UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MEYCLISON ALVES DE SOUZA

CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO DE CARROS E MOTOS DO PONTO DE VISTA CINEMÁTICO E ENERGÉTICO EM VÁRIOS PONTOS DA CIDADE DO RECIFE

Recife
2022

MEYCLISON ALVES DE SOUZA

CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO DE CARROS E MOTOS DO PONTO DE VISTA CINEMÁTICO E ENERGÉTICO EM VÁRIOS PONTOS DA CIDADE DO RECIFE

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica

Orientador: Maurício Pereira Magalhães de Novaes Santos

Coorientador: Fábio Santana Magnani

Recife

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo
autor, através do programa de geração
automática do SIB/UFPE

Souza, Meyclison Alves de.
Caracterização do tráfego de carros e motos do ponto de vista cinemático eenergético em vários pontos da cidade do recife / Meyclison Alves de Souza. -Recife, 2022.
68 : il., tab.

Orientador(a): Mauricio Pereira Magalhães de Novaes Santos
Cooorientador(a): Fabio Santana Magnani
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal dePernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2022.
Inclui referências, apêndices.

1. Tráfego urbano misto. 2. Carros. 3. Motos. 4. Diagrama fundamental. I. Santos, Mauricio Pereira Magalhães de Novaes . (Orientação). II. Magnani, Fabio Santana . (Coorientação). III. Título.

MEYCLISON ALVES DE SOUZA

CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO DE CARROS E MOTOS DO PONTO DE VISTA CINEMÁTICO E ENERGÉTICO EM VÁRIOS PONTOS DA CIDADE DO RECIFE

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica

Aprovada em: 28/12/2022.

BANCA EXAMINADORA

Participação via Videoconferência

MSc. Mauricio Pereira Magalhães de Novaes Santos (Orientador)

Participação via Videoconferência

Prof. Dr. Fábio Santana Magnani (Coorientador)

Participação via Videoconferência

Prof. Guilherme Medeiros Soares de Andrade (Avaliador interno)

Participação via Videoconferência

Prof. Fernando Wesley Cavalcanti de Araújo (Avaliador externo)

Dedico este trabalho à minha tia Ângela que, do céu, reza por mim.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida, e por me dar inteligência e resiliência para me ajudar a ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo do curso.

Aos meus pais e avós, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava aos meus estudos.

Aos professores, pelas correções, conselhos e ensinamentos que me permitiram apresentar o melhor desempenho no processo e formação profissional.

À Autarquia de Trânsito da Cidade do Recife (CCTU), por ter me auxiliado da melhor forma possível, cedendo dados e informações cruciais para a realização deste trabalho.

Aos meus orientadores e membros do grupo LOST, Professor Fábio Magnani, Maurício e Fernando pelos ensinamentos, confiança e paciência que depositaram em mim na execução deste trabalho. Muito obrigado.

“Dulcius ex asperis.”
(Clan Fergusson)

RESUMO

Os ciclos de condução padrão, por serem ciclos genéricos construídos para representar tráfegos de uma grande região, ou até mesmo de um país inteiro, podem não conseguir reproduzir as características de cada cidade individualmente. Ao invés disso, fornecem uma média do conjunto de cidades dentro desta grande região. Para suprir essa falha, surgiram os ciclos de condução locais, que abrangem uma região bem menor do que os ciclos de condução padrão, tornando-os mais eficientes a nível local. Recife, a cidade mais congestionada do Brasil em 2021, já possui alguns ciclos de condução locais construídos para o seu tráfego. Este trabalho busca avaliar se a coleta de dados de apenas um local dentro da cidade do Recife é suficiente para representar todo o tráfego desta cidade. Em outras palavras, busca-se aferir se o tráfego do Recife possui características semelhantes ou distintas de um local para o outro, fazendo com que sejam viáveis aplicações, como por exemplo, a construção de ciclos de condução locais desta cidade utilizando apenas uma localidade para representar todo o tráfego. Para isso, foram coletados dados de fluxo e densidade de veículos através de mais de dez câmeras de trânsito no Recife, totalizando 150 minutos de vídeo. Esses dados foram utilizados para simular o tráfego de alguns desses locais, com os quais foi possível comparar os resultados entre eles e analisar as eventuais disparidades entre o tráfego. Os resultados destas simulações mostraram que para os carros, entre as localidades analisadas, há uma diferença de até 62% no fluxo, 63% na velocidade média e 61% na demanda energética veicular.

Palavras-chave: Ciclos de condução. Fluxo. Densidade. Demanda energética veicular.

ABSTRACT

Standard driving cycles, are generic cycles developed to represent traffic for a large region, or even an entire country, and might not be able to reproduce the characteristics of each city individually. Instead providing an average of the set of cities within of this great region. To overcome this flaw, local conduction cycles were developed, which cover a smaller region than the standard conduction cycles, making them more efficient at the local level. Recife, the most congested city in Brazil in 2021, already has some local driving cycles built for its traffic. This study seeks to assess whether collecting data from just one location within the city of Recife is sufficient to represent all traffic in this city. In other words, we seek to assess whether Recife's traffic has similar or different characteristics from one location to another, making applications viable, such as, for example, the construction of local driving cycles in this city using only one location for represent all traffic. For this, regarding the flow and density of vehicles were collected from more than ten traffic cameras in Recife, totaling 150 minutes of video. These data were used to simulate the traffic of some of these locations, with which it was possible to compare the results between them and analyze any disparities between the traffic. The results of these simulations showed that for cars, between the locations analyzed, there is a difference of up to 62% in flow, 63% in average speed and 61% in vehicle energy demand.

Keywords: Driving cycles. Flow. Density. Vehicle energy demand.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Porcentagem por região da população que vive em área urbana, em cada região..... 13
Figura 2 - Evolução dos automóveis particulares na frota brasileira..... 15
Figura 3 - Representações dos modelos macroscópico e microscópico, respectivamente..... 20
Figura 4 - Relação entre as três grandezas macroscópicas no diagrama fundamental..... 21
Figura 5 - Relação entre velocidade média e fluxo no diagrama fundamental.... 22
Figura 6 - Relação entre velocidade média e fluxo no diagrama fundamental.... 22
Figura 7 - Relação entre fluxo e densidade no diagrama fundamental..... 23
Figura 8 - Nuvem de pontos (em cinza) correspondentes a observações reais de tráfego e reta que melhor se ajusta a esses pontos (em preto)..... 24
Figura 9 - Exemplo de Diagrama Fundamental e suas regiões..... 25
Figura 10 - Diagramas fundamentais no plano fluxo densidade..... 25
Figura 11 - Ciclo FTP-75..... 26
Figura 12 - Ciclo HWFET..... 27
Figura 13 - Alguns ciclos padrão ao redor do mundo; a) JC08; b) NEDC; c) WLTC..... 28
Figura 14 - Ciclo WMTC dividido em estágios..... 29
Figura 15 - Diagrama de corpo livre de um veículo se movimentando em um plano inclinado..... 29
Figura 16 - Posição das câmeras gerenciadas pela CTTU no Recife e região metropolitana..... 37
Figura 17 - Layout padrão do software utilizado pela CTTU para observar as imagens das câmeras..... 38
Figura 18 - Vista da Via Mangue a partir da câmera da CTTU. A linha vermelha foi traçada pelo autor para medição do fluxo..... 39
Figura 19 - Visão do software da CTTU com área demarcada que foi utilizada pra medir a densidade na Via Mangue..... 41
Figura 20 - Visão do software da CTTU com área demarcada que foi utilizada pra medir a densidade na Avenida Estelita..... 42
Figura 21 - Visão do software da CTTU com área demarcada que foi utilizada pra medir a densidade na Avenida Beberibe..... 42
Figura 22 - Avenida Engenheiro José Estelita vista a partir do Google Maps..... 43
Figura 23 - Ilustração da pista do modelo..... 45
Figura 24 - Exemplo de planilha do Excel que foi utilizada para o cálculo dos parâmetros característicos..... 45
Figura 25 - Pontos coletados pelo autor na Via Mangue sobre o Diagrama Fundamental da Via Mangue construído por Araujo (2021)..... 51
Figura 26 - Pontos coletados pelo autor na Avenida Beberibe sobre o Diagrama Fundamental da Via mangue construído por Araujo (2021)..... 52
Figura 27 - Pontos coletados pelo autor na Avenida Estelita sobre o Diagrama Fundamental da Via Mangue construído por Araujo (2021)..... 52
Figura 28 - Gráfico velocidade *versus* tempo dos vetores velocidade dos carros dos três locais simulados..... 55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros característicos, energético e suas definições..... 34
Tabela 2 - Parâmetros característicos e DEV de alguns ciclos de condução padrão..... 34
Tabela 3 - Parâmetros característicos e DEV para alguns ciclos de condução locais..... 35
Tabela 4 - Comprimentos dos trechos utilizados para medição da densidade nos três locais..... 44
Tabela 5 - Fluxo medido nos locais utilizando seis minutos de vídeo..... 46
Tabela 6 - Fluxo medido a cada minuto em carros h^{-1} $faixa^{-1}$..... 47
Tabela 7 - Média dos valores observados de fluxo para os carros e para as motos durante seis e quinze minutos de vídeo, em veículos h^{-1} $faixa^{-1}$..... 47
Tabela 8 - Densidade média a cada minuto em carros km^{-1} $faixa^{-1}$..... 48
Tabela 9 - Densidade média dos carros e das motos em veículos km^{-1} $faixa^{-1}$. 48
Tabela 10 - Fluxo médio e densidade média dos carros em carros h^{-1} $faixa^{-1}$ com respectivos desvios padrão..... 49
Tabela 11 - Razão entre fluxo de carros e motos e razão entre densidade de carros e motos nos três locais..... 50
Tabela 12 - Fluxo e densidade totais de veículos (carros, motos e veículos pesados) nos três locais em veículos h^{-1} $faixa^{-1}$ e veículos km^{-1} $faixa^{-1}$ respectivamente..... 50
Tabela 13 - Velocidade média dos carros e das motos em km h^{-1} nos três locais calculados através dos valores de fluxo e densidade médios medidos ($V = F. D^{-1}$)..... 51
Tabela 14 - Dados da simulação de tráfego para a Via Mangue..... 53
Tabela 15 - Dados da simulação de tráfego para a Avenida Estelita..... 54
Tabela 16 - Dados da simulação de tráfego para a Avenida Beberibe..... 54
Tabela 17 - Velocidade média dos carros e das motos em km h^{-1} calculados a partir da média dos valores do vetor velocidade correspondente..... 54
Tabela 18 - Ciclos de condução padrões e parâmetros característicos e DEV dos carros obtidos através de simulação de tráfego utilizando dados reais coletados..... 57
Tabela 19 - Ciclos de condução locais e parâmetros característicos e DEV dos carros obtidos através de simulação de tráfego utilizando dados reais coletados..... 57
Tabela 20 - Ciclos de condução padrão (WMTC), local (Recife motos) e parâmetros característicos e DEV das motos obtidos através de simulação de tráfego utilizando dados reais coletados..... 58
Tabela 21 - Velocidade média dos carros e das motos nos três locais obtidos através dos valores de fluxo e densidade médios medidos (Real) e velocidade média dos carros e das motos observados nas simulações (Simulação)..... 59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CCL	Ciclo de condução local
CCP	Ciclo de condução padrão
CNH	Carteira Nacional de Habilitação
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CTTU	Autarquia de Trânsito e Transporte Urbano do Recife
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
DEV	Demanda Energética Veicular
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
FTP	Federal Test Procedure
HWFET	Highway Fuel Economy Test Cycle
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
JC08	Ciclo de Condução de emissão japonês (Japanese Emission Drive Cycle)
LOST	Laboratório de Otimização de Sistemas Térmicos e de Estudos Sobre Bicicletas e Motocicletas
NBR	Norma Brasileira de Regulamentação
NEDC	New European Driving Cycle
PC	Parâmetros Característicos
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
VUC	Veículos Urbanos de Carga
WLTC	Ciclo de teste de veículos leves harmonizados em todo o mundo (Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Cycle)
WMTC	Ciclo de teste de motocicleta mundialmente harmonizado (Worldwide Harmonised Motorcycle Test Cycle)

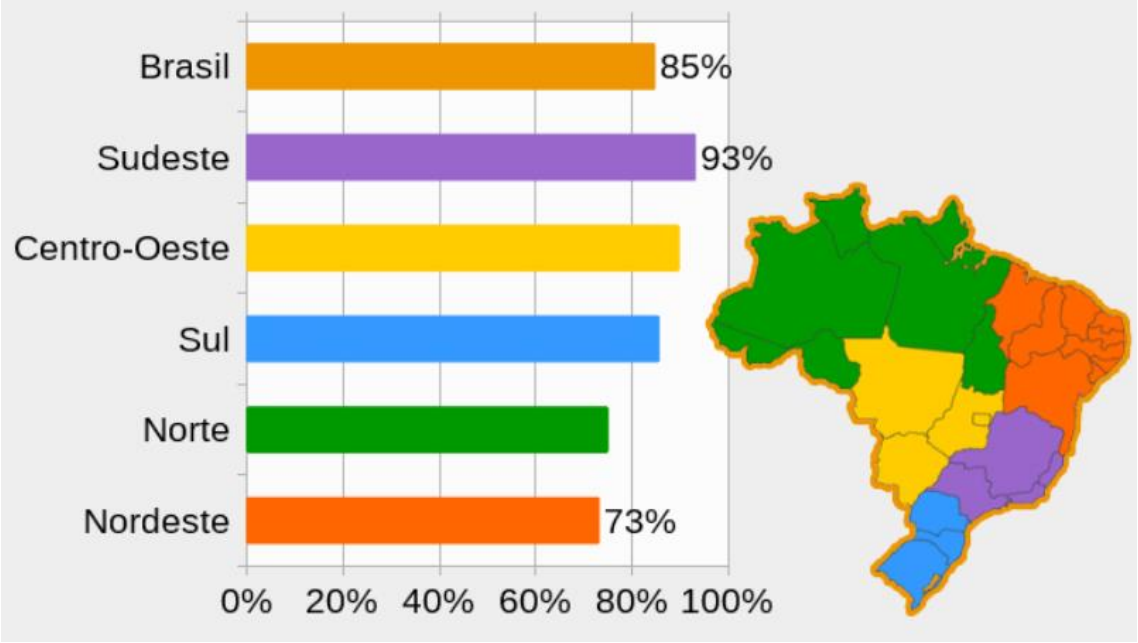
SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	**13**
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	**Objetivo geral**	**16**
1.1.2	**Objetivos específicos**	**16**
1.1.3	**Objetivos secundários**	**16**
1.1.4	**Limitações do trabalho**	**16**
2	**REFERENCIAL TEÓRICO**	**17**
2.1	TEORIA DO FLUXO DE TRÁFEGO	17
2.1.1	**Abordagem microscópica**	**17**
2.1.2	**Abordagem macroscópica**	**18**
2.1.2.1	**Fluxo**	**19**
2.1.2.2	**Densidade**	**20**
2.2	DIAGRAMA FUNDAMENTAL	20
2.3	CICLOS DE CONDUÇÃO	25
2.4	CARGAS DINÂMICAS E ENERGÉTICAS SOBRE O VEÍCULO	29
2.4.1	**Força de propulsão**	**30**
2.4.2	**Força de resistência gravitacional**	**30**
2.4.3	**Força de resistência aerodinâmica**	**30**
2.4.4	**Força de resistência ao deslocamento**	**31**
2.4.5	**Força de frenagem**	**31**
2.4.6	**Força resultante**	**31**
2.4.7	**Demanda energética veicular**	**32**
2.5	PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS	33
3	**METODOLOGIA**	**36**
3.1	ESCOLHA DAS CÂMERAS	36
3.2	FLUXO DE VEÍCULOS	38
3.3	ESCOLHA DAS VIAS	40
3.4	MEDIÇÃO DO FLUXO E DENSIDADE DEFINITIVOS	41
3.5	SIMULAÇÃO DO MODELO	44
4	**RESULTADOS E DISCUSSÕES**	**46**
4.1	MEDIDAS DO FLUXO E DENSIDADE	46
4.2	DIAGRAMAS FUNDAMENTAIS	51
4.3	SIMULAÇÃO	53
4.4	PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS	56
4.4.1	**Carros**	**56**
4.2.2	**Motos**	**58**
5	**CONCLUSÕES**	**60**
	REFERÊNCIAS	**62**
	APÊNDICE A – Dados originais de fluxo e densidade dos carros	**65**
	APÊNDICE B – Dados originais de fluxo e densidade das motos	**66**
	APÊNDICE C – Dados originais de fluxo e densidade dos veículos pesados	**67**

1. INTRODUÇÃO

O Brasil, ao longo das últimas décadas, vem sofrendo o processo de urbanização, consequência principalmente do êxodo rural, que ocorreu mais intensamente durante as décadas de 1970 e 1980. Segundo o IBGE, a mais recente Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), realizada em 2015 mostrou que aproximadamente 85% da população vive em área urbana no Brasil, como pode ser observado na Figura 1, sendo a região nordeste a menos urbanizada (73%).

Figura 1 – Porcentagem por região da população que vive em área urbana, em cada região



Fonte: IBGE, Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD)

Este intenso processo de urbanização gerou o fenômeno de metropolização, o qual ocorre quando a ocupação ultrapassa os limites de determinada cidade e se liga a outra, gerando as chamadas conurbações urbanas. A necessidade de maior mobilidade e deslocamento da população gerou, concomitante a este processo, o aumento da frota de veículos no Brasil.

Esse aumento na quantidade de veículos reflete não só no aumento no consumo de energia, mas também no cotidiano dos brasileiros, que passaram a ter mais dificuldades de mobilidade urbana, enfrentando viagens mais longas e congestionamentos. Aliado este fato, em geral, o sistema de transporte público é visto como precário e de baixa confiança, fazendo com que as pessoas adquiram um veículo próprio em busca de conforto e maior liberdade ao seu usuário (STEG, 2005), enquanto o transporte público é usado principalmente por quem realmente necessita deste para se locomover.

Para mitigar este problema de locomoção nas cidades é necessário um planejamento de transportes e da infraestrutura da rede rodoviária. Segundo (BRUTON,

1979), um estudo de diferentes propostas para melhorar a rede rodoviária existente e/ou construção de novas redes, melhorarão, obviamente, o fluxo de veículos nelas. Além disso, deve ser levado em conta as vantagens econômicas que as melhorias trarão, como redução de consumo de combustível por congestionamentos, maior pontualidade nos serviços, valorização de áreas comerciais e residências, aumento de arrecadação de impostos, entre outros. Uma outra opção seria aumentar o número de alternativas ao automóvel, investindo em ciclovias, hidrovias (a exemplo de Paris), trens e metrôs, além de incentivar a população a fazer uso desses transportes.

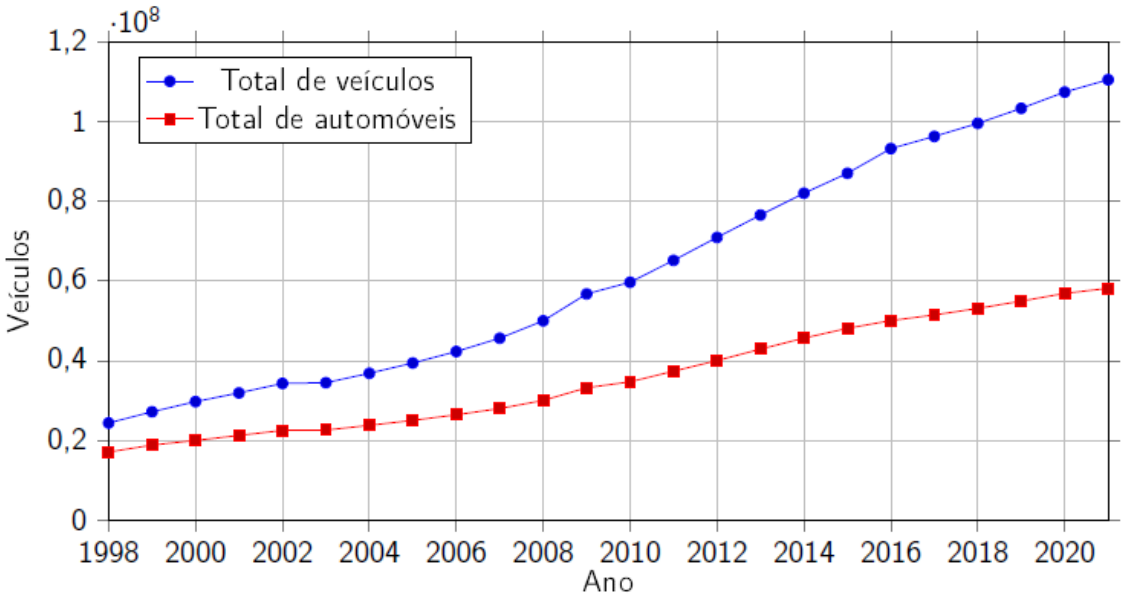
Recife é uma das mais importantes capitais brasileiras. Localizada na costa do atlântico, assim como a maioria das capitais, é uma das metrópoles mais ricas do Norte-Nordeste, apresentando um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de 0,772, acima da média de Pernambuco (0,673) e da média nacional (0,759) (IBGE, 2021). Sua região metropolitana é a mais antiga do Brasil e a terceira mais densamente habitada, sendo superada apenas por São Paulo e Rio de Janeiro.

Em questão ao tráfego de veículos, o Recife é bastante congestionado, sendo a cidade mais congestionada do Brasil, acima de São Paulo, e 24° pior do mundo, segundo O Estado de S.Paulo (2021). Para gerenciar este tráfego caótico, foi criada em 2000 a Companhia de Trânsito e Transporte Urbano (CTTU) que, fazendo parte da administração pública municipal, é responsável pelo controle, fiscalização e monitoramento do tráfego da cidade do Recife. Também faz parte das atribuições da CTTU a realização de estudos e projetos da frota e das vias, apresentando melhorias para a mobilidade urbana e educação no trânsito.

Em caráter nacional, é o Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN) que fornece pela internet informações sobre a frota licenciada de veículos, entre eles a sua composição e quantidade de veículos, que vem mostrando intenso crescimento: Dados de dezembro de 2021 demonstram um total de mais de 111 milhões veículos licenciados no Brasil, enquanto o valor em dezembro do ano 2000 beirava os 30 milhões veículos (DENATRAN, 2021). Essa frota é composta hoje principalmente por automóveis particulares (53%), caminhonetes (8%), motocicletas (22%) e motonetas (5%). A cidade do Recife detém 0,6% da frota brasileira (aproximadamente 714 mil veículos), e possui fração de automóveis em relação ao total de veículos um pouco maior (55%) que o valor nacional.

Os dados da composição da frota vêm demonstrando que a proporção de automóveis particulares vem aumentando em relação ao total de veículos. Nos últimos 10 anos por exemplo, a frota total de veículos (motos, carros, ônibus, etc) teve aumento de 70% enquanto a frota de carros de passeio aumento de 56% (FABIANA, 2022), sendo estes os veículos que mais são utilizados no Brasil. A Figura 2 mostra a evolução desta proporção.

Figura 2 – Evolução dos automóveis particulares na frota brasileira



Fonte: Fabiana (2022)

O estudo da composição da frota é importante pois estes são dados importantes para criar os ciclos de condução. Um ciclo de condução é um vetor velocidade no tempo, ou seja, é uma série de valores de velocidade organizados sequencialmente que devem ser seguidos ao longo do tempo e que são usados para os mais diversos fins: testes de homologação em veículos (testes em veículos que saem de fábrica), projetos de veículos, testes de consumo, emissão de poluentes (MAZER, 2020), entre outros. Para que um veículo seja licenciado com o DENATRAN, se faz necessário o teste através de ensaios utilizando ciclos de condução, no qual o INMETRO pode classificar o veículo desde a classe A (mais economia) até a classe E (menos economia), utilizando a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), assim como este órgão classifica os mais diversos eletrodomésticos.

Existem dois tipos de ciclos de condução: os ciclos de condução padrão (CCP) e os ciclos de condução locais (CCL). Os CCP servem para testes de homologação e certificação nacionais, ou seja, todo veículo a ser vendido naquele país deve ser aprovado nestes testes utilizando o seu CCP. Os CCL servem para análises de tráfego regionais, e seu estudo é importante porque os CCPs, devido ao seu caráter mais abrangente, podem não representar eficientemente o tráfego de determinadas regiões ou cidades.

Para mitigar essas diferenças e ampliar a análise, vários trabalhos propõem métodos para desenvolver CCL como alternativa aos CCP. Mas até mesmo a construção de um CCL pode vir a ser problemática: o tráfego de uma cidade também pode variar a depender do local, como por exemplo, periferias das cidades tendem a ser menos congestionadas que o centro (MARICATO, 2000). Esta característica, aliada a outras particulares que podem existir dentro das cidades, podem fazer com que até um CCL construído para uma região dentro de uma cidade não represente fielmente o tráfego em todas as suas regiões.

1.1 OBJETIVOS

Nesta seção serão apresentados os objetivos gerais e secundários, propostos por este trabalho e algumas limitações.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é verificar se medições de tráfego de apenas um local são suficientes para representar todo o tráfego da cidade do Recife. Em suma, será analisado se o tráfego do Recife possui características distintas entre as diferentes regiões da cidade, e em caso positivo, o quanto essas características variam e os possíveis motivos para as variações.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são colocados a seguir

- Medir fluxo e densidade em vários locais do Recife;
- Obter vetores de velocidade representativos de alguns desses locais através de simulação de tráfego computacional;
- Extrair parâmetros característicos desses vetores de velocidade desses locais e fazer a comparação dentre eles utilizando estes parâmetros.

1.1.3 Objetivos secundários

Os objetivos secundários são colocados a seguir.

- Fazer a comparação dos parâmetros de outros ciclos padrão utilizados no Brasil com os parâmetros encontrados em Recife;
- Verificar se os pontos observados coincidem com o diagrama fundamental da Via Mangue construído por Araujo (2021).

1.2 Limitações do trabalho

Algumas limitações encontradas para a realização deste trabalho foram colocadas a seguir.

- A comparação entre o diagrama fundamental da Via Mangue construído por Araujo (2021) e pontos observados somente foi realizada de forma visual;
- Período curto de análise do tráfego;
- As observações se restringiram à apenas um horário do dia.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresenta uma revisão das ideias necessárias para a compreensão do trabalho. Primeiro, apresenta-se a teoria do fluxo de tráfego sob suas diferentes abordagens. Segundo, apresenta-se uma explicação sobre diagramas fundamentais. Terceiro, apresenta-se os ciclos de condução e os principais ciclos utilizados no Brasil e ao redor do mundo. Quarto, mostra-se quais são as forças que agem sobre um veículo em movimento e como é realizado o cálculo da demanda energética veicular de um veículo. Por fim, define-se o que são parâmetros característicos e como são utilizados para fazer comparações entre os ciclos de condução.

2.1 TEORIA DE FLUXO DE TRÁFEGO

A teoria do fluxo do tráfego tenta descrever o comportamento do tráfego através da aplicação das leis da física e da matemática. São várias as formas de descrever os eventos do tráfego do mundo real e modelá-lo matematicamente (PEREIRA, 2002), pois o fluxo do tráfego é constituído por diversos fatores que não possuem comportamento constante, como, por exemplo, o comportamento dos condutores, a constituição das vias, a quantidade de veículos na via, os tipos veículos e as condições adversas do ambiente ao redor.

Existem duas principais formas de se abordar o tráfego, que são a abordagem microscópica e a abordagem macroscópica e, além desses, é possível ainda a abordagem utilizando o modelo mesoscópico, que é um modelo híbrido que comporta características de ambos os anteriores. Neste último, o comportamento dos veículos não é considerado individualmente, como na abordagem microscópica, mas em pelotões, e o movimento desses pelotões segue a abordagem hidrodinâmica que é aplicada na abordagem macroscópica (GAMBOA, 2016). Mais detalhes sobre esta abordagem podem ser encontrados em Van Wageningen-Kessels et al. (2015). A seguir, uma explicação sobre as duas abordagens principais e suas grandezas.

2.1.1 Abordagem Microscópica

Essa abordagem tem por base as relações interativas entre os veículos, considerando seus movimentos individuais, que coletivamente formam o fluxo de tráfego. Também descreve a reação de cada motorista individualmente em seu veículo (aceleração, alternância de faixa) a depender das condições do tráfego a seu redor.

Nesta abordagem pode-se considerar as chamadas leis de perseguição, que se trata de como ocorre a reação dos veículos quando estão em fila (também chamados de seguidores) a depender dos estímulos que o condutor da frente (veículo líder) realiza. As grandezas utilizadas são a velocidade, a *headway* e o espaçamento (ou *gap*), que serão definidas a seguir.

Nesta abordagem, a velocidade é definida como sendo a relação entre distância percorrida e tempo gasto para um veículo dentro do tráfego percorrê-la. Nos modelos

clássicos da abordagem microscópica, estuda-se como a velocidade de um veículo varia quando a velocidade dos veículos à sua frente varia (SILVA, 2007).

O *headway*, também chamado de intervalo, é a distância entre dois veículos sucessivos no tráfego, medida entre os para-choques dianteiros dos veículos. Pode ser medido em unidades de distância (*distance headway*) ou de tempo (*time headway*) que neste caso, é o tempo que um veículo levaria para ocupar o mesmo lugar do veículo à sua frente na corrente de tráfego na velocidade atual dos veículos (TREIBER; KESTING, 2013).

O espaçamento, que também é conhecido como *gap*, é o valor da distância entre veículos sucessivos, medida entre o para-choques traseiro do veículo da frente e para-choques dianteiro do veículo de trás. Assim como no *headway*, pode ser medido em unidades de distância (*distance gap*) ou de tempo (*time gap*) (TREIBER; KESTING, 2013).

Para se evitar acidentes, o ideal é aumentar ao máximo o *headway* ou o *gap*, para assim maximizar o tempo disponível para reação dos motoristas, mas isso causaria congestionamentos no tráfego. Por isso, ao projetar as vias e sua velocidade máxima, busca-se diminuir ao máximo essas grandezas, sempre prezando pela segurança do tráfego e dos condutores. Um *headway* ou *gap* muito pequenos por exemplo, não daria tempo suficiente para um motorista reagir a algum problema no tráfego.

2.1.2 Abordagem Macroscópica

Na abordagem macroscópica se considera o tráfego como um líquido ou gás em movimento, e por esse motivo às vezes é chamado de abordagem hidrodinâmica (PEREIRA, 2002). Esta analogia vem do fato de que para definir o tráfego são usados os valores médios das principais grandezas, como fluxo, velocidade e densidade (COELHO e GOLDNER, 2016), fazendo com que o projetista tenha uma melhor noção das limitações de capacidade das vias e a avaliar possíveis pontos de estrangulamento (SILVA, 2007).

Nesta abordagem a velocidade, novamente, é a relação entre a distância percorrida e o tempo gasto para percorrer essa distância, mas aqui mede-se a velocidade do tráfego como um todo. Apesar de parecer simples, é uma das grandezas mais trabalhosas de se medir no tráfego (SILVA, 2007). Neste trabalho será utilizada a velocidade média no tempo e a partir deste momento, quando for falado em velocidade média, será sobre este tipo que estará se referindo.

A velocidade média no tempo utiliza os dados obtidos em um único trecho do percurso e faz uma média aritmética das velocidades individuais de todos os veículos, como mostrado na Equação 1.

$$V = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} u_i = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{d}{t_i} \quad (1)$$

Onde:

V = velocidade média no tempo

u_i = velocidade do i-ésimo veículo nesse trecho

d = comprimento deste trecho;

n = o número de veículos;

t_i = tempo do i-ésimo veículo para percorrer esse trecho.

Há sempre o interesse em se cruzar a maior distância possível no menor tempo, levando os fatores como conforto e segurança em conta. São vários os fatores do tráfego que podem afetar a velocidade dos veículos (DNER, 1973):

- Horário (mais elevada pela manhã e à tarde, em que os condutores estão indo e voltando do trabalho, por exemplo);
- Volume de tráfego;
- Tipo de via e área (à medida que se afasta dos centros das cidades, a velocidade média dos veículos vai aumentando);
- Tipo de veículo;
- Faixas da via (a velocidade aumenta a depender das faixas, da esquerda para a direita).

2.1.2.1 Fluxo

É a razão entre o número de veículos que passa por determinado ponto da via pela unidade de tempo. Além disso, no estudo do tráfego, ainda é realizado o cálculo da razão do fluxo pelo número de faixas da via afim de se poder fazer uma melhor comparação com outras vias. Senão fosse dessa forma, as vias com mais faixas teriam um fluxo maior, sem necessariamente estarem mais congestionadas.

O fluxo depende diretamente da velocidade dos veículos, e pode ser analisado de diversas formas, a depender do interesse de quem está medindo (DNIT, 2006):

- Fluxo diário médio: avaliar a distribuição do tráfego, medir demanda e programar medidas;
- Fluxo anual: utilizado para determinação do índice de acidentes, estimar receitar para pedágios e estudar tendências de tráfego;
- Fluxo de horário: estudos de capacidade, projetos geométricos e controle de tráfego.

O fluxo sempre está variando, tanto ao longo do dia quanto ao longo da semana. Durante o dia, de maneira geral, o fluxo é mais elevado nas primeiras horas da manhã e ao entardecer. Já durante os dias úteis, o tráfego é maior nas vias urbanas e menor nas vias rurais, situação que se inverte aos fins de semana.

O estudo dessas variáveis é importante para o dimensionamento das vias, pois leva-se em conta tanto a variação diária quanto a variação anual do fluxo. Em períodos de férias escolares, por exemplo, o fluxo diminui em vários dias consecutivos, por isso, se fosse adotado sempre o maior fluxo como referência seria muito dispendioso os custos de construção das estradas.

2.1.2.2 Densidade

É a quantidade de veículos por unidade de distância, em suma, é a razão entre a quantidade de veículos presentes em um determinado trecho da via pelo comprimento desse trecho. Como numa via existem diferentes faixas de rolamento, em que cada uma dessas faixas pode comportar um veículo, ainda se faz a razão da densidade pela quantidade de faixas de rolamento.

Essa quantidade depende diretamente do espaço entre os veículos. A velocidade não influencia diretamente na densidade, exceto pelo fato de que quanto maior a velocidade dos veículos, maior tende a ser a distância entre eles, e menor o congestionamento do tráfego.

Essa variável é extremamente útil para a análise de congestionamentos das vias, pode ser aferida através de simples fotografias (COELHO et al., 2016) ou da razão entre o fluxo (n° de veículos por tempo) e a velocidade (unidade de distância por tempo), resultando em n° de veículos por unidade de distância, como pode ser observado na Equação 2:

$$D = \frac{F}{V} \tag{2}$$

Onde:

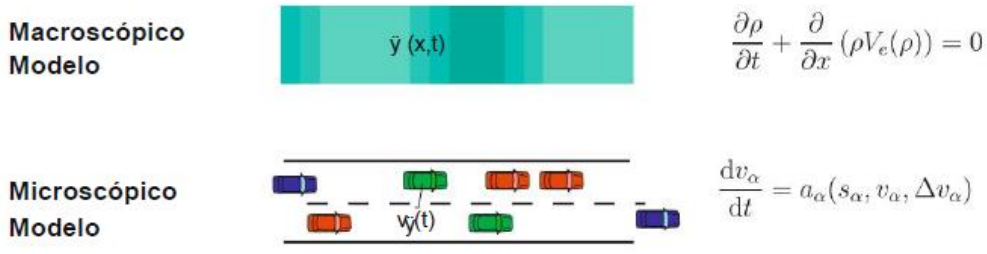
D = Densidade da via em veículos km^{-1} $faixa^{-1}$

F = Fluxo da via em veículos h^{-1} $faixa^{-1}$

V = Velocidade média dos veículos da via em km h^{-1}

Na Figura 3, uma pequena ilustração de como o tráfego é tratado em ambas as abordagens descritas até então.

Figura 3 – Representações dos modelos macroscópico e microscópico, respectivamente



Fonte: Treiber e Kesting (2013), adaptado

2.2 DIAGRAMA FUNDAMENTAL

O pioneiro em observações de fluxo de tráfego em rodovias e estradas foi Bruce D. Greenshields em 1933, fazendo vários testes utilizando métodos de medição por fotos

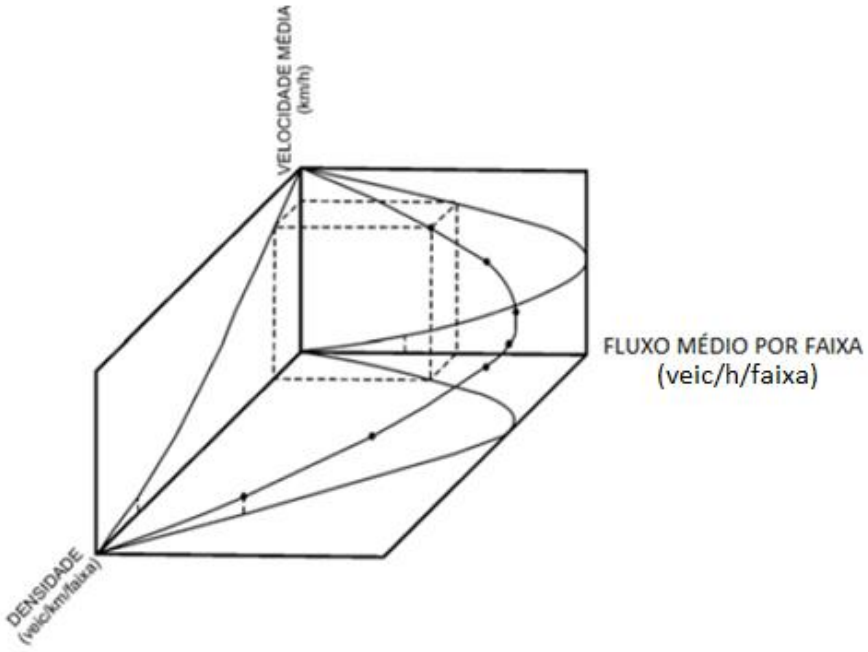
para analisar a velocidade, o fluxo e a densidade de carros em uma rodovia (KÜHNE, 2008).

No ano seguinte, Greenshields foi capaz de encontrar a primeira relação entre a densidade e a velocidade de veículos (densidade inversamente proporcional à distância entre os veículos). Em seu modelo matemático, a velocidade dos veículos decrescia linearmente quando a densidade aumentava, e o fluxo se relacionava com a densidade sob a forma de uma parábola.

A partir de manipulações desse modelo utilizando o cálculo diferencial e integral, Greenshields foi capaz de encontrar um diagrama, que posteriormente foi denominado diagrama fundamental.

Esse diagrama é um gráfico de duas dimensões (abscissa, ordenada) onde as três grandezas macroscópicas (velocidade, fluxo, densidade) se relacionam duas a duas, sendo que o diagrama fluxo versus densidade é o mais utilizado. Na Figura 4 é mostrada uma a relação entre as três grandezas macroscópicas.

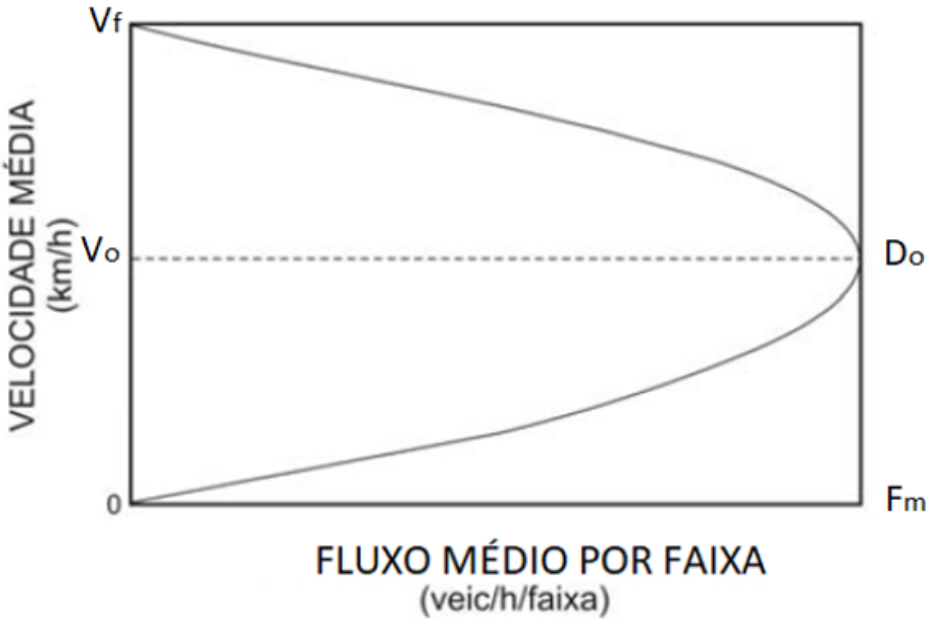
Figura 4 – Relação entre as três grandezas macroscópicas no diagrama fundamental



Fonte: DNIT (2006), adaptado

Existem diversos fenômenos que influenciam no tráfego, como a turbulência, presença de vias locais, acessos, semáforos, mas em suma, essas grandezas guardam uma relação entre si, isto é, tendo-se quaisquer duas delas, é possível encontrar o correspondente valor da terceira, e suas relações gráficas estão expostas nas Figuras 5, 6 e 7 a seguir.

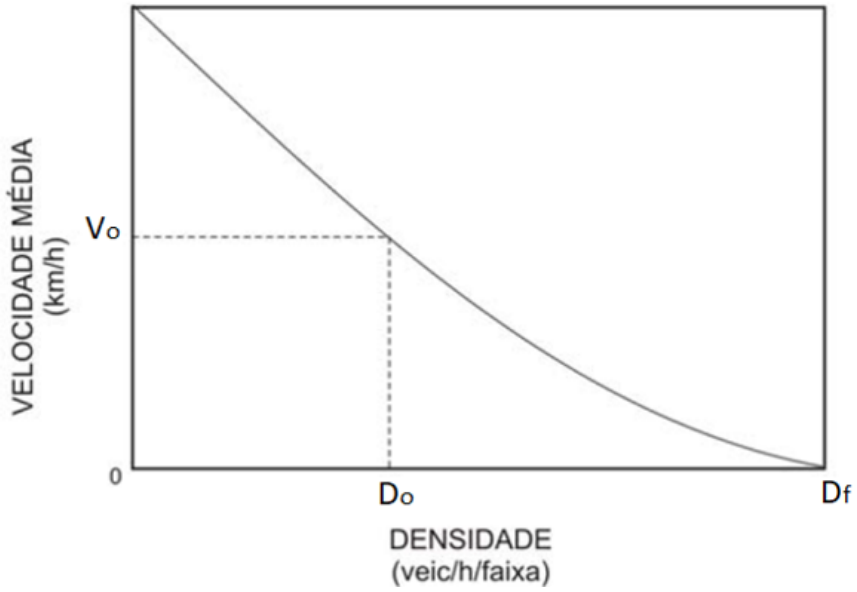
Figura 5 – Relação entre velocidade média e fluxo no diagrama fundamental



Fonte: DNIT (2006), adaptado

Partindo de V_f na Figura 5, que é a velocidade de fluxo livre, e se deslocando para a esquerda, no sentido de aumento de fluxo, chega-se ao ponto D_0, chamado de ponto de densidade ótima, também chamado de densidade crítica, o qual corresponde ao fluxo máximo que a via pode comportar, e esse fluxo máximo também pode ser chamado de capacidade da via. A partir deste ponto, introduzindo mais veículos na via (aumentando densidade), provoca um fenômeno chamado de turbulência, e o fluxo e a velocidade média diminuem.

Figura 6 – Relação entre velocidade média e densidade no diagrama fundamental

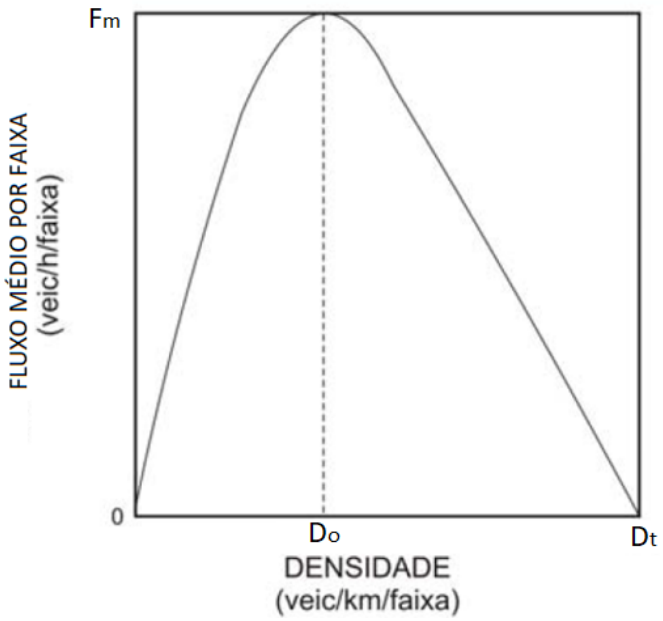


Fonte: DNIT (2006), adaptado

Observando a Figura 6 pode-se observar que a velocidade média e densidade são grandezas inversamente proporcionais, e isto faz sentido na prática, pois é comum pensar que uma menor quantidade de veículos na pista permite ao condutor trafegar mais livremente, em uma velocidade mais elevada, enquanto quando se tem mais veículos na via o tráfego fica mais lento, pois a velocidade de um veículo é limitada pelo veículo que está à frente.

Como pode ser visto na Figura 7, a relação entre fluxo e densidade neste diagrama tem a forma parabólica invertida. Enquanto a densidade aumenta, o fluxo também aumenta, até atingir o vértice, que é o ponto D_0 de densidade ótima. A partir daí, o fluxo começa a decair até o ponto D_t de congestionamento.

Figura 7 – Relação entre fluxo e densidade no diagrama fundamental



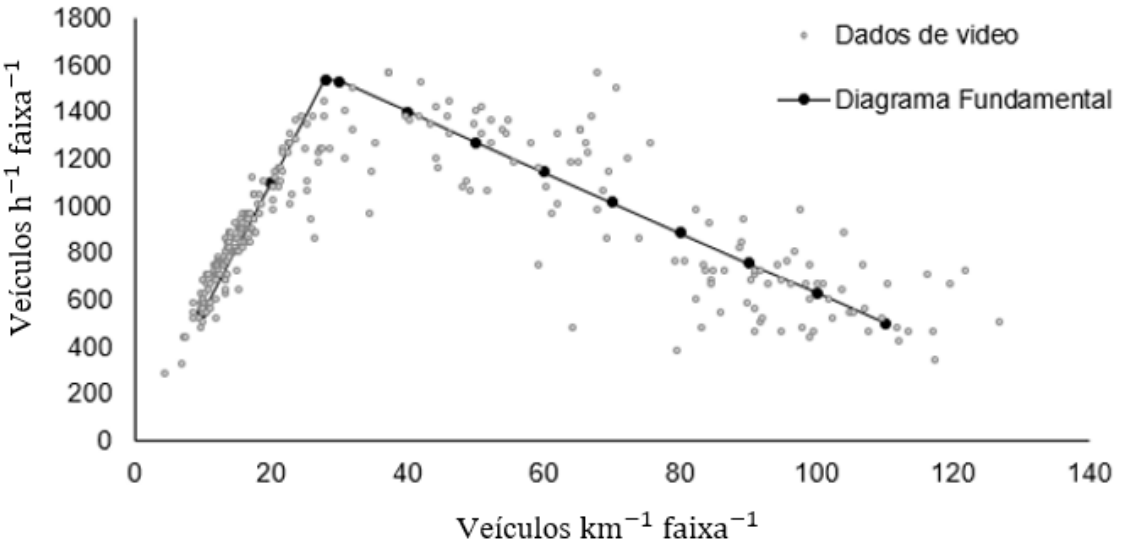
Fonte: DNIT (2006), adaptado

Mesmo que o diagrama fundamental apresente o fluxo nas ordenadas e densidade nas abscissas, há diferenças entre um diagrama fundamental e um diagrama fluxo-densidade. Segundo Treiber e Kesting (2013), são vários os motivos pelos quais o diagrama fundamental não coincide com um diagrama fluxo-densidade, entre eles:

- O estado estacionário, presente apenas no diagrama fundamental e que não represente bem a realidade de um tráfego urbano misto. Neste, há variações bruscas na velocidade dos veículos, as quais podem ser causados por semáforos, mudança do número de faixas nas vias, saídas, entradas, conversões e até mesmo a presença de veículos de grande porte;
- O diagrama fundamental considera o tráfego homogêneo, ou seja, todos os veículos iguais e condutores com comportamentos semelhantes, o que mais uma vez não representa a realidade do tráfego misto urbano, onde além dos carros serem diferentes entre si, também estão presentes as frotas de motocicletas, caminhões, ônibus, etc.

Mesmo com essas diferenças, a partir deste ponto, quando o autor citar diagrama fundamental estará se referindo a curva que melhor representa os pontos da relação fluxo densidade de dada localidade. Na Figura 8 abaixo está representado um exemplo de diagrama fluxo-densidade, onde há uma nuvem de pontos correspondentes a observações de tráfego real e as retas que melhor aproximam esses pontos, o chamado diagrama fundamental.

Figura 8 – Nuvem de pontos (em cinza) correspondentes a observações reais de tráfego e reta que melhor se ajusta a esses pontos (em preto)

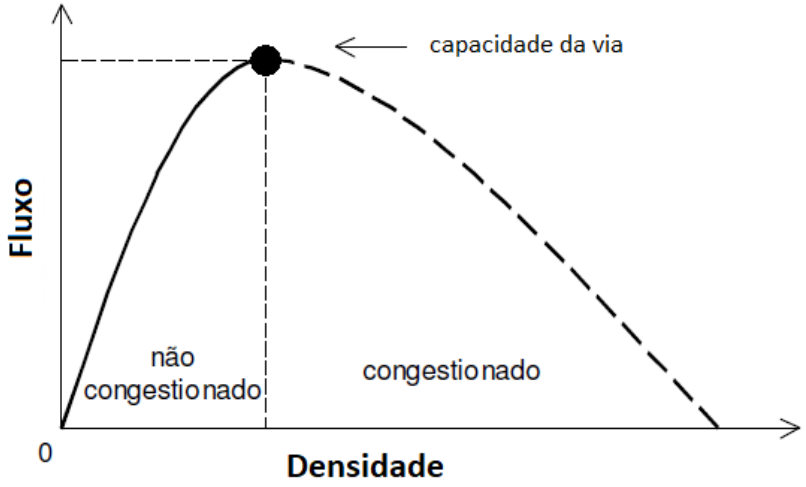


Fonte: (ARAUJO, 2021), adaptado

Quando deseja-se estudar o comportamento de uma via, o primeiro passo é encontrar o seu diagrama fundamental, pois ele é o mais importante indicador do comportamento global de uma via, desde a região de tráfego totalmente livre a região de congestionamento. Por exemplo, ao analisar a região do diagrama fundamental onde se encontra um ponto, é possível saber qual a condição do tráfego desse ponto.

Na Figura 9, é possível ver que pontos que estejam à esquerda do ponto de inflexão, também chamado de capacidade da via, são pontos de tráfego livre, e à direita, são pontos de tráfego congestionado.

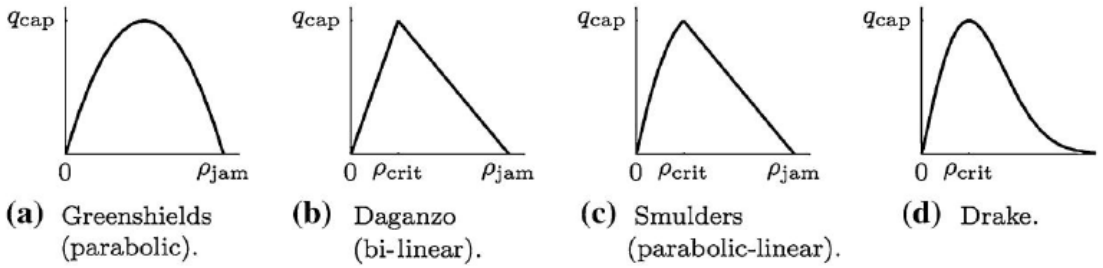
Figura 9 – Exemplo de Diagrama Fundamental e suas regiões



Fonte: Silva (2007), adaptado

Entretanto essa forma do diagrama fundamental não foi a única proposta. Posteriormente a Greenshields, Daganzo (1994) propôs um diagrama fundamental com plano fluxo-densidade com forma triangular (bi-linear), como pode ser visto na Figura 10b. (SMULDERS, 1990) propôs uma relação que é combinação das duas anteriores, como visto em 10c. Ou seja, parabólico para densidades baixas (à esquerda do ponto de inflexão) e linear para densidades altas (à direita do ponto de inflexão). Finalmente, Drake et al. (1967) propôs um diagrama fundamental inteiramente parabólico.

Figura 10 – Diagramas fundamentais no plano fluxo-densidade



Fonte: Van Wageningen et al. (2015)

2.3 CICLOS DE CONDUÇÃO

Os ciclos de condução são sequências de valores de velocidade no tempo que representam o tráfego de uma região ou localidade. Essa sequência de valores de velocidade é chamada de vetor velocidade, o qual aqui possui um significado diferente do conceito de vetor da física básica: vetor velocidade é uma sequência de valores de velocidade organizados no tempo, que normalmente é dado em segundos. Estes valores podem ser representados em um gráfico, a exemplo da Figura 11 ou em uma matriz de ordem Nx2, onde N é a duração do ciclo em segundos.

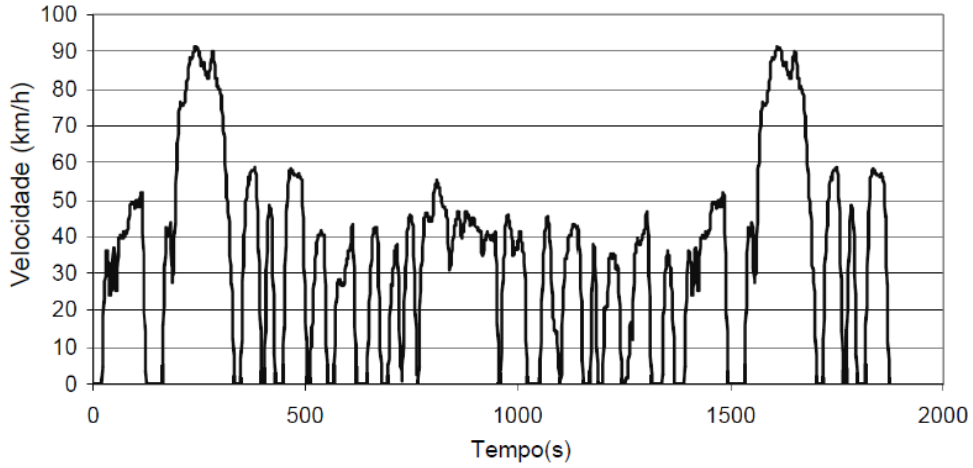
Existem dois tipos de ciclos de condução: os ciclos de condução padrão (CCP) e os ciclos de condução locais (CCL). Os CCP servem para testes de homologação e certificação nacionais, ou seja, todo veículo a ser vendido em determinado país, ou conjunto de países (União Européia) deve ser aprovado em seu respectivo teste utilizando seu CCP correspondente. Os CCL servem para análises de tráfego regionais, e seu estudo é importante porque os CCPs, devido ao seu caráter mais abrangente, podem não representar eficientemente o tráfego de determinadas regiões.

Estes testes de homologação são realizados em laboratório, utilizando um dinamômetro de chassi e um motorista treinado para reproduzir o perfil de velocidade, as marchas ou outros parâmetros (se existirem) do ciclo a ser reproduzido. A velocidade desejada é mostrada em um monitor enquanto a velocidade atual é apontada no velocímetro do veículo (ANDRADE, 2020).

A realização destes testes permite medir de forma padronizada a emissão veicular e consumo de combustível em motores de combustão interna, servindo também como padrão de qualidade. Por isso, devem atualizados regularmente, mantendo-se o mais fiel possível à realidade, e também acompanhando as melhorias na eficiência energética dos veículos, por exemplo. Também são usados para projetar os veículos híbridos ou elétricos, afim de estudar o uso e eficiência da bateria (WANG et al., 2008).

No Brasil, o ciclo de condução oficial para testes de emissão e consumo de combustível obedecem às Normas ABNT NBR 6601 e ABNT NBR 7024, respectivamente, adotando um ciclo baseado no ciclo padrão americano EPA FTP-75 (Federal Test Procedure) para testes referentes ao interior de cidades, cujo gráfico velocidade versus tempo pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Ciclo FTP-75



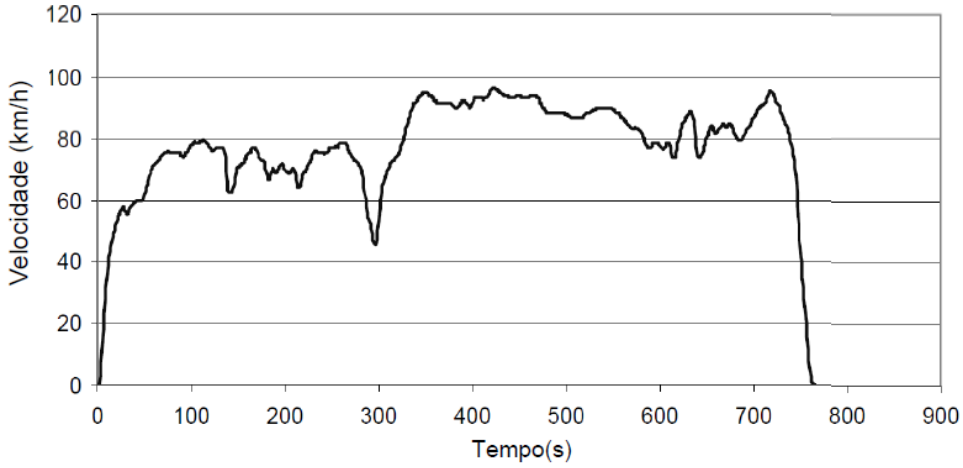
Fonte: Barlow (2009)

Para testes referentes a rodovias, em que veículos passam a maior parte do tempo em velocidade de cruzeiro e que possuem o tráfego menos congestionado, é utilizado no Brasil, segundo as normas ABNT NBR 6601 e ABNT NBR 7024, o ciclo EPA HWFET (Highway Fuel Economy Test Cycle), que pode ser visualizado na Figura 12. É dito que

o veículo está em cruzeiro quando mantém velocidade constante e maior que zero, situação bem comum em rodovias. Observe que as únicas paradas neste ciclo são feitas no início e ao final, diferentemente do FTP – 75. Mais detalhes sobre a execução destes testes podem ser observados nas já citadas normas da ABNT NBR 6601 e NBR 7024.

Normalmente os CCPs são definidos em um gráfico de velocidade em função do tempo, mas também pode ser construído em função de outras variáveis dinâmicas, como a aceleração. As normas definem informações e procedimentos adicionais que devem ser seguidos durante o ciclo, como as marchas em que o veículo deve estar em determinados momentos do ciclo, temperatura do motor, dentre outras. Os ciclos de condução locais são mais numerosos e em sua maioria são publicados em artigos, apresentando geralmente apenas uma imagem de seu gráfico com alguns parâmetros característicos medidos durante o ciclo.

Figura 12 – Ciclo HWFET



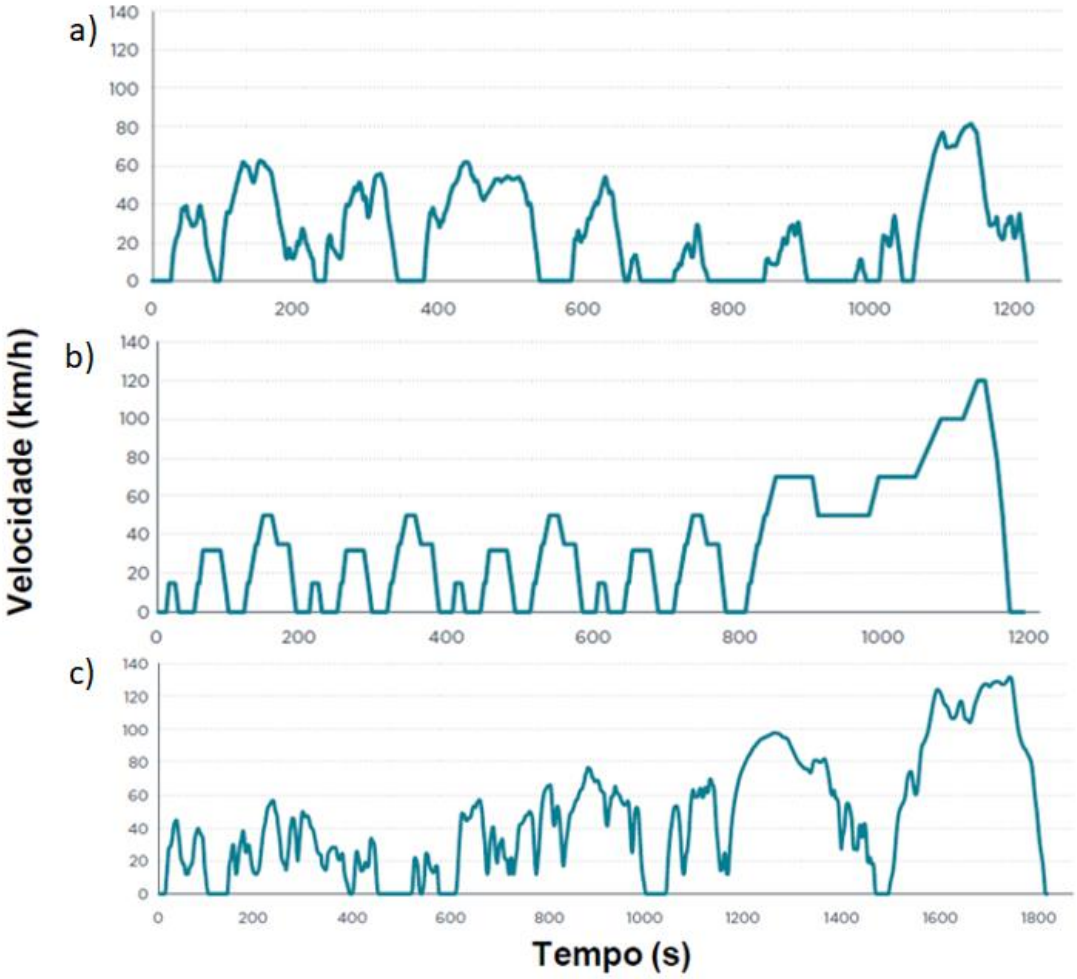
Fonte: Barlow (2009)

No Japão, o ciclo utilizado atualmente é o JC08 e possui aspectos semelhantes: o veículo é submetido ao mesmo vetor velocidade duas vezes, com a diferença da primeira vez ser com a partida com o motor frio e a segunda com a temperatura do motor estabilizada. Essa abordagem é importante pois o gasto de combustível, e por consequência, as emissões de carbono, são afetadas pela temperatura do motor (ARAUJO, 2021).

O NEDC (New European Driving Cycle) é o ciclo europeu. Referência não só na Europa, mas também em algumas outras regiões, como China e América Latina, este ciclo é composto por cinco segmentos, sendo os quatro primeiros para representar a movimentação urbana e o último, com uma velocidade média maior, para simular a situação de estrada (ARAUJO, 2021). Há algum tempo o NEDC é contestado a respeito do seu perfil de velocidade, que é constante na maioria do ciclo e não se aproxima com a situação de uso real urbano de um veículo (QUADROS, 2016). Para suprir essa deficiência, foi criado o ciclo WLTC (Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Cycle), que desde janeiro de 2019 substituiu o NEDC nos testes de homologações de veículos na Europa, sendo dividido em quatro fases, também é o mais moderno dentre

todos os ciclos apresentados até o momento. Os ciclos que ainda não foram mostrados podem ser vistos na Figura 13.

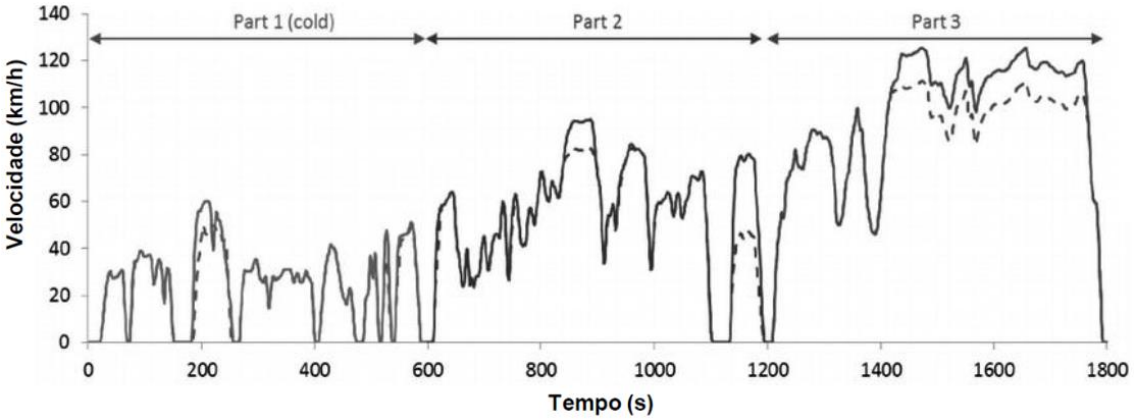
Figura 13 – Alguns ciclos padrão ao redor do mundo; a) JC08; b) NEDC; c) WLTC



Fonte: Adaptado de Kuhlwein, German e Bandivadekar (2015)

Os cinco ciclos descritos anteriormente são usados para testes em carros de passeio. Para motocicletas, existe o WMTC (World Motorcycle Test Cycle), que é usado para medir o consumo de combustível e emissão em motocicletas na maioria dos países do globo, servindo de regulamentação para que se possa comerciar esses veículos. Mesmo possuindo reconhecimento global, no Brasil e no Japão são utilizados apenas para testes de emissões (GIAKOUMIS, 2016). Este ciclo WMTC também é dividido em fases, sendo iniciado sempre com o motor frio (cold) e com média de velocidades mais baixas, como pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 – Ciclo WMTC dividido em estágios



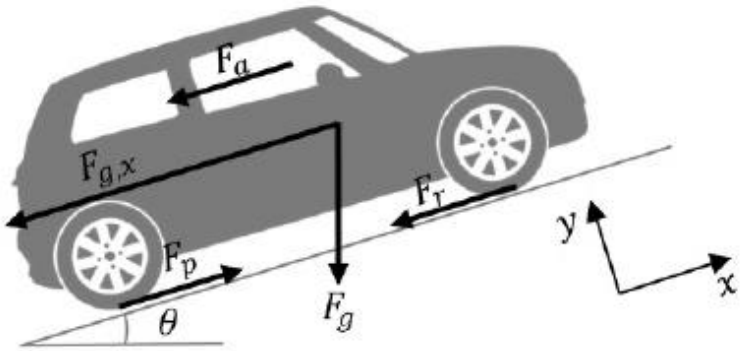
Fonte: Geraldi (2016)

Importante salientar que todos os CCPs descritos anteriormente (com exceção do ciclo WLTC e WMTC que são utilizado por diversos países) foram desenvolvidos conforme as características do tráfego e da frota local; FTP-75 para os EUA, JC08 para o Japão e NEDC para a Europa que, posteriormente, adotou o WLTC.

2.4 CARGAS DINÂMICAS E ENERGÉTICAS SOBRE O VEÍCULO

A dinâmica de forças sobre um veículo pode ser modelada matematicamente através de um balanço de forças utilizando o diagrama de corpo livre, conforme mostrado na Figura 15, que mostra essas forças em um plano inclinado.

Figura 15 – Diagrama de corpo livre de um veículo se movimentando em um plano inclinado



Fonte: Santos (2021)

A força de propulsão (F_p) é a força que o combustível fornece ao motor para o veículo se movimentar. Esta força, junto com a força de frenagem (F_f) são as únicas que podem ser controladas pelo motorista do carro ou piloto da moto, através do acelerador e

dos freios, respectivamente. A força de propulsão deve ser suficiente para vencer outras quatro forças para que o veículo possa acelerar para frente. São elas: a força de resistência gravitacional (F_g) devido à inclinação da pista, a força de resistência aerodinâmica (F_a), a força de resistência ao deslocamento (F_d) e a força de frenagem (F_f). Esta última tem mesma direção e sentido da força de resistência ao deslocamento, caso os freios estejam acionados. A seguir, será dada uma explicação mais detalhada sobre cada uma destas forças.

2.4.1 Força de propulsão

É a força que o motor fornece para as rodas do veículo, fazendo-o se movimentar. É função da potência máxima P do motor no instante considerado, da eficiência η da transmissão, da velocidade V do veículo e do coeficiente α, que representa a porcentagem com que o acelerador do veículo está sendo pressionado, variando de 0 a 1 na Equação 3.

$$F_p = \alpha \frac{\eta P}{V} \tag{3}$$

2.4.2 Força de resistência gravitacional

Esta força produz seus efeitos quando o veículo está numa pista que possui alguma declividade, e pode ser calculada decompondo-se a força peso no sentido paralelo à inclinação da pista. Pode ser expressa pela Equação 4, onde (Φ) é o ângulo da inclinação da pista, m é a massa do conjunto veículo e ocupantes e g a gravidade:

$$F_g = mg \operatorname{sen} \Phi \tag{4}$$

Essa força dificulta o movimento do veículo quando este está em movimento ascendente na pista (subindo) e auxilia o mesmo na decida. A inclinação máxima nas estradas brasileiras é regulada pelas Normas Para o Projeto das Estradas de Rodagem (DNER, 1973), e depende do tipo de estrada. Em suma, em vias onde o tráfego é mais intenso, recomenda-se inclinações de no máximo 5%, o que equivale a Φ = 3°. Já nas rodovias com mais baixo volume de tráfego as inclinações máximas são de 9%, com Φ girando em torno de 5°.

2.4.3 Força de resistência aerodinâmica

Essa força na mecânica dos fluidos é conhecida como arrasto aerodinâmico, e ocorre durante o movimento de um corpo sólido imerso em um fluido (um líquido ou um gás), como ocorre no movimento de um veículo no ar atmosférico. O ar exerce um atrito na superfície do automóvel, cuja intensidade depende da velocidade e do formato do veículo, por isso é importante se projetar uma forma que minimize essa perda. O vento atua em todas as direções no veículo, mas apenas a força que se opõe ao movimento foi considerada neste trabalho (ARAUJO, 2017). A força de arrasto aerodinâmico pode ser simplifica pela Equação 5:

$$F_a = K_a V^2 \quad (5)$$

Onde V é a velocidade do veículo em relação ao vento longitudinal. Se a velocidade do vento tiver o mesmo sentido do carro, a velocidade relativa será menor, fazendo que a força de arrasto seja menor e caso tenham sentidos opostos, a velocidade relativa será maior, aumentando o valor da força de arrasto.

O termo K_a é uma constante que representa outras constantes, que são a densidade do ar (ρ), área de contato de referência (A) e uma constante adimensional (C_d), determinada experimentalmente. Abaixo a expressão para calcular-se o K_a, todas as grandezas estão em unidades do SI.

$$K_a = \frac{1}{2}\rho C_d A \quad (4)$$

A área de referência é a área que resulta de uma projeção da área do veículo num plano perpendicular à direção em que o veículo está se movendo. Isto significa que, visto de frente, esta área seria a largura do automóvel multiplicada pela altura, e não a área total de todas as superfícies curvas (capô, para-brisa).

Nas motos esse coeficiente pode variar, em razão de a área que sofre com a resistência do ar variar a depender da posição do piloto sobre a moto. Em uma posição mais deitada, por exemplo, gera uma área projetada menor e diminui a resistência do ar.

2.4.4 Força de resistência ao deslocamento

A resistência ao deslocamento (F_d) ocorre principalmente pela deformação do pneu quando em contato com a pista. O atrito interno entre as peças em movimento e o amortecimento também aumentam a resistência ao deslocamento, embora seus efeitos sejam menores (COSSALTER, 2006). Todos esses efeitos podem ser concentrados em um mesmo coeficiente, denominado coeficiente de rolagem C_r, que varia em torno de 0,02 para automóveis e carros (ARAUJO, 2017). Pode-se calcular a força de rolagem através da Equação 6:

$$F_d = C_r\, mg \cos \Phi \quad (6)$$

2.4.5 Força de frenagem

A força de frenagem (F_f) ocorre quando os freios do veículo são acionados e, basicamente, é a força de atrito entre o pneu e a pista, que considera o coeficiente de atrito e o peso do veículo, e um coeficiente β, que depende da intensidade percentual com que o condutor pressiona os freios, variando de 0 a 1. Pode ser dada pela Equação 7:

$$F_f = \beta\, \mu\, mg \cos \Phi \quad (7)$$

2.4.6 Força resultante

A força resultante atuante no veículo pode ser dada, segundo a 2° Lei de Newton, pelo somatório da força de propulsão F_p com as forças resistivas F_r, como pode ser visto nas equações 7 e 8. As forças resistivas são dadas como o somatório de todas as forças apresentadas até agora, com exceção da força de propulsão.

$$F = F_p + F_r = F_p - F_g - F_a - F_d - F_f = ma \quad (7)$$

$$m\frac{dV}{dt} = \alpha\frac{\eta P}{V} - mg\,\text{sen}\,\Phi - K_a V^2 - Cr\,mg\cos\Phi - \beta\,\mu\,mg\cos\Phi \quad (8)$$

2.4.7 Demanda Energética Veicular

Para que o veículo consiga acelerar, é necessário que a força de propulsão F_p seja maior que todas as outras forças combinadas (ANDRADE, 2020; ANDRADE et al., 2021), conforme descrito na última seção. Caso o somatório de forças seja nulo, o veículo estará em velocidade constante ou parado, segundo a 2° Lei de Newton. Em alguns momentos as forças resistivas podem ajudar no movimento, como em descidas, vento em popa, mas no decorrer deste trabalho serão sempre considerados os casos em que o arrasto e a inércia do veículo dificultam o movimento, agindo em sentido oposto ao da força de propulsão.

A demanda energética veicular (DEV) é a potência desejada nas rodas, expressa em unidades de MJ km^{-1}, para que o veículo percorra o trajeto desejado. Como na DEV deseja-se calcular a potência que o veículo precisa ter nas rodas para vencer as forças resistivas, não faz sentido considerar a força de frenagem ou o atrito interno entre as peças do automóvel. Além disso, para situações de pista sem declividades e vento parado, as forças resistivas podem ser dadas como na Equação 8.

$$F_r = F_a + F_d = K_a V^2 + C_r\,mg\cos\Phi \quad (8)$$

A norma da ABNT NBR 10312, a qual regula os testes de resistência ao deslocamento, aproxima a Equação 9 para uma curva do 2° grau, utilizado duas constantes denominadas f_0 e f_2 para ajustar a parábola, como demonstra a Equação 9.

$$F_r = f_2 V^2 + f_0 \quad (9)$$

Utilizando a 2° Lei de Newton, é possível expressar a potência (P) através da Equação 10.

$$P = \Delta E_i = (ma_i + F_r)V_i\Delta t = (ma_i + f_0 + f_2 V_i^2)V_i\Delta t \quad (10)$$

Onde:

ΔE_i = Energia requerida pelo veículo a cada intervalo de tempo Δt em Joules (J);
f_0 e f_2 = Coeficientes de resistência ao deslocamento em unidades de N e $N.(km.h^{-1})^{-2}$, respectivamente.

Os termos f_0 e f_2 são definidos de forma experimental, através de um procedimento chamado de teste de resistência ao deslocamento (ANDRADE, 2020), o qual também é regulamentado pela norma da ABNT NBR 10312.
A DEV é obtida dividindo-se a Energia total demandada pela distância percorrida em quilômetros, como é mostrado na Equação 11.

$$DEV=\sum \frac{\Delta E_i}{d} \tag{11}$$

Perceba, pela Equação 10, que quando o veículo está em velocidade constante, o termo ma_i se torna igual a zero, mas os demais permanecem, tendo o veículo que consumir energia para manter a sua velocidade, se opondo às forças resistivas. Entretanto, quando o veículo desacelera por seu próprio movimento, isto é, quando o veículo está em ponto morto e nenhum dos pedais está sendo acionado, a DEV é considerada nula.

2.5 PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS

Os parâmetros característicos (PC) são resultantes da combinação de dados cinemáticos de velocidade e do tempo, como por exemplo: velocidade média, aceleração positiva média, percentual de tempo em velocidade de cruzeiro (HUERTAS et al., 2019). Estes parâmetros podem ser calculados a partir de quaisquer dados, como um ciclo de condução padrão, ciclo de condução local ou até mesmo a partir de um vetor de velocidade qualquer. Como os ciclos são diferentes entre si, com curvas apresentando diferentes características, a sua comparação visual não é eficiente, assim foram definidos os parâmetros característicos, para comparar os ciclos de condução.

Existem diversos parâmetros característicos, a depender do objeto do estudo ou teste que será realizado. De acordo com Barlow et al. (2009), existem mais de 30 PC relacionados a fatores como tempo, velocidade, aceleração, paradas e dinâmica. Esses parâmetros também podem vir a ter uma definição diferente para cada tipo de autor, por exemplo alguns autores consideram que o veículo está em movimento quando a velocidade não é nula e outros apenas quando a velocidade é maior que 1 $m.s^{-1}$.

Neste trabalho serão utilizados em suma os parâmetros cinemáticos e os temporais. Os cinemáticos são os que tem relação com o movimento do veículo (aceleração, velocidade média) e os temporais são os que envolvem medição de tempos dentro do ciclo (tempo acelerando, tempo em cruzeiro, tempo parado).

Além dos parâmetros característicos existem os parâmetros energéticos, ou de energia, que levam em conta as características dos veículos individualmente, como por exemplo massa, aerodinâmica do veículo, potência do motor, entre outros. Os principais parâmetros energéticos são o consumo energético e a emissão de poluentes. Vide que são esses os mesmos testes de fábrica pelos quais os veículos precisam passar ao sair de fábrica no Brasil e na maioria dos países.

Não há acordo sobre os parâmetros que descrevem completamente um ciclo padrão de condução (HUERTAS et al., 2019). Por isso, os parâmetros escolhidos para este trabalho foram os mesmos escolhidos por Araujo (2021) e Andrade et al. (2021) de

forma que também possam ser comparados em alguns momentos deste trabalho. Esses parâmetros são mostrados na Tabela 1, em que o único parâmetro energético é a DEV.

Tabela 1 – Parâmetros característicos, energético e suas definições

Parâmetros	Símbolos	Unidades	Definição
Duração	T	s	Tempo total do ciclo
Distância	L	km	Distância percorrida no ciclo
Velocidade média	V	km/h	Velocidade média
Velocidade média corrida	Vc	km/h	Velocidade média excluindo períodos em neutro
Velocidade máxima	Vx	km/h	Maior valor de velocidade registrado
Desvio padrão da velocidade	σ	km/h	Desvio padrão da velocidade para todo o ciclo de condução
Paradas			Vezes em que a velocidade é igual a zero
Percentual do tempo em repouso	Tr	s (%)	Proporção de tempo onde velocidade e aceleração são zero
Percentual do tempo em cruzeiro	Tc	s (%)	Proporção de tempo onde a velocidade é constante e diferente de zero
Percentual do tempo acelerando	Ta	s (%)	Proporção de tempo onde aceleração é maior que zero
Percentual do tempo desacelerando	Td	s (%)	Proporção de tempo onde aceleração é menor que zero
Aceleração média		m/s^2	Média das acelerações positivas
Desaceleração média		m/s^2	Média das acelerações negativas
Aceleração máxima		m/s^2	Maior valor positivo da aceleração
Desaceleração máxima		m/s^2	Menor valor positivo da aceleração
Demanda Energética Veicular	DEV	MJ/km	Energia necessária para que o veículo de movimente

Fonte: Adaptado de Andrade et al. (2021)

A Tabela 2 mostra os parâmetros característicos e DEV dos ciclos de condução padrão citados na seção 2.4: FTP-75, HWFET, JC08, NEDC, WLTC fase 3 e WMTC. É possível comparar estes ciclos através dos valores destes parâmetros. A exemplo, o ciclo japonês (JC08) é o que possui menor tempo em cruzeiro (2%), enquanto o NEDC possui o maior (40%), o HWFET, por se tratar de ciclo de rodovias, é o que possui menor porcentagem de tempo em repouso.

O WLTC fase 3 é o que possui maiores valores de duração, distância percorrida, velocidade máxima e demanda de energia e que também possui a maior porcentagem de tempo acelerando e desacelerando, sendo por isso considerado o ciclo mais severo e possivelmente o mais realista dentre os ciclos apresentados (QUADROS, 2016), com exceção do WMTC, por se tratar de um ciclo especifico para motos.

Tabela 2 – Parâmetros característicos e DEV de alguns ciclos de condução padrão

Parâmetros	Unidades	FTP–75	HWFET	JC08	NEDC	WLTC	WMTC
Duração	s	1874	765	1204	1180	1800	1800
Distância	km	17,77	16,51	8,17	11,03	23,27	28,90
Velocidade média	km/h	34,14	77,7	24,4	33,6	46,5	57,8
Velocidade máxima	km/h	91,2	96,4	81,6	120	131,3	63,4
Paradas		23	2	12	14	9	NI*
Percentual do tempo em repouso	s (%)	335 (17,6%)	4 (0,5%)	346 (29%)	280 (24%)	226 (12%)	162 (9%)
Percentual do tempo em cruzeiro	s (%)	145 (8%)	126 (16,5%)	21 (2%)	475 (40%)	66 (4%)	288 (16%)
Percentual do tempo acelerando	s (%)	739 (39,7%)	338 (44,2%)	432 (36%)	247 (21%)	789 (44%)	738 (41%)
Percentual do tempo desacelerando	s (%)	655 (34,7%)	297 (38,8%)	405 (33%)	178 (15%)	719 (40%)	612 (34%)
Aceleração média	m/s^2	0,51	0,19	0,42	0,59	0,41	0,39
Desaceleração média	m/s^2	-0,58	-0,22	-0,45	-0,82	-0,45	-0,49
Aceleração máxima	m/s^2	1,48	1,43	NI*	1,04	1,67	NI*
Desaceleração máxima	m/s^2	NI*	-1,48	-1,19	-1,39	-1,5	NI*
Demanda Energética Veicular	MJ/km	0,38	0,40	0,29	0,37	0,45	0,28

*- Não informada Fonte: Araujo (2021) e Andrade et al. (2021)

A Tabela 3 mostra os parâmetros para alguns ciclos de condução locais do Brasil. São mostrados o CCL de Fortaleza – CE encontrado por Azevedo et al. (2017); Chennai na Índia (ARUN et al, 2017), onde o tráfego, composto por veículos de três rodas, se destaca do resto do mundo; o CCL de Recife Brasil para carros (ANDRADE et al, 2021) feito para carros fora do horário de pico em Recife; e o CCL de Recife Brasil para motos (ANDRADE et al, 2021).

É possível verificar que o FTP-75, exposto na Tabela 2, é o ciclo com maior velocidade média quando comparado aos demais CCL brasileiros, com exceção do ciclo de motos do Recife, o que sugere que a velocidade média dos automóveis nos EUA, de onde vem este ciclo, é maior que a velocidade média dos automóveis no Brasil.

Recife e Fortaleza apresentam aceleração média próximas uma da outra e a aceleração de Recife foi próxima do FTP-75. O Chennai da Índia é o que apresenta menor demanda energética e menor velocidade média, entretanto a aceleração é semelhante ao FTP-75 e Recife.

Tabela 3 – Parâmetros característicos e DEV para alguns ciclos de condução locais

Parâmetros	Unidades	Recife carros	Recife motos	Fortaleza Brasil	Chennai Índia
Duração	s	1820	2106	1216	1065
Distância	km	11,4	19	8,4	5,23
Velocidade média	km/h	22,6	57,8	23,8	17,7
Velocidade média corrida	km/h	29,6	38,4	NI*	NI*
Velocidade máxima	km/h	NI*	NI*	76	50,4
Desvio padrão da velocidade	km/h	18,37	21,5	NI*	NI*
Paradas		15	NI*	9	9
Percentual do tempo em repouso	s (%)	437 (24%)	316 (15%)	523 (43%)	NI*
Percentual do tempo em cruzeiro	s (%)	91 (5%)	105 (2%)	0 (0%)	NI*
Percentual do tempo acelerando	s (%)	692 (38%)	906 (43%)	365 (30%)	NI*
Percentual do tempo desacelerando	s (%)	600 (33%)	863 (41%)	328 (27%)	NI*
Aceleração média	m/s^2	0,48	0,76	NI*	0,49
Desaceleração média	m/s^2	-0,43	-0,8	NI*	-0,71
Desaceleração máxima	m/s^2	-2,98	NI*	-5,6	NI*
Demanda Energética Veicular	MJ/km	0,33	0,17	0,35	0,25

*- Não informada Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

3. METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para chegar aos resultados obtidos neste trabalho, que pode ser dividida essencialmente em cinco etapas.

1) Escolher câmeras em locais que atendam às condições desejadas para solicitar as imagens.
2) Analisar condições de tráfego desses locais a partir das imagens e mensurar o fluxo de carros de forma aproximada.
3) Analisar quais locais são adequados para serem realizadas as simulações de tráfego e contabilizar o fluxo e densidade destes locais utilizando todo tempo de vídeo disponível.
4) Comparar os dados de fluxo e densidade obtidos desses locais com o diagrama fundamental proposto para a Via Mangue (ARAUJO, 2021).
5) Extrair os parâmetros característicos e a DEV da simulação destes locais e fazer a comparação entre eles e com outros ciclos de condução através dos parâmetros característicos.

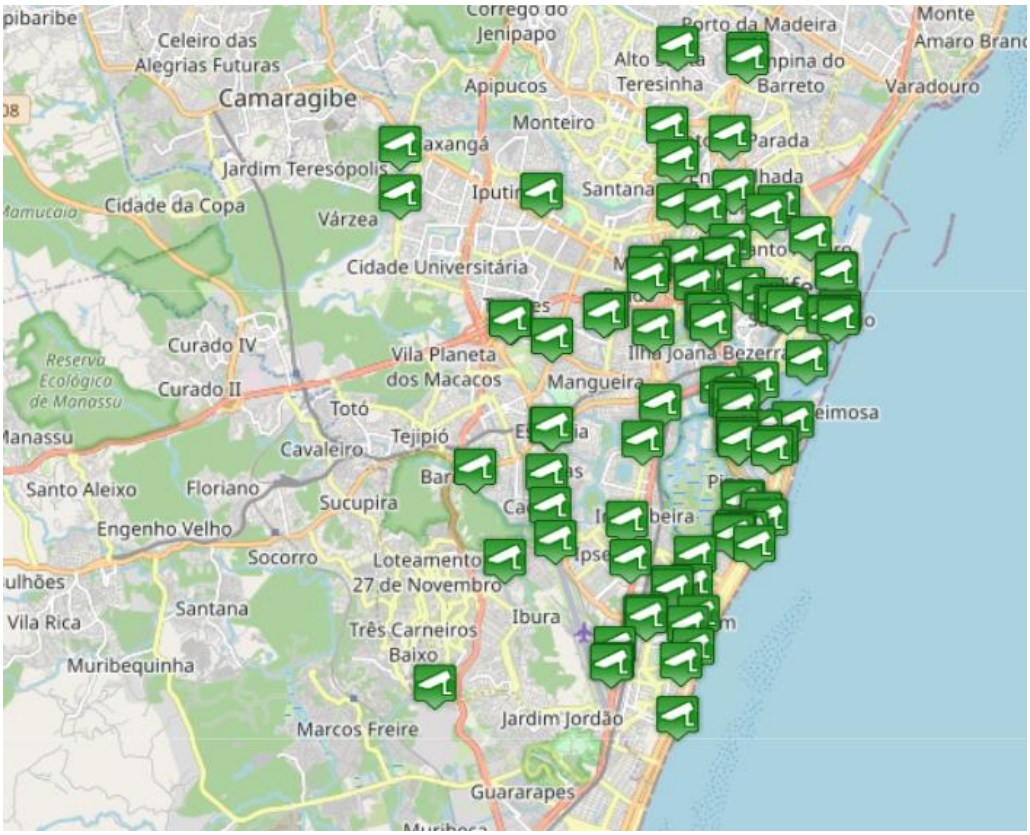
3.1 ESCOLHA DAS CÂMERAS

Nesta etapa, o autor analisou pontos onde haviam câmeras da CTTU (Autarquia de Trânsito e Transporte Urbano do Recife) no Recife e Região Metropolitana. A CTTU gerencia mais de 148 câmeras de monitoramento de tráfego na cidade do Recife, e por meio da Lei 12.527/2011 (Lei de acesso à informação) é possível solicitar, através de um ofício, os vídeos e imagens com as devidas justificativas. No ofício deve ser informado quais as câmeras e horários desejados, até no máximo sete dias antes do dia em que se está solicitando. Além disso, deve ser disponibilizado um dispositivo pessoal de armazenamento para os vídeos.

A CTTU também disponibiliza essas imagens gratuitamente em seu portal, através do site (http://transito.gtrans.com.br/cttupe/index.php/mapa), onde se pode observar a posição de todas as câmeras, como pode ser visto na Figura 16, bem como as imagens que essas câmeras gravam. Não é possível assistir aos vídeos dessas câmeras neste site, apenas é possível visualizar a imagem estática das vias, informando a velocidade média dos carros, as quais são atualizadas após um certo período, e cuja intenção é de apenas informar aos usuários as condições da via naquele momento, como congestionamentos, clima ou acidentes.

Infelizmente, na época em que esta tarefa estava sendo feita, o site estava em reforma, e muitos dos links para as imagens das referidas câmeras da CTTU não estavam funcionando, então foi necessário o auxílio da ferramenta Google Maps, da Google (https://www.google.com.br/maps) para auxiliar nesta tarefa. Através do Google Maps foi possível encontrar a posição de algumas das câmeras e visualizar as prováveis imagens que se teria da avenida a partir dela.

Figura 16 – Posição das câmeras gerenciadas pela CTTU no Recife e região metropolitana



Fonte: http://transito.gtrans.com.br/cttupe/index.php/mapa

Buscou-se preferencialmente por trechos de avenidas ininterruptos, em que o congestionamento do tráfego não ocorresse por outra ação a não ser a quantidade de veículos acima da capacidade da via (ARAUJO, 2021). Em suma, seriam trechos sem semáforos, lombadas eletrônicas ou físicas, faixas de pedestres, com poucas entradas, saídas ou conversões, com duas ou mais faixas de rolamento sendo utilizadas (em algumas avenidas uma ou mais de suas faixas são utilizadas como estacionamento), com pouco tráfego de veículos pesados (caminhões, ônibus, baús, etc.) e sem declividades. A presença desses elementos dificulta tanto a medição do fluxo e da densidade como também a própria simulação do tráfego desses locais.

Como são poucas as avenidas na cidade do Recife com todas essas condições, em um primeiro momento foi admitida a presença de semáforos ou lombadas eletrônicas. No caso dos semáforos, foi medido o fluxo e o tempo que o semáforo permanecia aberto, como será melhor explicado mais adiante. Nas lombadas eletrônicas foi observado se estas eram as causas de congestionamentos fora dos horários de pico.

As câmeras escolhidas nesta etapa foram:

1) Via Mangue
2) Avenida Dom Hélder Câmara
3) Avenida José Estelita

4) Avenida Eng. Abdias de Carvalho
5) Avenida Beberibe
6) Avenida Conde da Boa Vista
7) Rua Real da Torre
8) Rua Monsenhor Fabricio
9) Avenida Doutor José Rufino
10) Avenida Agamenon Magalhães

Ademais, o autor escolheu três câmeras adicionais caso ocorresse de a CTTU não possuir os vídeos de algumas das câmeras na data e horários solicitados. São essas:

1) Avenida Anibal Benévolo
2) Avenida Norte Miguel Arraes de Alencar
3) Rua Afonso Olindense

Foram solicitados vídeos das câmeras mencionadas do dia 17/01/2022 (uma segunda-feira), no período das 14:00 às 14:15, que ao total renderam 150 minutos de gravações. E todos os vídeos requeridos foram disponibilizados, inclusive os adicionais.

3.2 FLUXO DE VEÍCULOS

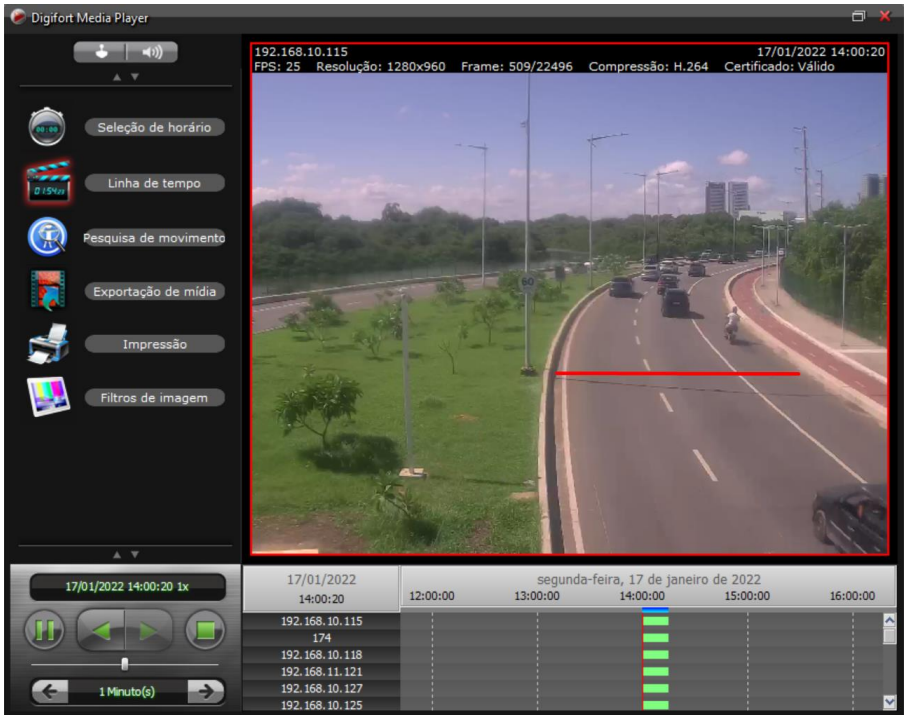
A CTTU disponibiliza os vídeos em um software que tem como layout padrão o exibido na Figura 17. Clicando-se em cada uma das vias é possível visualizar uma imagem ampliada da mesma.

Figura 17 – Layout padrão do software utilizado pela CTTU para observar as imagens das câmeras

Fonte: CTTU

A partir das imagens, foi realizada a medição do fluxo de veículos de cada uma das vias, utilizando o método da contagem manual. Esse método de contagem foi o mesmo utilizado por Araujo (2021), que foi baseado no procedimento utilizado por Lv et al. (2013) e Fukuda et al. (2016). Nele, o fluxo de veículos é obtido a partir da quantidade de veículos que passam a sessão transversal delimitada na via a cada minuto, conforme foi mostrado na Figura 18, onde a linha vermelha delimita a seção transversal. As unidades utilizadas neste trabalho foram escolhidas para tornar possível a comparação com os resultados obtidos por Araujo (2021) e são elas: veículos h^{-1} faixa^{-1} para o fluxo e veículos km^{-1} faixa^{-1} para a densidade.

Figura 18 – Vista da Via Mangue a partir da câmera da CTTU. A linha vermelha foi traçada pelo autor para medição do fluxo



Fonte: CTTU (Adaptada)

Na primeira etapa de medições, buscava-se ter um valor aproximado do fluxo apenas dos carros em todas as vias, mas sem realizar a contagem utilizando toda a duração dos vídeos de todas as vias, para assim selecionar quais seriam as melhores vias para serem estudadas. Foi escolhido utilizar os primeiros seis minutos de análise para as vias de tráfego livre, e nas vias que continham semáforo foi utilizado um procedimento diferente, descrito mais adiante.

Para realizar a contagem, foi necessário estabelecer alguns critérios padrões para serem seguidos em todas as contagens e locais. São eles:

1) Se o veículo, no início da contagem para medição do fluxo, estivesse tocando a linha vermelha, ele não era contabilizado. Se o veículo estivesse tocando a faixa vermelha ao fim da contagem, ele não era contabilizado.

2) Os veículos foram separados em 3 tipos: moto, carros de passeio e veículos pesados. As motos são as motocicletas padrões, inclusive eventuais motos cinquenta cilindradas (vulgarmente chamadas de cinquentinhas) que trafegam nas vias. Os carros de passeio incluíram, além dos carros padrões, todos aqueles veículos que podem ser conduzidos por motoristas com a Carteira Nacional de Habilitação (CNH) do tipo B (veículos de quatro rodas cujo peso bruto não ultrapasse 3,5 toneladas), como caminhonetes, furgões e alguns baús pequenos, chamados de Veículos Urbanos de Carga (VUC) foram incluídos nesta categoria. Os demais foram contabilizados como veículos pesados, que, segundo a resolução n° 340 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), são os com peso superior a 3,5 toneladas e necessitam de habilitação tipo C ou superior para serem conduzidos como por exemplo tratores, caminhões baús, carretas, etc. Também foram incluídos aqui os veículos com mais de oito passageiros, que requerem habilitação tipo D para serem conduzidos como por exemplo ônibus, microônibus, etc.
3) Nas vias que possuíam semáforos foi realizada a contagem da seguinte forma: Em situação de semáforo verde ou amarelo (aberto), foi realizada a contagem dos veículos que passavam por este. Repetiu-se essa contagem tantas vezes quantos foram possíveis dentro dos quinze minutos de vídeo disponíveis, afim de se obter uma média desses valores. Em seguida foi contabilizado o tempo total de um ciclo do semáforo da via em questão, isto é, o tempo em que o semáforo fica vermelho, amarelo e verde, e foi utilizado esse valor de tempo para o cálculo do fluxo na via.

3.3 ESCOLHA DAS VIAS

Com os resultados da etapa anterior, optou-se pela escolha das seguintes câmeras:

1) Via Mangue
2) Avenida José Estelita
3) Avenida Beberibe

As demais foram descartadas pois não apresentavam fluxo ou condições de tráfego adequadas para o objetivo deste trabalho, a saber:

- A avenida Dom Hélder Câmara possui um semáforo, além de um fluxo de veículos constantemente interrompido por veículos buscando estacionamento e veículos adentrando na avenida através das ruas paralelas.
- A avenida Engenheiro Abdias de Carvalho possui um semáforo cujo seu tempo aberto ou fechado não foi possível de ser determinado com exatidão através das filmagens, além de fluxo e parada intensos de ônibus, e por se tratar de um local em frente à uma universidade, com frequência os veículos paravam antes da faixa de pedestres para que os estudantes pudessem atravessar, mesmo com o semáforo verde.
- A avenida Conde da Boa vista não foi sequer realizada a contagem aproximada do fluxo, pois seu tráfego é predominantemente composto por ônibus e motocicletas, com alguns táxis e ausência quase total de veículos de passeio, além de tráfego intenso de pedestres e bicicletas, então foi descartada antes mesmo de ser completada esta etapa.

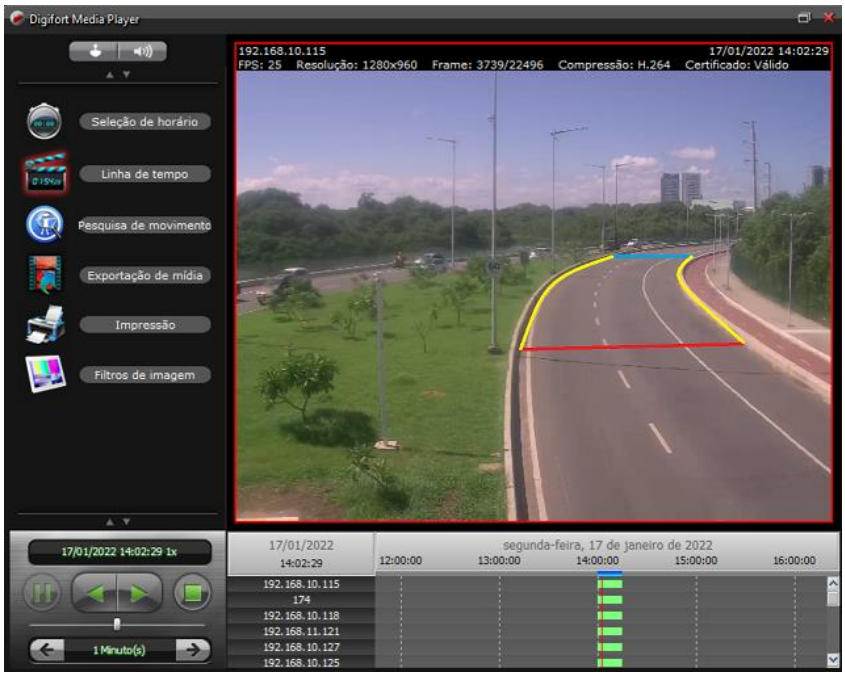
- Rua Real da Torre apresentou um minuto de sinal aberto e a Avenida Agamenon Magalhães apresentou quarenta segundos de sinal aberto, e ambas demonstraram ter um tráfego intenso e fluxo de vias paralelas, que impedem que os veículos atinjam uma velocidade de cruzeiro alta, próxima ao limite da via. A avenida Doutor José Rufino, embora possua um tempo de semáforo aberto maior, apresenta os mesmos problemas mencionados acima, além de diversos locais para estacionamento em ambos os lados da avenida, que atrapalhavam o fluxo.
- A Avenida Monsenhor Fabricio não possui semáforos, apenas uma lombada eletrônica com uma faixa de pedestres, em que os carros passam com velocidade bem abaixo da permitida, gerando congestionamentos em um sentindo, enquanto no outro sentido o tráfego de veículos é muito menor, a saber, quase duas vezes e meia menor, por isso também foi descartada.

No capítulo de resultados serão apresentados e discutidos o fluxo de carros que foram medidos em todos estes locais.

3.4 MEDIÇÃO DO FLUXO E DENSIDADE DEFINITIVOS

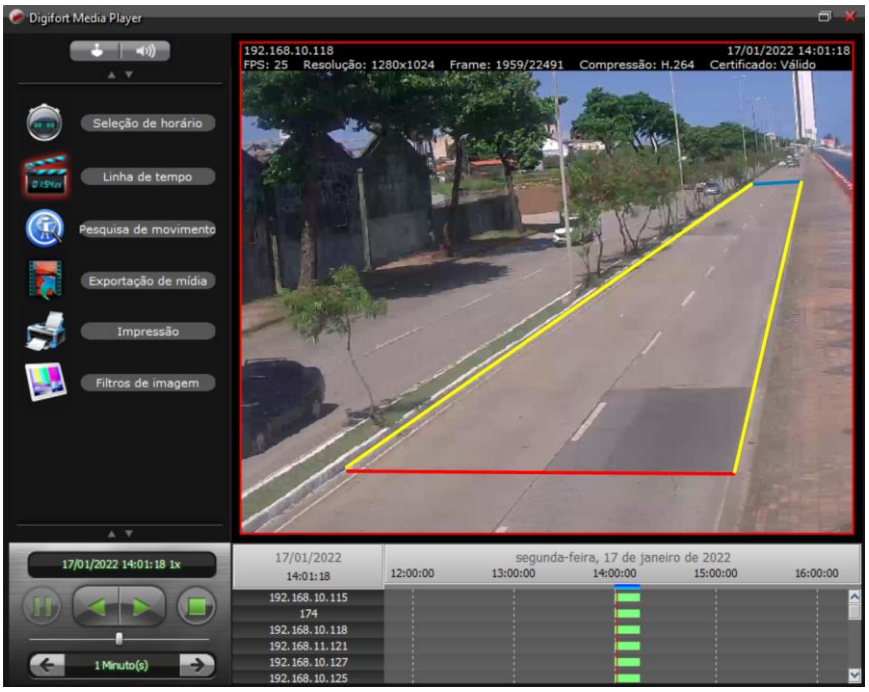
Para medir a densidade, também foi necessário estabelecer alguns critérios padrões a serem seguidos em todos os locais, semelhantes aos critérios dos fluxos. Primeiramente, foram traçadas duas linhas imaginárias perpendiculares à via, e duas paralelas (em amarelo), estas últimas a fim apenas de demarcar as laterais da pista, como é mostrado nas Figuras 19, 20 e 21.

Figura 19 – Visão do software da CTTU com área demarcada que foi utilizada pra medir a densidade na Via Mangue



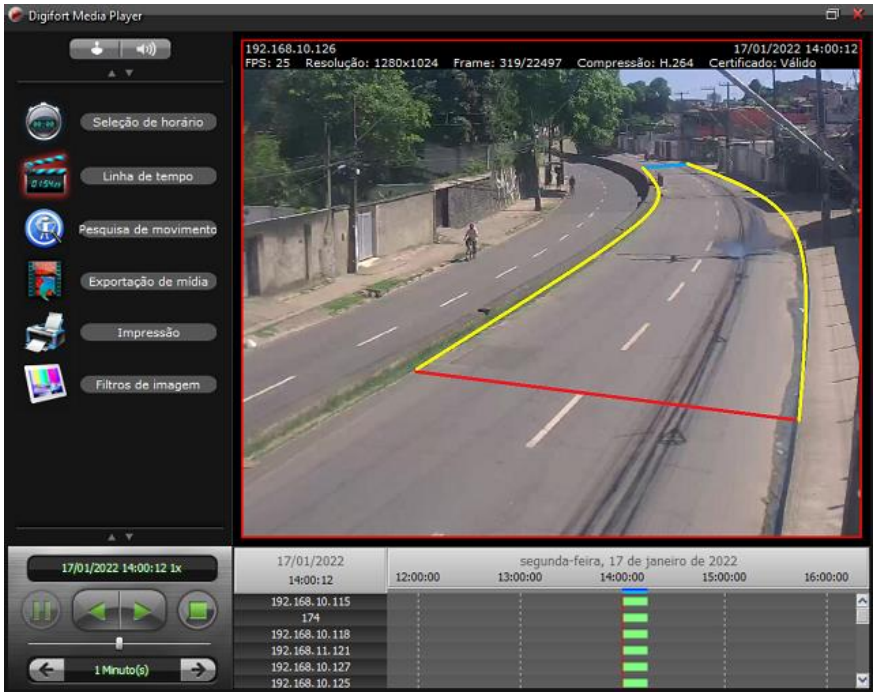
Fonte: CTTU (Adaptada)

Figura 20 – Visão do software da CTTU com área demarcada que foi utilizada pra medir a densidade na Avenida Estelita



Fonte: CTTU (Adaptada)

Figura 21 – Visão do software da CTTU com área demarcada que foi utilizada pra medir a densidade na Avenida Beberibe



Fonte: CTTU (Adaptada)

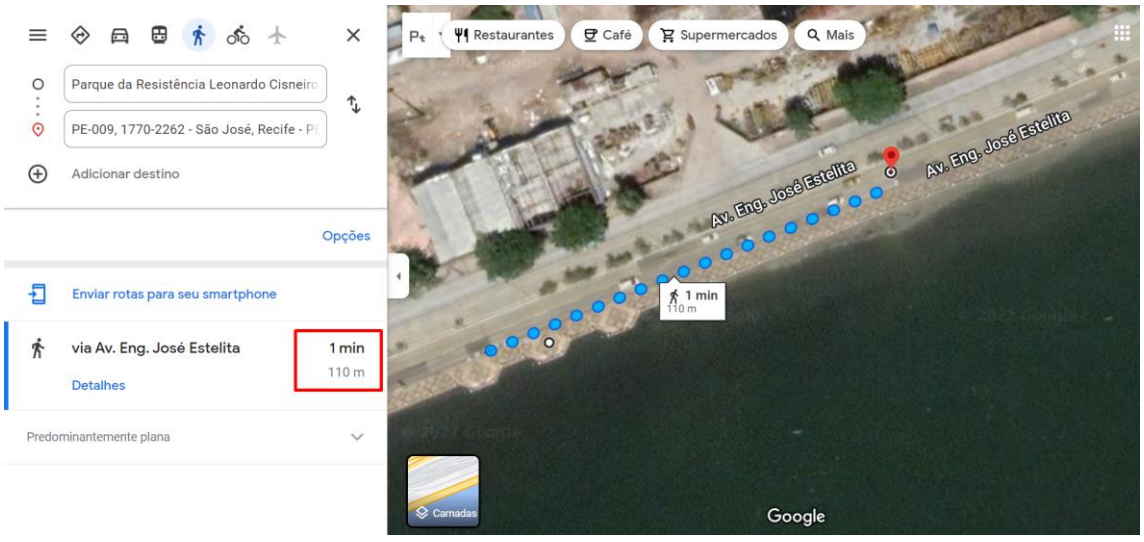
Para realizar a medida da densidade, é necessário mensurar quantos veículos, de cada uma das categorias estavam dentro da área delimitada a cada período de tempo. O período de tempo escolhido foi de um segundo.

O software possui várias ferramentas, dentre elas, a opção de pausar o vídeo e avançar segundo a segundo. Dessa forma, foi realizada a contagem manual do número de veículos a cada segundo e armazenados em uma tabela, totalizando 900 medições para cada uma das três vias. Caso o veículo estivesse tocando a linha vermelha abaixo no início da contagem, o mesmo era considerado dentro. Caso estivesse tocando a linha azul, era considerado fora da área.

Os veículos aqui também foram divididos em três categorias, conforme explicado na seção 3.2 sobre a medição do fluxo. Após contabilizar todos os veículos, foi necessário medir a distância real entre as linhas vermelhas e azul em cada umas das pistas, além do número de faixas de rolamento, que é de fácil visualização em vídeo, sendo três faixas na via mangue e duas nas demais vias.

Para medir a distância foi utilizada o Google Maps, que possui uma ferramenta para medição de distância dentre dois pontos. Na Figura 22 pode ser visualizada a Avenida Engenheiro José Estelita, em que os pontos azuis demarcam o comprimento da área de medição. Foram utilizados pontos de referência visuais, como postes, placas e faixas de pedestres, por exemplo, para auxiliar o autor a delimitar com exatidão os pontos de início e fim do trecho através das imagens de satélite. Os pontos azuis da Figura 22 demarcam o trecho dessa avenida que foi utilizado para a medição da densidade. Ao lado esquerdo é possível ver o comprimento do trecho. Na Tabela 4 é possível ver as distâncias nos três locais utilizando esse método.

Figura 22 – Avenida Engenheiro José Estelita vista a partir do Google Maps.



Fonte: Google Maps (2022)

Tabela 4 – Comprimentos dos trechos utilizados para medição da densidade nos três locais

Local	Via Mangue	Av. Estelita	Av. Beberibe
Distância (metros)	65	110	89

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Primeiro foi contado o quanto de cada tipo de veículo estava dentro da área delimitada a cada segundo durante os quinze minutos de vídeo, para cada um dos três locais, totalizando 2700 medições ao todo. Depois, para cada minuto, foi realizado o cálculo da média de veículos dentro da área e conversão para a unidade de densidade (veículos km^{-1} $faixa^{-1}$).

Em seguida, foi realizada uma nova medição do fluxo para as três vias, para todos os tipos de veículos. Esta nova medição foi realizada com os mesmos critérios da medição anterior, com a diferença de serem realizadas sobre o tempo total de vídeo disponíveis, com o propósito de melhorar a confiança dos resultados. O método consistiu em fazer a contagem de quantos de cada tipo de veículo ultrapassaram a via minuto a minuto durante os quinze minutos, e após as devidas conversões, estes valores serão usados em conjunto com os valores da densidade para a construção do diagrama fundamental de cada um dos locais.

Como o diagrama fundamental construído por Araujo (2021) utilizou apenas o fluxo e densidade de carros da Via Mangue para ser construído, neste trabalho também serão comparados apenas os valores dos carros no diagrama fundamental, totalizando quinze pontos para cada um dos locais sobre o diagrama fundamental.

3.5 SIMULAÇÃO DO MODELO

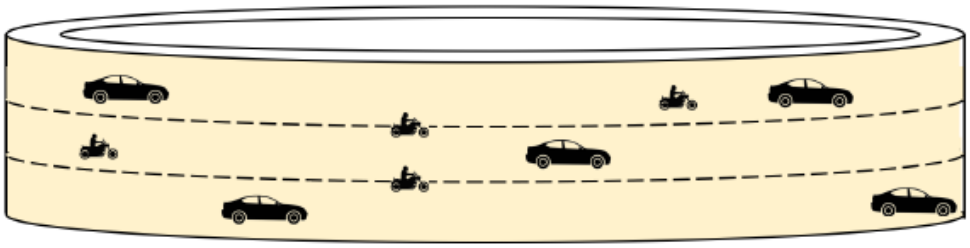
Os vetores de velocidade de carros e das motos dos locais analisados foram obtidos por meio de simulação computacional. Esses dados foram obtidos em parceria com o grupo LOST (Laboratório de Otimização de Sistemas Térmicos e de Estudos Sobre Motocicletas) da UFPE, utilizando um simulador microscópico de tráfego (SANTOS, 2019; ARAUJO, 2021).

Neste simulador, os veículos percorrem uma pista circular de 5km de extensão. Esta pista possui faixas de rolamento cujo número pode ser escolhido pelo usuário, e onde qualquer veículo pode trafegar. Entre duas pistas há sempre um “corredor”, por onde apenas as motos podem trafegar. A exemplo, caso haja duas faixas, haverá um corredor, e caso haja três faixas, haverá dois corredores, conforme pode ser observado na Figura 23. Antes de iniciar a simulação, os veículos são distribuídos sobre a pista aleatoriamente, obedecendo à densidade estipulada pelo usuário e não há adição ou remoção de veículos nem alterações na pista durante a simulação, fazendo com que a densidade seja constante a todo o momento.

A simulação foi realizada separadamente para cada um dos três locais, utilizando três faixas de rolamento para a Via Mangue e duas faixas para os demais locais. Para o

simulador representar bem os locais analisados, é preciso que ele passe por um processo de calibração. Para ser feita a esta calibração, foi utilizada como base a análise de sensibilidade de Araujo (2021), a qual verifica a influência que oito parâmetros de entrada (do simulador) tem sobre o fluxo de veículos. O objetivo foi obter o fluxo de carros e motos que foi observado nas gravações de vídeo, com erros inferiores a 5%.

Figura 23 – Ilustração da pista do modelo



Fonte: Araujo (2021)

No total foram obtidos seis vetores de velocidade na simulação, sendo dois para cada um dos locais (um para os carros e um para as motos), e destes foram extraídos os parâmetros característicos e a DEV dos carros e das motos, em cada um dos locais. O cálculo destes parâmetros foram todos obtidos com simples manipulações do vetor velocidade utilizando o Microsoft Excel (2016), o qual oferta diversas fórmulas entre suas funcionalidades, como por exemplo, valor médio de um conjunto de dados (velocidade média), quantidades de zeros (tempo parado) e operações de subtração entre valores, com a qual foi calculada as acelerações a cada segundo.

Para o cálculo da DEV de cada um dos locais foram utilizados os mesmos vetores velocidade dos demais PC. Os valores utilizados para as constantes (m, C_r e K_a) foram iguais aos utilizados em Andrade et al. (2021), tanto para os carros quanto para as motos. A planilha utilizada para o cálculo dos parâmetros de um dos locais é mostrada na Figura 24, onde a coluna mais à esquerda mostra parte do vetor velocidade obtido na simulação.

Figura 24 – Exemplo de planilha do Excel que foi utilizada para o cálculo dos parâmetros característicos

				Velocidades	Velocidades		KM/H	Espaço percorrido KM	Espaço percorrido total M	Acelerações							E ine	E rol	E aero	DEV
24 , 10				KM/H	M/S					M/S2										MJ/KM
1800,36	0	1800,36		36,0000000	10	36,0000	Vel Média	0	0	0	Nula	Num. De acel	438	Tempo acelerando	24,33%		0	1012,3	524,88	0,22951
1801,36	1	1801,36		36,0000000	10	36,0000	35,3916	0,01	10	0	Nula	Num. De desacel:	162	Tempo desacelerando	9,00%		0	1012,3	524,88	
1802,36	2	1802,36		36,0000000	10	36,0000		0,02	20	0	Nula	Num. De Nula	1200				0	1012,3	524,88	
1803,36	3	1803,36		36,0000000	10	36,0000		0,03	30	0	Nula			Nula	66,67%		0	1012,3	524,88	
1804,36	4	1804,36		36,0000000	10	36,0000		0,04	40	0	Nula						0	1012,3	524,88	
1805,36	5	1805,36		36,0000000	10	36,0000		0,05	50	0	Nula			Aceleração média posit	0,34018		0	1012,3	524,88	
1806,36	6	1806,36		36,0000000	10	36,0000		0,06	60	0	Nula			Aceleração média nega	-0,91975		0	1012,3	524,88	
1807,36	7	1807,36		36,0000000	10	36,0000		0,07	70	0	Nula						0	1012,3	524,88	
1808,36	8	1808,36		36,0000000	10	36,0000		0,08	80	0	Nula			Paradas	0		0	1012,3	524,88	
1809,36	9	1809,36		36,0000000	10	36,0000		0,09	90	0	Nula			Duração(s)	1800		0	1012,3	524,88	
1810,36	10	1810,36		36,0000000	10	36,0000		0,1	100	0	Nula			Distância(Km)	17,6958		0	1012,3	524,88	
1811,36	11	1811,36		36,0000000	10	36,0000		0,11	110	0	Nula						0	1012,3	524,88	
1812,36	12	1812,36		36,0000000	10	36,0000		0,12	120	0	Nula			Velocidade max	36		0	1012,3	524,88	
1813,36	13	1813,36		36,0000000	10	36,0000		0,13	130	0	Nula			Velocidade min	32,4		0	1012,3	524,88	
1814,36	14	1814,36		36,0000000	10	36,0000		0,14	140	0	Nula						0	1012,3	524,88	
1815,32.4	15	1815,324		32,4000000	9	32,4000		0,1495	149,5	-1	esacelerando			Aceleração maxima	0,4		-10697	961,685	403,8952	
1816,33.84	16	1816,3384		33,8400000	9,4	33,8400		0,1587	158,7	0,4	Acelerando			Aceleração minima	-1		4143,68	931,316	426,6813	
1817,35.28	17	1817,3528		35,2800000	9,8	35,2800		0,1683	168,3	0,4	Acelerando						4323,84	971,808	483,931	
1818,36	18	1818,36		36,0000000	10	36,0000		0,1782	178,2	0,2	Acelerando						2229,48	1002,177	519,6312	
1819,36	19	1819,36		36,0000000	10	36,0000		0,1882	188,2	0	Nula						0	1012,3	524,88	
1820,36	20	1820,36		36,0000000	10	36,0000		0,1982	198,2	0	Nula						0	1012,3	524,88	
1821,36	21	1821,36		36,0000000	10	36,0000		0,2082	208,2	0	Nula						0	1012,3	524,88	
1822,32.4	22	1822,324		32,4000000	9	32,4000		0,2177	217,7	-1	esacelerando						-10697	961,685	403,8952	
1823,33.84	23	1823,3384		33,8400000	9,4	33,8400		0,2269	226,9	0,4	Acelerando						4143,68	931,316	426,6813	
1824,35.28	24	1824,3528		35,2800000	9,8	35,2800		0,2365	236,5	0,4	Acelerando						4323,84	971,808	483,931	
1825,36	25	1825,36		36,0000000	10	36,0000		0,2464	246,4	0,2	Acelerando						2229,48	1002,177	519,6312	
1826,36	26	1826,36		36,0000000	10	36,0000		0,2564	256,4	0	Nula						0	1012,3	524,88	
1827,36	27	1827,36		36,0000000	10	36,0000		0,2664	266,4	0	Nula						0	1012,3	524,88	
1828,36	28	1828,36		36,0000000	10	36,0000		0,2764	276,4	0	Nula						0	1012,3	524,88	
1829,36	29	1829,36		36,0000000	10	36,0000		0,2864	286,4	0	Nula						0	1012,3	524,88	
1830,36	30	1830,36		36,0000000	10	36,0000		0,2964	296,4	0	Nula						0	1012,3	524,88	
1831,36	31	1831,36		36,0000000	10	36,0000		0,3064	306,4	0	Nula						0	1012,3	524,88	
1832,36	32	1832,36		36,0000000	10	36,0000		0,3164	316,4	0	Nula						0	1012,3	524,88	
1833,36	33	1833,36		36,0000000	10	36,0000		0,3264	326,4	0	Nula						0	1012,3	524,88	

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados deste trabalho. Primeiramente, serão discutidos os resultados da coleta de dados do tráfego, bem como suas considerações. Em seguida, serão discutidos os resultados da simulação dos veículos no modelo de tráfego, e finalmente, será realizada uma comparação entre os parâmetros característicos e DEV de alguns ciclos de condução e os parâmetros característicos e DEV resultantes da simulação, que representarão as vias estudadas.

4.1 MEDIDAS DO FLUXO E DENSIDADE

A primeira medição de fluxo médio de carros de todas as vias trouxe os resultados presentes na Tabela 5. A Avenida Conde da Boa Vista não está presente nesta tabela pois, como já mencionado, foi descartada antes mesmo de ser realizada esta medição inicial.

Tabela 5 – Fluxo medido nos locais utilizando seis minutos de vídeo

Local	Número de faixas	Fluxo (carros h^{-1}faixa^{-1})
Via Mangue	3	687
Avenida Dom Hélder Câmara	2	205
Avenida José Estelita	2	535
Avenida Eng. Abdias de Carvalho	3	637
Avenida Beberibe	2	385
Rua Real da Torre	4	540
Rua Monsenhor Fabrício	2	368
Avenida Doutor José Rufino	2	382
Avenida Agamenon Magalhães	4	459

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Em seguida, foi realizada a nova medição de fluxo minuto a minuto com as vias definitivas já escolhidas. Os valores encontrados para os carros são mostrados na Tabela 6, sendo o maior valor de fluxo encontrado o de 900 carros h^{-1} faixa^{-1} na Via Mangue, e o menor de 270 carros h^{-1} faixa^{-1} na Avenida Beberibe.

Vide que os valores da Tabela 6 são todos números inteiros pois o número de veículos é um número inteiro e o método de conversão para a unidade desejada (carros h^{-1} faixa^{-1}) não gerou números fracionários nestes locais (multiplicar por sessenta para transformar a unidade de minutos em horas e dividir pelo número de faixas da via, que são dois ou três nesses locais).

Tabela 6 – Fluxo medido a cada minuto em carros h^{-1} $faixa^{-1}$

Horário	Via Mangue	Av. Estelita	Av. Beberibe
14h00	760	510	270
14h01	520	450	390
14h02	720	450	300
14h03	800	870	480
14h04	780	450	270
14h05	540	480	600
14h06	580	630	450
14h07	680	600	540
14h08	620	510	330
14h09	620	450	570
14h10	600	390	450
14h11	500	540	390
14h12	900	660	510
14h13	760	570	450
14h14	760	360	390

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Na Tabela 7 são mostrados os valores médios aproximados e definitivos do fluxo das três vias. Para os carros, comparando os valores da medição aproximada de seis minutos e a medição definitiva utilizando os quinze minutos, é possível visualizar que os valores estão bem próximos, exceto pelos valores da Avenida Beberibe.

Como é possível observar na Tabela 5, na primeira etapa de medições foram medidos apenas o fluxo dos carros durante seis minutos, não tendo sido realizada medição do fluxo de motos nesta etapa. Posteriormente, com os três locais já escolhidos, foram realizadas novas medições minuto a minuto destes três locais, tanto do fluxo de carros quanto do fluxo de motos. Com esses dados, foi possível extrair o valor do fluxo de motos dos primeiros seis minutos de vídeo apenas desses três locais. Este valor de fluxo teria sido o valor medido para o fluxo de motos na medição aproximada (caso tivesse sido realizada nesta etapa), e foi colocado na Tabela 7 apenas para comparação entre as medidas. Isto posto, pode-se ver que apenas a Via Mangue está com um erro aceitável para as motos, dentre os três locais.

Tabela 7 – Média dos valores observados de fluxo para os carros e para as motos durante seis e quinze minutos de vídeo, em veículos h^{-1} $faixa^{-1}$

Veículo	Via Mangue	Av. Estelita	Av. Beberibe
Carro (6 minutos)	687	535	385
Carro (15 minutos)	676	528	426
Moto (6 minutos)	103	120	260
Moto (15 minutos)	97	102	234

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Para os carros, na Via Mangue e Avenida Estelita as diferenças entre os valores foram inferiores a 2%, demonstrando que, nessas vias, fora do horário de pico, as

medições de fluxo de pelo menos seis minutos já geram ótimas aproximações. Na Av. Beberibe o erro foi superior a 10% e não foi possível de observar uma possível causa para isto. Observando os valores de densidade dos carros a cada minuto desta avenida (disponíveis no Apêndice B), estes foram 35% menores nos primeiros seis minutos que nos demais minutos de observados.

Na Avenida Estelita foi notado um comportamento peculiar do tráfego: por várias vezes, durante o tempo de vídeo, tanto o fluxo quanto a densidade de todos os veículos são nulos na via em intervalos que vão de dez a trinta segundos seguidos, formando lapsos ou "vazios" no tráfego. Não foi possível notar um possível motivo para esse comportamento, não existindo semáforos ou passagem de pedestres antes do trecho da via onde estava sendo realizada a contagem. É possível atribuir a esse fenômeno o maior fluxo que foi medido na primeira observação, pois a quantidade desses lapsos de fluxo descritos foi maior (proporcionalmente) nos primeiros seis minutos de vídeo.

Para as motos, os valores foram muito mais díspares em comparação com os carros, demonstrando que medições utilizando apenas seis minutos não são uma boa aproximação para o fluxo.

Na Tabela 8 estão os valores de densidade medidos minuto a minuto para os carros e na Tabela 9 estão os valores de densidade médios encontrados para os carros e as motos, nos três locais.

Tabela 8 – Densidade média a cada minuto em carros km^{-1} $faixa^{-1}$

Horário	Via Mangue	Av. Estelita	Av. Beberibe
14h00	13,76	10,98	5,99
14h01	9,49	11,67	8,43
14h02	14,62	9,09	8,61
14h03	15,38	22,42	13,86
14h04	14,27	11,06	6,27
14h05	8,97	8,86	10,49
14h06	11,37	13,26	9,83
14h07	8,21	13,03	14,33
14h08	10,26	7,88	8,33
14h09	11,28	1,21	14,33
14h10	10,6	8,86	14,04
14h11	9,57	10,53	10,58
14h12	6,92	14,7	15,82
14h13	13,93	10,61	18,16
14h14	15,3	7,12	17,88

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Tabela 9 – Densidade média dos carros e das motos em veículos km^{-1} $faixa^{-1}$

Veículo	Via Mangue	Av. Estelita	Av. Beberibe
Carro	11,6	10,8	11,8
Moto	1,78	2,09	5,24

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A densidade de carros possui valores bem próximos nos três locais estudados. Para as motos, o valor está abaixo das densidades medias de motos observada por (ARAUJO, 2021) na Via Mangue, que foi de 3,1 motos km^{-1} $faixa^{-1}$. Isto era esperado, devido a suas observações englobarem vários horários do dia na via mangue, inclusive em horários de pico, onde a densidade é maior. Todos valores encontrados em cada minuto para as motos estão disponíveis no apêndice B.

A impressão que se teve, observando os valores de fluxo aproximados da Tabela 5, foi que em avenidas mais distantes do centro, ou próximas de bairros residenciais (vias arteriais ou coletoras) tendem a ter uma maior proporção de fluxo de motos em relação aos carros, como pode ser observado nas Avenidas Doutor José Rufino, Eng. Abdias de Carvalho e Beberibe. Na Avenida Beberibe tanto o fluxo de motos quanto a densidade são bem maiores que a Via Mangue e a Avenida Estelita, como pode ser visto nas Tabelas 7 e 9.

O tráfego de veículos pesados possui valores bem díspares nas três avenidas, tendo a Avenida Beberibe os maiores fluxo e densidade e a Via mangue o menor, registrando um valor de apenas 12 veículos h^{-1} $faixa^{-1}$ para o fluxo. Os dados referentes aos veículos pesados estão disponíveis no apêndice C. Na Tabela 10 estão presentes os valores de fluxo e densidade médios dos carros nas vias e seus respectivos desvios padrão.

Tabela 10 – Fluxo médio e densidade média dos carros em carros h^{-1} $faixa^{-1}$ com respectivos desvios padrão

Grandeza	Via Mangue	Av. Estelita	Av. Beberibe
Fluxo ± desvio	676 ± 118	528 ± 127	426 ± 105
Densidade ± desvio	11,6 ± 2,75	10,75 ± 4,53	11,8 ± 3,97

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Todos os três locais têm fluxos bem distintos, com diferença de quase 60% entre o maior e o menor fluxo, mas demonstram ter desvio padrão próximos no fluxo, demonstrando que a cada minuto, o fluxo de cada um dos três locais varia de forma semelhante.

Na densidade, a Avenida Beberibe possui o maior valor, o que pode ser explicado pela presença de ônibus estacionando em uma parada dentro da área delimitada na via, o que atrapalhava momentaneamente o trânsito. A avenida Estelita possui o menor valor de densidade e, conforme se pode ver na Tabela 8, possui os valores mais discordantes de densidade dos carros, indo de 1,2 até 22,4, sendo estes o menor e maior valor dentre todos os três locais, respectivamente. Pode-se atribuir este fato aos lapsos no tráfego que já foram comentados.

Outro conjunto de dados interessantes que se pode extrair a partir dos dados coletados é a proporção entre carros e motos no tráfego, que pode ser calculada através da razão entre os respectivos fluxos ou das respectivas densidades, como pode ser observado na Tabela 11.

Tabela 11 – Razão entre fluxo de carros e motos e razão entre densidade de carros e motos nos três locais

Razão	Via Mangue	Av. Estelita	Av. Beberibe
Fluxos	7	5,2	1,8
Densidades	6,5	5,1	2,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Por se tratar de uma razão entre grandezas com mesmas unidades, os valores são adimensionais, servindo apenas para comparação entre si. Pode-se observar que a razão entre fluxos e densidades estão bem próximas na Via Mangue e na Avenida Estelita. Isso significa que carros e motos possuem velocidade média próximas uns dos outros em cada um dos locais.

Analisando todos esses fatores e observando os valores médios dos fluxos, densidades e seus respectivos desvios padrões, a impressão que se teve é de que a Via Mangue e a Avenida Estelita possuem comportamentos semelhantes, mas em proporções diferentes: os dois locais possuem valores de densidade média próximos um do outro, mas com fluxos de carros e proporção entre carros e motos distintos.

A Avenida Beberibe, embora com o menor dos fluxos de carros, possui o maior fluxo de motos e de veículos pesados, de forma que o fluxo combinado de todos os veículos (carros, motos e veículos pesados) equipara-se às demais vias, como pode ser visto na Tabela 12. Já a Via Mangue teve o maior fluxo de carros e o menor fluxo de motos e veículos pesados.

Tabela 12 – Fluxo e densidade totais de veículos (carros, motos e veículos pesados) nos três locais em veículos h^{-1} $faixa^{-1}$ e veículos km^{-1} $faixa^{-1}$ respectivamente

Grandeza	Via Mangue	Av. Estelita	Av. Beberibe
Fluxo	785	662	742
Densidade	13,4	13,4	18,6

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Observando a densidade total, a única que se destaca é a Avenida Beberibe, isto posto, pode-se supor que a presença de carros estacionando em situações de tráfego livre que causa este efeito bastante visível de aumento das densidades.

A Tabela 13 mostra o valor da velocidade média dos carros calculados a partir do fluxo e densidades médios das três vias (Tabela 7 e 9). Na Via Mangue e Avenida Estelita os carros e as motos trafegam quase com a mesma velocidade, mesmo com a proporção entre carros e motos nesses dois locais serem distintos. A Avenida Beberibe, como já era esperado, dado todos os motivos já discutidos, possui também o maior valor de velocidade média para as motos, sendo o único local em que a velocidade média das motos é maior que a velocidade média dos carros.

Tabela 13 – Velocidade média dos carros e das motos em km h^{-1} nos três locais calculados através dos valores de fluxo e densidade médios medidos ($V = F. D^{-1}$)

Veículo	Via Mangue	Av. Estelita	Av. Beberibe
Carro	58,3	49,1	36,1
Moto	54,5	48,8	44,7

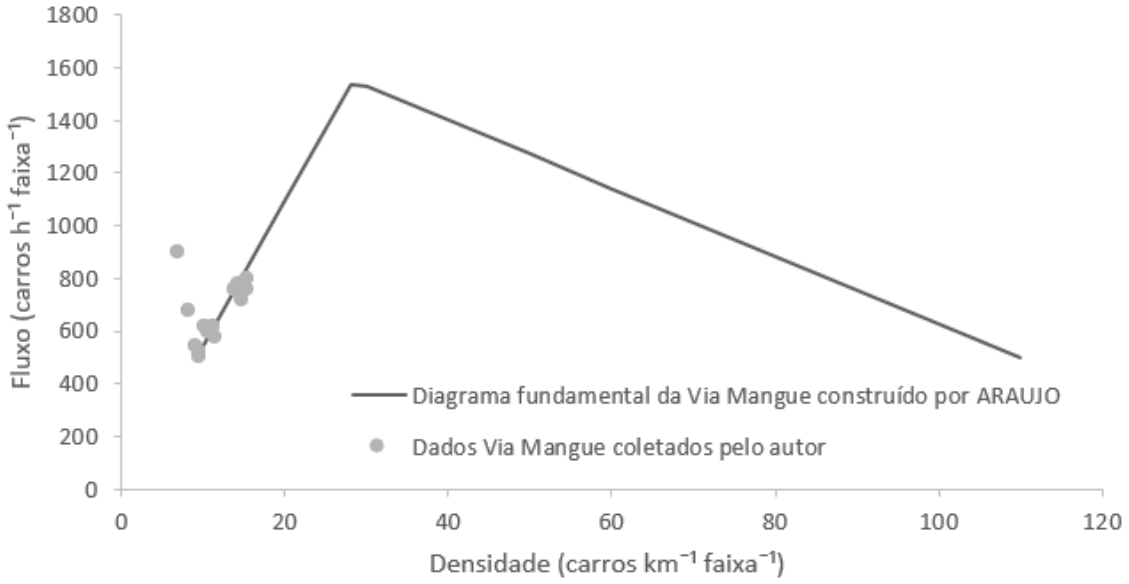
Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A conclusão que se pode tirar, ao analisar as Tabelas 12 e 13, bem como os demais dados, é de que o tráfego na cidade do Recife apresenta características distintas fora dos horários de pico, a depender do local analisado. Um exemplo disso são os valores de densidade dos carros próximos entre si, mesmo o fluxo e a proporção entre os carros e as motos tendo valores tão distintos nos três locais, principalmente na Avenida Beberibe. Além disso, a presença de veículos estacionando na via quando o tráfego está livre também é um fator que deve ser considerado. Mais dados sobre a contagem manual estão disponíveis nos Apêndices A, B e C.

4.2 DIAGRAMAS FUNDAMENTAIS

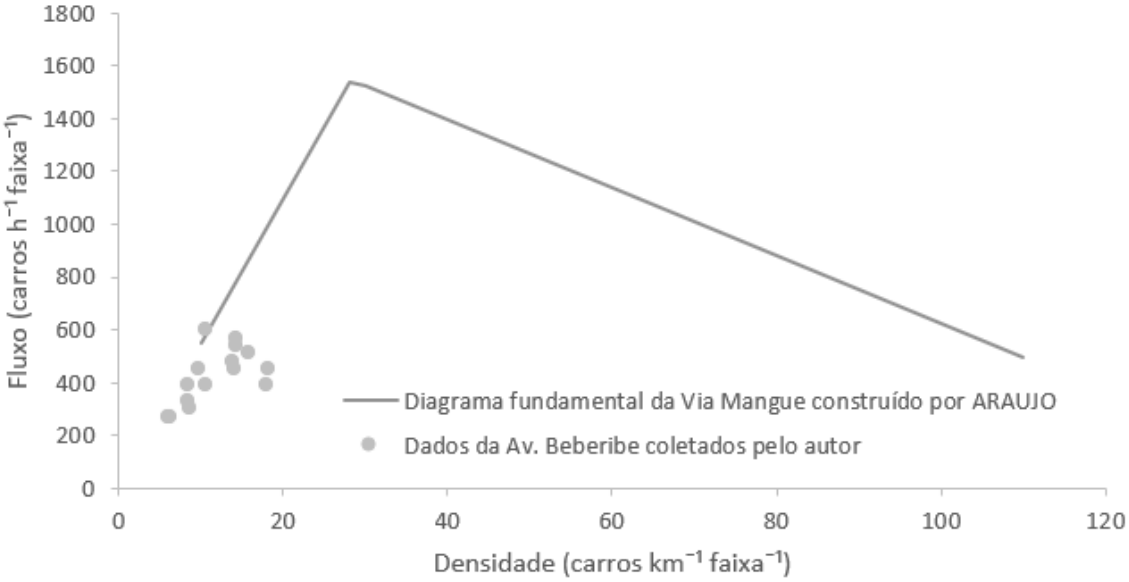
As figuras a seguir apresentam os resultados da coleta de dados feitos pelo autor discriminados sobre o diagrama fundamental da Via Mangue construído por Araujo, (2021), para cada uma das três vias individualmente.

Figura 25 – Pontos coletados pelo autor na Via Mangue sobre o Diagrama Fundamental da Via Mangue construído por Araujo (2021)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

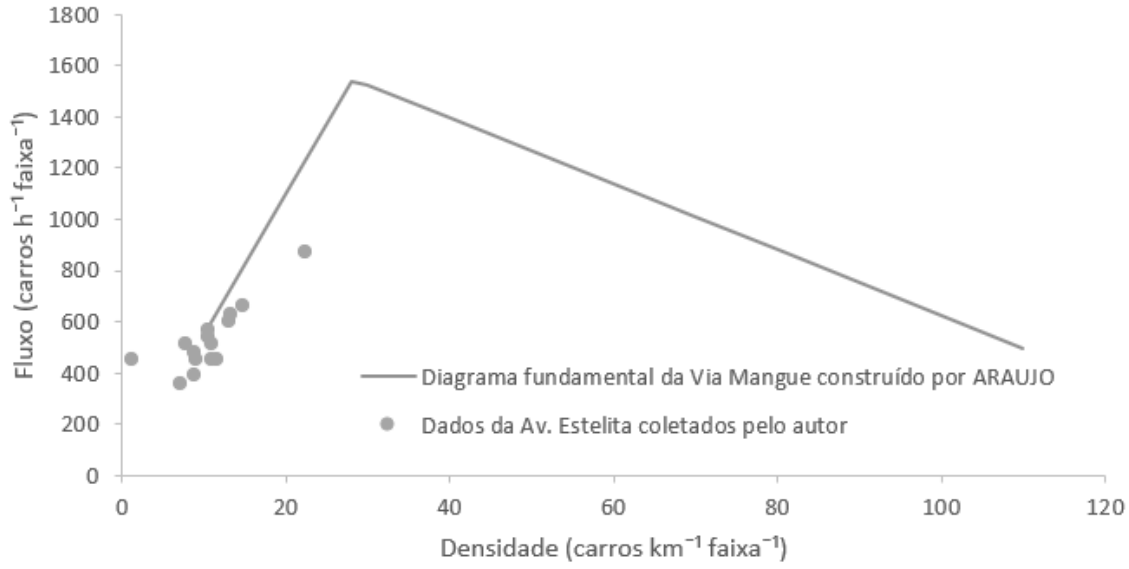
Figura 26 – Pontos coletados pelo autor na Avenida Beberibe sobre o Diagrama Fundamental da Via Mangue construído por Araujo (2021)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Observando os gráficos dos três locais, todos os pontos estão à esquerda do gráfico, antes do ponto de densidade ótima, como era de se esperar por se tratar de um horário fora do horário de pico. Além disso, como a Av. Estelita e Av. Beberibe apresentam a maioria de seus pontos distantes do diagrama fundamental da Via Mangue, já é possível inferir que os locais possuem características distintas de tráfego.

Figura 27 – Pontos coletados pelo autor na Avenida Estelita sobre o Diagrama Fundamental da Via Mangue construído por Araujo (2021)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Dentre os três, os pontos que mais parecem se aproximar do diagrama fundamental são os pontos da via mangue, como já era esperado. Dentre as duas outras, a que mais parece se aproximar do diagrama fundamental é a Avenida Estelita, cujas características se assemelham mais à Via Mangue, embora com fluxo menor. A mais díspar do diagrama fundamental é a Avenida Beberibe, que possui os menores valores de fluxo de carros, conforme já discutido, e maiores valores de densidade, cuja causa pode-se atribuir à uma parada de ônibus, que quando os mesmos estacionavam, faziam com que a densidade de carros no local aumentasse brevemente.

4.3 SIMULAÇÃO

Embora o diagrama fundamental apresentado nas Figuras 25, 26 e 27 seja da Via Mangue, onde a densidade ótima foi de 28 carros km^{-1} $faixa^{-1}$, pode-se inferir, tomando a Via Mangue como base, que todos os pontos dos três locais estão na região de fluxo livre, pois todos estão extremamente à esquerda do ponto de densidade ótima deste diagrama fundamental, e também pelo fato de não ter havido congestionamentos durante as observações.

Segundo a análise de sensibilidade feita por Araujo (2021), este verificou que o parâmetro de entrada do modelo de tráfego que mais exerce influência no fluxo quando a densidade está abaixo de 40 carros km^{-1} $faixa^{-1}$ é o da velocidade máxima dos veículos. Devido a isto, as simulações foram realizadas utilizando os mesmos valores dos parâmetros de entrada que Araujo (2021), com exceção da velocidade máxima dos veículos.

A velocidade máxima dos carros e das motos foi ajustada até que o fluxo resultante de ambos apresentasse o menor erro possível com relação ao valor médio do fluxo observado nas gravações. Vide que a velocidade máxima dos carros e das motos não são necessariamente iguais.

Nas Tabelas 14, 15 e 16 são mostrados a densidade medida e o fluxo medido, estes são os valores dessas grandezas obtidos nas simulações dos locais. A densidade utilizada é a que foi usada na simulação, a velocidade máxima é a maior velocidade permitida para cada tipo de veículo, o fluxo calibrado é o fluxo resultante a partir dessa velocidade máxima e o erro é a diferença percentual entre o fluxo calibrado e o real.

Tabela 14 – Dados da simulação de tráfego para a Via Mangue

Veículo	Densidade medida (carros $km^{-1}faixa^{-1}$)	Densidade utilizada (carros $km^{-1}faixa^{-1}$)	Fluxo medido (carros $h^{-1}faixa^{-1}$)	Velocidade máxima (km h^{-1})	Fluxo calibrado (carros $h^{-1}faixa^{-1}$)	Erro
Carro	11,6	12	676	70	687	1,63%
Moto	1,78	2	97	50	99	1,72%

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Tabela 15 – Dados da simulação de tráfego para a Avenida Estelita

Veículo	Densidade medida (carros $km^{-1}faixa^{-1}$)	Densidade utilizada (carros $km^{-1}faixa^{-1}$)	Fluxo medido (carros $h^{-1}faixa^{-1}$)	Velocidade máxima (km h^{-1})	Fluxo calibrado (carros $h^{-1}faixa^{-1}$)	Erro
Carro	10,75	11	528	50	543	2,84%
Moto	2,09	2	102	50	99	1,03%

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Tabela 16 – Dados da simulação de tráfego para a Avenida Beberibe

Veículo	Densidade medida (carros $km^{-1}faixa^{-1}$)	Densidade utilizada (carros $km^{-1}faixa^{-1}$)	Fluxo medido (carros $h^{-1}faixa^{-1}$)	Velocidade máxima (km h^{-1})	Fluxo calibrado (carros $h^{-1}faixa^{-1}$)	Erro
Carro	11,8	12	426	36	425	0,24%
Moto	5,24	5	234	55	233	0,43%

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A Figura 28, na próxima página, mostra os vetores velocidade dos carros obtidos na simulação na forma gráfica, com o tempo nas abscissas e velocidade nas ordenadas. Vide que os gráficos da Av. Estelita e Av. Beberibe tem forma semelhante, embora com médias de velocidade diferentes, possuem a mesma amplitude de velocidade, em torno de 4 km h^{-1}.

A Tabela 17 mostra o valor das velocidades médias extraídos a partir do vetor velocidade das simulações, para cada um dos locais. Comparando com os valores da Tabela 13, que foram calculados a partir dos dados de fluxo e densidade reais observados, pode-se perceber que eles estão bem concordantes, com o maior dos erros sendo igual a aproximadamente 10% (Via Mangue para motos), demonstrando que a simulação foi eficaz em reproduzir as características de tráfego nesses locais. Os demais parâmetros característicos da simulação serão apresentados posteriormente.

Tabela 17 – Velocidade média dos carros e das motos em km h^{-1} calculados a partir da média dos valores do vetor velocidade correspondente

Veículo	Via Mangue	Av. Estelita	Av. Beberibe
Carro	55,8	49,4	35,4
Moto	49,3	49,4	48,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Figura 28 – Gráfico velocidade *versus* tempo dos vetores velocidade dos carros dos três locais simulados; a) Via Mangue; b) Av. Estelita; c) Av. Beberibe

Fonte: O autor (2022)

4.4 PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS

Nessa seção serão discutidos os valores dos parâmetros característicos obtidos a partir da simulação dos três locais, bem como será realizada a comparação destes com alguns ciclos de condução. Essa seção foi dividida em duas partes para melhor compreensão: uma para comentários relacionado aos parâmetros e características das vias em relação aos carros e outra para as motos e comentários finais.

4.4.1 Carros

Na Tabela 18 estão os valores dos parâmetros dos principais ciclos padrão de condução utilizados no Brasil para os carros e os parâmetros obtidos através do vetor velocidade gerado na simulação. A maioria dos parâmetros cinemáticos apresentam valores próximos um dos outros, mas os parâmetros temporais e as velocidades médias e máximas são bem distintas, o que reforça a ideia de que os três locais têm características de tráfego distintas. A maior velocidade média foi a da Via Mangue e a menor a da Avenida Beberibe, que possuem o maior e o menor fluxo, respectivamente.

A Via Mangue apresentou o maior valor de desaceleração e a maior DEV entre as três avenidas. Frisa-se também que a Via Mangue foi o local com menor tempo em cruzeiro e com a velocidade média mais distante da velocidade máxima. É importante notar que não houve paradas nas três avenidas, demonstrando que não houveram congestionamentos, o que condiz com o que foi observado em vídeo, mesmo que em alguns momentos das observações alguns veículos estiveram parados (Beberibe).

Quando comparadas aos CCPs, a impressão que se tem é de que os valores são discrepantes. Durante a simulação, os carros permaneceram a maior tempo em cruzeiro, com valores de velocidade na maior parte do tempo bem próximos ao valor máximo possível estipulado na simulação. Devido a isso poder-se-ia esperar que os parâmetros simulados fossem mais semelhantes aos parâmetros do ciclo HWFET, que é o ciclo padrão para rodovias (possui apenas duas paradas), mas não é o que acontece, principalmente porque se tratam de locais urbanos, em que a velocidade média é menor e o fluxo de carros maior do que nas rodovias. Isto posto, dentre os três locais aqui estudados, a Via Mangue é o que aparenta ter os parâmetros que mais se aproximam de ambos os ciclos padrão apresentados na Tabela 18.

Em relação à DEV das três vias simuladas, esta demonstra aumentar junto com a velocidade média das vias, devido ao arrasto aerodinâmico do ar, que aumenta conforme o quadrado da velocidade. O mesmo acontece com o HWFET, que tem a maior velocidade média entre todos comparados. Entretanto, o FTP-75 possui a menor velocidade média e DEV semelhante ao HWFET e à Via Mangue. Isso pode ser explicado pelo grande número de paradas do ciclo (vide que o HWFET possui apenas duas paradas). Esse maior número de paradas faz com que os carros tenham que passar mais tempo acelerando, o que resulta em um gasto de energia maior devido à inércia, aumentando a DEV, o que de certa forma compensa a menor velocidade média deste ciclo. Vide que o FTP-75 é o ciclo que possui maior aceleração média positiva.

Tabela 18 – Ciclos de condução padrões e parâmetros característicos e DEV dos carros obtidos através de simulação de tráfego utilizando dados reais coletados

Parâmetros	Unidades	FTP–75	HWFET	Via Mangue	Av. Estelita	Av. Beberibe
Duração	s	1874	765	1800	1800	1800
Distância	km	17,77	16,51	27,89	24,67	17,7
Velocidade média	km/h	34,14	77,7	55,78	49,35	35,39
Velocidade máxima	km/h	91,2	96,4	70	50	36
Paradas		23	2	0	0	0
Percentual do tempo em repouso	s (%)	335 (17,6%)	4 (0,5%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Percentual do tempo em cruzeiro	s (%)	145 (8%)	126 (16,5%)	281 (15,61%)	1156 (64,22%)	1200 (66,67%)
Percentual do tempo acelerando	s (%)	739 (39,7%)	338 (44,2%)	989 (54,94%)	469 (26,06%)	438 (24,33%)
Percentual do tempo desacelerando	s (%)	655 (34,7%)	297 (38,8%)	530 (29,44%)	175 (9,72%)	162 (9%)
Aceleração média	m/s^2	0,51	0,19	0,33	0,34	0,34
Desaceleração média	m/s^2	-0,58	-0,22	-0,61	-0,92	-0,92
Aceleração máxima	m/s^2	1,48	1,43	0,4	0,4	0,4
Desaceleração máxima	m/s^2	NI*	-1,48	-2	-1	-1
Demanda Energética Veicular	MJ/km	0,38	0,40	0,38	0,28	0,23

*- Não informada Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A Tabela 19 mostra os valores de alguns ciclos de condução locais do Brasil e novamente os valores obtidos através da simulação. Mais uma vez os parâmetros demonstram estar bem discrepantes, ao contrário da DEV, que demonstra seguir a mesma tendência apresentada nos ciclos de condução padrão da Tabela 18, aumentando junto com a velocidade média e com a quantidade de paradas do ciclo.

Tabela 19 – Ciclos de condução locais e parâmetros característicos e DEV dos carros obtidos através de simulação de tráfego utilizando dados reais coletados

Parâmetros	Unidades	Recife carros	Fortaleza	Via Mangue	Av. Estelita	Av. Beberibe
Duração	s	1820	1216	1800	1800	1800
Distância	km	11,4	8,4	27,89	24,67	17,7
Velocidade média	km/h	22,6	23,8	55,78	49,35	35,39
Velocidade máxima	km/h	NI*	76	70	50	36
Paradas		15	9	0	0	0
Percentual do tempo em repouso	s (%)	437 (24%)	523 (43%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Percentual do tempo em cruzeiro	s (%)	91 (5%)	0 (0%)	281 (15,61%)	1156 (64,22%)	1200 (66,67%)
Percentual do tempo acelerando	s (%)	692 (38%)	365 (30%)	989 (54,94%)	469 (26,06%)	438 (24,33%)
Percentual do tempo desacelerando	s (%)	600 (33%)	328 (27%)	530 (29,44%)	175 (9,72%)	162 (9%)
Aceleração média	m/s^2	0,48	NI*	0,33	0,34	0,34
Desaceleração média	m/s^2	-0,43	NI*	-0,61	-0,92	-0,92
Aceleração máxima	m/s^2	NI*	NI*	0,4	0,4	0,4
Desaceleração máxima	m/s^2	-2,98	-5,6	-2	-1	-1
Demanda Energética Veicular	MJ/km	0,33	0,35	0,38	0,28	0,23

*- Não informada Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

4.4.2 Motos

Na Tabela 20 estão os valores dos parâmetros do ciclo padrão WMTC, do ciclo local de Recife para motocicletas construído por Andrade et al. (2021) e os parâmetros extraídos a partir da simulação. A velocidade média e a velocidade média corrida, assim como nos carros, são iguais nos três locais estudados neste trabalho, pois não ocorreram paradas durante a simulação.

Em suma, os parâmetros das três vias calculadas neste trabalho estão bem concordantes entre si, demonstrando que as vias tem condições de tráfego semelhantes para as motos, mesmo que o fluxo e a densidade da Avenida Beberibe sejam tão diferentes das demais. A Avenida Beberibe possui o maior desvio padrão de velocidade e o menor tempo de cruzeiro. A DEV é praticamente a mesma nos três locais, vide que eles possuem velocidade média praticamente iguais.

Em comparação com os parâmetros dos outros ciclos há divergência: os parâmetros referentes à aceleração e a velocidade estão mais próximos dos valores do WMTC e são discrepantes dos valores do ciclo Recife, pois neste ciclo as motos passam apenas 2% do tempo total em cruzeiro enquanto na simulação as motos passam em média mais que 60% do tempo dessa forma.

Tabela 20 – Ciclos de condução padrão (WMTC), local (Recife motos) e parâmetros característicos e DEV das motos obtidos através de simulação de tráfego utilizando dados reais coletados

Parâmetros	Unidades	WMTC	Recife motos	Via Mangue	Av. Estelita	Av. Beberibe
Duração	s	1800	2106	1800	1800	1800
Distância	km	28,9	19	24,75	24,72	24,12
Velocidade média	km/h	57,8	32,5	49,29	49,44	48,25
Velocidade média corrida	km/h	63,4	38,4	49,29	49,44	48,25
Desvio padrão da velocidade	km/h	37,9	21,5	1,12	1,17	8,8
Percentual do tempo em repouso	s (%)	162 (9%)	316 (15%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Percentual do tempo em cruzeiro	s (%)	288 (16%)	105 (2%)	1287 (71,5%)	1241 (68,94%)	834 (46,33%)
Percentual do tempo acelerando	s (%)	738 (41%)	906 (43%)	332 (18,44%)	363 (20,17%)	500 (27,78%)
Percentual do tempo desacelerando	s (%)	612 (34%)	863 (41%)	181 (10,06%)	196 (10,89%)	466 (25,89%)
Aceleração média	m/s^2	0,39	0,76	0,49	0,47	0,46
Desaceleração média	m/s^2	-0,49	-0,8	-0,91	-0,88	-0,48
Aceleração máxima	m/s^2	NI*	NI*	0,6	0,6	0,6
Desaceleração máxima	m/s^2	NI*	NI*	-1	-1	-2
Demanda Energética Veicular	MJ/km	0,28	0,17	0,13	0,13	0,14

*- Não informada Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A DEV aparenta seguir a mesma tendência dos carros: tende a aumentar com o aumento da velocidade média e com o aumento de paradas. A DEV calculada a partir das simulações estão mais próximas do valor do ciclo de Recife e distantes do WMTC. Ambos possuem paradas, mas o WMTC possui velocidades médias muito altas em

comparação com o ciclo de Recife, elevando a DEV devido ao arrasto aerodinâmico, como já citado.

Na Tabela 21 são apresentados os valores de velocidade média calculados a partir dos valores de fluxo e densidade medidos, que são os mesmos já mostrados na Tabela 13, e os valores de velocidade média observados nas simulações, que foram mostrados ao longo desta seção. Esses dados foram reunidos para melhor visualização e comparação.

Tabela 21 – Velocidade média dos carros e das motos nos três locais obtidos através dos valores de fluxo e densidade médios medidos (Real) e velocidade média dos carros e das motos observados nas simulações (Simulação)

Veículo	Mangue (real)	Mangue (simulação)	Estelita (real)	Estelita (simulação)	Beberibe (real)	Beberibe (simulação)
Carro (km/h)	58,3	55,8	49,1	49,4	36,1	35,4
Moto (km/h)	54,5	49,3	48,8	49,4	44,7	48,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Os valores da simulação estão bem próximos dos valores observados na prática, o que mais uma vez reforça a ideia que as simulações foram bem sucedidas em replicar as condições de tráfego que foram observadas em vídeo, nos três locais.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho foi focado no estudo do tráfego urbano misto da cidade do Recife e do quanto este varia entre os diferentes locais na cidade. Esta análise foi feita a partir de observações de vídeo de câmeras de tráfego cujas imagens foram cedidas pela CTTU, totalizando 225 minutos de imagens em 10 câmeras. As observações objetivavam medir o fluxo e a densidade dos veículos nos locais de forma manual, e durante essa coleta de dados, algumas características subjetivas e impressões gerais do tráfego foram observadas e comentadas pelo autor ao longo do trabalho.

Em seguida, foi realizada a simulação computacional do tráfego de três destes locais utilizando os valores de fluxo e densidade coletados em vídeo, afim de obter um vetor velocidade para os carros e um para as motos, para cada um desses locais. Destes vetores foram extraídos parâmetros característicos, com os quais foi possível realizar comparações entre as vias estudadas neste trabalho e entre dados de outros trabalhos já realizados anteriormente.

A primeira comparação foi realizada visualmente, entre um diagrama fundamental triangular recentemente construído da Via Mangue e os dados de fluxo e densidade dos carros coletados pelo autor nos três locais, sendo um deles a própria Via Mangue. Como todas as observações se restringiram a um horário do dia apenas e fora do horário de pico, todos pontos ficaram numa mesma região do diagrama, a região de fluxo livre. Dentre os dados dos três locais, o que mais coincidiu com o diagrama fundamental foi a Via Mangue, como era de se esperar, e o que mais se diferenciou foi o da Avenida Beberibe, que apresentou um fluxo baixo de veículos e maior fluxo de motos, em comparação com as demais. Importante frisar que a Avenida Beberibe está inserida em um local residencial no Recife, subúrbio com diversas ruas paralelas, enquanto as demais estão mais próximas do centro e apresentam menos ruas paralelas.

Posteriormente foram realizados cálculos com os vetores velocidade das simulações afim de extrair os parâmetros característicos desses locais, separadamente para os carros e para as motos. Para os carros foi observado que o tráfego é bastante distinto entre os locais, apresentando cerca de 63% de diferença entre o maior e menor valor de velocidade média e 61% de diferença entre demanda energética veicular, dentro outros. Já para as motos, os valores dos parâmetros demonstraram estar bem concordantes entre os três locais, apresentando cerca de 1% de diferença entre o menor e o maior valor de velocidade média e 8% da demanda energética veicular.

Portanto, a utilização de dados de tráfego de apenas um local do Recife se mostra insuficiente para representar todo o tráfego desta cidade. Não só pelo fato de os três locais escolhidos para serem realizados os estudos e as simulações serem livres da maioria dos obstáculos (semáforos, lombadas e cruzamentos) ao tráfego existentes nas cidades, mas também porque, mesmo esses locais possuindo características físicas semelhantes, ainda assim apresentaram características distintas de tráfego, como velocidade média, composição da frota e densidade de veículos.

Por fim, quando comparados aos ciclos de condução padrão utilizados no Brasil e alguns ciclos de condução locais do Recife, dentre outros, os parâmetros calculados neste trabalho demonstram estar bem discrepantes, em sua maioria. Isso ocorreu porque neste trabalho, devido às limitações, apenas foram coletados dados do tráfego em um horário do dia, diferentemente destes ciclos, que visam representar as situações reais de um veículo dentro do trânsito, coletando dados em diferentes horários do dia, tanto com fluxo livre quanto congestionado.

Este fato leva a propostas de futuros trabalhos, que seriam coletar dados dessas vias em horários de pico, onde há congestionamentos, afim de verificar se o tráfego também apresenta comportamento distinto em cada um dos locais e, além disso, também seria interessante coletar dados em outros locais de subúrbio, afim de verificar a hipótese levantada neste trabalho, que estes locais possuem uma composição da frota diferente do centro da cidade, apresentando um maior volume de motocicletas.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Guilherme Medeiros Soares de. **Desenvolvimento de método simplificado de construção e análise de ciclos de condução locais para carros e motos: um estudo de caso no horário fora de pico na cidade do recife.** 2020. Tese - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

ANDRADE, G. M. S. de; ARAÚJO, F. W. C. de; SANTOS, M. P. M. de N.; GARNÉS, S. J. dos A.; MAGNANI, F. S. Simple Methodology for the Development and Analysis of Local Driving Cycles Applied in the Study of Cars and Motorcycles in Recife, Brazil. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, p. 036119812199185, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1177/0361198121991850

ARAUJO, F. W. C. **Análise do tráfego misto de motocicletas e automóves considerando uma variedade de métricas, escalas e pontos de vistas**. 2017. - UFPE, *[s. l.]*, 2017.

ARAUJO, F. W. C. **Construção de ciclos de condução veiculares adaptados às várias condições de tráfego de uma via a partir de monitoramento por vídeo. 2021.** Tese - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.

ARUN, N. H.; MAHESH, S.; RAMADURAI, G.; SHIVA NAGENDRA, S. M. Development of driving cycles for passenger cars and motorcycles in Chennai, India. **Sustainable Cities and Society**, v. 32, n. March, p. 508–512, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.05.001

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6601**: Veículo veículo rodoviários automotores leves - Determinação determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7024**: Veículos veículos rodoviários automotores leves - Medição medição do consumo de combustível - Método método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10312**: Veículos veículos rodoviários automotores leves - Determinação determinação da resistência ao deslocamento por desaceleração livre em pista de rolamento e simulação em dinamômetro. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

AZEVEDO, J. A. H.; CASSIANO, D. R.; FEITOSA, B. B.; DE OLIVEIRA, M. L. M.; LIMA, E. P.; BERTONCINI, B. V. Influências dos modos de operação nas emissões de poluentes provenientes de veículos flex em região urbana. **Transportes**, v. 25, n. 2, p. 91, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.14295/transportes.v25i2.1304

BARLOW, Tim J. *et al.* **A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions**. 3 ed. Workingham, UK: TRL Limited, 2009. *E-book*.

BRUTON, M. J. Introdução ao planejamento dos transportes. [S.l.]: Editora Intercincia, 1979

COELHO, A. H.; GOLDNER, L. G. **Engenharia de Tráfego - Módulo I**. Departamento de Engenharia Civil, UFSC, 2016.

COSSALTER, V**. Motorcycle Dynamics**, 2nd edition. **Editora Lulu**, 2006.

DAGANZO, C. F. The cell transmission model: a dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. **Transp Res Part B Methodology**, v. 28, n. 4, p. 269–287, 1994.

DENATRAN. **Frota de Veículos**. *[s. l.]*, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-denatran/frota-de-veiculos-2021>. Acesso em: 10 nov. 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER. Normas Para o Projeto das Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1973.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT – IPR 723. Manual de Estudos de Tráfego. Rio de Janeiro, 2006.

FABIANA, W. A. **Experimentação com simulação de tráfego mesoscópica utilizando o software SUMO aplicada à Região Metropolitana da Grande Florianópolis**. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Civil, UFSC, 2022.

FUKUDA, E.; TANIMOTO, J.; IWAMURA, Y.; NAKAMURA, K.; MITSUHIRO, A. Field measurement analysis to validate lane-changing behavior in a cellular automaton model. **Physical Review E**, v. 94, n. 5, p. 1–7, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1103/PhysRevE.94.052209

GAMBOA, J. P. S. **Desenvolvimento de um protótipo para simulação microscópica de tráfego.** 2016. Dissertação – Área Departamental de Engenharia Civil, ISEL, 2016.

GERALDI, Cláudia R. S.; MONTANARI, Gino; DEPIERI, Marcello; SEDANO, Raphael; "Estudo preliminar das emissões de Aldeídos totais em motocicletas de várias cilindradas utilizando o novo ciclo de Emissões conforme PROMOT IV (WMTC) e a nova proposta do projeto norma de aldeídos em motos baseado na ABNT NBR 12026", p. 160-171. In: **Anais do XXIV Simpósio Internacional de Engenharia Automotica - SIMEA 2016 [=Blucher Engineering Proceedings].** São Paulo: Blucher, 2016. ISSN 2357-7592, DOI: 10.5151/engpro-simea2016-PAP24

GIAKOUMIS, Evangelos G. **Driving and engine cycles**. Suiça: Springer International Publishing, 2016. *E-book*. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-49034-2.

HUERTAS, J. I.; QUIRAMA, L. F.; GIRALDO, M.; DÍAZ, J. Comparison of three methods for constructing real driving cycles. **Energies**, v. 12, n. 4, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en12040665

HUNG, Wing-Tat *et al.* Development of a practical driving cycle construction methodology: A case study in Hong Kong. **Transp Res D**, New Brunswick, v. 12, n. 2, p. 115-128, 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.01.002.

IBGE. **Índice de Desenvolvimento Humano.** *[s. l.]*, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/busca.html?searchword=IDH>. Acesso em: 20 nov. 2022.

KÜHNE, R. D. **Foundations of Traffic Flow Theory I: Greenshields' Legacy -Highway Traffic**. 2008.

LV, W.; SONG, W. G.; LIU, X. D.; MA, J. A microscopic lane changing process model for multilane traffic. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 392, n. 5, p. 1142–1152, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.physa.2012.11.012

MARICATO, Ermínia. Urbanismo na periferia do mundo globalizado. Metrópoles brasileiras. **São Paulo em Perspectiva**, 14 (4), 2000, pp. 21-33. DOI: https://doi.org/10.1590/S0102-88392000000400004

MAZER, M. F. P. **Comparação de ciclos de condução padrão aplicados a um veículo de passageiros operando com etanol.** Trabalho de Conclusão de Curso**.** Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, UFSM, 2020.

PEREIRA, A. L., 2002, "Apostila – Notas de Aula", Programa de Engenharia de Transportes, PET/COPPE/UFRJ.

QUADROS, Eduardo Costa; "Impacto de diferentes ciclos de emissões em um veículo Flex-Fuel", p. 172-188. In: **Anais do XXIV Simpósio Internacional de Engenharia Automotica - SIMEA 2016 [=Blucher Engineering Proceedings].** São Paulo: Blucher, 2016. ISSN 2357-7592, DOI: 10.5151/engpro-simea2016-PAP25

Ranking mostra as cidades com piores trânsitos do mundo. **O Estado de S.Paulo**, São Paulo, 26 de mai. de 2021. Disponível em: <https://www.mobilize.org.br/noticias/12661/ranking-mostra-as-cidades-com-os-piores-transitos-do-mundo.html>. Acesso em: 09 de nov. de 2022.

SANTOS, M. P. M. de N. **A importância do motor na simulação de carros e motos em situação de tráfego**. 2019. - UFPE, *[s. l.]*, 2019.

SANTOS, M. P. M. de N, et al. **A Simple Physical Model to Study the Relationship between the Individual Automobile Properties and the Collective Traffic Behavior.** 2021.

SILVA, P. C. M., 2007, "Apostila – Teoria do Fluxo de Tráfego", Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB. Disponível em: <http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/teoria-do-fluxo-de-trafego.pdf>. Acesso em: 07 de nov. de 2022.

SMULDERS, S. **Control of freeway traffic flow by variable speed signs, Transportation Research Part B: Methodological**, v. 24, n. 2, p. 111-132, ISSN 0191-2615, 1990, Disponível em: https://doi.org/10.1016/0191-2615(90)90023-R.

STEG, L. Car use: Lust and must. Instrumental, symbolic and affective motives for car use. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 39, n. 2- 3 SPEC. ISS., p. 147–162, 2005. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tra.2004.07.001.

TREIBER, M.; KESTING, A. **Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation**. 1. ed. *[S. l.]*: Springer Berlin Heidelberg, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-642-32460-4

VAN WAGENINGEN-KESSELS, F.; VAN LINT, H.; VUIK, K.; HOOGENDOORN, S. Genealogy of traffic flow models. **EURO Journal on Transportation and Logistics**, v. 4, n. 4, p. 445–473, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13676-014-0045-5

WANG, Q.; HUO, H.; HE, K.; YAO, Z.; ZHANG, Q. Characterization of vehicle driving patterns and development of driving cycles in Chinese cities. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 13, n. 5, p. 289–297, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.trd.2008.03.003

APÊNDICE A – Dados originais de fluxo e densidade dos carros

Onde Q é a quantidade de carros que cruzaram a linha imaginária delimitada na avenida no intervalo de um minuto e S a soma do número de carros que estiveram dentro da área imaginária delimitada na avenida a cada segundo dentro do minuto correspondente.

Todos os dados foram coletados a partir de gravações do dia 17/01/2022 das 14:00 às 14:15.

A linha e área imaginária dos três locais são mostradas na metodologia.

Mangue		
Minuto	Q	S
14:00	38	161
14:01	26	111
14:02	36	171
14:03	40	180
14:04	39	167
14:05	27	105
14:06	29	133
14:07	34	96
14:08	31	120
14:09	31	132
14:10	30	124
14:11	25	112
14:12	45	81
14:13	38	163
14:14	38	179
Média	33,80	135,67

Estelita		
Minuto	Q	S
14:00	17	145
14:01	15	154
14:02	15	120
14:03	29	296
14:04	15	146
14:05	16	117
14:06	21	175
14:07	20	172
14:08	17	104
14:09	15	16
14:10	13	117
14:11	18	139
14:12	22	194
14:13	19	140
14:14	12	94
Média	17,60	141,93

Beberibe		
Minuto	Q	S
14:00	9	64
14:01	13	90
14:02	10	92
14:03	16	148
14:04	9	67
14:05	20	112
14:06	15	105
14:07	18	153
14:08	11	89
14:09	19	153
14:10	15	150
14:11	13	113
14:12	17	169
14:13	15	194
14:14	13	191
Média	14,20	126,00

Também são disponibilizados os valores médios de fluxo e densidade nas unidades utilizadas neste trabalho, todas calculadas a partir desses dados.

Unidade	Mangue	Estelita	Beberibe
Fluxo em (carros h^{-1} faixa^{-1})	676	528	426
Densidade em (carros km^{-1} faixa^{-1})	11,60	10,75	11,80

APÊNDICE B – Dados originais de fluxo e densidade das motos

Onde Q é a quantidade de motos que cruzaram a linha imaginária delimitada na avenida no intervalo de um minuto e S a soma do número de motos que estiveram dentro da área imaginária delimitada na avenida a cada segundo dentro do minuto correspondente.

Todos os dados foram coletados a partir de gravações do dia 17/01/2022 das 14:00 às 14:15.

A linha e área imaginária dos três locais são mostradas na metodologia.

Mangue		
Minuto	Q	S
14:00	10	43
14:01	3	14
14:02	4	17
14:03	5	20
14:04	6	21
14:05	3	15
14:06	5	25
14:07	5	21
14:08	2	11
14:09	0	0
14:10	6	24
14:11	6	26
14:12	3	15
14:13	8	33
14:14	7	27
Média	4,87	20,80

Estelita		
Minuto	Q	S
14:00	3	31
14:01	3	21
14:02	6	48
14:03	7	76
14:04	2	12
14:05	3	34
14:06	1	5
14:07	2	13
14:08	1	7
14:09	2	0
14:10	6	40
14:11	3	28
14:12	4	34
14:13	6	48
14:14	2	17
Média	3,40	27,60

Beberibe		
Minuto	Q	S
14:00	10	65
14:01	7	47
14:02	9	75
14:03	8	63
14:04	7	63
14:05	11	29
14:06	6	40
14:07	8	40
14:08	12	74
14:09	9	98
14:10	3	23
14:11	8	54
14:12	9	69
14:13	3	47
14:14	7	53
Média	7,80	56,00

Também são disponibilizados os valores médios de fluxo e densidade nas unidades utilizadas neste trabalho, todas calculadas a partir desses dados.

Unidade	Mangue	Estelita	Beberibe
Fluxo em (motos h^{-1} faixa^{-1})	97	102	234
Densidade em (motos km^{-1} faixa^{-1})	1,78	2,09	5,24

APÊNDICE C – Dados originais de fluxo e densidade dos veículos pesados

Onde Q é a quantidade de veículos pesados que cruzaram a linha imaginária delimitada na avenida no intervalo de um minuto e S a soma do número de veículos pesados que estiveram dentro da área imaginária delimitada na avenida a cada segundo dentro do minuto correspondente.

Todos os dados foram coletados a partir de gravações do dia 17/01/2022 das 14:00 às 14:15.

Os veículos pesados são os com peso acima de 3500 kg (ônibus, microônibus, carretas, caminhões, baús, etc.).

A linha e área imaginária dos três locais são mostradas na metodologia.

Mangue		
Minuto	Q	S
14:00	0	0
14:01	1	5
14:02	0	0
14:03	0	0
14:04	0	0
14:05	0	0
14:06	0	0
14:07	2	0
14:08	1	0
14:09	1	0
14:10	0	0
14:11	0	0
14:12	2	2
14:13	0	4
14:14	2	0
Média	0,60	0,73

Estelita		
Minuto	Q	S
14:00	1	0
14:01	0	0
14:02	1	9
14:03	2	29
14:04	0	0
14:05	1	8
14:06	0	0
14:07	0	0
14:08	4	33
14:09	3	0
14:10	0	0
14:11	1	9
14:12	3	16
14:13	0	0
14:14	0	0
Média	1,07	6,93

Beberibe		
Minuto	Q	S
14:00	1	7
14:01	1	8
14:02	3	17
14:03	2	9
14:04	8	83
14:05	1	8
14:06	1	8
14:07	3	0
14:08	1	0
14:09	2	7
14:10	2	7
14:11	3	7
14:12	6	42
14:13	2	15
14:14	5	53
Média	2,73	18,07

Também são disponibilizados os valores médios de fluxo e densidade nas unidades utilizadas neste trabalho, todas calculadas a partir desses dados.

Unidade	Mangue	Estelita	Beberibe
Fluxo em (veículos h^{-1} faixa^{-1})	12	32	82
Densidade em (veículos km^{-1} faixa^{-1})	0,06	0,53	1,69