas do gráfico 6.3 com os valores do gráfico 6.10, pode-se ver no gráfico 6.11 a diferença para o fluxo de pessoas onde o automóvel transporta duas pessoas e a motocicleta apenas uma, para as situações com e sem trocas de pistas.

Figura 6.11: Comparação do fluxo de pessoas com o automóvel transportando duas pessoas e a motocicleta uma, com e sem trocas de pista.



Quando se faz a análise para uma situação onde o automóvel transporta cinco pessoas e a motocicleta transporta duas, condição ótima de uso da capacidade de transporte de cada veículo, e não considerando as trocas de pistas, pela figura 6.12 pode-se ver que a troca de pista é dispensável para se ter o maior fluxo de pessoas, porém esta condição é pouco comum no tráfego urbano real.

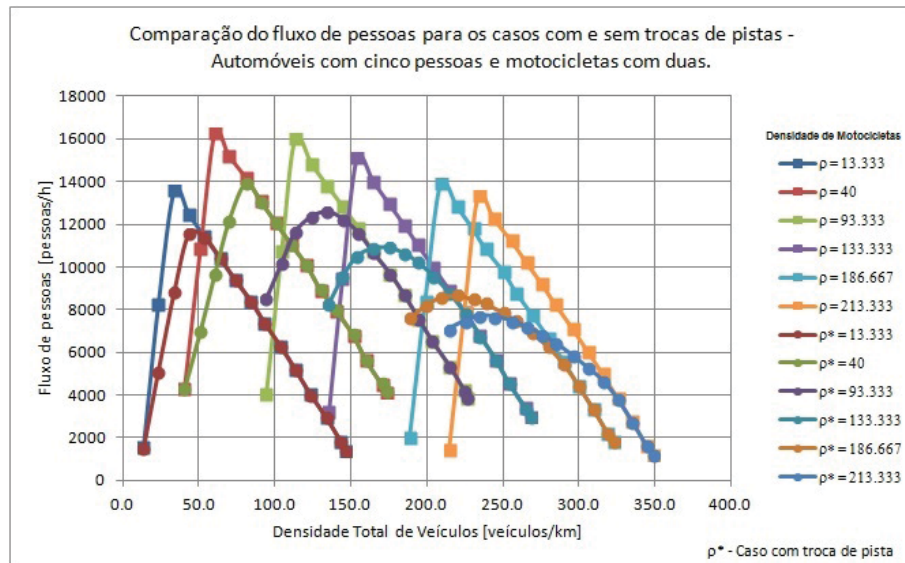
Figura 6.12: Análise do fluxo de pessoas com o automóvel transportando cinco pessoas e a motocicleta duas, sem trocas de pista.



Comparando-se agora os valores do fluxo de pessoas do gráfico 6.5 com os valores do gráfico 6.12, pode-se ver no gráfico 6.13 a diferença para o fluxo de pessoas onde o automóvel transporta cinco pessoas e a motocicleta duas, para as situações com e sem trocas de pistas.



Figura 6.13: Comparação do fluxo de pessoas com o automóvel transportando cinco pessoas e a motocicleta duas, com e sem trocas de pista.



Percebe-se que, para o modelo utilizado no simulador “MOD\_TRAF”, se tanto os automóveis como as motocicletas trafegarem em pistas exclusivas com suas capacidades de transportar pessoas utilizadas por completo, sempre se terá a melhor configuração de fluxo de pessoas para a via.

Em alguns lugares do mundo, como acontece nos Estados Unidos, existem pistas exclusivas para automóveis com mais de dois passageiros, chamadas de HOV - High Occupancy Vehicle, que permite que automóveis trafeguem em pista exclusiva nos horários de pico. Estas pistas utilizam para sua sinalização um losango e o número de pessoas necessárias para que o veículo possa trafegar em determinados horários, conforme pode-se ver na figura 6.14, e nos horários de menor movimento, estas pistas ficam liberadas para quaisquer veículos. (WSDOT, 2014)

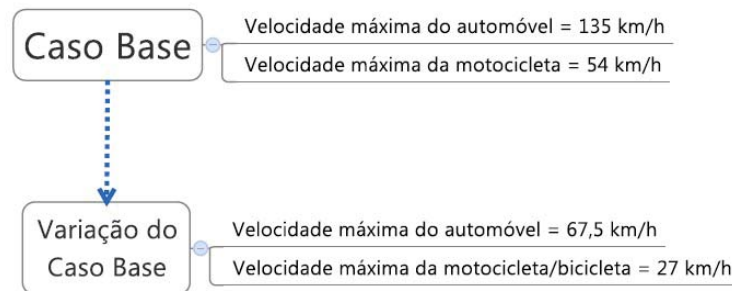
Figura 6.14: Sinalização de pistas exclusivas para automóveis trafegarem com mais de dois passageiros.



No “MOD\_TRAF” foram utilizadas as velocidades indicadas no artigo desenvolvido

por Meng *et al.* (2007), com o automóvel podendo chegar à 135 km/h e a motocicleta à 54 km/h, situação intitulada de caso base. Alterando-se as velocidades máximas do caso base, com os veículos trafegando com a metade de seus valores, para investigar a sua influência no fluxo da via e para aproximar aos valores das velocidades máximas dos veículos que transitam em vias urbanas aqui no Brasil, procurou-se associar o trânsito que antes era composto por automóveis e motocicletas, com o trânsito agora composto por automóveis e bicicletas, em virtude do novo valor da velocidade máxima para as motocicletas igual a 27 km/h. Assim, as motocicletas podem ser consideradas bicicletas e os automóveis terem valores mais reais para suas velocidades máximas aqui no trânsito brasileiro. Pode-se ver na figura 6.15 um esquema representativo para esta variação do caso base.

Figura 6.15: Variação do Caso Base considerando motocicletas como bicicletas.

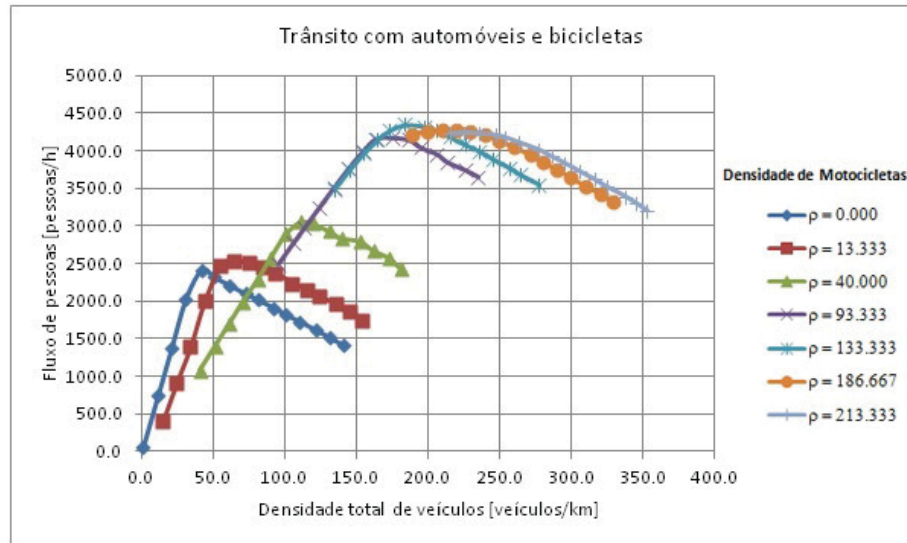


Segundo Klein (2013), o uso da bicicleta é cada vez maior, seja por motivos financeiros de seus usuários, despreocupação com estacionamento, tentativa de fugir dos congestionamentos etc. Assim, foram analisadas também as situações onde as bicicletas interferem no fluxo dos automóveis por compartilharem a pista e na situação onde se pode considerar o uso de ciclovias, com o uso de pistas exclusivas para as bicicletas.

A bicicleta, por ser um veículo movido à tração humana, tem o seu raio de alcance limitado às condições de saúde do condutor e das condições do ambiente, como o tráfego e a infraestrutura da via. Tal desvantagem pode ser amenizada através da integração da bicicleta com outros tipos de transportes, como por exemplo, a possibilidade de levar a bicicleta em ônibus ou metrô em deslocamentos mais longos.

A figura 6.16 mostra o fluxo de pessoas para o tráfego, onde as velocidades do caso base foram reduzidas à metade, composto por automóveis e bicicletas, com trocas de pistas, e cada veículo transportando somente seu condutor.

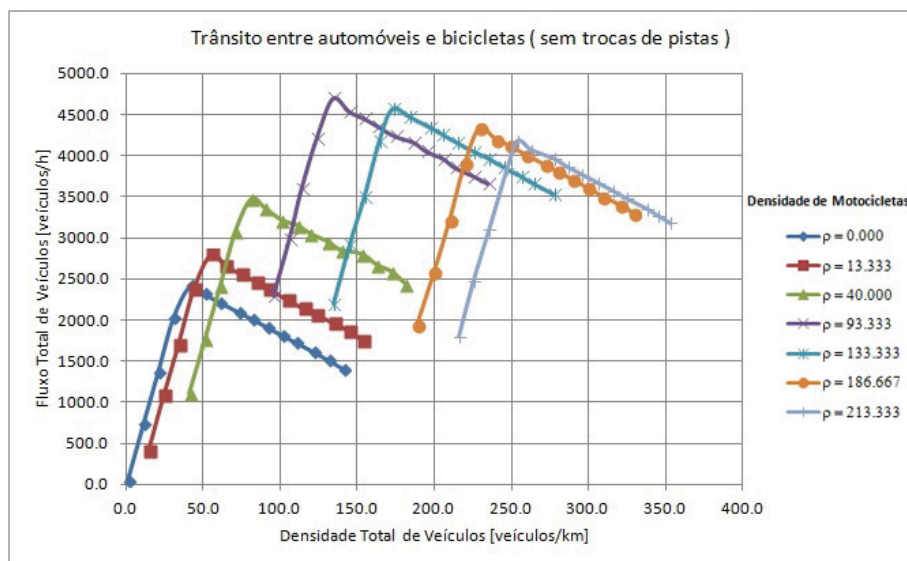
Figura 6.16: Análise do fluxo de pessoas com o tráfego composto por automóveis e bicicletas.



Nota-se na figura 6.16 que o fluxo de pessoas, além de ser maior cerca de 2% em comparação ao valor máximo do fluxo quando foram utilizadas as velocidades do caso base, também apresenta uma faixa maior de densidades com valores próximos a este valor máximo. Logo, para o modelo utilizado no simulador “MOD\_TRAF”, a redução pela metade da velocidade máxima dos veículos resultou no aumento do fluxo máximo da via.

Visando preservar o ciclista e evitar acidentes, também é feita a análise onde as bicicletas transitam em ciclovias, ou seja, as mesmas não interferem no fluxo de automóveis pois não trocam de pistas. A figura 6.17 mostra o fluxo de pessoas para essa situação, com tanto o automóvel, como a bicicleta, transportando apenas uma pessoa.

Figura 6.17: Análise do fluxo de pessoas com o tráfego composto por automóveis e bicicletas sem trocas de pistas.



Para esta situação, também nota-se o aumento do fluxo da via, decorrente da redução da velocidade dos veículos. Assim, pode-se acreditar que a redução da velocidade máxima dos veículos em uma via, também é capaz de possibilitar o aumento do fluxo da mesma, sendo possível ainda através de trabalhos de conscientização da população, incentivar a prática do transporte coletivo, com os automóveis sempre transitando com mais de duas pessoas, visando assim otimizar o fluxo de pessoas na via, pela composição do tráfego misto entre automóveis e motocicletas, ou com a presença de bicicletas e automóveis que transitem com menores velocidades, e mitigar todos os problemas associados ao tráfego congestionado.

A tabela 6.1 compara os valores de fluxo máximo de pessoas para o tráfego entre automóveis e bicicletas, com e sem trocas de pistas.

Tabela 6.1: Comparação entre os valores de fluxo máximo de pessoas para o tráfego entre automóveis e bicicletas, com e sem trocas de pistas

Dens. de motocicletas [motocicletas/km]	Fluxo máx. com trocas de pistas [pessoas/h]	Fluxo máx. sem trocas de pistas [pessoas/h]
0,000	2.417	2.417
13,333	2.525	2.796
40,000	2.980	3.468
93,333	4.178	4.703
133,333	4.349	4.569
186,667	4.282	4.332
213,333	4.240	4.184

## 6.2 Análise da proporção de motocicletas para condição de maior fluxo na via

Retomando as velocidades utilizadas para o caso base, esse estudo de caso visa estabelecer a proporção ótima entre automóveis e motocicletas numa via para se conseguir o maior fluxo possível. Assim, a figura 6.18 mostra os valores dos fluxos de veículos, com seus pontos de máximos para cada densidade de motocicleta, que foram base para construção da tabela 6.2. Considerando-se as trocas de pistas por parte das motocicletas, o maior valor para o fluxo aparece na densidade de motocicletas igual a 93,333, representando cerca de 90% dos veículos da via, conforme pode-se ver na tabela 6.2.

Figura 6.18: Análise da proporção de motocicletas na via para avaliação do fluxo de veículos.

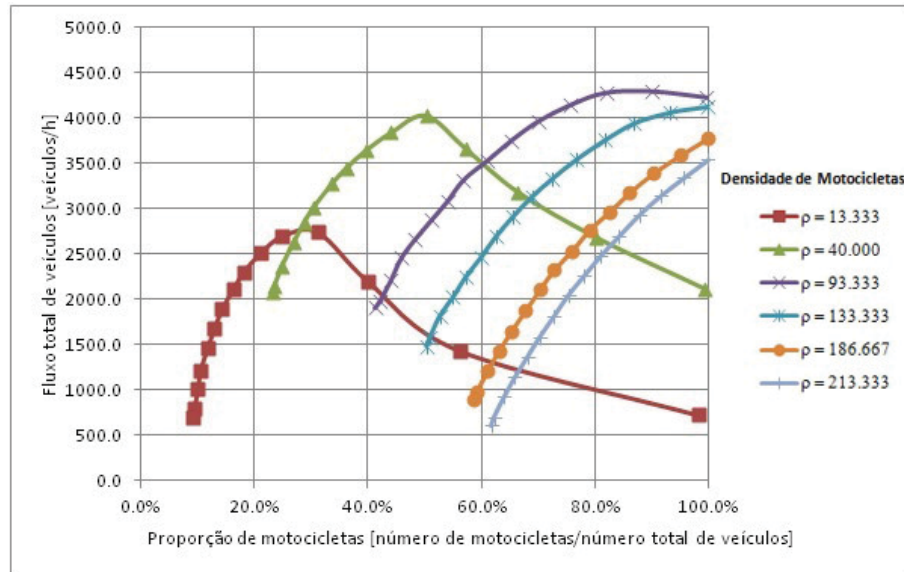


Tabela 6.2: Proporção de motocicletas para os pontos de maior fluxo da via com trocas de pistas

Densidade de motocicletas[motocicletas/km]	Percentagem de motocicletas na via	Fluxo máximo [veículos/h]
13,333	31,2%	2.842
40,000	50,2%	4.030
93,333	90,0%	4.289
133,333	99,8%	4.127
186,667	99,9%	3.780
213,333	100%	3.540

Avaliando a proporção de motocicletas para a situação em que não são realizadas as trocas de pistas, pode-se ver na figura 6.19 que os pontos de máximos para o fluxo mudaram em função da proporção de motocicletas quando são comparados ao caso que acontecem as trocas de pistas. A tabela 6.3 mostra os valores de fluxo máximo para cada densidade de motocicletas na via e a sua percentagem em relação a quantidade total de veículos.

Figura 6.19: Análise da proporção de motocicletas na via para avaliação do fluxo de veículos sem trocas de pistas.

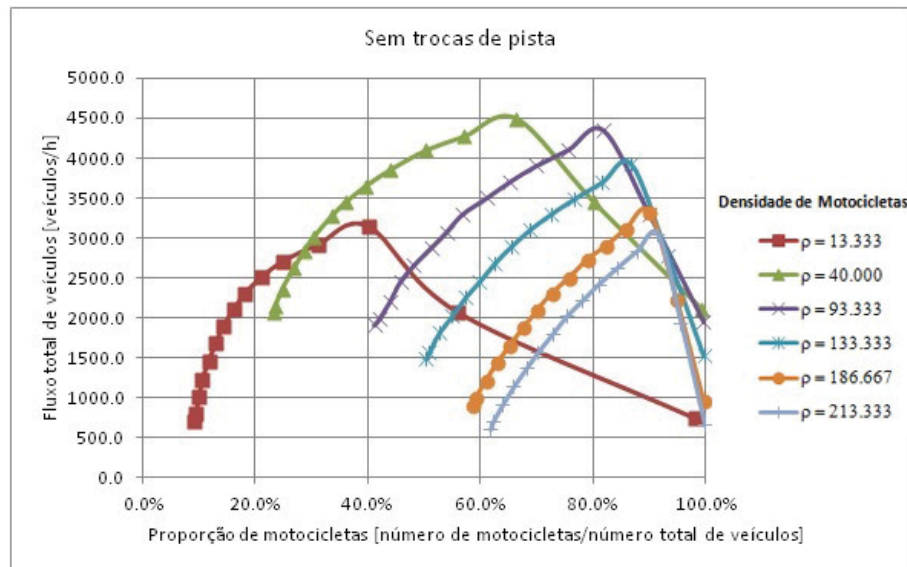


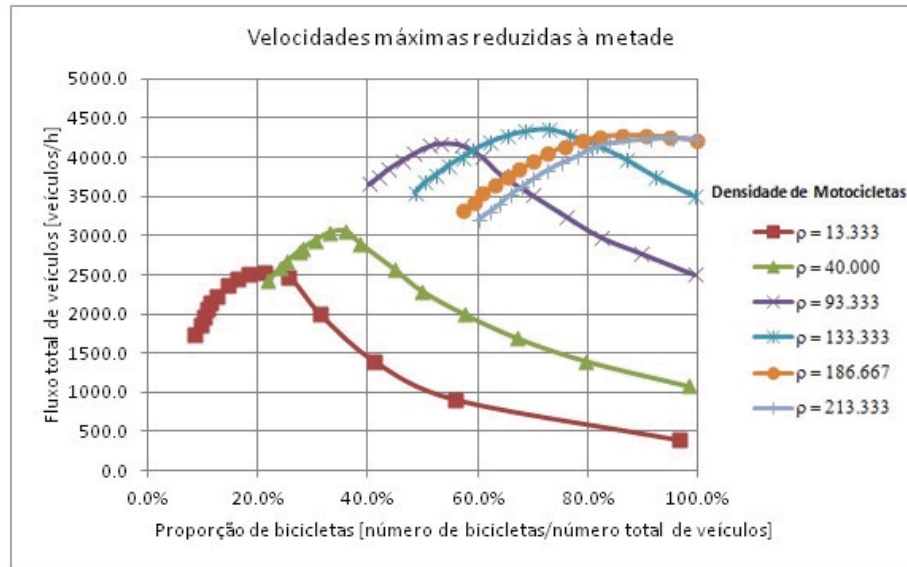
Tabela 6.3: Proporção de motocicletas para os pontos de maior fluxo da via sem trocas de pistas

Densidade de motocicletas[motocicletas/km]	Porcentagem de motocicletas na via	Fluxo máximo [veículos/h]
13,333	40,2%	3.145
40,000	66,4%	4.496
93,333	81,9%	4.351
133,333	86,8%	3.922
186,667	90,2%	3.296
213,333	91,5%	3.040

Percebe-se que, pelo fato das motocicletas não trocarem de pista, tem-se uma redução da proporção de motocicletas para se alcançar os valores máximos de fluxo, para altas densidades, fato este confirmado nas análises anteriores que mostravam que uma motocicleta acabava atrapalhando mais no fluxo da outra devido a não troca de pistas.

Se as velocidades máximas do caso base forem reduzidas à metade, a proporção de motocicletas, que neste caso podemos considerar como bicicletas, muda bastante em relação aos casos anteriores. Conforme pode-se ver na figura 6.20.

Figura 6.20: Análise da proporção de bicicletas na via para avaliação do fluxo de veículos.



A tabela 6.4 exibe os valores de fluxo máximo da via em função da proporção de bicicletas, considerando-se as trocas de pistas.

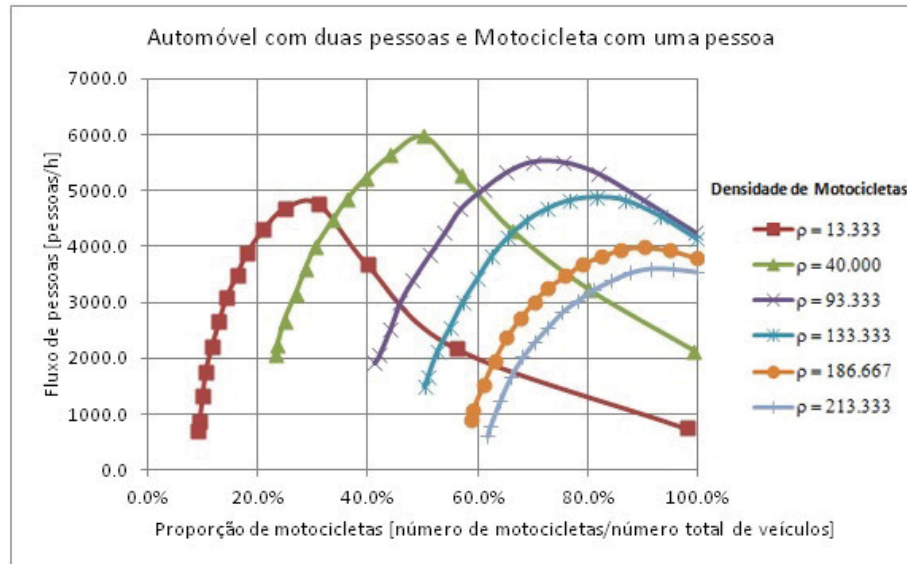
Tabela 6.4: Proporção de bicicletas para os pontos de maior fluxo da via com trocas de pistas

Densidade de bicicletas[bicicletas/km]	Percentagem de bicicletas na via	Fluxo máximo [veículos/h]
13,333	22%	2.431
40,000	36%	3.054
93,333	53,2%	4.178
133,333	73%	4.349
186,667	86,3%	4.282
213,333	95,4%	4.240

Assim, para o caso com valores de velocidades mais baixas, situação mais comum no tráfego urbano, tem-se a necessidade de menos bicicletas para se alcançar os pontos de fluxos máximos em cada densidade analisada, e com uma faixa maior de valores próximos a ele quando se considera o intervalo entre 50 e 90% da presença de bicicletas para densidades acima de 40 bicicletas por quilômetro.

Retornando a análise para as velocidades do caso base, considerando o fluxo de pessoas e visando obter uma situação de maior fluxo, pode-se avaliar a proporção de motocicletas na via para a situação em que o automóvel transporta duas pessoas e a motocicleta apenas uma, considerando-se as trocas de pistas, conforme mostra a figura 6.21.

Figura 6.21: Análise da proporção de motocicletas na via para avaliação do fluxo de pessoas com o automóvel transportando duas pessoas e a motocicleta com uma pessoa, para as velocidades do caso base e considerando as trocas de pistas.

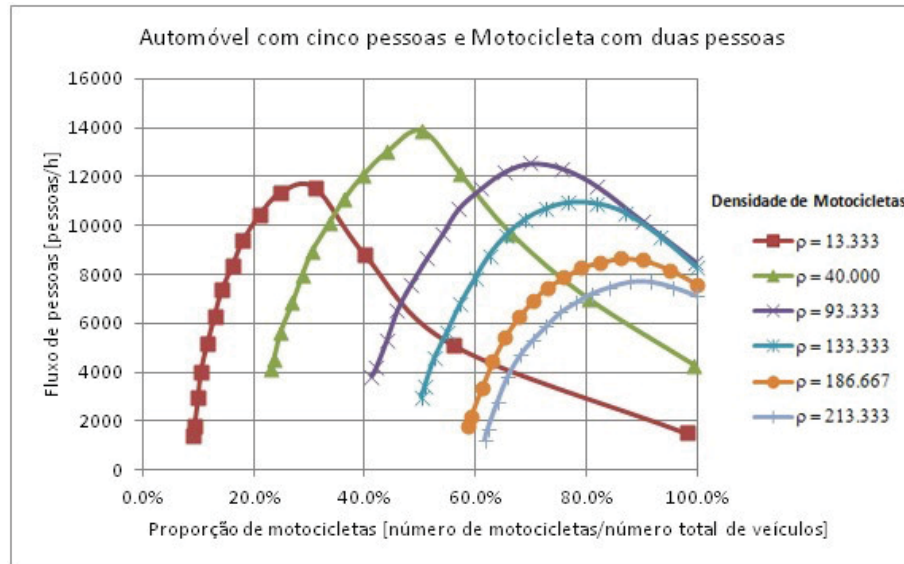


Nota-se que o ponto de maior fluxo de pessoas acontece para a configuração com 50,2% de motocicletas na via e para densidades acima de 40 é necessário aumentar cada vez mais a proporção de motocicletas para se alcançar os valores de fluxo máximo, mas estes sempre serão menores à medida que se aumenta a densidade de motocicletas.

Se for considerada a capacidade total de transporte dos veículos, a proporção de motocicletas na via continuará em 50,2% com a densidade de motocicletas igual a 40, para se obter o valor de maior fluxo de pessoas. A figura 6.22 exibe o fluxo de pessoas em função da proporção de motocicletas na via, onde percebe-se que mesmo com o automóvel transportando cinco pessoas, o fato das motocicletas trocarem de pista, evidencia que é necessário ter uma proporção praticamente igual de veículos na via para se conseguir maior mobilidade.



Figura 6.22: Análise da proporção de motocicletas na via para avaliação do fluxo de pessoas com o automóvel transportando cinco pessoas e a motocicleta com duas pessoas, para velocidades do caso base e considerando as trocas de pistas.



A tabela 6.5 mostra um resumo do fluxo de pessoas em função da proporção de motocicletas para as situações com e sem trocas de pistas, para as velocidades do caso base, e para tanto o automóvel como a motocicleta transportam apenas uma pessoa.

Tabela 6.5: Resumo da análise do fluxo de pessoas em função da proporção de motocicletas para os casos com e sem trocas de pistas, para as velocidades do caso base

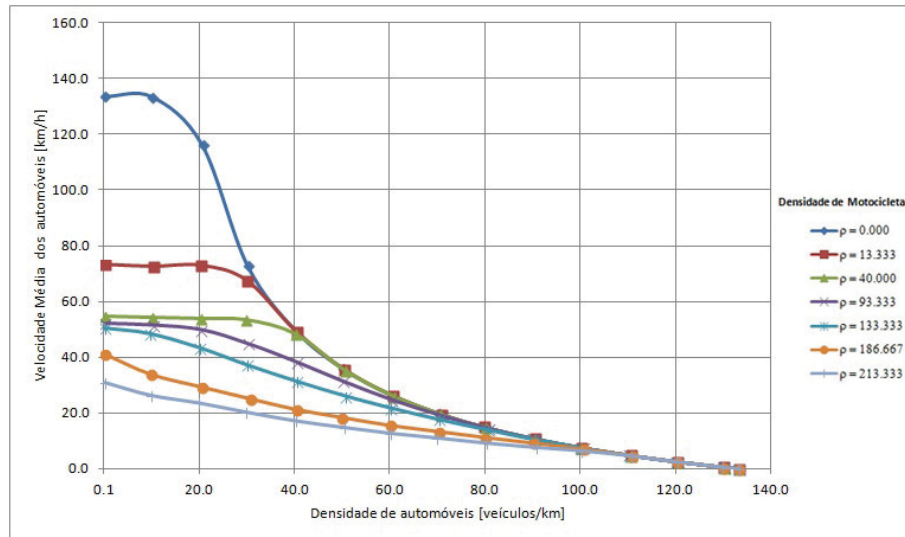
Sem trocas de pistas				
Dens. de motocicletas [motocicletas/km]	Fluxo máximo [pessoas/h]	Qtd. de automóveis na via	Qtd. de motocicletas na via	Porcentagem de motocicletas
13,333	3.145	152	102	40,2%
40,000	4.496	152	301	66,4%
93,333	4.351	154	695	81,9%
133,333	3.922	152	1.001	86,8%
186,667	3.296	154	1.415	90,2%
213,333	3.040	150	1.605	91,5%
Com trocas de pistas				
Dens. de motocicletas [motocicletas/km]	Fluxo máximo [pessoas/h]	Qtd. de automóveis na via	Qtd. de motocicletas na via	Porcentagem de motocicletas
13,333	2.842	225	102	31,2%
40,000	4.030	301	304	50,2%
93,333	4.289	78	705	90,0%
133,333	4.127	2	1.013	99,8%
186,667	3.780	2	1.415	99,9%
213,333	3.540	1	1.608	100,0%

### 6.3 Análise das velocidades médias desenvolvidas pelos veículos

A figura 6.23 exibe as velocidades médias dos automóveis dado o aumento de sua densidade para cada configuração das densidades das motocicletas. Como consequência das trocas de pista por parte das motocicletas e o aumento da densidade de motocicletas, os automóveis

apresentam uma redução significativa de suas velocidades médias quando se comparam os valores de sua velocidade média para as situações com alta e baixa densidades de automóveis.

Figura 6.23: Velocidades médias desenvolvidas pelos automóveis.



Conforme pode-se ver na figura 6.23, a motocicleta apresenta-se como elemento que retarda o fluxo de automóveis e provoca, à medida que se aumenta a sua densidade, diminuição superior a 75% da velocidade média dos automóveis, quando se compara a velocidade média dos automóveis trafegando sozinhos e a situação onde trafegam com a densidade de motocicletas igual a 213,333. Porém, as motocicletas passam a influenciar menos na redução da velocidade média dos automóveis à medida que a densidade de automóveis aumenta, pois os próprios automóveis começam a contribuir para redução de sua velocidade média, provocando retenções e conseqüentemente redução do fluxo. Este fato ocorre para um valor próximo da densidade de automóveis igual a 100, onde as motocicletas, independente de sua densidade, simplesmente não afetam mais na redução da velocidade média dos automóveis, sendo estes os únicos responsáveis pelo baixo valor de sua velocidade média. Provavelmente, isto acontece porque os automóveis no “MOD\_TRAF” não trocam de pista.

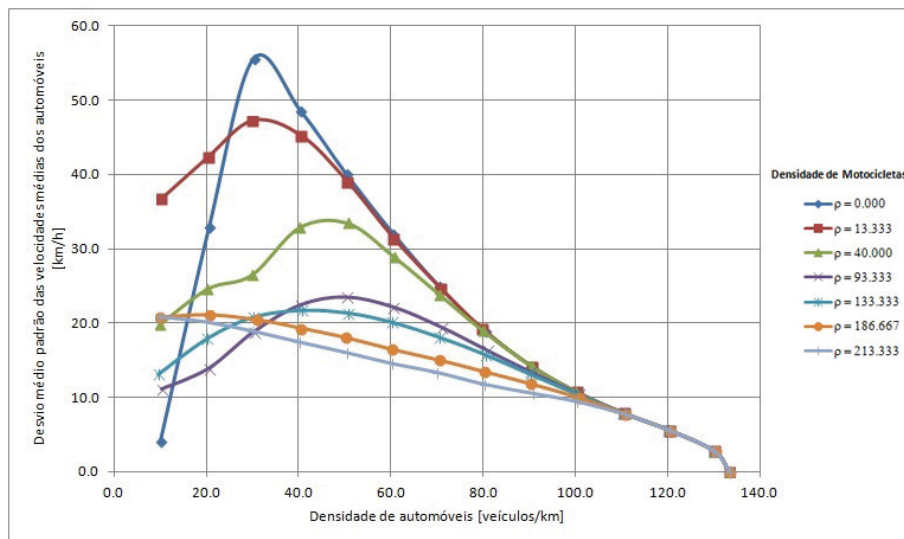
Analisando a velocidade média do ponto de vista das motocicletas, tem-se na figura 6.24 a relação entre a velocidade média das motocicletas e a densidade de automóveis em função das densidades das motocicletas. Nota-se que, para densidades baixas das motocicletas, com valores inferiores a 40, independente das densidades de automóveis, as motocicletas praticamente possuem as mesmas velocidades médias. Porém, para as demais densidades, os carros afetam no fluxo das motocicletas, reduzindo a sua velocidade média à medida que a densidade de automóveis aumenta, chegando-se num valor próximo de 100 onde deixam de influenciar na velocidade média das motocicletas. O fato das motocicletas mudarem de pista tem como conseqüência a vulnerabilidade de suas velocidades médias em função da densidade de automóveis,



Retornando-se aos valores máximos das velocidades dos veículos para o caso base, faz-se uma análise do desvio médio padrão das velocidades médias desenvolvidas pelos automóveis, e verifica-se na figura 6.26 que o desvio médio padrão das velocidades médias para os automóveis em relação ao aumento de sua densidade para cada grupo de densidades das motocicletas, que, para baixas densidades de automóveis, os desvios padrões das velocidades são maiores, isto acontece, porque os veículos podem vir a acelerar e alcançar maiores velocidades, uma vez que a via encontra-se mais livre. Assim, para baixas densidades de automóveis, mesmo alterando-se a densidade de motocicletas, o desvio médio padrão das velocidades médias dos automóveis será decorrência muito mais da pista livre do que em consequência da composição de veículos na via.

Percebe-se um crescimento do desvio padrão até um ponto de máximo valor, com diminuição deste após o referido ponto, para cada curva, dada a densidade de motocicletas na via, isto acontece porque os veículos no modelo de tráfego utilizado neste trabalho sempre tentarão trafegar com a maior velocidade possível e possivelmente nesta região de crescimento do desvio padrão, os mesmo encontram-se em situações de engarrafamentos temporários, que a literatura define como ondas de para-e-vai, tendo como consequência maiores acelerações por partes dos veículos, sendo este fenômeno reduzido com o aumento da densidade de veículos, onde as regiões de engarrafamentos são mais extensas.

Figura 6.26: Desvio médio padrão das velocidades médias desenvolvidas pelos automóveis.



Na figura 6.26, também fica evidente que com o aumento de automóveis na via, independente da densidade de motocicletas, o desvio médio padrão das velocidades médias dos automóveis diminui, pois o fluxo diminui em função da quantidade de veículos, impossibilitando assim os automóveis de realizarem maiores acelerações. As motocicletas influenciam no desvio médio padrão das velocidades médias dos automóveis também porque, ao trocarem de

pista, podem afetar na decisão do automóvel em acelerar, por mais que a motocicleta siga a regra de retornar para outra pista quando está obstruindo a passagem de um automóvel.

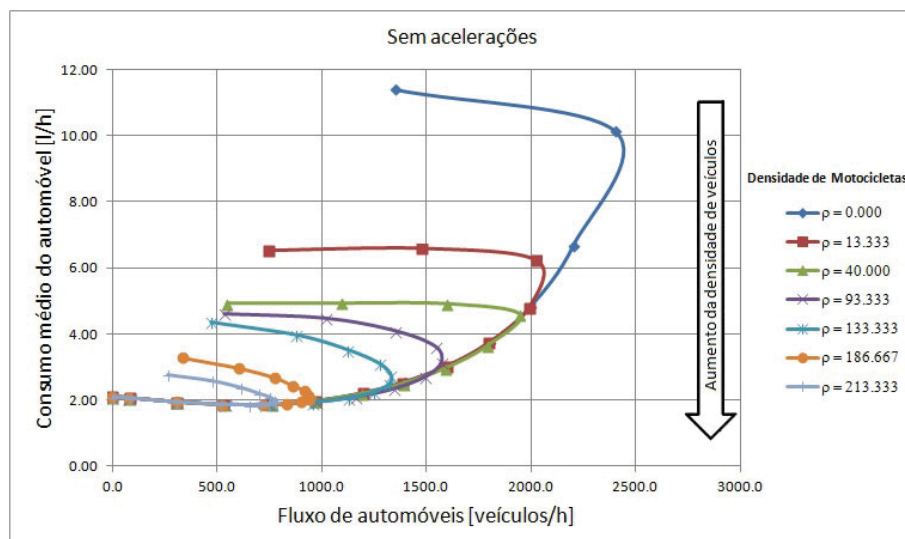
Como o fluxo tende para zero em função do aumento da densidade de veículos na via, encontra-se na figura 6.26 dois pontos com valores iguais de desvio médio padrão das velocidades médias dos automóveis, porém é importante destacar que um ponto apresenta alta velocidade e o outro baixa velocidade dos automóveis, sendo o de menor velocidade localizado mais a direita na figura.

## 6.4 Análise do consumo médio de combustível dos veículos

Ao se analisar o consumo médio de combustível por hora para os veículos, no tráfego misto entre automóveis e motocicletas, considerando-se as velocidades máximas do caso base, sem levar em conta as acelerações dos veículos, uma vez que no artigo desenvolvido por Meng *et al.* (2007) os veículos trafegam com velocidades constantes, percebe-se que na situação de congestionamento total dos veículos na via, tem-se um alto valor do consumo de combustível, onde cada automóvel consome em média 2,1 litros de gasolina por hora e cada motocicleta consome em média 0,4 litros de gasolina por hora. A situação de congestionamento total dos automóveis acontece, para a extensão da via igual a 7,5 km, com mil automóveis e para as motocicletas, com mil e seiscentas motocicletas. Assim, com a situação de congestionamento total, por hora, na via com 7,5 km de extensão, consome-se em média 2.740 litros de gasolina, conforme pode-se ver nas figuras 6.27 e 6.28.

Na figura 6.27 tem-se as relações do fluxo de automóveis em função do seu consumo médio de combustível, para cada composição das densidades das motocicletas na via, para as velocidades máximas do caso base, desconsiderando-se as acelerações dos veículos.

Figura 6.27: Fluxo de automóveis em função de seu consumo médio de combustível.



Os pontos apresentados na figura 6.27 que aparecem com mesmos valores do consumo médio de combustível apresentam densidades de veículos na via diferentes, onde a densidade de veículos na via aumenta da esquerda para direita e de cima para baixo, conforme pode-se ver na figura 6.27.

A equação utilizada para o consumo médio de combustível dos veículos é a equação 4.4 que foi apresentada no modelo para o tráfego do capítulo de metodologia. Ou seja:

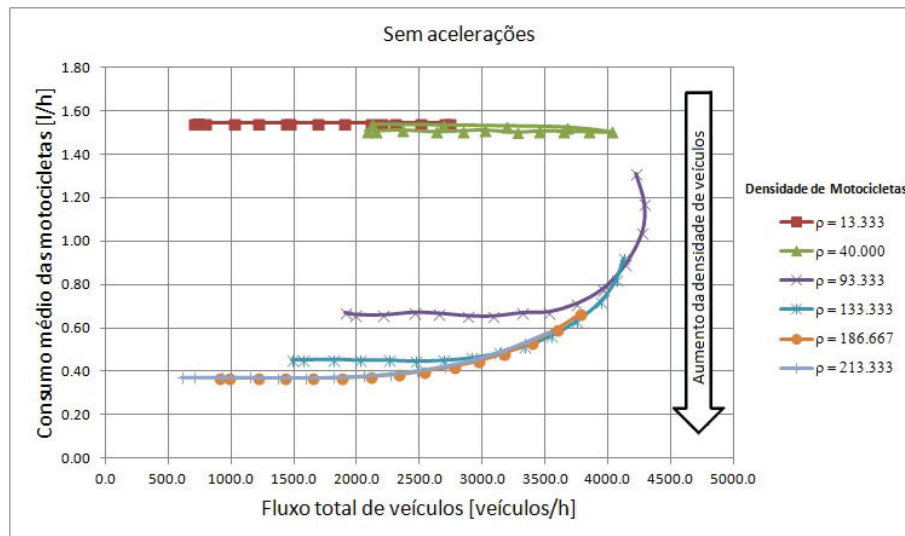
$$\bar{C} = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0+1}^{t_0+T} \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_i(t) \right)$$

onde:

$\bar{C}$ : Consumo médio de combustível do veículo para 30 simulações, com valor médio de mil passos de tempo para cada uma das simulações. (l/s)

A figura 6.28 mostra as relações do fluxo total de veículos em função do consumo médio de combustível para as motocicletas, para as velocidades máximas do caso base, sem considerar as acelerações.

Figura 6.28: Fluxo total de veículos em função do consumo médio de combustível para as motocicletas.



A tabela 6.6 exibe os valores de consumo médio total da via nos pontos de maiores fluxos totais dos veículos em função de cada densidade de motocicletas utilizada, para as velocidades máximas do caso base e desconsiderando-se as acelerações.

Tabela 6.6: Consumo médio total de combustível na via dadas as densidades de motocicletas

Dens. de motocicletas [motocicletas/km]	Fluxo máximo [veículos/h]	Consumo médio total de combustível na via [l/h]
0,000	2.417	1.573,66
13,333	2.842	1.556,18
40,000	4.030	1.843,34
93,333	4.289	1.187,38
133,333	4.127	942,40
186,667	3.780	946,61
213,333	3.540	936,97

De acordo com a tabela 6.6, o consumo médio total, para os casos com fluxo máximo, para altas densidades de motocicletas, apresentam valores inferiores porque a via nestes pontos de máximo fluxo está com mais motocicletas do que automóveis, e as motocicletas consomem menos combustível que os automóveis.

No tráfego urbano real, os veículos apresentam o consumo de combustível associado principalmente às acelerações que realizam. Assim, foram feitas análises para comparar o consumo de combustível para acelerar o veículo de sua velocidade inicial para a desejada no tempo de um segundo e para o valor máximo entre o consumo para alcançar 99% da velocidade desejada e o consumo para o tempo de um segundo, conforme foram expostos anteriormente na seção que fez a análise numérica do “MOD\_VEIC”.

Conforme citado na fundamentação teórica, se o motorista puder evitar acelerações, reduzirá o consumo de combustível de seu veículo, caso contrário, o consumo será elevado, fato evidenciado na tabela 6.7 que mostra o consumo médio total de combustível nos pontos de maiores fluxos de veículos, considerando-se as acelerações.

Tabela 6.7: Consumo médio total de combustível na via dadas as densidades de motocicletas considerando as acelerações dos veículos

Dens. de motocicletas [motocicletas/km]	Fluxo máximo [veículos/h]	Consumo médio total de combustível com acelerações [l/h]
0,000	2.417	3.762,99
13,333	2.842	5.329,97
40,000	4.030	6.304,34
93,333	4.289	2.290,24
133,333	4.127	1.513,44
186,667	3.780	1.556,22
213,333	3.540	1.563,83

Assim, comprova-se que o fator que mais faz um automóvel consumir combustível no trânsito é decorrente principalmente das acelerações realizadas pelo veículo e em função dos congestionamentos por aumento da densidade de veículos na via.

A diferença do consumo médio total dos veículos, em seus pontos de fluxo máximo,

em função de cada densidade de motocicletas, para o caso em que se consideram os adicionais de consumo para as acelerações e para o caso em que não se consideram, com as motocicletas trocando de pistas e para as velocidades máximas do caso base, é exposto na tabela 6.8.

Tabela 6.8: Diferenças de consumos médios totais para os casos com e sem acelerações dos veículos

Dens. de motocicletas [motocicletas/km]	Diferença de consumo médio total com e sem acelerações [l/h]
0,000	2.189,33
13,333	3.773,78
40,000	4.461,00
93,333	1.102,86
133,333	571,04
186,667	609,61
213,333	626,86

A diferença de consumo com e sem acelerações evidencia as perdas decorrentes das acelerações realizadas pelos veículos, porém esta energia perdida em forma de calor nos freios durante as frenagens pode ser reaproveitada se o veículo possuir um sistema de recuperação de energia cinética, conhecido pela sigla em inglês KERS - Kinetic Energy Recovery Systems, onde o princípio da conservação de energia é utilizado, ou seja, sabendo-se que a energia não pode ser criada ou destruída, mas pode ser convertida, poder-se-ia captar parte da energia cinética que seria desperdiçada no momento da desaceleração do veículo e reutilizá-la como potência complementar ao motor. Ao se pensar num projeto que venha a utilizar o KERS, deve-se analisar o peso do conjunto e o retorno de seu investimento ao utilizá-lo no tráfego urbano, sendo esta análise feita em função da redução do consumo de combustível dos veículos.

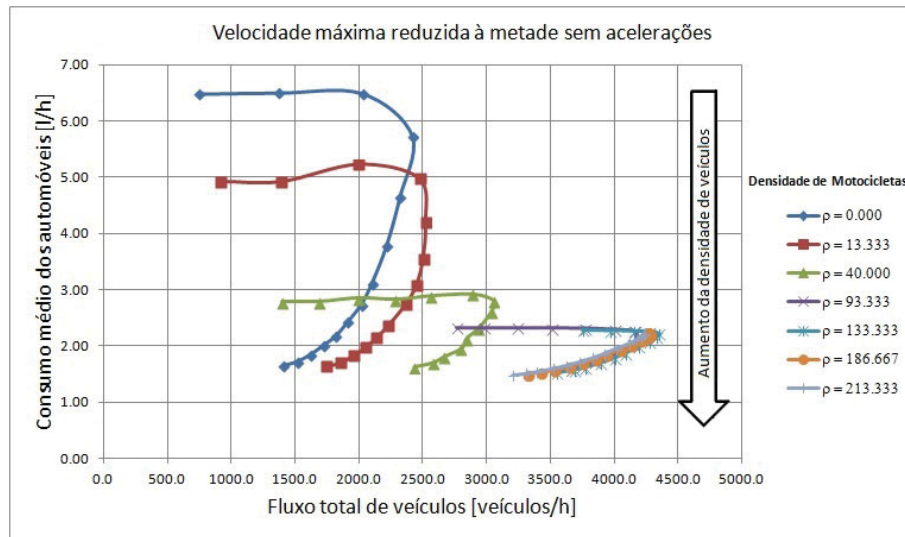
Mesmo com o aumento da densidade de veículos e menor fluxo da via, o fato de não se considerar as acelerações mostra uma redução considerável no consumo de gasolina, corroborando mais uma vez que o uso de um sistema como o KERS é uma solução para reduzir o consumo de combustível para os veículos no tráfego urbano.

Os valores do consumo de combustível aqui expostos são consequências das escolhas feitas para o tipo de câmbio e procedimento para trocas de marchas dos veículos, as características de seu motor e de sua dinâmica, as características de densidade de veículos na via e da regra adotada para o cálculo do consumo de combustível para as acelerações. A regra que foi utilizada para se poder considerar as acelerações dos veículos poderia ter sido utilizada para o tempo de um segundo, porém este também apresentaria erros associados, uma vez que o artigo desenvolvido por Meng *et al.* (2007) não considera acelerações e este procedimento é uma tentativa de expor o consumo adicional decorrentes das acelerações dos veículos, corroborando que os veículos aumentam seus consumos no tráfego urbano principalmente em função dos congestionamentos que os fazem acelerar constantemente.



Realizando uma análise do consumo para as velocidades máximas do caso base reduzidas à metade, desconsiderando-se as acelerações, a figura 6.29 mostra o fluxo total de veículos em função do consumo médio dos automóveis.

Figura 6.29: fluxo total de veículos em função do consumo médio dos automóveis para velocidades máximas do caso base reduzidas à metade e sem acelerações.



Nota-se na figura 6.29 que a redução das velocidades máximas do caso base pela metade, sem acelerações, resultou em um menor consumo médio de combustível para os automóveis quando trafegam em faixas exclusivas, ou seja, para  $\rho = 0$ . Apresentando uma redução do valor médio de consumo de combustível entre 19 e 43 %, em função da densidade de motocicletas na via, quando comparado aos valores do caso base, também sem acelerações.

Quando as acelerações são consideradas para o caso com velocidades máximas do caso base reduzidas à metade, o consumo médio de combustível para o automóvel trafegando em pista exclusiva ainda é inferior aos valores do caso base para baixas densidades, conforme pode-se ver nas figuras 6.30 e 6.31.

Figura 6.30: Fluxo total de veículos em função do consumo médio de combustível dos automóveis para velocidades máximas do caso base reduzidas à metade e com acelerações.

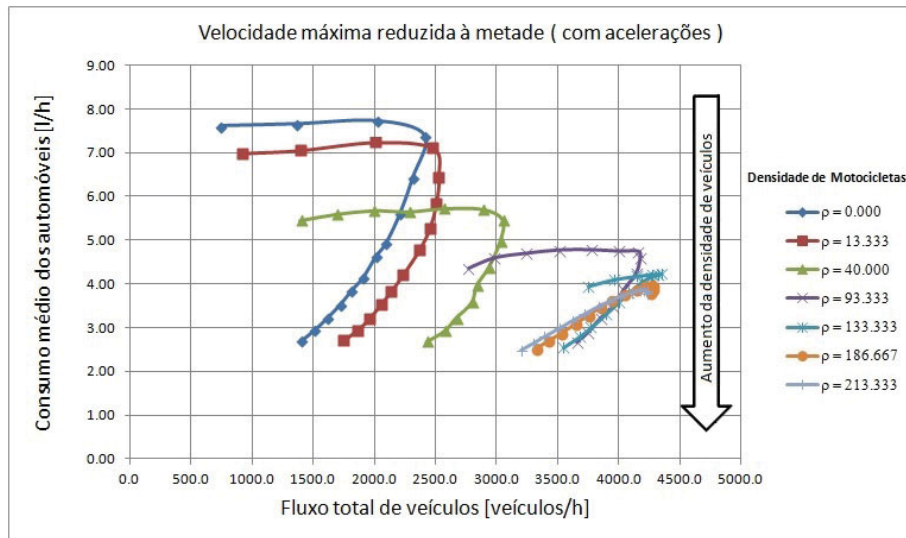
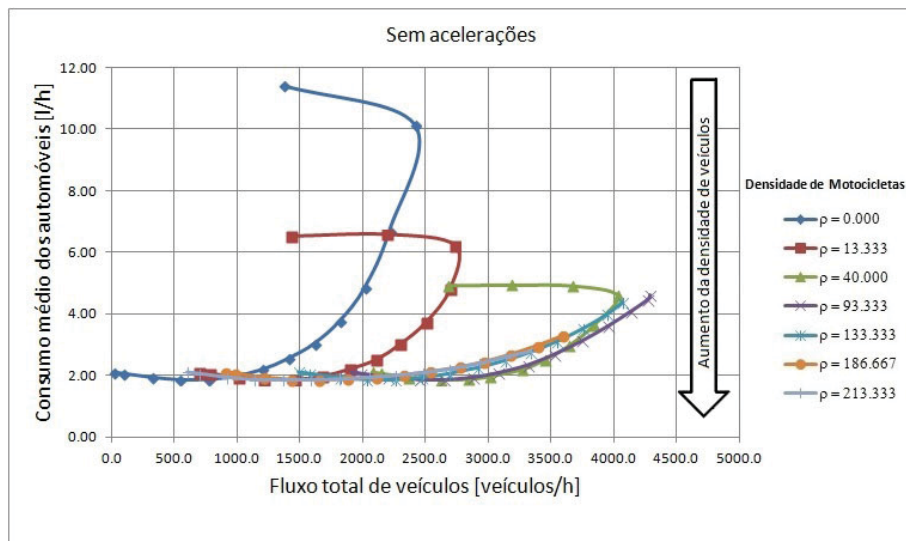


Figura 6.31: Fluxo total de veículos em função do consumo médio de combustível dos automóveis para o caso base sem acelerações.



O desempenho de um veículo considera a relação entre a distância percorrida pelo veículo em função do seu consumo de combustível. Neste caso, como é comum aqui no Brasil, o desempenho de um veículo é informado em quilômetros por litro mas pode-se encontrar em alguns artigos ou livros a relação de litros por 100 quilômetros.

Analisando o desempenho médio dos automóveis para as velocidades máximas do caso base, desconsiderando-se as acelerações e com as trocas de pistas das motocicletas, nos pontos de fluxo total máximo dos veículos, tem-se na tabela 6.9 os seus valores.

Tabela 6.9: Desempenho médio dos automóveis para valores de fluxos máximos dos veículos, com as velocidades máximas do caso base, troca de pistas das motocicletas e desconsiderando-se as acelerações

Dens. de motocicletas [motocicletas/km]	Fluxo total máximo [veículos/h]	Desempenho médio dos automóveis [km/l]	Qtd. de automóveis na via	Qtd. de motocicletas na via
0,000	2.417	11,48	2.417	0
13,333	2.842	10,86	225	102
40,000	4.030	10,54	301	304
93,333	4.289	11,15	78	705
133,333	4.127	11,15	2	1.013
186,667	3.780	10,33	2	1.415
213,333	3.540	9,5	1	1.608

Percebe-se na tabela 6.9 que à medida em que a densidade de motocicletas aumenta, o desempenho médio dos automóveis diminui. Como já foi citado em estudos anteriores, as motocicletas interferem no fluxo dos automóveis por trocarem de pista, mas são importantes para aumentar o fluxo total da via.

Logo, se o objetivo for ter o maior fluxo total de veículos, não se terá o melhor desempenho médio por parte dos automóveis e se for considerada a situação de melhor desempenho médio para os automóveis, os mesmo deverão transitar com pequenos valores de suas densidades e em pistas isoladas das motocicletas.

Comparando-se os valores para o desempenho médio dos automóveis para as situações que consideram e que não consideram as acelerações, em função das velocidades máximas do caso base, com trocas de pistas das motocicletas, nos pontos de fluxo máximo de veículos, dadas as densidades das motocicletas na via, têm-se, na tabela 6.10, seus valores.

Tabela 6.10: Comparação entre os desempenhos médios dos automóveis, para os casos com e sem acelerações, com trocas de pistas das motocicletas, nos pontos de fluxo máximo de veículos dadas as densidades das motocicletas

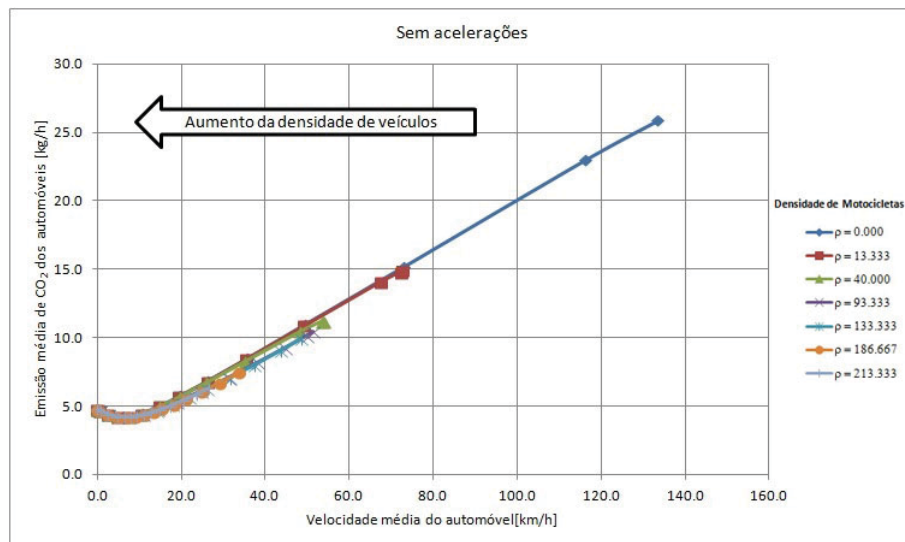
Dens. de motocicletas [motocicletas/km]	Desempenho médio com acelerações [km/l]	Desempenho médio sem acelerações [km/l]	Varição do desempenho médio [km/l]
0,000	5,13	11,48	6,35
13,333	3,2	10,86	7,66
40,000	2,86	10,54	7,68
93,333	4,55	11,15	6,6
133,333	4,64	11,15	6,51
186,667	4,1	10,33	6,23
213,333	3,76	9,5	5,74

## 6.5 Análise da emissão média de dióxido de carbono dos veículos

No capítulo da fundamentação teórica foi mencionado que ao se considerar a combustão completa para a gasolina com uma composição média igual a  $C_8H_{18}$ , produz-se oito moléculas de  $CO_2$ , e para uma relação mássica dos elementos, tem-se  $352/114 = 3,087g$  de  $CO_2$  para cada grama de gasolina queimada. Considerando a densidade da gasolina igual a  $0,735 kg/l$ , obtém-se a relação de  $2,27 kg$  de  $CO_2$  para cada litro de gasolina, quando acontece uma queima completa.

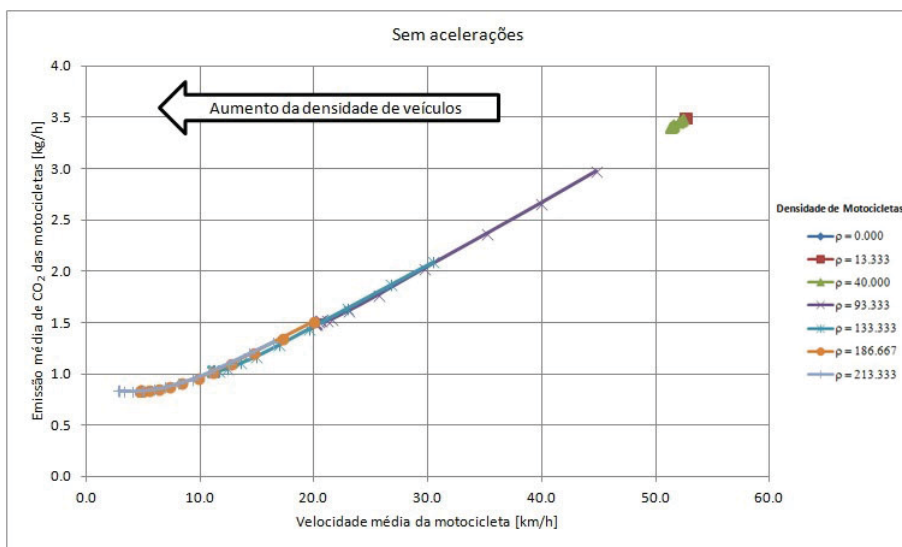
A figura 6.32 mostra a emissão média de  $CO_2$  dos automóveis em função de suas velocidades, para as velocidades máximas dos veículos do caso base, desconsiderando-se as acelerações e com trocas de pistas das motocicletas. Como o consumo de combustível cresce em função do aumento da velocidade, a situação que tem poucos automóveis trafegando sozinhos é a que terá as maiores emissões médias, isto porque é nesta situação que os automóveis desenvolvem as suas maiores velocidades. Com o aumento da densidade de motocicletas na via, gradativamente a emissão média de  $CO_2$  dos automóveis diminui, chegando a uma emissão igual a 4,8 kg de  $CO_2$  por hora na situação de total congestionamento. Vale lembrar que na figura 6.32, o aumento da densidade de veículos é exibida da direita para esquerda.

Figura 6.32: Emissão média de  $CO_2$  dos automóveis em função de suas velocidades, para velocidades máximas do caso base, desconsiderando-se as acelerações e com trocas de pistas das motocicletas.



Nesta mesma situação, a emissão média de  $CO_2$  das motocicletas em função de suas velocidades é exibida na figura 6.33.

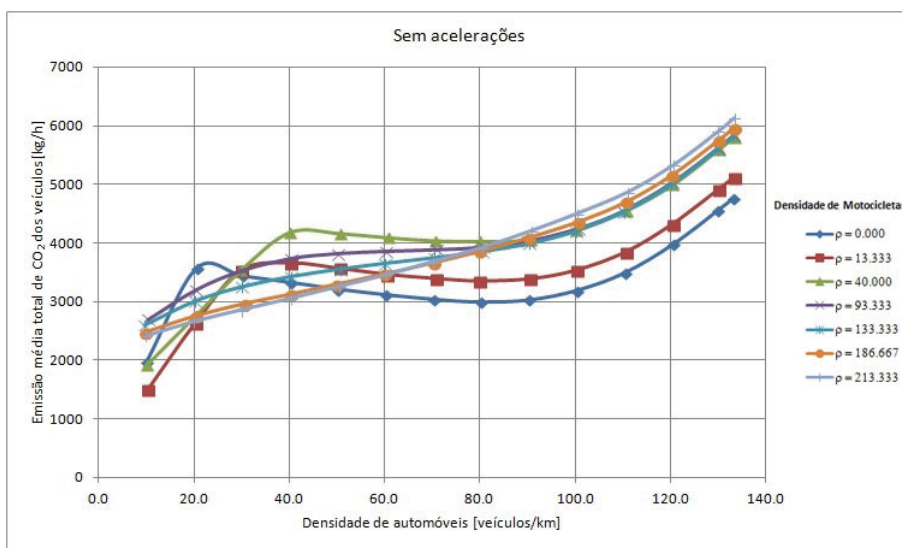
Figura 6.33: Emissão média de  $CO_2$  das motocicletas em função de suas velocidades, para velocidades máximas do caso base, desconsiderando-se as acelerações e com trocas de pistas das motocicletas.



Para a situação com as motocicletas completamente paradas no trânsito, tem-se uma emissão média de  $CO_2$  igual a 0,9 kg de  $CO_2$  por hora.

Se for contabilizada a emissão média total dos veículos na via com extensão de 7,5 km, tem-se o valor de 6,24 toneladas de dióxido de carbono por hora para a situação da via completamente congestionada. A figura 6.34 mostra as emissões médias totais dos veículos em função das densidades de automóveis na via para cada composição da densidade de motocicletas, para as velocidades máximas do caso base, desconsiderando-se as acelerações e com trocas de pistas das motocicletas.

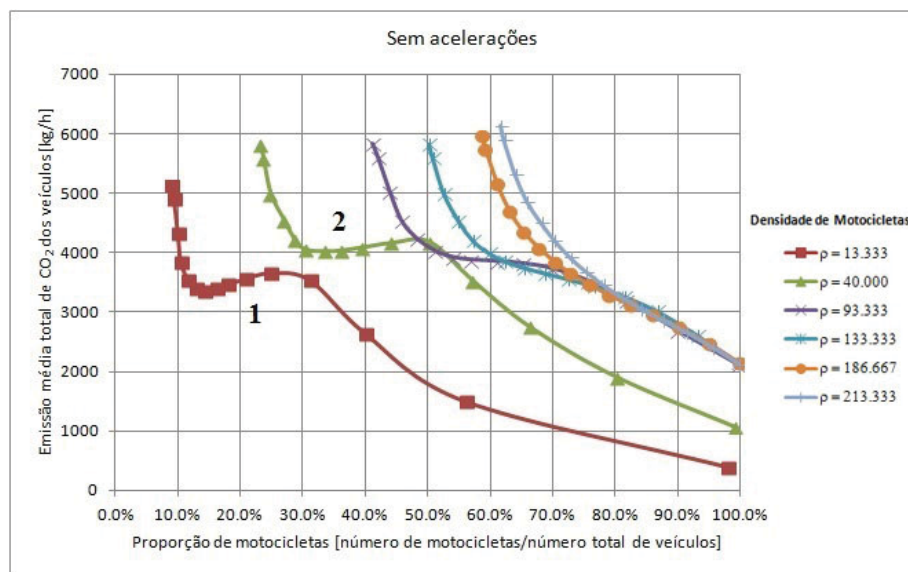
Figura 6.34: Emissão média total de  $CO_2$  dos veículos para as velocidades máximas do caso base, desconsiderando-se as acelerações e com trocas de pistas das motocicletas.



Se for feita uma análise da proporção de motocicletas na via para verificar a emissão

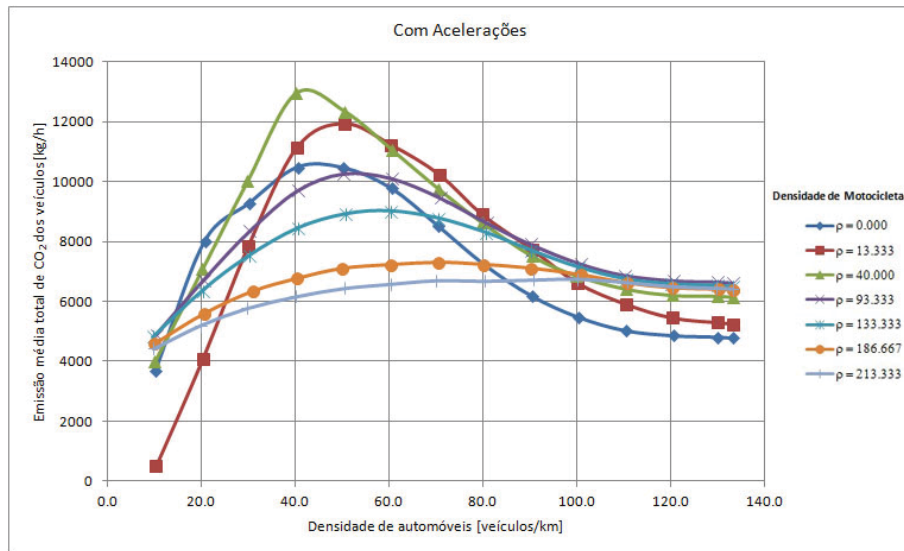
média total dos veículos, percebe-se na figura 6.35 que a região 1, com densidade de motocicletas igual a 13,333, quase não apresenta diferenças na emissão total para variação entre 10 e 20 % motocicletas na via. Olhando-se também para região 2, percebe-se que para a variação entre 30 e 40 % de motocicletas para a densidade igual a 40, também não há maiores variações. Logo, mesmo no caso sem considerar as acelerações, são os automóveis os principais responsáveis pela emissão de dióxido de carbono no tráfego urbano misto entre automóveis e motocicletas.

Figura 6.35: Emissão média total de  $CO_2$  dos veículos em função da proporção de motocicletas, para as velocidades máximas do caso base, desconsiderando-se as acelerações e com trocas de pistas das motocicletas.



Quando as acelerações são levadas em consideração, para as velocidades máximas do caso base, as emissões médias de dióxido de carbono crescem significativamente, conforme pode-se ver na figura 6.36 as emissões médias totais dos veículos em função da densidade de automóveis.

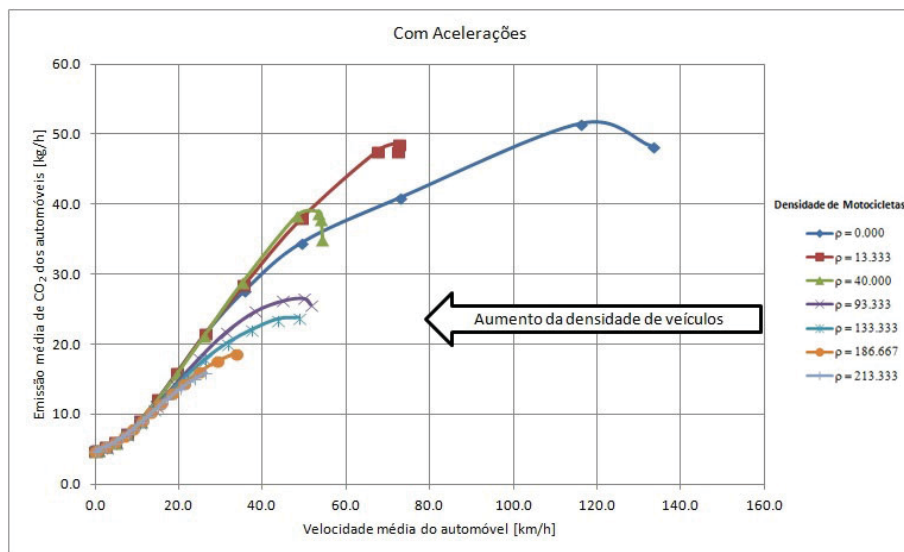
Figura 6.36: Emissão média total de  $CO_2$  dos veículos, para as velocidades máximas do caso base, considerando-se as acelerações e com trocas de pistas das motocicletas.



O ponto que apresenta maior emissão de dióxido de carbono quando as acelerações são consideradas é o que possui a proporção de 50% da via com automóveis para uma densidade de motocicletas igual a 40, tendo o seu valor igual a 12,96 toneladas de  $CO_2$  por hora, porém este ponto não é o que apresenta maior fluxo da via, conforme já visto na seção que analisou o fluxo de veículos e passageiros.

Do ponto de vista dos automóveis, a emissão média de dióxido de carbono em função de suas velocidades, para as velocidades máximas do caso base, considerando-se as acelerações e com trocas de pistas das motocicletas, é exibida na figura 6.37.

Figura 6.37: Emissão média de  $CO_2$  dos automóveis em função de suas velocidades, para as velocidades máximas do caso base, considerando-se as acelerações e com trocas de pistas das motocicletas.

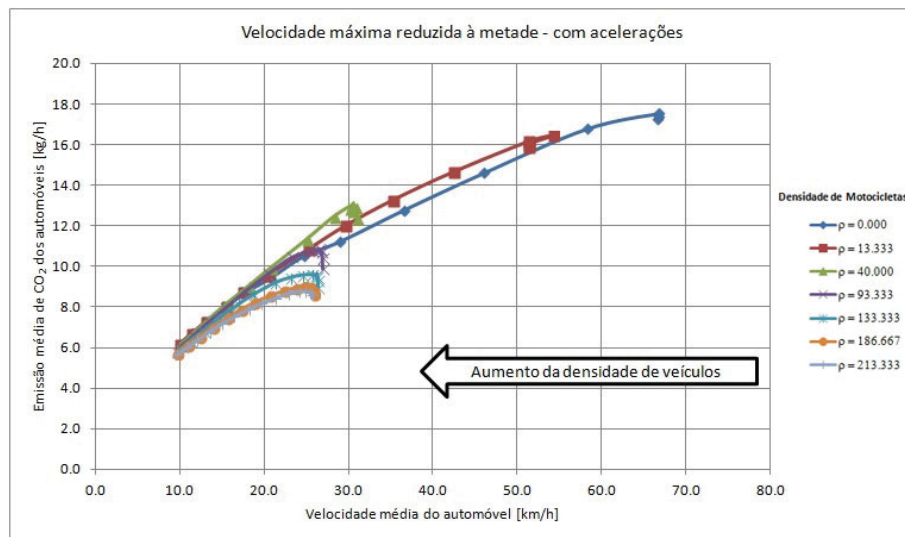


A emissão média máxima para os automóveis, para as velocidades máximas do caso base, desconsiderando-se as acelerações e com trocas de pistas das motocicletas, é igual a 25,9 kg de  $CO_2$  por hora. Considerando-se as acelerações, para a mesma situação, este valor sobe para 51,5 kg de  $CO_2$  por hora. Ou seja, uma diferença de 25,6 kg de  $CO_2$  por hora. Assim, o valor máximo da emissão média de  $CO_2$  por hora dos automóveis, quando se consideram as acelerações, praticamente dobra de valor.

O decreto federal 7.819, de outubro de 2012, regulamenta o programa de incentivo à inovação tecnológica e adensamento da cadeia produtiva de veículos automotores (INOVAR-AUTO), onde esse decreto estabelece metas para redução de emissões e do consumo de combustíveis pelos automóveis. Até 2017, os automóveis fabricados no Brasil deverão reduzir em 13,6% o consumo de combustível, visando reduzir as emissões na atmosfera. A meta é um desempenho de 17,26 km/l para os automóveis que utilizam gasolina.

Ao analisar a emissão de dióxido de carbono para o caso das velocidades máximas do caso base reduzidas à metade, considerando-se as acelerações e trocas de pistas das motocicletas, tem-se na figura 6.38 a relação da emissão média de dióxido de carbono dos automóveis em função de suas velocidades.

Figura 6.38: Emissão média de  $CO_2$  dos automóveis em função de suas velocidades, para as velocidades máximas do caso base reduzidas à metade, considerando-se as acelerações e trocas de pistas das motocicletas.

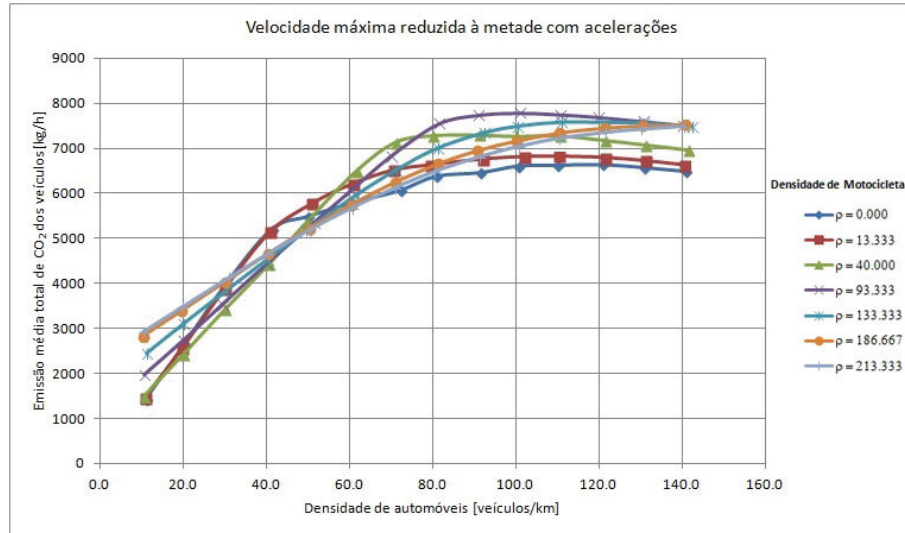


O valor da emissão média máxima para os automóveis neste caso, com as velocidade máximas do caso base reduzidas à metade e considerando-se as acelerações e trocas de pistas das motocicletas, é igual a 17,3 kg de  $CO_2$  por hora. Analisando o valor da emissão média total dos veículos na via, com extensão de 7,5 km, nesta mesma situação, tem-se na figura 6.39 as curvas em função das densidades de motocicletas na via, com valor máximo da emissão igual a



7,79 toneladas de  $CO_2$  por hora para uma composição da via com cerca de 50% de motocicletas para densidade de carros igual a 100.

Figura 6.39: Emissão média total de  $CO_2$  dos veículos para as velocidades máximas do caso base reduzidas à metade, considerando-se as acelerações e trocas de pistas das motocicletas.

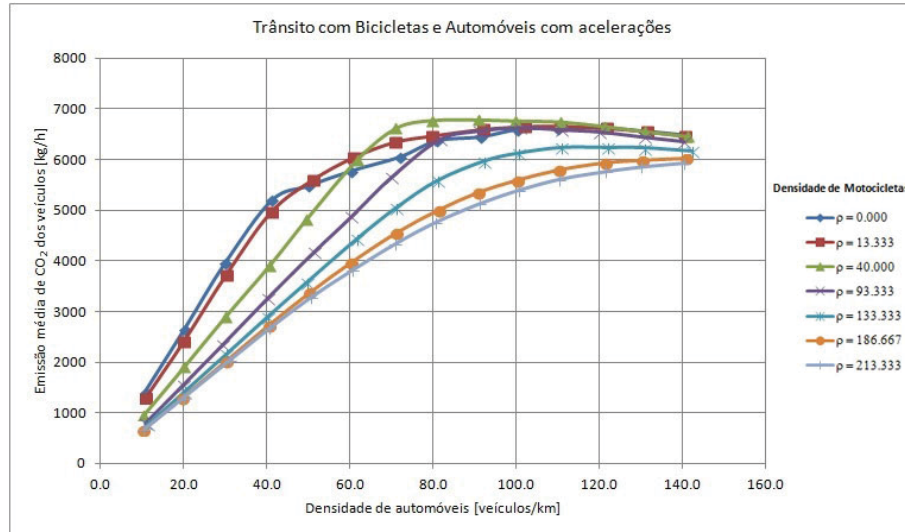


Assim, como dito na seção que analisou o fluxo de veículos e passageiros, com a redução das velocidades máximas do caso base pela metade, tem-se um aumento no fluxo da via, e agora, percebe-se que, com esta redução das velocidades, ocorre uma redução de emissão média total de  $CO_2$  dos veículos por hora igual a 5,17 toneladas, que seriam emitidos na atmosfera.

Se for levado em consideração o tráfego com automóveis e bicicletas, com velocidade máxima do automóvel igual a  $67,5 \text{ km/h}$ , para avaliar a emissão de dióxido de carbono, pode-se ver na figura 6.40 que o ponto de maior valor da emissão média total dos veículos é igual a 6,77 toneladas de  $CO_2$  por hora, com uma densidade de bicicletas igual a 40 e de automóveis igual a 80, ou seja, com cerca de 33 % de bicicletas na via. Porém neste caso, a bicicleta não aparece contribuindo para a emissão de  $CO_2$ . Se forem consideradas as emissões relativas à produção e ao transporte dos alimentos, que é o combustível do ciclista, este valor para a emissão média total será maior.

Ao analisar a bicicleta, considerando-se a emissão associada ao transporte e produção do alimento, que é o combustível para o ciclista, percebe-se que a bicicleta convencional não é tão perfeita assim. Sob esse ponto de vista, é discutível se uma bicicleta convencional emite mais ou menos  $CO_2$  do que uma bicicleta elétrica.

Figura 6.40: Emissão média total de  $CO_2$  para o trânsito com bicicletas e automóveis com velocidades máximas do caso base reduzidas à metade, considerando-se as acelerações e trocas de pistas das bicicletas.



## 6.6 Análise do custo médio dos veículos no tráfego

De acordo com dados da ANP (2014), em pesquisa realizada em 80 postos de combustíveis do Recife, o valor médio da gasolina, no período de 23/02/2014 à 01/03/2014, foi de R\$ 2,859. Considerando-se a cotação do dólar no dia 01/03/2014 igual a R\$ 2,34, pode-se adotar o valor médio da gasolina, em Recife, igual a \$1,22 dólares.

O valor da renda per capita mensal em Recife, segundo dados do TERRA (2013), é igual a R\$ 1.144,26, ou seja, convertendo-se para dólares, tem-se uma renda per capita mensal em Recife igual a \$ 489 dólares.

Se for considerado um mês com 20 dias úteis e a jornada de trabalho diária com oito horas, um trabalhador em Recife, nessas condições, receberá \$3,05 dólares por hora. Assim, de acordo com a figura 6.41, tem-se a tabela 6.11, com os valores gastos para manter o fluxo total de veículos em seus máximos valores, em função do custo médio por hora com a gasolina para os automóveis, considerando-se as velocidades máximas para o caso base, trocas de pistas das motocicletas e desconsiderando-se as acelerações.

Figura 6.41: Análise do fluxo total de veículos em função do custo médio de gasolina por hora para os automóveis, para as velocidades máximas do caso base, trocas de pistas das motocicletas e desconsiderando-se as acelerações.

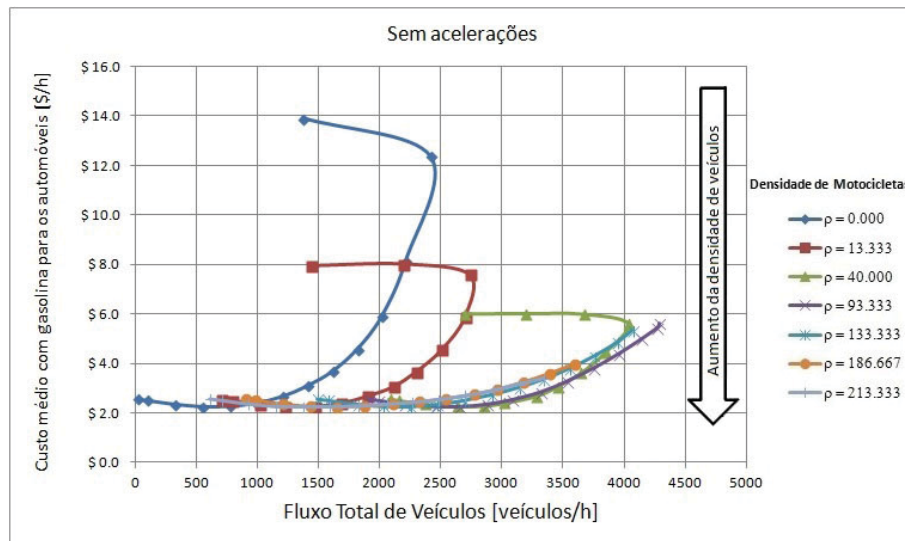


Tabela 6.11: Análise do fluxo máximo total de veículos em função do custo médio por hora com gasolina para o automóvel, para as velocidades máximas do caso base, trocas de pistas das motocicletas e desconsiderando-se as acelerações

Dens. de motocicletas [motocicletas/km]	Fluxo máximo [veículos/h]	Custo médio com gasolina do automóvel [\$/h]
0,000	2.417	12,37
13,333	2.842	7,59
40,000	4.030	5,61
93,333	4.289	5,62
133,333	4.127	5,32
186,667	3.780	4,00
213,333	3.540	3,39

Ou seja, é necessário, em média, 4 horas de trabalho por dia, para o caso com a densidade de motocicletas igual a zero e desconsiderando-se as acelerações, para se pagar o consumo de combustível em prol de se ter o valor máximo do fluxo de veículos na via. Na situação de maior fluxo, independente da densidade de motocicletas na via, precisa-se em média de 1,8 horas de trabalho diárias para se pagar o consumo de combustível por pessoa. Dependendo da quantidade de motocicletas na via, é necessário de 14 a 50% do tempo de trabalho diário de uma pessoa somente para manter por uma hora o fluxo máximo total de veículos da via.

Quando os automóveis estão parados em congestionamentos, para cada hora, tem-se um custo médio de \$ 2,56, o que corresponde a 84% do valor recebido por hora de trabalho, ou seja, a cada hora preso no tráfego, o motorista de um automóvel só ganha cerca de \$ 0,49 por hora de trabalho em Recife.

Se for considerado que por mês este motorista perde em média 30 horas parado no

tráfego, cerca de 16% de seu salário mensal seria destinado para pagar a gasolina consumida por seu veículo, considerando que o automóvel transporta apenas uma pessoa. Se a capacidade de transporte do automóvel for melhor aproveitada, ou seja, o automóvel transportando cinco pessoas, este custo é dividido pelo quantitativo de pessoas no veículo, o que significaria uma redução considerável do custo de gasolina quando estes estão parados em congestionamentos. Reforça-se assim, mais uma vez, a necessidade de se utilizar os automóveis trafegando sempre com mais de uma pessoa por veículo para se otimizar o fluxo da via e reduzir os custos relativos ao seu deslocamento.

Quando as acelerações são consideradas, para as velocidades máximas do caso base, o custo médio do consumo de combustível sobe, uma vez que, em função das acelerações, tem-se um maior consumo de combustível, conforme foi exposto em seções anteriores e pode-se ver na tabela 6.12.

Tabela 6.12: Comparação do custo médio com gasolina para velocidades máximas do caso base, considerando-se as acelerações para o automóvel

Dens. de motocicletas [motocicletas/km]	Fluxo máximo [veículos/h]	Adicional da aceleração em 1s [\$ /h]	Adicional da aceleração máx(99%,1s) [\$ /h]
0,000	2.417	14,70	27,7
13,333	2.842	13,29	25,58
40,000	4.030	12,46	20,67
93,333	4.289	10,98	13,78
133,333	4.127	8,95	10,82
186,667	3.780	8,79	10,37
213,333	3.540	7,16	8,18

Se for considerado o adicional de aceleração para um segundo, o trabalhador necessitará trabalhar 3,6 horas para pagar o consumo de combustível no ponto de maior fluxo da via, e se for considerado o adicional de aceleração calculado como o valor máximo entre o adicional para acelerar à 99% da velocidade desejada e em um segundo, na mesma situação, o trabalhador precisará de 4,5 horas de trabalho.

Ao analisar o custo para o caso em que as velocidades máximas do caso base para os veículos são reduzidas à metade, o custo médio do combustível para os automóveis no ponto de maior fluxo cai para 2,72 dólares por hora para um fluxo igual a 4.349. Ou seja, tem-se uma redução do custo em 2,9 dólares por hora e um aumento no fluxo de 60 veículos por hora. Neste caso, como dito anteriormente, a motocicleta pode ser considerada uma bicicleta, e assim, tem-se que associar o custo do seu combustível em função da alimentação do ciclista.

Segundo XAVIER *et al.* (2000), se for feita uma análise da energia consumida por um ciclista com 72 kg, pedalando por 40 minutos em velocidade de passeio igual a 19 km/h, o seu gasto energético será igual a 300 kcal, ou seja, 1.257 kJ. ( onde 1kcal = 4,19 kJ ). O consumo energético em função da distância percorrida pelo ciclista neste caso será igual a 99,7 kJ/km e se for considerado o custo de R\$ 20,00 para consumir 2.000 kcal por dia, tem-se um custo para

a alimentação do ciclista igual a  $R\$ 20,00 / 8380 \text{ kJ} = 0,0024 \text{ R\$/kJ}$ , ou, convertendo-se para dólares,  $0,001\$/\text{kJ}$ , com um custo por quilômetro para a bicicleta igual a  $0,10 \text{ \$/km}$ . Assim, para a extensão da via igual a  $7,5 \text{ km}$ , que foi utilizada no “MOD\_TRAF”, cada bicicleta consumirá em média  $\$ 0,75$ . Este valor não considera a água utilizada pelo ciclista para sua re-hidratação, água para o banho e para lavar as suas roupas.

Considerando-se as velocidades máximas para o caso base, com acelerações e trocas de pistas para as motocicletas, o simulador “MOD\_TRAF” apresenta valores para o custo médio com gasolina para a motocicleta neste caso, variando de  $\$0,04$  a  $\$0,17$  por quilômetro, e para o automóvel, tem-se uma variação de  $\$0,24$  a  $\$0,67$  por quilômetro. Assim, para a extensão da via igual a  $7,5 \text{ km}$ , a motocicleta apresenta um gasto médio com gasolina variando de  $\$0,3$  a  $\$1,28$  e o automóvel, com valores variando de  $\$1,8$  a  $\$5,0$ . A variação desses valores acontece devido as combinações de densidade dos veículos na via durante as simulações e em virtude das regras adotadas para o tráfego. Tomando-se a média entre os gastos médios máximos e mínimos com gasolina para o automóvel, tem-se um valor igual a  $\$3,4$ , e para a motocicleta, um valor igual a  $\$0,79$ .

Esses valores médios do consumo de combustível para percorrer os  $7,5 \text{ km}$  da via, devem ser somados, para cada modal, ao custo associado da aquisição do veículo, ao custo dos acessórios, a depreciação, ao custo de manutenção, impostos e aos custos sociais, referentes a emissão de poluentes e acidentes, para se ter o valor do custo total por veículo em função de seu deslocamento. Porém esse trabalho não contemplará tais valores, por motivos de simplificação e por se tratar de um estudo qualitativo.

Em resumo, os custos médios, para percorrer a extensão da via igual a  $7,5$  quilômetros, que foi utilizada nas simulações do tráfego misto para os diferentes tipos de veículos, são expostos na tabela 6.13.

Tabela 6.13: Custo médio para percorrer  $7,5 \text{ km}$  pelos modais

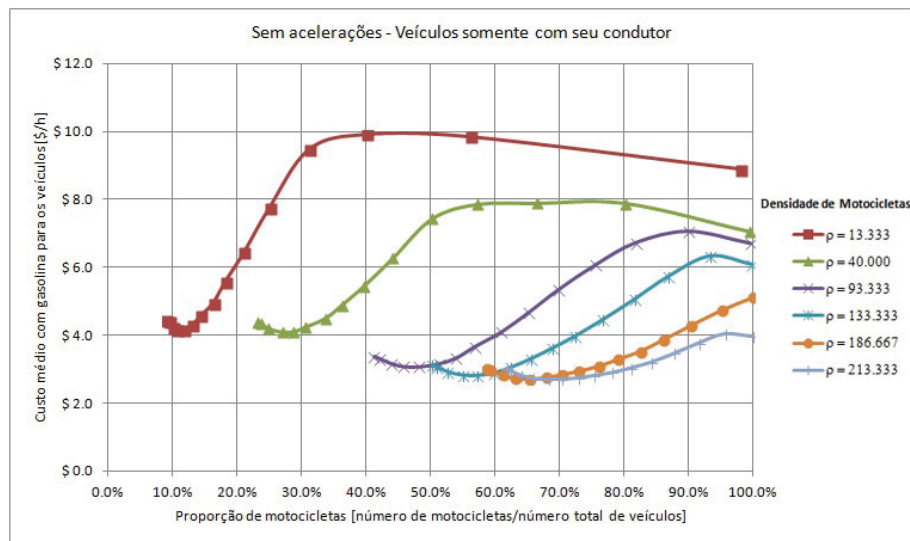
Veículo	Custo [\\$]
Bicicleta	0,75
Motocicleta	0,79
Automóvel	3,4

Logo, para a extensão da via igual a  $7,5 \text{ km}$ , a melhor opção é utilizar a bicicleta se o objetivo for a redução dos custos, considerando que o ciclista não terá custo com água e se alimentará gastando pouco, caso contrário, se a distância a ser percorrida for maior, a motocicleta aparecerá como a melhor opção para redução dos custos visando também maior fluxo,

pois como dito anteriormente, a bicicleta tem um raio de ação limitado pelas condições físicas do ciclista e o seu tempo de deslocamento é maior nestas situações, comprometendo o tempo que o ciclista deveria estar realizando outras atividades, como por exemplo, ganhando dinheiro.

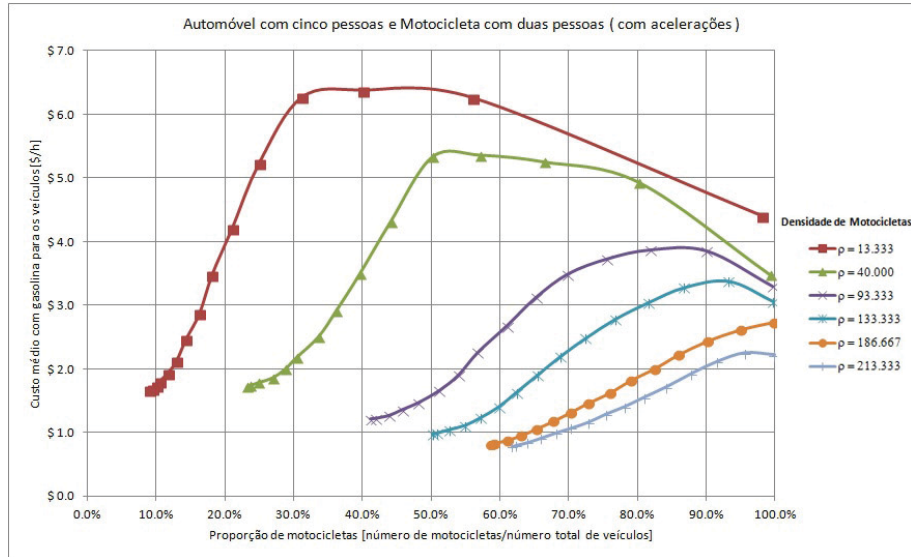
Com esta análise, tem-se uma estimativa de que a motocicleta é, entre esses três modais, o modal mais barato para quem trabalha prestando serviços, como na atividade de office boy, ou para quem reside distante do seu local de trabalho, porém deve-se avaliar se o uso da motocicleta oferece segurança e se o motociclista não sofrerá discriminação nos locais onde for. Os valores aqui expostos são para o veículo trafegando apenas com seu condutor, e, se forem consideradas mais pessoas por veículos, os valores associados ao custo serão menores, conforme pode-se ver na figura 6.42, onde não são consideradas as acelerações dos veículos, que transitam com as velocidades máximas do caso base, com trocas de pistas das motocicletas, e transportam apenas o condutor do veículo.

Figura 6.42: Análise da proporção de motocicletas em função do custo médio com gasolina para os veículos com uma pessoa, trafegando com as velocidades máximas do caso base, desconsiderando-se as acelerações e com trocas de pistas pelas motocicletas.



A figura 6.43, que consideram as acelerações dos veículos com o critério do maior valor entre os adicionais de consumo para 99% da velocidade desejada e um segundo, utilizando as velocidades máximas do caso base, com trocas de pistas das motocicletas e com o automóvel transportando cinco pessoas e a motocicleta com duas pessoas.

Figura 6.43: Análise da proporção de motocicletas em função do custo médio com gasolina para os veículos considerando as acelerações, com trocas de pistas das motocicletas, utilizando as velocidades máximas do caso base e com o automóvel transportando cinco pessoas e a motocicleta com duas pessoas.



Ao comparar as figuras 6.42 e 6.43, percebe-se que mesmo quando se consideram as acelerações, pelo fato dos veículos estarem transportando o número máximo de pessoas que suas capacidades permitem, tem-se um menor custo médio total dos veículos quando comparados ao caso sem acelerações mas com os veículos transportando apenas uma pessoa. Assim, para se reduzir o custo de transporte deve-se procurar andar com os veículos à plena capacidade e preferencialmente à velocidades constantes, ou seja, evitando arrancadas no tráfego urbano.

## 7 CONCLUSÕES

Ao estudar o tráfego misto entre automóveis e motocicletas, considerando-se, em alguns estudos, também as bicicletas, conseguiu-se através de um modelo que integra motor, veículo e tráfego, utilizando-se autômatos celulares, analisar qualitativamente o fluxo, o consumo de combustível, as emissões de  $CO_2$  e os custos associados ao tráfego para esses veículos em uma via.

Para uma via com 7,5 km de extensão, onde um automóvel ocupa 7,5 m e uma motocicleta ocupa 3,75 m, a relação entre as densidades de veículos que apresenta maior fluxo na via acontece quando se tem 90% de motocicletas, considerando-se que essas podem trocar de pistas. Ao considerar que os veículos trafegam com suas capacidades totais de transporte, esta relação cai para 50% de motocicletas mas tem-se um aumento de 15% do fluxo quando comparado com a situação onde os veículos trafegam em pistas exclusivas.

Existem relações entre as densidades dos veículos nas quais um modal não interfere no fluxo do outro. Para as motocicletas, com densidades abaixo de 40 motocicletas por quilômetro e baixos valores da densidade de automóveis, e para densidades acima de 110 automóveis por quilômetro, as mesmas não sofrem influência no seu fluxo. Porém, as motocicletas atrapalham no fluxo dos automóveis ao mesmo tempo elevam o fluxo total de veículos na via. Para situações com pistas exclusivas, com densidades de motocicletas acima de 93,333 motocicletas por quilômetro, o fluxo total de veículos diminui de 5 a 14% de acordo com o aumento de motocicletas na via. Como não existe controle da proporção de veículos numa via, é preferível que as motocicletas compartilhem a via com os automóveis, realizando trocas de pistas, em prol de se obter um maior fluxo de veículos e pessoas.

Considerando-se o tráfego entre automóveis e bicicletas, onde as bicicletas, de maneira geral, possuem velocidades duas vezes maior que a de um pedestre, e podem ser integradas a outros meios de transporte, através de políticas públicas, como ônibus e metrô, tem-se um acréscimo no fluxo total de veículos, para os automóveis com velocidade máxima igual a 67,5 km/h, de 2% quando comparado ao valor máximo encontrado para o caso em que o automóvel trafega com velocidade máxima igual a 135 km/h. Ou seja, a redução pela metade do valor máximo das velocidades dos veículos, resulta num aumento de 2% no fluxo total de veículos,



considerando-se as trocas de pistas por parte das bicicletas.

Através do estudo do consumo de combustível dos veículos desenvolvidos nesse trabalho, verificou-se que a utilização de mecanismos que recuperem parte da energia perdida ao frear o veículo, como o KERS, mostram-se como alternativa para melhorar a autonomia dos automóveis no tráfego urbano.

A configuração da via que apresenta maior fluxo de veículos tem um consumo médio total de combustível dos veículos igual a 1.187,38 litros por hora, quando não se consideram as acelerações. Ao se considerar as acelerações, o mesmo ponto de maior fluxo apresenta um consumo médio total igual a 2.290,24 litros por hora. Logo, considerando-se as acelerações, tem-se um consumo adicional de 93% de combustível por hora.

De acordo com os modelos que integram motor, veículo e tráfego apresentado neste trabalho, um automóvel preso no congestionamento gasta \$2,56 por hora, o que corresponde a 84% do valor médio ganho por hora de um trabalhador em Recife. Ou seja, para cada hora preso no trânsito em Recife, um motorista de automóvel só ganhará \$0,49 por hora trabalhada, em função do seu custo com o combustível. Se for considerado que o motorista fica 30 horas por mês preso em engarrafamentos, cerca de 16% de seu salário será destinado apenas para pagar o combustível de seu automóvel. Logo, quanto mais pessoas forem transportadas por este automóvel, menor será o custo com combustível por pessoa, reforçando-se a ideia de que os veículos, além de garantir o melhor fluxo de pessoas numa via, também terão um menor custo associado ao transporte se utilizarem melhor sua capacidade de transporte.

Com a redução pela metade das velocidades máximas do caso base para os veículos, conseguiu-se uma redução no custo de \$2,9 por hora para se manter o fluxo da via em seu maior valor, além de um acréscimo no fluxo de 2%. Logo, a redução das velocidades dos veículos, além de melhorar o fluxo, também reduz o consumo de combustível.

Para a via com extensão igual a 7,5 km, o uso da bicicleta apresentou o menor custo de transporte entre os modais, desconsiderando-se o custo adicional com a água de re-hidratação do ciclista. A motocicleta aparece como a melhor opção para quem trabalha com prestações de serviço, uma vez que o raio de ação da bicicleta é limitado às condições físicas do ciclista e pode-se perder mais tempo no seu deslocamento.

Para cada litro de gasolina consumida, neste trabalho, emite-se 2,27 kg de  $CO_2$ . Quando se consideram as acelerações dos veículos, as emissões de dióxido de carbono praticamente dobram em relação aos casos em que não são consideradas. Segundo dados do IPCC (2007), os automóveis são os principais responsáveis por este alto valor de emissão de dióxido de carbono na atmosfera, que segundo alguns estudos, pode ser o responsável pelo problema do aquecimento global.

Para desenvolvimento de trabalhos futuros que venham a analisar o tráfego misto entre automóveis e motocicletas, seguem algumas sugestões:

- Considerar a troca de pistas para os automóveis levando-se em conta a dinâmica dos veículos;
- Utilizar métodos de monitoramento eletrônico para o estudo do fluxo e comportamento dos veículos numa via, como o uso de câmeras, sensores e instrumentos, visando a modelagem do tráfego mais próxima do real do tráfego urbano.
- Realizar um estudo dos poluentes emitidos pelos motores veiculares, considerando-se situações de combustões parciais;
- Otimizar o processo de trocas de marchas para os veículos, visando-se obter menor consumo de combustível;
- Utilizar simuladores de trânsito comerciais que permitam a integração de outros tipos de veículos e pedestres, para simular situações reais de consumo de combustível, fluxo e emissões;
- Realizar estudos para outros combustíveis além da gasolina considerando-se o uso de veículos híbridos e elétricos.
- Analisar o custo dos acidentes entre os modais para fazer uma análise mais aprofundada dos custos relativos ao transporte de cada modal, além de estimar o risco com acidentes, podendo-se fazer uma análise do uso de sistemas como o V2V ou itens de segurança como o freio ABS;
- Relacionar as deseconomias relacionadas ao tráfego urbano fazendo um levantamento dos custos associados ao tempo perdido nos congestionamentos e a influência deste no valor do frete ao transportar mercadorias e ao utilizar táxis e mototáxis, a poluição e aos acidentes, referenciando assim o lucro cessante do tráfego urbano.
- Analisar a velocidade efetiva de cada modal;
- Verificar a viabilidade financeira do uso de sistemas que recuperem parte da energia perdida ao frear os veículos no tráfego urbano;
- Realizar estudo das características construtivas dos veículos para redução das potências resistivas aerodinâmicas;

- Desenvolver uma análise para a potência consumida pelo veículo quando o mesmo está funcionando em marcha lenta;
- Considerar aspectos dinâmicos da motocicleta como o travamento da roda dianteira, pneu patinando, empinamento ao acelerar e perda de contato com o solo do pneu traseiro durante a frenagem.

## REFERÊNCIAS

- ABCR. 2011. Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias. Disponível em: <<http://www.abcr.org.br/>>. Acesso em: Novembro de 2013.
- ANP. 2014. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/>>. Acesso em: Março de 2014.
- ARAFAH, M.; RAMLI, M. I.; ALY, S. H.; SELINTUNG, M. The motorcycle emission characteristics in developing countries: Logit and regression analysis of i/m data in makassar city, indonesia. v. 9, 2013.
- ARTAMONOV, M. D.; ILARIONOV, V. A.; MORIN, M. M. *Motor Vehicles : Fundamentals and Design*. Moscow: Mir Publishers, 1976.
- AZIS, M. A.; RAMLI, M. I.; ALY, S. H.; HUSTIM, M. The motorcycle driving behaviors on heterogeneous traffic : The real world driving cycle on the urban roads in makassar. v. 9, 2013.
- BEN-CHAIM, M.; SHMERLING, E.; KUPERMAN, A. Analytic modeling of vehicle fuel consumption. *Energies*, v. 6, n. 1, p. 117–127, jan. 2013. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/6/1/117/>>.
- BOSCH, R. *Manual de Tecnologia Automotiva*: Tradução da 25 edição alemã. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2005.
- BRUNETTI, F. *Motores de Combustão interna*: Volume 1. São Paulo: Edgard Blucher, 2012. ISBN 978-85-212-0708-5.
- CETSP. 2011. Disponível em: <<http://www.cetsp.com.br/>>. Acesso em: Março de 2014.
- CHÁVEZ, C. D. S.; TAMARA, A. S. A. *Análisis de la incidencia del tráfico mixto con motocicleta en la movilidad sobre la avenida pedro de heredia de la ciudad de cartagena de indias d. T. Y c. Mediante estudios primarios y modelación con software ptv vissim*. 108 p. — Universidad de Cartagena, Cartagena de indias D. T. Y C., 2013.
- CHO, H.-j.; WU, Y.-T. Modeling and simulation of motorcycle traffic flow. *2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No.04CH37583)*, Ieee, v. 7, p. 6262–6267, 2004. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1401382>>.
- COCCO, G. *Motorcycle Design and Technology*. Milão: Motorbooks workshop, 2004.
- COSSALTER, V. *Motorcycle dynamics*. Second. [S.l.]: LULU, 2006.
- DENATRAN. 2013. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/>>. Acesso em: Outubro de 2013.
- DURKOVIĆ, R.; DAMJANOVIĆ, M. Regression models of specific fuel consumption curves and characteristics of economic operation of internal combustion engines. v. 4, p. 17–26, 2006.

EMMERICH, H.; RANK, E. An improved cellular automaton model for traffic flow simulation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 234, n. 3-4, p. 676–686, jan. 1997. ISSN 03784371. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037843719600310X>>.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. *Termodinâmica*. Quinta edição. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

FENABRAVE. 2013. Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores. Disponível em: <<http://www3.fenabrave.org.br/>>. Acesso em: Novembro de 2013.

FUKUI, M.; ISHIBASHI, Y. Traffic flow in 1d cellular automata model including cars moving high speed. *Journal of the Physical Society of Japan*, v. 65, p. 1868–1870, 1996.

GARCIA, R. *Combustíveis e combustão industrial*. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

GENTA, G. *Motor Vehicle Dynamics: Modeling and simulation*. vol. 43. Westport, USA: World Scientific, 1997. (Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences). ISBN 9810229119.

GILLESPIE, T. D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, Inc., 1992.

GOLVERK, A. A. Mathematical calculation of the performance map of internal combustion engine. SAE Technical Paper Series 920683, 1992.

HOAG, k. L. *Vehicular Engine Design*. Powertrain. Madison, Wisconsin, U.S.A: Engine Research Center, University of Wisconsin Madison, 2006.

HU, Y. A New Cellular Automaton Model for Traffic Flow. p. 264–267, 1999.

IBGE. 2010. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Censo Demográfico 2010 - Resultados do universo. Disponível em: <<http://censo2010.ibge.gov.br/resultados>>. Acesso em: Novembro de 2013.

IPCC. 2007. Climate change 2007: synthesis report - summary for policymakers. Disponível em: <[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data\\_reports.shtml](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml)>. Acesso em: Setembro de 2013.

JAZAR, R. N. *Vehicle Dynamics: Theory and Application*. New York: Springer, 2009.

KLEIN, J. 2013. Disponível em: <<http://jcrs.uol.com.br/site/noticia.php?codn=127847>>. Acesso em: Março de 2014.

KUMAR, R.; DURAI, B. K.; PARIDA, P.; SALEH, W.; GUPTA, K. Driving cycle for motorcycle using micro-simulation. v. 2012, n. September, p. 1268–1273, 2012.

LAN, L. W.; CHANG, C.-W. Motorbike's moving behavior in mixed traffic : Particle-hopping model with cellular automata. v. 5, p. 23–37, 2003.

LAN, L. W.; CHIOU, Y.-C.; LIN, Z.-S.; HSU, C.-C. Cellular automaton simulations for mixed traffic with erratic motorcycles' behaviours. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier B.V., v. 389, n. 10, p. 2077–2089, maio 2010. ISSN 03784371. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378437110000828>>.

- LARRAGA, M.; RÍO, J. D.; ALVAREZ-LCAZA, L. Cellular automata for one-lane traffic flow modeling. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 13, n. 1, p. 63–74, fev. 2005. ISSN 0968090X. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0968090X0400066X>>.
- LAW, T. H.; SOHADI, R. U. R. Determination of comfortable safe width in an exclusive motorcycle lane. v. 6, p. 3372–3385, 2005.
- LEE, T.-C.; POLAK, J. W.; BELL, M. G. H. New approach to modeling mixed traffic containing motorcycles in urban areas. *Journal of the Transportation Research Board*, Transportation Research Board of the National Academies, v. 2140, p. 195–205, 2010.
- LIU, R.; TATE, J. Microsimulation modelling of intelligent speed adaptation system. European Transport Conference, Cambridge, 2000.
- MARCILIO, I.; GOUVEIA, N. Quantifying the impact of air pollution on the urban population of brazil. p. 529–536, 2007.
- MARTINS, J. *Motores de Combustão Interna*. Quarta. Porto, Portugal: Publindústria, Edições Técnicas, 2013. ISBN 978-989-723-033-2.
- MENG, J.-p.; DAI, S.-q.; DONG, L.-y.; ZHANG, J.-f. Cellular automaton model for mixed traffic flow with motorcycles. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 380, p. 470–480, jul. 2007. ISSN 03784371. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378437107002270>>.
- MILLER, J. M. *Propulsion Systems for Hybrid Vehicles*. 1st edition. ed. London: The Institution of Electrical Engineers, 2004.
- MINH, C. C.; MATSUMOTO, S.; SANO, K. The speed, flow and headway analyses of motorcycle traffic. v. 6, p. 1496–1508, 2005.
- NACIONAL, J. 2011. Carros são responsáveis por 90% da poluição do ar em São Paulo. Disponível em: <<http://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2011/04/carros-sao-responsaveis-por-90-da-poluicao-do-ar-em-sao-paulo.html>>. Acesso em: Novembro de 2013.
- NAGEL, K.; SCHRECKENBERG, M. A cellular automaton model for freeway traffic. *J. Phys. I France*, v. 2, p. 2221–2229, 1992.
- NGUYEN, L. X.; HANAOKA, S. Safety spaces for overtaking movements in motorcycle traffic flow. v. 9, p. 2–12, 2013.
- NI, D.; HENCLEWOOD, D. Simple engine models for vii-enabled in-vehicle applications. v. 57, p. 2695–2702, 2008.
- REN, F. T.; LIU, X. M.; RONG, J. Traffic engineering science. *China Communications Press (in Chinese)*, 2003.
- RONGVIRIYAPANICH, T.; SOMPAKDEE, P.; APANISH, s. R. Microscopic simulation for modeling effects of motorcycles on traffic operations at signalized intersection. v. 8, 2010.
- RONGVIRIYAPANICH, t.; SUPPATTRAKUL, c. Effects of motorcycles on traffic operations on arterial streets. v. 6, p. 137–146, 2005.

SCHMITT, W. F. *Metodologia de avaliação de eficiência energética em veículos leves e seus impactos em termos de uso de combustíveis*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SHIOMI, Y.; HANAMORI, T.; UNO, N.; SHIMAMOTO, H. Modeling mixed traffic flow with motorcycles based on discrete choice approach. v. 9, n. 1999, 2013.

TERRA. 2013. Disponível em: <<http://economia.terra.com.br/infograficos/renda/>>. Acesso em: Fevereiro de 2014.

TOMIĆ, V. M.; PETROVIĆ, V. S. *Motori sa unutrašnjim sagorijevanjem*. Beograd: Masinski fakultet, 2004.

TREIBER, M.; KESTING, A. *Traffic Flow Dynamics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 978-3-642-32459-8. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-32460-4>>.

VASIC, J.; RUSKIN, H. J. Cellular automata simulation of traffic including cars and bicycles. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier B.V., v. 391, n. 8, p. 2720–2729, abr. 2012. ISSN 03784371. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378437111009150>>.

WEN, P.-c.; CHEN, H.-y.; CHUANG, C.-w.; YANG, Y.-w. Fuel consumptions of scooter on the real-world in taiwan. v. 9, 2013.

WONG, J. Y. *Theory of Ground Vehicles*. 3rd. ed. Ottawa, Canadá: John Wiley Sons, 2001. ISBN 0-471-35461-9.

WSDOT. 2014. Disponível em: <<http://www.wsdot.wa.gov/hov/>>. Acesso em: Fevereiro de 2014.

XAVIER, G. N. A.; GIUSTINA, M. C. D.; CARMINATTI, L. J. Promovendo o uso da bicicleta para uma vida mais saudável. Revista CINERGIS, Santa Cruz do Sul, 2000.

ZHANG, J. *et al.* Universal flow-density relation of single-file bicycle, pedestrian and car motion. p. 1–5, 2012.