



**Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico
Departamento de Engenharia Civil**

Arthur Martins Vitoreti de Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso

**Análise automatizada da presença de congestionamentos com base em dados de
postos de monitoramento de tráfego**

20 de julho de 2022

Arthur Martins Vitoreti de Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado pelo acadêmico Arthur Martins Vitoreti de Oliveira à banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Professor orientador: Alexandre Hering Coelho, Dr.

20 de julho de 2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Oliveira, Arthur Martins Vitoreti de
Análise automatizada da presença de congestionamentos
com base em dados de postos de monitoramento de tráfego /
Arthur Martins Vitoreti de Oliveira ; orientador,
Alexandre Hering Coelho, 2022.
108 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Engenharia de Tráfego. 3.
Congestionamento. 4. Detecção automática. 5. Programação de
computadores. I. Coelho, Alexandre Hering. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

Arthur Martins Vitoreti de Oliveira

**Análise automatizada da presença de congestionamentos com base em dados de
postos de monitoramento de tráfego**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do Título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 19 de julho de 2022

Prof. Liane Ramos da Silva, Dra.
Coordenadora do Curso

Banca examinadora:



Documento assinado digitalmente
Alexandre Hering Coelho
Data: 20/07/2022 08:08:33-0300
CPF: 758.478.099-72
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Alexandre Hering Coelho, Dr.
Professor orientador

Prof. Marcos Aurélio Marques Noronha, Dr.
Membro da banca

Prof. Eduardo Lobo, Dr.
Membro da banca

Agradecimentos

À minha família, por todo o suporte e apoio durante esta jornada acadêmica, fundamental para chegar até aqui.

Aos amigos que fiz durante a graduação, por todos os momentos compartilhados, vocês foram essenciais e tornaram essa trajetória mais leve.

Ao meu orientador, Prof.^o Alexandre Hering, por ter aceito a tarefa de orientar este trabalho e por todo o auxílio com o desenvolvimento do mesmo.

À banca examinadora, que avaliou a monografia e a apresentação do trabalho.

Finalmente, a todos que me auxiliaram de alguma forma a chegar até aqui, obrigado!

RESUMO

Os meios de transporte surgiram como uma forma de atender a demanda de locomoção. É comum buscar a solução mais eficiente de transporte, sendo que a eficiência está relacionada com o tempo gasto para se locomover. As rodovias são projetadas para atender um valor determinado de demanda crescente, estimado através de projeções de tráfego. Quando a demanda observada supera estimativa prevista na fase de projetos, surgem os congestionamentos. Os congestionamentos, além de afetar diretamente na rotina dos usuários, tem um impacto enorme na economia de uma região. Em 2019, conforme consta em Schrank e Lomax (2021), os congestionamentos custaram cerca de U\$190 bilhões aos cofres americanos. Um dos métodos que permite identificar congestionamentos, através de dados de postos de monitoramento de tráfego, é o modelo de Greenshields. Utilizando as relações entre fluxo, densidade e velocidade é possível, através dos gráficos entre as relações, identificar cenários congestionados. Entretanto, projetos de engenharia de tráfego podem facilmente abranger uma quantidade tal de dados, que torna impraticável a análise visual, além de que sua determinação pode ser difícil nos casos limites entre cenários congestionados e não congestionados. Este Trabalho de Conclusão de Curso visa desenvolver um método para que, com auxílio de ferramentas computacionais, seja possível automatizar o processo de identificação de congestionamentos, evitando assim, classificações erradas nos cenários limites. A ferramenta utiliza um fator de diferença percentual δ entre a média das $N\%$ maiores velocidades de cada conjunto de dados e a média de todos os registros de velocidade como limite de decisão para classificação em cenários congestionados e não congestionados. Os conjuntos de dados com uma diferença percentual δ superior a diferença percentual limite α apresentaram congestionamento, enquanto os conjuntos em que $\alpha > \delta$, foram classificados como não congestionados. A ferramenta passou por um processo de calibração, conforme descrito em Ortuzar e Willumsen (2011), analisando 315 combinações de α e N , obtendo uma taxa de acerto μ de 98%, em uma comparação com a classificação obtida com o uso do modelo de Greenshields. A combinação de parâmetros correspondentes a este valor de μ ($\alpha = 1,55\%$ e $N = 93\%$) foram validados, conforme proposto em Ortuzar e Willumsen (2011), resultando em um $\mu = 97,4\%$. Conclui-se que o método desenvolvido é capaz de identificar congestionados em dados de contagem de tráfego, em comparação com as classificações visual utilizando o modelo de Greenshields.

Palavras-chave: engenharia de tráfego; congestionamento; detecção automática; programação de computadores; estatística.

ABSTRACT

The means of transport emerged as a way to attend to the demand for locomotion. It is common to look for the most efficient transport solution, with efficiency being related to the locomotion time. Highways are usually designed to meet a certain value of demand that increases with time, estimated through traffic projections. When the observed demand exceeds the foreseen estimative in the design phase, congestion is observed. Traffic congestion, besides directly affecting the routine of its users, has a huge impact on the economy of a region. In 2019, as reported in Schrank e Lomax (2021), traffic jams cost the United States around U\$190 billion. One of the methods that allow congestion identification is the Greenshields' model. Using the relationships between flow, velocity, and density, it is possible, through graphical analysis, to identify congested scenarios. However, traffic engineering projects can easily have such an amount of data that makes its visual analysis impracticable, besides that its determination can be difficult in the borderline between congested and non-congested scenarios. This work aims to develop a method that, with the aid of computational tools, makes it possible to automate the traffic identification process, thus avoiding wrong classifications in borderline scenarios. This method utilizes a percentage difference factor δ between the average of the highest $N\%$ speeds of each dataset and the average of all speed records as a decision threshold for classification in congested and non-congested scenarios. Datasets with a percentual difference δ greater than the threshold percentage difference α showed congestion, while datasets where $\alpha > \delta$, were classified as non-congested. The method underwent a calibration process, as described in Ortuzar e Willumsen (2011), analyzing 315 different combinations of α and N , obtaining a hit rate μ of 98%, when comparing the method's classification with the one obtained with the Greenshield's visual classification. The combination of parameters corresponding to this value of μ ($\alpha = 1.55\%$ and $N = 93\%$) were validated, as proposed in Ortuzar e Willumsen (2011), resulting in a $\mu = 97.4\%$. It is concluded that the developed method can identify congested traffic count data, in comparison to the visual classification using the Greenshields model.

Keywords: traffic engineering; congestion; automatic detection; computer programing; statistics

Lista de Figuras

1	Ilustração da visibilidade do olho humano. Fonte: (YOUNIS et al., 2019)	5
2	Impacto de veículos autônomos na variação de velocidades nas rodovias. Fonte: (WU et al., 2022)	6
3	Impacto de veículos autônomos nos diagramas espaço-tempo. Fonte: (WU et al., 2022)	7
4	Classificação funcional das rodovias. Fonte: (DNER, 1974)	12
5	Relação entre a hora e o volume horário de tráfego em rodovias norte-americanas. Fonte: DNIT/IPR (2006)	17
6	Ilustração do conceito de espaçamento. Fonte: (PAPACOSTAS, 1987)	20
7	Ilustração do posicionamento do detector. Fonte: (ROESS; PRASSAS; MCSHANE, 2010)	21
8	Relacionamento entre as três características do tráfego. Fonte: (MANNERING; WASHBURN, 2012)	22
9	Relação instável no fluxo saturado entre fluxo e densidade para dados das cidades de Nairóbi (Quênia), Yokohama (Japão) e São Francisco (EUA). Fonte: (FRASCARIA; OLVER; VERHOEF, 2020)	24
10	Relação instável no fluxo saturado entre velocidade e fluxo. Fonte: (ITE, 2016)	25
11	Relações entre as variáveis fundamentais de tráfego em um modelo de microssimulação. Fonte: (TREIBER; KESTING, 2012)	25
12	Ilustração das relações entre as características fundamentais de tráfego em Linkerover, Bélgica. Fonte: (MAERIVOET; MOOR, 2005)	26
13	Relações entre fluxo, velocidade e densidade, identificando zonas congestionadas. Fonte: (ITE, 2016)	27
14	Exemplo de detectores no pavimento com tubos pneumáticos. Fonte: (GARBER; HOEL, 2008)	29
15	Exemplo de diagrama espaço-tempo na <i>California State Route 99</i> destacando, em verde, a região de possível congestionamento. Fonte: Adaptado de (TREIBER; KESTING, 2012)	31
16	Localização da área de estudo	33
17	Posicionamento dos detectores virtuais na área de estudo	35
18	Modelo de simulação microscópica em execução no SUMO	37
19	Fluxograma geral do desenvolvimento do sistema	38
20	Fluxograma representativo da criação da base de dados geral	40

21	Visualização da estrutura da base de dados no pgAdmin, mostrando os primeiros 16 registros	41
22	Fluxograma representativo do processo de geração dos gráficos fluxo-velocidade . . .	42
23	Gráfico fluxo por velocidade gerado pelo sistema	45
24	Fluxograma representativo do processo de classificação visual	46
25	Interface de classificação visual exibido ao usuário	47
26	Ilustração do preenchimento da coluna de 'classificação', para 20 primeiros registros, no pgAdmin	47
27	Ilustração de gráficos de fluxo por velocidade com o resultado da classificação visual	49
28	Fluxograma representativo da calibração dos parâmetros	50
29	Região das 90% maiores velocidades destacada em um cenário não congestionado .	51
30	Região das 90% maiores velocidades destacada em um cenário congestionado	52
31	Proporção entre classificações pelo método visual	55
32	Gráfico entre os parâmetros α , N e μ	56
33	Proporção entre classificações pelo método proposto	57
34	Proporção entre erros e acertos na comparação entre resultados dos métodos	57
35	Histograma com os valores de δ para os conjuntos de validação	58
36	Histograma com os resultados das diferenças percentuais δ dos cenários congestionados	59
37	Histograma com os resultados das diferenças percentuais δ dos cenários não congestionados	60
38	Gráficos de fluxo por velocidade igualmente classificados por ambos os métodos . .	61
39	Gráficos de fluxo por velocidade com classificações distintas de acordo com cada método	62

Lista de Tabelas

1	Tarifas de postos de pedágio em rodovias concedidas	8
2	Principais dimensões de veículos de projeto. Fonte: (DNIT/IPR, 2006)	11
3	Equações do modelo de Greenshields. Fonte: (ITE, 2016)	23
4	Estrutura de dados de demanda: exemplo mostrando os dez primeiros registros para um posto de monitoramento com três faixas de tráfego	36
5	Ilustração dos dados conforme armazenamento na base de dados	43
6	Estrutura dos dados importados para o <i>script</i>	44
7	Comparação das médias para o posto ROD-01 do conjunto de dados 0004 (não congestionado)	51
8	Comparação das médias para o posto RAM-05 do conjunto de dados 0007 (congestionado)	52
9	Ilustração de estrutura de dados para os resultados da calibração	54
10	Configuração inicial de parâmetros utilizada na calibração	55
11	Parâmetros obtidos no processo de calibração	56
12	Combinações de parâmetros avaliada na calibração do modelo	77
13	Resultado do processo de validação do modelo	87

Lista de Quadros

1	Exemplos de classes de veículos definidas em DNIT/IPR (2006)	9
---	--	---

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	3
1.1.1	Objetivo geral	3
1.1.2	Objetivos específicos	3
2	Revisão bibliográfica	4
2.1	Elementos da engenharia de tráfego e sua relação com os congestionamentos	4
2.1.1	Usuários, veículos e vias	4
2.1.2	Importância da identificação de congestionamentos	13
2.2	Características básicas do fluxo de tráfego e métodos de aquisição de dados	14
2.2.1	Volume e fluxo	15
2.2.2	Velocidade	17
2.2.3	Densidade	19
2.2.4	Relações entre fluxo, velocidade e densidade	21
2.2.5	Contagens de tráfego	27
2.2.6	Diagrama espaço-tempo	30
2.3	Calibração e validação	31
2.4	Conceitos estatísticos	32
2.4.1	Medidas de tendência central	32
3	Área de estudo	33
4	Desenvolvimento do sistema	38
4.1	Recursos de <i>software</i> utilizados	39
4.2	Criação da base de dados geral	40
4.3	Geração dos gráficos de fluxo-velocidade	41
4.4	Classificação visual	45
4.5	Calibração do modelo	50
5	Resultados	55
6	Conclusões	64
6.1	Recomendação para trabalhos futuros	65
	Referências	66

A	<i>script</i> para gerar a base de dados	68
B	<i>script</i> para geração de gráficos e classificação visual	70
C	<i>script</i> de calibração e validação	73
D	Tabela de combinações dos fatores α e N avaliados	77
E	Tabela de resultados da validação	87

1 Introdução

Os meios de transporte surgiram como alternativa para atender uma demanda de locomoção. No Brasil, a concretização do incentivo ao transporte rodoviário se deu ao final da década de 1950, durante o governo de Juscelino Kubitschek (BRASIL, 2014). Seu principal objetivo era firmar o transporte rodoviário como o principal meio de transporte no país - e obteve sucesso. No período entre 1960 e 1980, a malha rodoviária brasileira passou de 8.675 km para 47.487 km (CNT, 2018), um crescimento de aproximadamente 400%. Hoje, aproximadamente 70 anos após o fato, é inegável a importância deste meio de transporte na locomoção de cargas e pessoas, tendo sido responsável por 61,1% do transporte de carga e locomovido 79,5 milhões de pessoas no ano de 2017 em todo o território nacional país (CNT, 2018).

Paralelo a este grande crescimento do transporte rodoviário, evidenciou-se um de seus possíveis problemas, o congestionamento. Apesar de cada vez mais presente na realidade do brasileiro, este problema não é exclusivo do crescimento destes últimos 70 anos. Slinn, Matthews e Guest (2005) afirmam que registros do Império Romano citam que as ruas da cidade de Roma eram congestionadas regularmente, de forma que, ao menos um Imperador emitiu uma proclamação ameaçando aplicar a pena de morte a carroças e carruagens que bloqueassem seu traslado.

O transporte rodoviário pode ser descrito como uma relação entre oferta e demanda. Devido ao aumento populacional, crescimento de centros urbanos e até mesmo o desejo dos usuários de cada vez viajarem a locais mais distantes, a demanda de locomoção está em constante crescimento. Entretanto, a oferta deste meio de transporte é algo estrutural, fixo, limitada ao valor de capacidade da via. Como em qualquer relação entre oferta e demanda, quando a oferta não é suficiente para atender a demanda, ocorre um déficit. Para o caso do sistema rodoviário, surgem os congestionamentos.

O estudo desenvolvido por Li et al. (2020) aponta que imediatamente após um congestionamento, os motoristas tendem a tentar recuperar o tempo de viagem perdido. Com isso, sua visão é afunilada de modo a focar apenas o veículo imediatamente a frente, ignorando todo o ambiente da rodovia, como carros atrás e em outras faixas. Este comportamento mais agressivo é nocivo à todos os usuários da via, além de contrariar um dos objetivos principais dos projetos de engenharia de tráfego para Roess, Prassas e McShane (2010), a segurança.

Além do claro prejuízo aos usuários, afetando diretamente sua rotina, saúde mental e física, este fenômeno acarreta, também, em prejuízos financeiros. Conforme apresentado em Schrank e Lomax (2021), os congestionamentos custaram cerca de US\$190 bilhões aos cofres americanos no ano de 2019, referentes a uma maior queima de combustível, maiores tempos de viagem e um aumento no preço dos produtos transportados por rodovias.

Devido ao grande impacto que os meios de transporte possuem sobre a sociedade, tanto pessoal como financeiro, é de suma importância seu monitoramento pelas entidades responsáveis. Este monitoramento utiliza dados obtidos por mecanismos de contagem instalados na via para realizar uma análise operacional do respectivo trecho. Os dados de contagem permitem realizar uma caracterização da rodovia, como identificação da hora de pico e determinação da sua capacidade. Além disso, também é possível identificar a ocorrência de congestionamentos. A identificação de congestionamentos permite à engenharia de tráfego mapear possíveis gargalos presentes em uma rodovia, avaliando a necessidade de melhorias, visando sempre a eficiência da via, tanto em aspecto operacional como econômico.

Em análises operacionais de rodovias é comum utilizar ferramentas que permitem a identificação de congestionamento, como o modelo de Greenshields (ITE, 2016). Nele são modeladas relações entre as características de tráfego macroscópico, o que permite utilizá-lo em todos os projetos deste tipo de modelagem, como análise de nível de serviço, alocações de tráfego e identificação de congestionamentos. Para a identificação de congestionamento através deste método, utiliza-se da análise visual de gráficos entre as características macroscópicas de uma rodovia: fluxo, velocidade e densidade.

No contexto de projetos de engenharia de tráfego, o modelo de Greenshields pode ser usado de maneira complementar a outros métodos de análise operacional de rodovias, como o apresentado no *Highway Capacity Manual* (HCM) (TRB, 2016). Para a análise por este método, é necessário inserir dados referentes a demanda da rodovia. Entretanto, não há uma disponibilidade tão grande destes dados como os de volume nas rodovias. A identificação de congestionamento permite avaliar a possibilidade de utilizar dados de contagem volumétrica como dados de demanda, uma vez que reportado um congestionamento, neste momento os dados de demanda são maiores que a capacidade e, conseqüentemente, maior que o volume observado. Caso não haja congestionamento, estes volumes podem ser adotados como valores da demanda solicitante da via.

Entretanto, projetos de engenharia de tráfego podem facilmente abranger uma quantidade tal de dados em que se tornam impraticáveis análises visuais. Em virtude disso, é comum utilizar ferramentas computacionais para atividades envolvidas nas análises de tráfego. *Softwares* específicos são muito utilizados para tarefas complexas, como simulações de tráfego, enquanto a utilização de *scripts* é comum em atividades manuais repetitivas em grandes quantidade de dados, como em estudos de alocações de tráfego.

Além da possibilidade da análise visual do método de Greenshields para identificação de congestionamentos se tornar impraticável, sua determinação pode ser difícil nos casos limites entre cenários congestionados e não congestionados.

1.1 Objetivos

Nesta seção são apresentados os objetivos deste trabalho.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste Trabalho de Conclusão de Curso é desenvolver um procedimento para a identificação automatizada da presença de congestionamentos em rodovias a partir do processamento de dados obtidos em postos de monitoramento de tráfego, com base na modelagem de Greenshields.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são os seguintes:

- a) caracterizar os dados de demanda utilizados em análises operacionais de rodovias;
- b) explorar diagramas de relação entre fluxo e velocidade para constatar a presença de congestionamento;
- c) utilizar linguagem de programação e recursos estatísticos para automatizar processos envolvidos no desenvolvimento deste do trabalho;
- d) apresentar análises de desempenho do procedimento desenvolvido.

2 Revisão bibliográfica

Esta seção apresenta os principais conceitos abordados para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Elementos da engenharia de tráfego e sua relação com os congestionamentos

Conforme disposto em BRASIL (2014) a engenharia de tráfego estuda o inter-relacionamento de um ecossistema com os usuários, o veículo e a via. Esta seção aborda a relação destes elementos com a presença de congestionamento nas vias.

2.1.1 Usuários, veículos e vias

De acordo com ITE (2016), a engenharia de tráfego pode ser descrita como uma subdisciplina da engenharia de transportes, responsável por planejar, projetar e operar as ruas e rodovias, e sua interação com outros meios de transporte. Roess, Prassas e McShane (2010) afirmam que projetos de engenharia de tráfego possuem como objetivos:

- velocidade;
- conforto;
- conveniência;
- economia;
- compatibilidade ambiental;
- segurança.

Ainda segundo os autores, muitos destes objetivos são evidentes, uma vez que o condutor normalmente busca trafegar de maneira rápida, confortável, sem perturbações, sem custos elevados e em harmonia com o ambiente. Um dos desafios do engenheiro de tráfego está em encontrar um equilíbrio para alcançar estes objetivos, como por exemplo no caso de velocidade e segurança.

Conforme disposto em BRASIL (2014) a engenharia de tráfego estuda o inter-relacionamento de um ecossistema com os usuários, o veículo e a via. Dentre os elementos, o usuário é o que apresenta um impacto direto na presença de congestionamentos, devido ao impacto das variações humanas (WU et al., 2022).

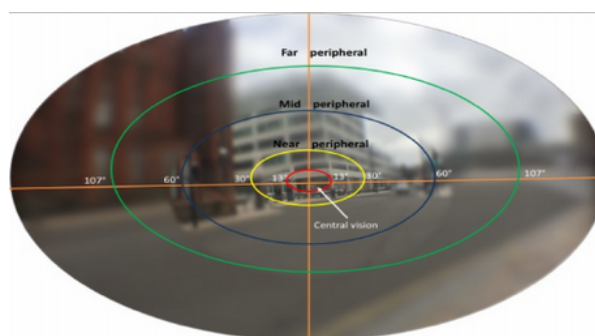
Lieu et al. (2017) consideram a tarefa de dirigir como um processo hierárquico com três níveis de organização: controle, orientação e navegação.

O nível de controle engloba todas as atividades que envolvem processamento de informações constantes e controle do veículo, como as atividades de reação, por exemplo.

Ao dirigir, o motorista precisa estar atento para reagir a interferências em seu caminho. Fatores como idade, motivação da viagem e estabilidade emocional estão relacionados ao tempo de reação de cada motorista, que compreende as fases de percepção, identificação, julgamento e de fato a reação.

A visão é uma peça fundamental na parte da percepção. O olho humano é capaz de observar em até 180º, com a visão periférica, porém somente 13º com o máximo nível de foco (YOUNIS et al., 2019).

Figura 1: Ilustração da visibilidade do olho humano. Fonte: (YOUNIS et al., 2019)



A percepção é primordial no aspecto da segurança da engenharia de tráfego, visto que quanto antes identificado a nuance, maior o tempo disponível para a reação acontecer. Já o julgamento é quando o motorista deve avaliar a situação, observar a necessidade de uma ação e avaliar suas possíveis consequências até, de fato, tomar a (re)ação.

O nível da orientação é definido como o conjunto de ações para a manutenção de uma velocidade segura e uma direção coerente com os elementos de tráfego da rodovia. Fatores que estão dentro deste nível são relacionados ao ecossistema da rodovia, como resposta para as curvas, comportamento em interseções e em engarrafamentos.

Já o terceiro nível onde o motorista age como supervisor do processo é a navegação. Este envolve tomadas de decisão acerca de rotas e mudança de trajetos enquanto já iniciada a navegação.

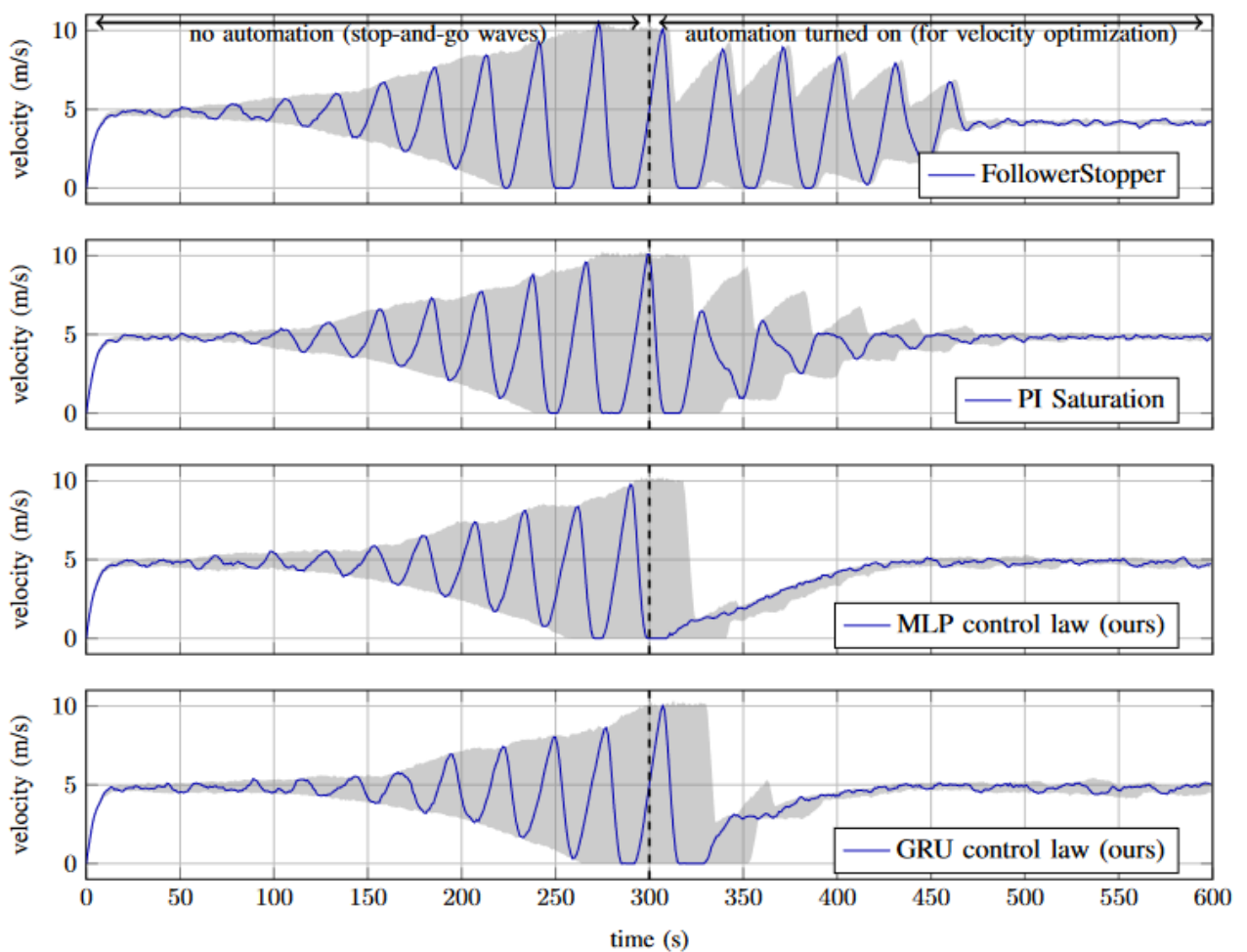
Além da separação do processo hierárquico, há variáveis intrínsecas ao caráter humano do motorista, na qual acabam se vinculando ao comportamento deste no trânsito, tais como:

- experiência;
- estresse;
- personalidade.

Essas variáveis humanas estão diretamente associadas a qualidade do tráfego em uma rodovia. O estudo desenvolvido por Wu et al. (2022) avalia o impacto da utilização de veículos autônomos

nas rodovias. A Figura 2 apresenta gráficos de velocidade por tempo de veículos em um congestionamento. No lado esquerdo, o sistema é composto inteiramente por veículos simulando conduções por seres humanos, incluindo o impacto de fatores humanos. Já no lado direito de cada gráfico é representado o impacto de diferentes configurações nos veículos autônomos, removendo o impacto das variações humanas. Percebe-se que a tendência dos veículos autônomos é encontrar uma velocidade na qual não seja necessário parar o veículo, característica de um congestionamento.

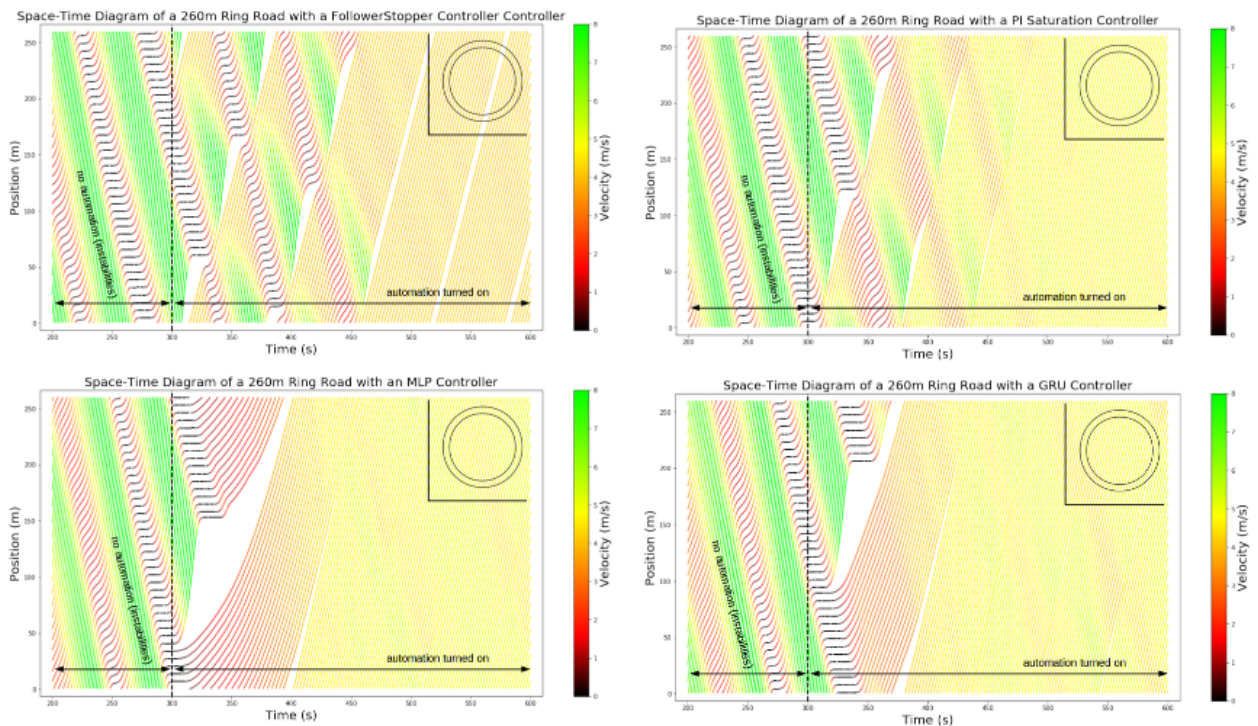
Figura 2: Impacto de veículos autônomos na variação de velocidades nas rodovias. Fonte: (WU et al., 2022)



Na Figura 3 estão representados diagramas espaço-tempo dos quatro cenários estudados. Percebe-se, da mesma maneira, que com a automação de veículos autônomos ligada, as ondas de choque basicamente são extinguidas.

Os autores relatam que ao substituir apenas 1 veículo de uma frota de 22, resultou em uma melhora de aproximadamente 40% da eficiência do sistema. Ao substituir 50% desta frota de seus experimentos por veículos autônomos, os resultados melhoraram em 85,03%.

Figura 3: Impacto de veículos autônomos nos diagramas espaço-tempo. Fonte: (WU et al., 2022)



Os veículos são fabricados para diferentes funções, em diferentes modelos. No escopo da engenharia de tráfego, os veículos são abordados em diversas atividades de projeto, tais como:

- projeto geométrico;
- estudo de sinalização;
- determinação da capacidade.

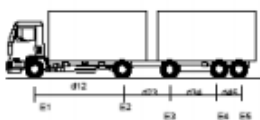
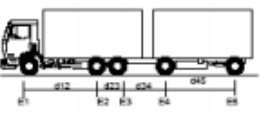
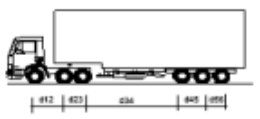

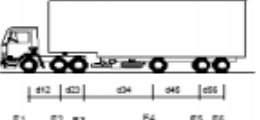
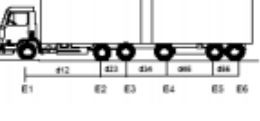

Ao entrarmos em nível de projeto da engenharia de tráfego, uma das características mais básicas e primordiais é a sua classificação. Para fins de projeto, uma classe deve ser atribuída a cada veículo, de acordo com suas características. Diferentes veículos possuem diferentes impactos em cada tipo de análise. Em projetos cuja velocidade do veículo é importante, cabe classificá-los de acordo com seu peso para uma maior aproximação da situação prática da rodovia. O engenheiro de tráfego é livre para utilizar qualquer classificação que julgar adequada, dependendo do escopo do projeto, levando em consideração a compatibilidade dos sensores disponíveis.

Uma classificação utilizada no Brasil, elaborada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), é usada para o dimensionamento de pavimentos rígidos e flexíveis e no cálculo de receita das praças de pedágios em rodovias concedidas, conforme Tabela 1 (DNIT/IPR, 2006). Das 32 classes definidas, 7 podem ser visualizadas no Quadro 1.

Tabela 1: Tarifas de postos de pedágio em rodovias concedidas

N°	Tipos de veículos	Nº eixos	Rodagem	Multiplicador da tarifa
1	Automóvel, caminhoneta e furgão	2	simples	1,00
2	Caminhão leve, ônibus, caminhão-trator e furgão	2	dupla	2,00
3	Automóvel com semi-reboque e caminhoneta com semi-reboque	3	simples	3,00
4	Caminhão, caminhão-trator, caminhão-trator com semi-reboque e ônibus	3	dupla	3,00
5	Automóvel com reboque e caminhoneta com reboque	4	simples	4,00
6	Caminhão com reboque e caminhão-trator com semi-reboque	4	dupla	4,00
7	Caminhão com reboque e caminhão-trator com semi-reboque	5	dupla	5,00
8	Caminhão com reboque e caminhão-trator com semi-reboque	6	dupla	6,00
9	Motocicletas, motonetas e bicicletas a motor	2	simples	0,50

Quadro 1: Exemplos de classes de veículos definidas em DNIT/IPR (2006)

SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX.(t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
	5	43(45,2)	CAMINHÃO + REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4E5 = TD, CM 17t d12, d23, d34 > 2,40m 1,20m < d45 ≤ 2,40m	2C3
	5	43(45,2)	CAMINHÃO TRUCADO + REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5 = ED, RD, CM 10t d12, d34, d45 > 2,40m 1,20m < d23 ≤ 2,40m	3C2
	6	45(47,3)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4E5E6 = TT, CM 25,5t d12, d34, > 2,40m 1,20m < d23, d45, d56 ≤ 2,40m	3S3
	6	45(47,3)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5 = ED, RD, CM 10t E6 = ED, RD, CM 10t d12, d34, d45, d56 > 2,40m 1,20m < d23 ≤ 2,40m	3I3
	6	45(47,3)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5E6 = TD, CM 17t d12, d34, d45 > 2,40m 1,20m < d23, d56 ≤ 2,40m	3J3
	6	45(47,3)	CAMINHÃO TRUCADO + REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5E6 = TD, CM 17t d12, d34, d45 > 2,40m 1,20m < d23, d56 ≤ 2,40m	3C3
	6	19,5(20,5)	CAMINHÃO TRATOR E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD(6 pneus), CM 13,5t 1,20m < d23 ≤ 2,40m A CMT do conjunto vai variar conforme a capacidade do semi-reboque, no mínimo 10 ton até, no máximo o limite legal de 4r ton.	X

A classificação do DNIT utiliza uma codificação alfanumérica, de forma NLN (número-letra-número) ou apenas NL (número-letra). O primeiro número é referente ao número de eixos que o veículo possui. Já a segunda referência numérica indica, caso exista, o número de eixos da unidade rebocada.

As letras significam:

- C = veículo simples;
- S = veículo trator;
- I = veículo trator com semi-reboque e distância entre-eixos maior que 2,40m;
- J = veículo trator com semi-reboque com um eixo em tandem e um isolado;
- D = caminhão com duas articulações combinadas no veículo;
- T = caminhão com três articulações combinadas no veículo;
- Q = caminhão com quatro articulações combinadas no veículo;
- X = veículos especiais;
- B = ônibus.

Então um veículo 3C3, por exemplo, seria um caminhão simples com 3 eixos, juntamente com um reboque com 3 eixos.

Para algumas modalidades de projeto, como nos projetos geométricos, o DNIT apresentou outra classificação. Neste escopo há a necessidade de características mais detalhadas dos veículos, como largura e comprimento. Em frente a diversos modelos de veículos de passeio, para fins de projetos, adota-se um veículo representativo, com características e dimensões que, em sua maioria, excedam a maioria de sua classe. Este veículo é chamado de veículo de projeto.

Em DNIT/IPR (2005) foram estabelecidas 5 categorias predominantes a serem adotadas como veículos de projeto para projetos de tráfego, dispostas a seguir, com suas características descritas na tabela 2.

- VP = Veículos leves: automóvel e similares;
- CO = Veículos comerciais rígidos não articulados: caminhões e ônibus não articulados;
- O = Veículos comerciais rígidos de maiores dimensões: ônibus e caminhões longos, frequentemente com três eixos;
- SR = Veículos articulados: unidade tratora simples com um semi-reboque;
- RE = Veículos comerciais com reboque: bitrem.

O automóvel de pequeno porte, chamado de "carro de passeio" no ramo da engenharia de tráfego, é o mais utilizado no Brasil. De acordo com DNIT/IPR (2005), em 2002, ele representava cerca de 80% da frota nacional de veículos. Conforme consta em ECLAC (2004), os carros de passeio são os veículos que mais impactam para o congestionamento de uma rodovia. Ainda de acordo com o autor, apesar de um ônibus, equivalente a 3 unidades de carro de passeio, causar mais congestionamento de uma unidade de pequeno porte, o número de passageiros deve ser considerado. Portanto, um carro de passeio que transporta, em média 1,5 pessoas, gera cerca de 11 vezes mais congestionamento que um ônibus com 50 passageiros.

Tabela 2: Principais dimensões de veículos de projeto. Fonte: (DNIT/IPR, 2006)

Características / Veículo tipo	Veículos leves (VP)	Caminhões e ônibus convencionais (CO)	Caminhões e ônibus longos (O)	Semi-reboques (SR)	Reboques (RE)
Largura Total	2,1	2,6	2,6	2,6	2,6
Comprimento total	5,8	9,1	12,2	16,8	19,8
Raio min. da roda externa dianteira	7,3	12,8	12,8	13,7	13,7
Raio min. da roda interna traseira	4,7	8,7	7,1	6,0	6,9

No que tange às vias sobre o congestionamento, destaca-se a classificação do fluxo em rodovias de acordo com duas categorias (ROESS; PRASSAS; MCSHANE, 2010):

(i) **fluxo ininterrupto**

É o fluxo observado nas *freeways*, mas não apenas nelas. É caracterizado por ser direto, sem interferência de agentes externos no fluxo de veículos, como semáforos, faixas de pedestre, lombadas e intersecções em nível. De acordo com TRB (2016), o fluxo de tráfego em uma rodovia de fluxo ininterrupto é o resultado de interações entre os veículos e as características geométricas do segmento. O fluxo é apenas controlado pelas características da via.

Em um regime de fluxo estável, rodovias de fluxo ininterrupto não deveriam apresentar congestionamentos, uma vez que suas limitantes são apenas geométricas. Entretanto, a presença de congestionamentos nessa categoria de rodovias indica a presença de um possível gargalo (TRB, 2016) a ser avaliado.

(ii) **fluxo interrompido**

É o fluxo que permite a interferência de controles externos, como intersecções, semáforos e

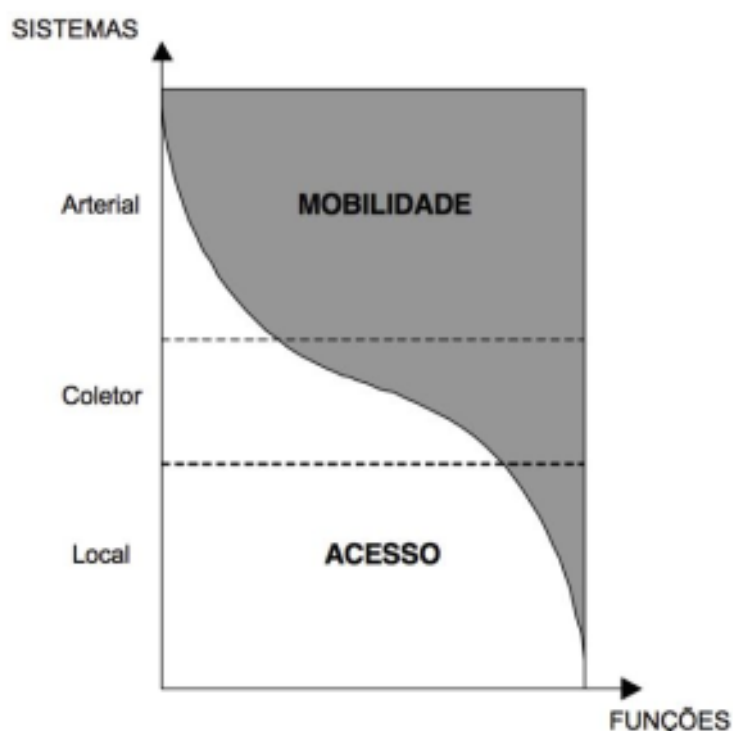
outros mecanismos de controle. É o tipo de fluxo encontrado em vias urbanas intra-municipais. Conforme consta no TRB (2016). A ocorrência de filas nesta categoria é comum, uma vez que o fluxo é interrompido e os veículos vão acumulando. Entretanto, pode acontecer uma situação de fluxo saturado no sistema quando o tempo de interrupção no local não é suficiente para atender todos os veículos interrompidos. Quando os veículos são interrompidos mais de uma vez pelo mecanismo de interrupção, identifica-se o congestionamento. A identificação de congestionamentos em cenários de fluxo interrompido pode auxiliar em estudos do dimensionamento das interrupções, como o dimensionamento dos semáforos.

A exemplo dos veículos, as vias também podem ser categorizadas de acordo com seus parâmetros operacionais. Brasil (1999) apresenta o sistema de classificação funcional, que agrupa as rodovias em classes conforme o tipo de serviço oferecido e sua função.

- Rodovias arteriais;
- Rodovias coletoras;
- Rodovias locais;

Uma das principais diferenças das classes propostas no sistema funcional é em relação a contrariedade entre mobilidade e acesso. A Figura 4 ilustra este conceito.

Figura 4: Classificação funcional das rodovias. Fonte: (DNER, 1974)



A classe das rodovias arteriais, conforme consta em FHWA (2016), é composta pelas rodovias projetadas para atender o maior número de veículos em relação as outras classes. (BRASIL, 1999) descreve as rodovias arteriais possuem a finalidade de prestar os seguintes serviços.

- alto nível de mobilidade;
- ligação entre municípios, estados e países vizinhos;
- proporcionar acesso a distâncias razoáveis a todas as áreas desenvolvidas e com grande densidade.

As rodovias coletoras, de acordo com FHWA (2016), exercem um papel crítico em uma malha viária. Brasil (1999) indica como sua principal função atender o tráfego intermunicipal e de centros geradores de tráfego de menor volume que não são atendidos pelo sistema arterial. Esta categoria apresenta um cenário balanceado na relação entre acessibilidade e mobilidade.

As rodovias pequenas, destinadas a atender o tráfego intra-municipal são chamadas de rodovias locais (BRASIL, 1999). Por estarem presentes dentro das cidades, estas rodovias possuem muitas intersecções e necessitam de mecanismos de controle de tráfego. Estas são projetadas para volumes menores, possuindo características inferiores em relação as outras classificações rodovias.

2.1.2 Importância da identificação de congestionamentos

Mannering e Washburn (2012) destacam o papel chave das rodovias de prover acesso para aquisição de recursos naturais, produção industrial, mercado de varejo e a mobilidade da população. Após o início dos anos de 1990, o crescimento do tráfego na rodovias e de demanda por transporte resultou em problemas como congestionamentos, atrasos, acidentes e uma deterioração ambiental, conforme consta em ECLAC (2004). ECLAC (2004) afirma ainda que o congestionamento vem se tornando rotineiro e possui impacto tanto para os motoristas usuários dos sistemas de transporte, quanto para a economia de forma geral. A principal consequência atrelada ao congestionamento é o aumento dos tempos de viagem. Com este aumento, acompanham outros fenômenos, tais como o aumento da poluição por queima de combustível fóssil, aumento do gasto de combustível e, por conta disto, sobe-se o valor do frete atrelado aos produtos oferecidos no mercado. Conforme consta em Schrank e Lomax (2021), os congestionamentos resultaram em um prejuízo de U\$190 bilhões aos cofres americanos, incluindo horas perdidas no trânsito e o aumento dos preços dos produtos devido ao frete.

Um dos objetivos dos projetos de engenharia de tráfego, conforme apresentado em Roess, Prassas e McShane (2010), é buscar a economia. Identificar estes pontos de congestionamento permite aos engenheiros de tráfego propor melhorias, buscando reduzir estes gastos.

Além do impacto econômico, ECLAC (2004) traz outro possível efeito acarretados dos congestionamentos, o aumento do número de acidentes. O estudo apresentado em Li et al. (2020) aponta que após congestionamentos, os motoristas tendem a apresentar um comportamento mais agressivo, se preocupando mais com o espaço imediatamente a sua frente, diminuindo a atenção para o quadro geral da rodovia. A identificação destes pontos de congestionamento permite a engenharia de tráfego um melhor dimensionamento das rodovias, buscando atender um de seus principais objetivos, de acordo com Roess, Prassas e McShane (2010), a segurança.

Outra alteração no comportamento dos motoristas frente aos congestionamentos é a tendência de utilizarem rotas alternativas. Ao trafegar em horários que tipicamente apresentam congestionamento, os motoristas podem procurar outros caminhos buscando obter o menor tempo de viagem. Com isso, vias locais de menores capacidade recebem uma demanda que, originalmente, não foi projetada para elas, congestionando-as. Assim, uma única via congestionada em uma malha viária pode propagar este cenário para outras vias. Este cenário é comumente observado nas horas de pico.

Em nível de análise operacional, o método apresentado no *Highway Capacity Manual* permite a obtenção de valores como capacidade e nível de serviço das rodovias. Conforme apresentado em TRB (2016), este método utiliza dados de demanda nos cálculos para a análise do serviço da rodovia. Para a obtenção da demanda é possível utilizar dados de volume obtidos através de postos de contagem, uma vez que a disponibilidade destes dados é maior do que outras alternativas de obtenção de demanda, como a alocação de tráfego a partir de matriz de origem/destino.

Entretanto, as premissas para a utilização dos volumes no HCM para rodovias de fluxo ininterrupto são válidas, apenas, em cenários não congestionados (TRB, 2016). Isto é devido ao fato de que o congestionamento nas rodovias, deste tipo de fluxo, ocorre quando a demanda excede a sua capacidade da via. Portanto, como o maior volume capaz de ser observado em uma rodovia é a sua capacidade, em trechos congestionados não é possível adotar os volumes registrados em postos de monitoramento como a demanda solicitante da via.

Desta maneira, é necessário verificar primeiro a existência de situações congestionadas com dados de volume e velocidade obtidos em campo, para avaliar a possibilidade de utilização do HCM.

2.2 Características básicas do fluxo de tráfego e métodos de aquisição de dados

De acordo com Treiber e Kesting (2012), os estudos sobre a teoria do fluxo de tráfego iniciaram nos anos de 1930, pelo americano Bruce D. Greenshields. Ele foi pioneiro e desenvolveu relações entre a velocidade e a densidade de veículos em um segmento de via. Esta seção aborda estes conceitos básicos da engenharia de tráfego, a relação entre eles e seus possíveis métodos de obtenção.

2.2.1 Volume e fluxo

Os dados de volume de uma rodovia, para Roess, Prassas e McShane (2010), são o ponto inicial para qualquer estudo da engenharia de tráfego, de maneira que permite ao profissional adquirir um conhecimento sobre as condições da via a ser estudada. Através destes dados, é possível obter conhecimento para projetos de infraestrutura rodoviária, classificação das rodovias, determinação do nível de serviço e de capacidade, bem como identificar a presença de congestionamento.

O fluxo de tráfego pode ser definido como a taxa de veículos que trafegaram por uma seção transversal de determinada rodovia, por um período de tempo (ELEFTERIADOU, 2014). Esta é uma definição teórica, aonde nem a seção transversal, nem o período de observação são determinados. Em projetos de engenharia de tráfego, trata-se de volume de tráfego. O volume deriva do conceito de fluxo (ELEFTERIADOU, 2014).

Conforme consta em (DNIT/IPR, 2006), o volume é a quantidade de veículos N que atravessa um local em um tempo t pré-definido.

Em projetos de engenharia de tráfego, o número de veículos observados em uma rodovia sempre está associado a um intervalo de tempo determinado. Este valor, na prática, é, também, chamado de volume de tráfego. Desta maneira, a definição teórica de fluxo se confunde com a definição prática de volume.

Para análise dos fluxos de tráfego é necessário determinar uma agregação temporal. ITE (2016) destaca as agregações diárias e horárias como as principais escolhas, entretanto qualquer agregação pode ser utilizada a fim de melhor adequação ao escopo do projeto.

Como consta em DNIT/IPR (2006), o volume médio diário (VMD) representa o volume médio de veículos que percorre um segmento de via em 24 horas. Esse volume, que melhor representa a utilização ou serviço prestado pela via, conforme consta em DNIT/IPR (2006) é usado para indicar a análises como a necessidade de melhorias ou, até mesmo, de novas vias, estimar benefícios esperados de uma obra viária, determinar prioridades de investimentos e calcular taxa de acidentes.

DNIT/IPR (2006) traz os seguintes conceitos de VMD, em sua unidade usual, veículos/dia (vpd):

Os volumes diários representam uma média do volume de veículos observados no período de um dia (24 horas), contabilizados como "Volume Médio Diário"(VMD). (DNIT/IPR, 2006) categoriza-os da seguinte maneira, com a unidade utilizada de veículos/dia (vpd):

- volume Médio Diário Anual (VMDa): Média dos volumes coletados em 24h, de todos os dias do ano (365 dias);
- volume Médio Diário Mensal (VMDm): Média dos volumes coletados em 24h, de todos os dias do respectivo mês;
- volume Médio Diário Semanal (VMDs): Média dos volumes coletados em 24h, de uma semana. É sempre acompanhado do mês de coleta, pois é utilizado como uma amostra do VMDm;

- volume Médio Diário em um Dia de Semana (VMDd): Volume médio em qualquer dia da semana. Sua representação é acompanhada do dia da semana e do mês de coleta.

O VMDa é o mais importante em estudos de tráfego de acordo com DNIT/IPR (2006). Os demais servem apenas de apoio como amostra para a determinação do VMD em situações em que ele não é coletado diretamente.

O volume horário (VH), como apresentado em DNIT/IPR (2006), é utilizado para analisar as variações de tráfego durante o dia. Utilizando a hora como unidade de tempo, chega-se no conceito para VH: volume total de veículos trafegando por uma seção em uma hora. Apesar de fornecer mais informações que o VMD para o desenvolvimento de projetos de rodovias, essa agregação pode não ser suficiente para determinadas atividades. Conforme apresentado em Garber e Hoel (2008), para a determinação do nível de serviço em uma rodovia, é necessário utilizar o maior fluxo em uma agregação temporal de 15 minutos. Além disso, esta agregação, como outras agregações inferiores a horária, permite a identificação de congestionamento através do método de Greenshields.

Projetar uma rodovia em condições ideais, para Brasil (1999), consiste em planejá-la com características buscando atender a máxima demanda horária prevista. Assim, em tal situação, não haveria congestionamentos. Entretanto, atender os requisitos técnicos necessários para isto tornaria o empreendimento antieconômico, pois haveria um superdimensionamento para as demais horas do ano.

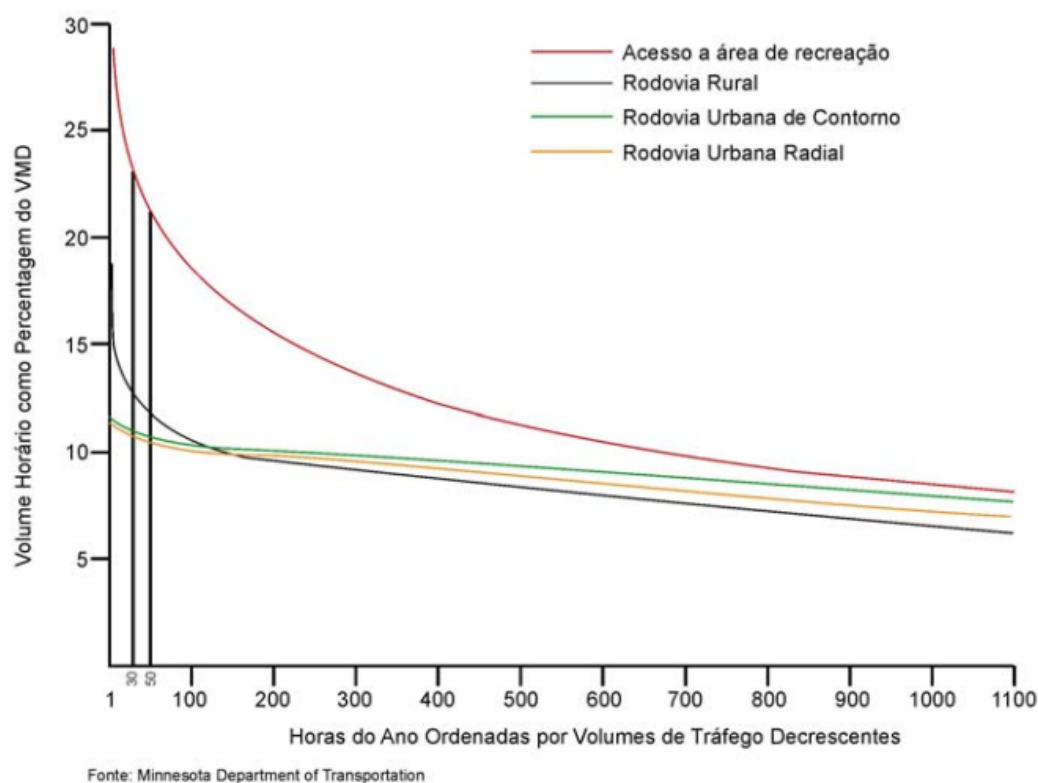
Assim, DNIT/IPR (2006) e Brasil (1999) apresentam o volume horário de projeto (VHP) como o volume adotado no dimensionamento dos detalhes geométricos das vias e interseções, determinação dos níveis de serviço, planejamento da operação da via, sinalização e regulamentação do trânsito.

Quando os postos de contagem registrarem contagens horárias contínuas, no período de um ano completo, pode-se determinar o VHP através da "curva da enésima hora" (DNIT/IPR, 2005). Esta curva consiste na ordenação decrescente da porcentagem de todos os volumes horários anuais, em relação ao volume médio diário.

A *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AAHSTO), entidade responsável pelos departamentos de transportes e infraestrutura viária dos 50 estados dos Estados Unidos da América, utiliza o valor da 30ª hora para determinação do VHP. Isto é, o trigésimo maior percentual dos volumes horários em relação ao VMDa. Este valor, conforme consta em DNIT/IPR (2005) e DNIT/IPR (2006), é denominado de VH30. No Brasil, estudos realizados em Brasil (1999) mostram a utilização do valor da 50ª hora em projetos nacionais de rodovias rurais (VH50). A Figura 5 ilustra a curva dos volumes percentuais em relação ao VMD, bem como destaca o posicionamento de VH30 e VH50. Do conceito de VHP, percebe-se que as rodovias são projetadas para que ocorram congestionamentos em vias rurais.

Tratando-se em nível de projeto, DNIT/IPR (2006) apresenta duas unidades para os veículos. Quando o volume utilizado for representado pela soma dos veículos, ignorando-se a classificação

Figura 5: Relação entre a hora e o volume horário de tráfego em rodovias norte-americanas. Fonte: DNIT/IPR (2006)



obtida em campo, ele será expresso em "Unidades de Tráfego Misto" (UTM). Em contrapartida, caso os veículos que compõem a somatória do volume forem, antes de somados, convertidos para unidades equivalentes em carro de passeio, utilizando de fatores de equivalência pré-estabelecidos, serão expressos em "Unidades de Carro de Passeio" (UCP).

O maior volume que a rodovia é capaz de absorver é a capacidade. TRB (2016) a define como o maior fluxo sustentável de veículos em uma rodovia, durante determinado período de tempo em que as condições de tráfego, controle e de ambiente sejam preservadas. É o maior fluxo onde não há congestionamento no local. Os valores de capacidades são calculados através do método proposto no HCM (TRB, 2016).

2.2.2 Velocidade

Conforme colocado em DNIT/IPR (2006) e Roess, Prassas e McShane (2010), a velocidade é descrita como a razão entre distância pelo tempo. Conforme apresentado em Leong (1968) e Gerlough e Huber (1975), os valores de velocidade em uma rodovia tendem a seguirem uma distribuição normal de frequência. Apesar da capacidade ser um fator limitante do volume, ao se atingir um fluxo próximo ao limite, é comum a ocorrência de congestionamento. Em situações

congestionadas, os veículos acabam operando em velocidades reduzidas. A formulação matemática da velocidade pode ser visualizada na Equação 1.

$$v = \frac{d}{t} \quad (1)$$

Onde:

v = velocidade, em m/s ou km/h;

d = distância, em m ou km;

t = tempo, em s ou h.

As velocidades obtidas em postos de monitoramento de tráfego, utilizadas atividades como elaboração de projetos e identificação de congestionamentos são velocidades pontuais. Além desta, DNIT/IPR (2006) apresenta outras especializações de velocidade utilizadas no ramo da engenharia de tráfego, e, Roess, Prassas e McShane (2010), complementam-nas.

- Velocidade instantânea: É a velocidade imediata do veículo em um ponto cuja distância tende a zero;
- Velocidade pontual: É a velocidade na qual o veículo passa por um ponto ou por um segmento de via;
- Velocidade média no tempo: É a média das velocidades pontuais dos veículos que passam por um ponto ou seção de via, durante intervalos de tempos finitos, conforme descrita na Equação 2.

$$VMT = \frac{\sum_{i=1}^n V_p}{n} \quad (2)$$

Onde:

V_p = velocidade Pontual;

n = número de veículos.

- Velocidade média no espaço: É a velocidade média em um trecho da via, determinado pela razão entre o comprimento (d) do trecho e o tempo total de observação (incluindo possíveis tempos parados), multiplicado pelo número (n) de veículos observados, ilustrado na Equação 3.

$$VME = \frac{d \cdot n}{\sum_{i=1}^n t}, \quad (3)$$

- Velocidade média de percurso: É a velocidade média no espaço, contabilizando apenas o tempo dos veículos em movimento.
- Velocidade percentual N%: é a velocidade na qual N% dos veículos observados estão trafegando, ou estão abaixo dela. A nível de projeto, utiliza-se normalmente a faixa de 85%.
- Velocidade de fluxo livre: É a média das velocidades que os motoristas utilizam quando há um baixo fluxo, sem restrições por regulamentação ou por outros veículos. É a velocidade na qual o motorista deseja dirigir.
- Velocidade "ótima": É a maior velocidade na qual os veículos conseguem trafegar em volumes iguais a capacidade da via.
- Velocidade de operação: É a maior velocidade na qual os veículos podem atingir em situações normais de tráfego, incluindo presença de outros veículos e regulamentações.
- Velocidade de projeto: É o valor de velocidade utilizado para o dimensionamento das rodovias. É um valor teórico, e costuma refletir na maior velocidade possível de dirigir com segurança no trecho, em virtude das características geométricas.

2.2.3 Densidade

DNIT/IPR (2006) e TRB (2016) definem densidade como o número de veículos por unidade de comprimento da via. Ela é característica do tráfego mais difícil de ser medida em campo, conforme consta em ITE (2016).

Roess, Prassas e McShane (2010) aponta que a densidade é, apesar da dificuldade de obtenção, o parâmetro mais importante na análise de tráfego, por conta do seu relacionamento direto com a demanda de tráfego.

Interligado ao estudo da densidade, DNIT/IPR (2006) e Roess, Prassas e McShane (2010) trazem o estudo de *headway*, espaçamento e ocupação. Embora o volume seja a característica mais clara para identificar congestionamentos, conforme consta em DNIT/IPR (2006), o *headway* e o espaçamento afetam no comportamento do motorista do veículo individualmente, pois indicam a liberdade de movimento e segurança relativa, influenciando a escolha das velocidades e distâncias entre veículos. Conforme apontado na Seção 2.1.1, a escolha de velocidades na via por fatores humanos está diretamente ligada com a produção de congestionamentos e ondas de choque.

Além disso, o *headway* e o espaçamento auxiliam na utilização do modelo de Greenshields para análise operacional da rodovia. As Equações 4 e 5 permitem calcular os valores de densidade e fluxo para as vias, permitindo a análise através do modelo de Greenshields. Do gráfico de fluxo por densidade, elaborado neste modelo, é possível identificar a presença de congestionamentos.

O espaçamento, para Garber e Hoel (2008), é a distância entre veículos sucessivos na rodovia, medido a partir de um ponto de referência em comum, como entre eixos dianteiros, ou entre para-

choques. Roess, Prassas e McShane (2010) também definem uma relação entre a densidade da via e o espaçamento médio na via, que pode ser visualizada na Equação 4.

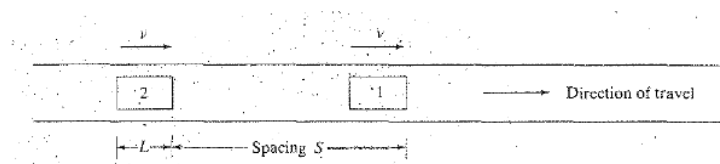
$$D = \frac{5.280}{d_a} \quad (4)$$

Onde:

D = densidade da via, em veículos/min/faixa;

da = espaçamento médio dos veículos na faixa, em metros.

Figura 6: Ilustração do conceito de espaçamento. Fonte: (PAPACOSTAS, 1987)



Ainda de acordo com os autores, o *headway* é a análise temporal do espaçamento. O procedimento de análise é exatamente igual, apenas que a medida é relacionada com o tempo que separa os veículos, a partir de referenciais em comum. A Equação 5 relaciona o *headway* com o fluxo na via.

$$F = \frac{5.280}{h_a} \quad (5)$$

Onde:

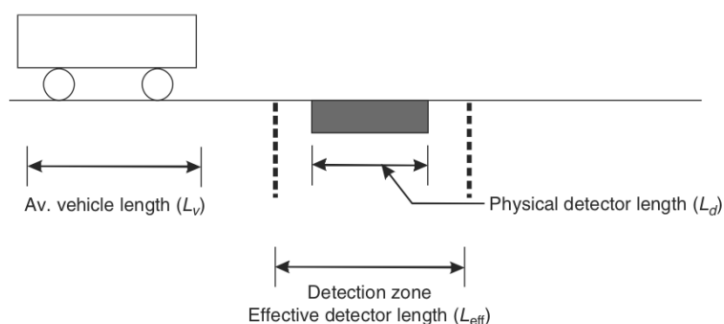
F = fluxo da via, em veículos/h/faixa;

da = tempo médio de espaçamento dos veículos na faixa, em segundos.

Por fim, a ocupação é um fator percentual que indica a proporção de tempo no qual um detector de contagem esteve "ocupado" (ROESS; PRASSAS; MCSHANE, 2010). Com a afirmação de que a densidade é a característica de tráfego mais difícil de se medir em campo, apresentada em ITE (2016), o fator de ocupação surge como uma alternativa para a obtenção de seus valores, através da Equação 6.

A Figura 7 ilustra as variáveis utilizadas na Equação 6 para a determinação da densidade através do fator de ocupação "O".

Figura 7: Ilustração do posicionamento do detector. Fonte: (ROESS; PRASSAS; MCSHANE, 2010)



$$D = \frac{10 \cdot O}{L_v + L_d} \quad (6)$$

Onde:

D = densidade do tráfego (veh/ft/faixa);

O = taxa de ocupação (%);

L_v = comprimento do veículo (m);

L_d = comprimento do detector (m).

Na Equação 6, os comprimentos do veículo e do detector são somados, visto que o detector é acionado no primeiro contato na ponta frontal do veículo, e apenas "liberado" quando a traseira do carro atravessar completamente o detector.

2.2.4 Relações entre fluxo, velocidade e densidade

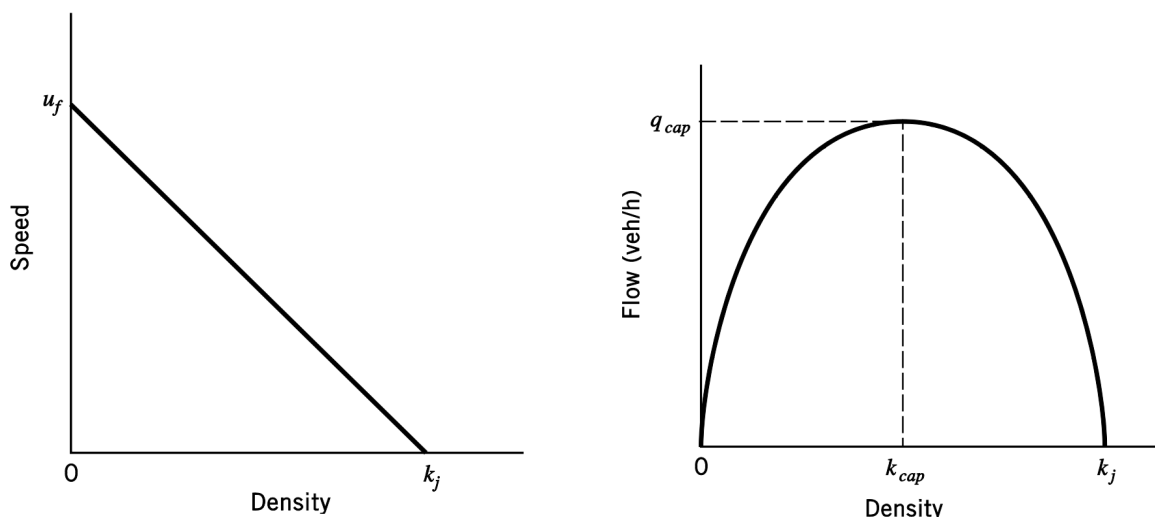
Embora fluxo, densidade e velocidade sejam características que podem ser medidas independentemente, elas estão relacionadas umas as outras. As relações matemáticas que estabelecem esse relacionamento são chamadas de modelos teóricos de fluxo de tráfego (ITE, 2016).

O primeiro modelo para o fluxo ininterrupto foi publicado em 1935 por Bruce Greenshields. Este modelo é o mais utilizado para análise destas relações e é conhecido como Modelo de Greenshields, conforme apontado em TRB (2016).

A chave para este modelo, de acordo com ITE (2016), é assumir uma relação linear entre velocidade e densidade, descrita pela Equação 7 e ilustrada conforme a Figura 8(a). Além desta, outra premissa adotada é o comportamento parabólico nas relações entre fluxo-densidade e velocidade-fluxo, conforme mostram as Figuras 8(b) e 8(c). O ponto de intersecção da reta com o eixo da densidade, identificado como k_j , equivale ao maior densidade que a rodovia suporta, chamado de densidade de congestionamento em Mannering e Washburn (2012). Já o local onde a reta encontra

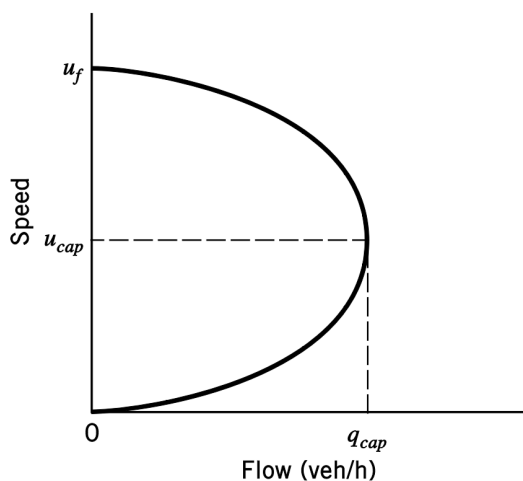
o eixo da velocidade, o ponto identificado como u_f equivale a velocidade de fluxo livre. Esta especialização de velocidade, conforme apresentado na Seção 2.2.2, representa a velocidade na qual o motorista atinge no menor cenário de fluxo, limitado somente pelas características geométricas da via.

Figura 8: Relacionamento entre as três características do tráfego. Fonte: (MANNERING; WASHBURN, 2012)



(a) Ilustração da relação linear entre densidade e velocidade

(b) Ilustração da relação parabólica entre fluxo e densidade



(c) Ilustração da relação parabólica entre fluxo e velocidade

A vantagem de se utilizar essa premissa de linearidade no relacionamento velocidade-densidade, de acordo com Mannering e Washburn (2012) é que ela fornece um entendimento básico sobre os relacionamentos entre as três características, sem entrar na complexidade que uma análise não-linear traria. As equações que descrevem estas as relações do modelo de Greenshields podem ser

observados na Tabela 3.

$$F = V \cdot D \quad (7)$$

Onde:

F = fluxo;

V = velocidade;

D = densidade.

Tabela 3: Equações do modelo de Greenshields. Fonte: (ITE, 2016)

Relação	Equação
Fundamental	$F = F \cdot D$
Velocidade e densidade	$V = V_f(1 - \frac{D}{D_j})$
Densidade e velocidade	$D = D_f(1 - \frac{D}{D_j})$
Fluxo e velocidade	$F = D_j(S - \frac{V^2}{V_f})$
Fluxo e densidade	$F = V_f(D - \frac{D^2}{D_j})$
Capacidade	$F_{capacidade} = \frac{V_f \cdot D_j}{4}$

Onde:

F = fluxo, em veículos/hora;

$F_{capacidade}$ = capacidade, em veículos/hora;

D = densidade, em veículos/km;

D_j = densidade do congestionamento, em veículos/km;

V = velocidade, em km/h; V_f = velocidade de fluxo livre, em km/h.

Nota-se nas Figura 9(b) que o fluxo máximo (q_{cap}) representa o maior fluxo que a rodovia é capaz de absorver. Este valor é chamado de capacidade. A região definida por seus limites k_{cap} e k_f é chamada de região saturada (MANNERING; WASHBURN, 2012).

Na Figura 9(c), o ponto de intersecção da parábola com o eixo da velocidade u_f apresenta o mesmo conceito que na Figura 9(b), a velocidade de fluxo livre. Entre a capacidade (q_{cap}) e a velocidade média no espaço u_{cap} , encontra-se a região saturada da relação.

Os dados de entrada para os gráficos gerados a partir das relações de Greenshields são dados de contagem de postos de monitoramento de tráfego, como velocidade e volume. Quanto menor a agregação temporal utilizada para os dados de volume (como 5 e 15 minutos), maior o número de pontos no gráfico e, conseqüentemente, maior a precisão de sua análise. Em situações práticas, caso algum ponto dos dados coletados na rodovia se enquadre da região saturada, de qualquer um dos três gráficos, podemos assumir que houve a presença de congestionamento no segmento, uma vez que há reduções drásticas no fluxo e na velocidade, juntamente com o aumento da densidade. Todas estas são características dos congestionamentos.

Além disso, outra característica comum de pontos na zona saturada dos gráficos de fluxo, velocidade e densidade, e que facilita sua identificação visual, é sua distribuição instável, não aderindo a premissa linear/parabólica, conforme ilustrado nas Figuras 9, 10, 11 e 12.

Figura 9: Relação instável no fluxo saturado entre fluxo e densidade para dados das cidades de Nairóbi (Quênia), Yokohama (Japão) e São Francisco (EUA). Fonte: (FRASCARIA; OLVER; VERHOEF, 2020)

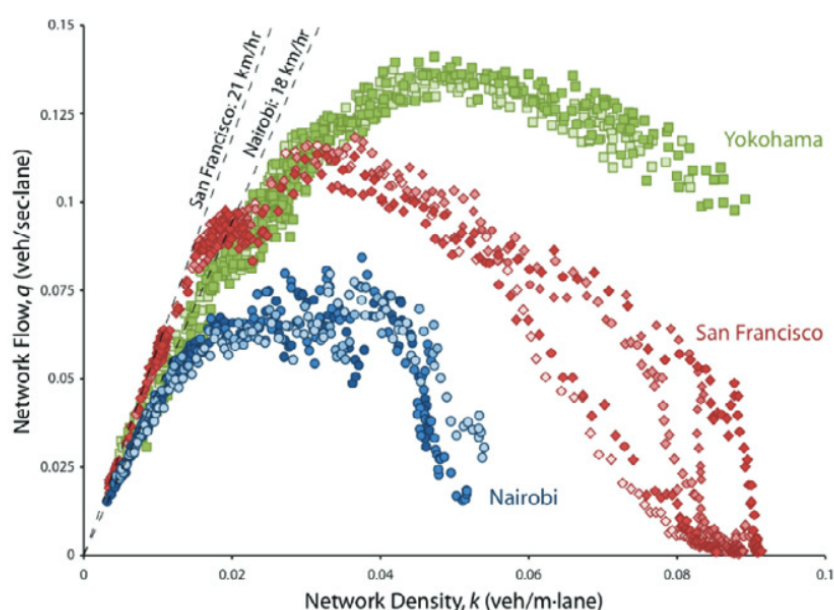


Figura 10: Relação instável no fluxo saturado entre velocidade e fluxo. Fonte: (ITE, 2016)

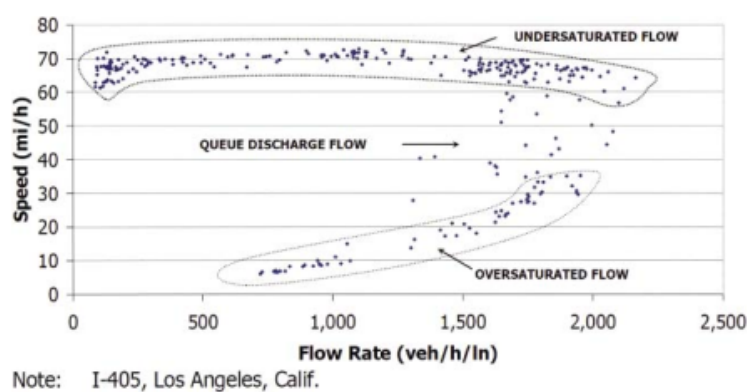


Figura 11: Relações entre as variáveis fundamentais de tráfego em um modelo de microsimulação
Fonte: (TREIBER; KESTING, 2012)

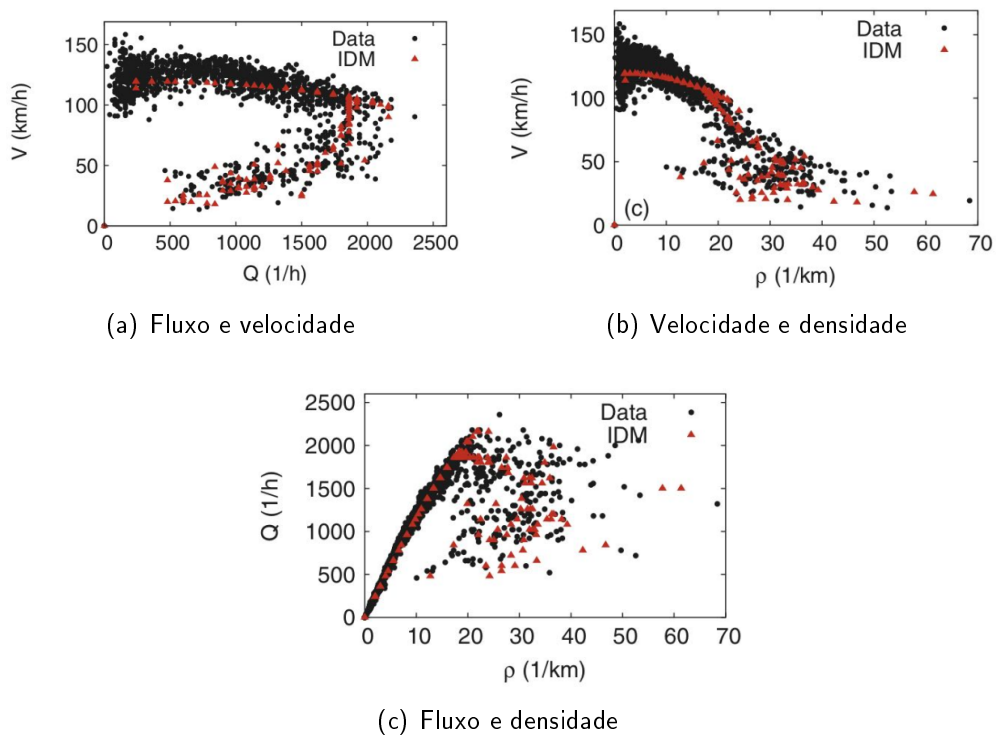
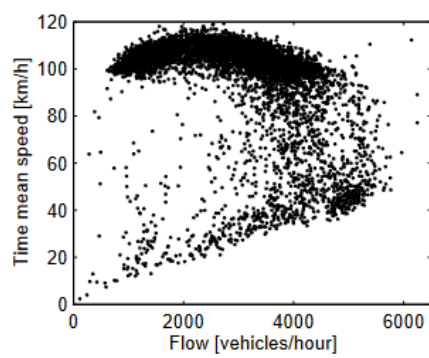
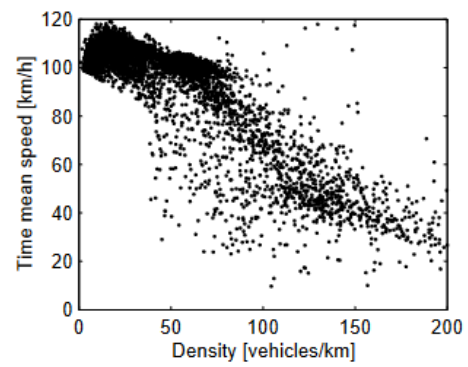


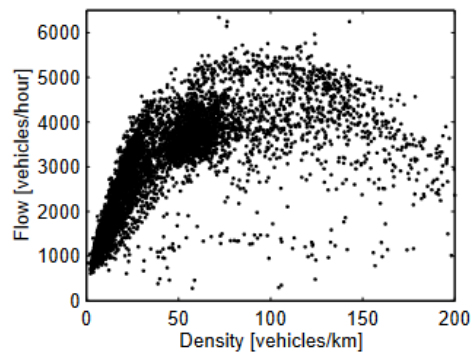
Figura 12: Ilustração das relações entre as características fundamentais de tráfego em Linkeroever, Bélgica. Fonte: (MAERIVOET; MOOR, 2005)



(a) Fluxo e velocidade



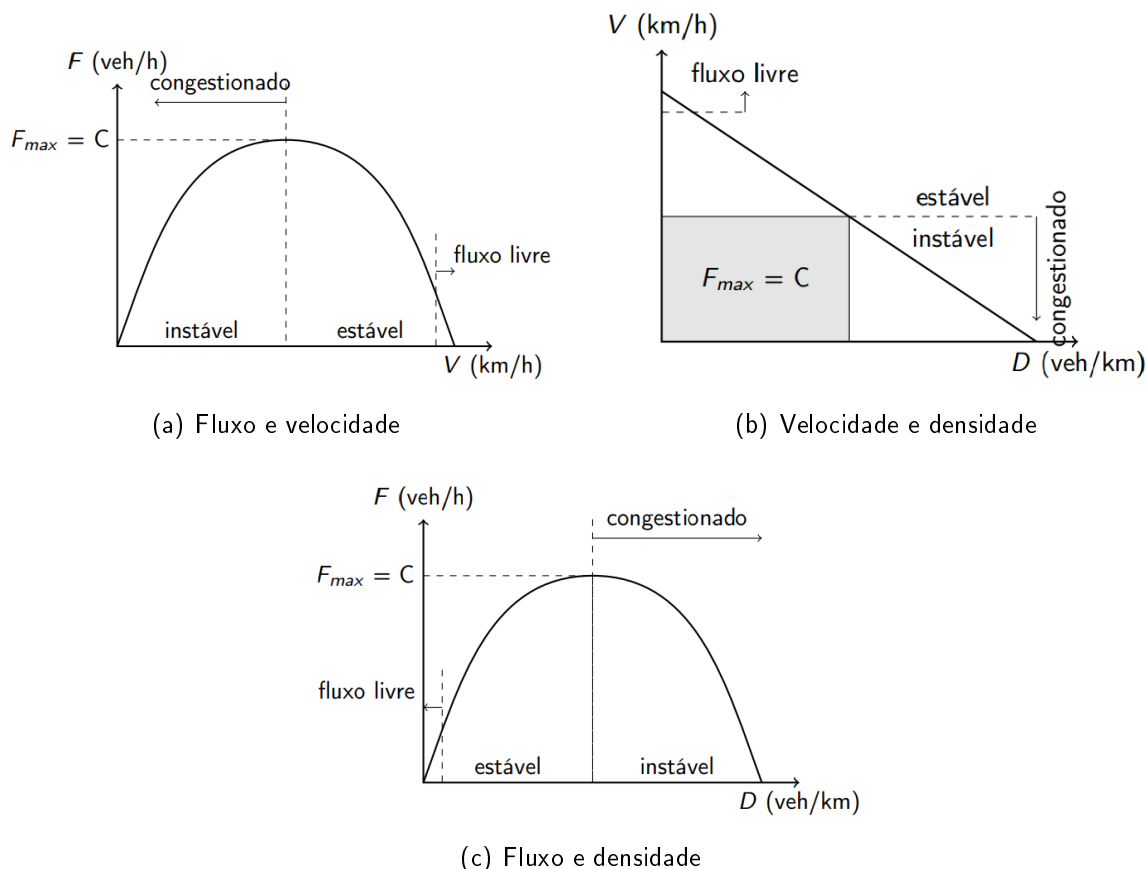
(b) Velocidade e densidade



(c) Fluxo e densidade

É possível definir e identificar zonas de tráfego saturado nas três relações entre as características do fluxo de tráfego, conforme ilustra a Figura 13.

Figura 13: Relações entre fluxo, velocidade e densidade, identificando zonas congestionadas. Fonte: (ITE, 2016)



2.2.5 Contagens de tráfego

O monitoramento de tráfego, segundo FHWA (2016), é realizado com o objetivo de coletar dados que descrevam o uso e a performance de uma malha rodoviária. Estes dados fornecem a fundação para todo planejamento, projeto geométrico e análise do sistema rodoviário. Se os dados não forem validados, todo o estudo pode ser falho. As atividades de contagens registram os volumes observados a via, em um determinado período de tempo. Em nível de projeto, os dados obtidos diretamente dos detectores são chamados de dados brutos. Estes dados devem ser processados e agrupados a uma determinada agregação temporal a depender do escopo da análise a ser realizada. Conforme apresentado na Seção 2.2.1, para o escopo da identificação de congestionamentos são utilizadas agregações temporais inferiores a horária, como a de 5 minutos e a de 15 minutos.

Existem dois modos nos quais as contagens de tráfego podem ser realizadas de acordo com FHWA (2016):

1. contagens manuais;
2. contagens automáticas.

As contagens realizadas por pessoas, utilizando fichas e/ou contadores manuais são as contagens manuais. Este tipo de contagem é utilizado para a classificação dos veículos, análise de movimento em interseções e contagens em rodovias com muitas faixas (DNIT/IPR, 2006).

Garber e Hoel (2008) listam algumas desvantagens do uso deste método.

- (a) Fisicamente exaustivo;
- (b) Pode ser caro;
- (c) Sujeito as limitações humanas;
- (d) Não pode ser utilizado por longos períodos.

De acordo com FHWA (2016), os métodos automáticos são as contagens nas quais a coleta de dados de tráfego é realizada com o auxílio de equipamentos automáticos que registram as informações continuamente. Em Garber e Hoel (2008) essa modalidade de coleta é dividida em duas categorias. Os que requerem a instalação de detectores (sob ou dentro do pavimento) e os que não necessitam de detectores.

Equipamentos apresentados em FHWA (2016) que são categorizados como a necessidade da instalação de detectores no pavimentos, de acordo com a classificação apresentada em Garber e Hoel (2008):

- laços indutivos;
- tubos pneumáticos;
- sensores piezoelétricos;
- sensores magnéticos.

As contagens automáticas sem detectores se dão por meio de abordagens menos invasivas ao pavimento, como:

- radar de micro-ondas (efeito doppler);
- radar em micro-ondas em frequência moderada;

Figura 14: Exemplo de detectores no pavimento com tubos pneumáticos. Fonte: (GARBER; HOEL, 2008)



- sensores infravermelhos;
- sensor ultrassônico/acústico;
- videomonitoramento.

O ponto da rodovia onde é instalado o detector, ou alocada a equipe de contagem manual, é chamado de posto de contagem (DNIT/IPR, 2006). Para cada escopo de projeto de engenharia de tráfego são necessárias diferentes quantidades e consecutividades de obtenção de dados.

Projetos de dimensionamento de rodovias utilizam o VHP, que necessita dos volumes horários em um período de um ano ininterrupto. Na análise operacional de rodovias, utiliza-se a detecção de congestionamento para avaliar necessidades de melhorias nas rodovias. Quanto maior a quantidade de dados disponíveis de maneira contínua, mais precisa será a análise de congestionamento.

A classificação dos postos de contagem, conforme consta em DNIT/IPR (2006) e Garber e Hoel (2008) é disposta a seguir.

- **Postos de contagem contínua ou permanente**

Locais com dispositivos de contagem permanentemente instalados. Com eles pode-se obter dados durante 24h por dia, em todos os dias do ano. Os espaçamentos temporais normalmente obtidos agrupam os veículos a cada hora e a cada 15 minutos. São utilizados para obter dados de distribuição temporal da rodovia, bem como observar as variações sazonais e identificar épocas de maior volume. A tecnologia mais utilizada de captação são os indutores em "loop", mas outros tipos de unidades captoras como magnéticas, sonoras e radares também são utilizadas.

- **Postos sazonais ou de controle**

São postos instalados em locais com as mesmas características dos postos permanentes, entretanto sua contagem é sazonal. São utilizados para determinar a variação dos volumes durante o ano e calcular o fator de expansão. Dividem-se em dois tipos:

- postos principais: A contagem é realizada durante uma semana ininterrupta a cada mês, ou durante cinco dias (três dias de semana, sábado e domingo) consecutivos.

- postos secundários: Contagens espaçadas a cada dois ou três meses, com o intervalo de contagem variando de dois a cinco dias consecutivos da semana.

- **Postos de cobertura**

Estes postos têm como função completar o monitoramento dos postos acima apresentados. As contagens são realizadas durante 48h, uma vez ao ano para DNIT/IPR (2006), entretanto não é necessário realizar a contagem todos os anos. Já em Garber e Hoel (2008), estipula-se um levantamento volumétrico a cada quatro anos.

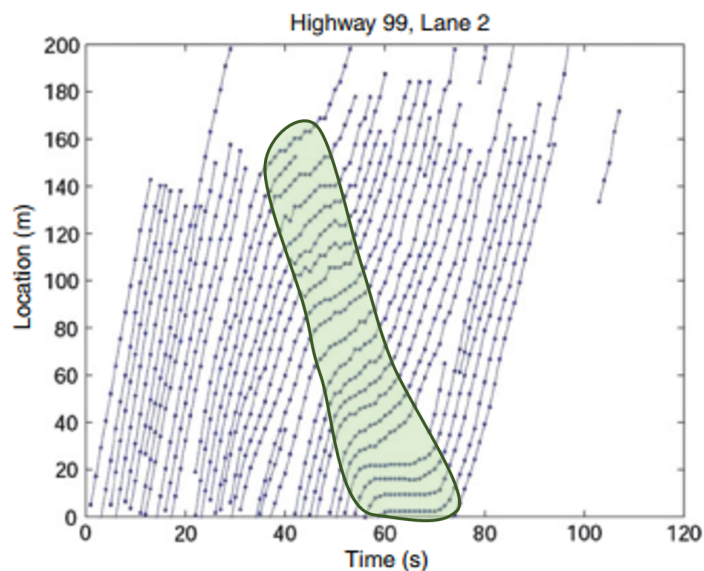
2.2.6 Diagrama espaço-tempo

Treiber e Kesting (2012) apresentam outro método que permite a identificação da presença de congestionamentos em uma rodovia: a interpretação de diagramas espaço-tempo. Para Hoel, Garber e Sadek (2011) os diagramas de espaço-tempo são uma ferramenta de análise de tráfego que rastreia a posição do veículo ao longo do tempo em uma via unidimensional. Podem ser utilizados para rastrear a posição do veículo em uma via expressa, possíveis mudanças de faixas e identificar a ocorrência de congestionamentos.

A Figura 15 ilustra um destes diagramas. Cada linha representada equivale ao deslocamento de um veículo. Essas curvas mostram as variações da velocidade ao longo do percurso destes veículos. Assim, quanto mais a tangente se aproximar do plano horizontal, menor é a velocidade neste instante. O fenômeno da redução de velocidade nestes gráficos está relacionada a ocorrência de ondas de choque e congestionamento (TRB, 2016). ITE (2016) descreve as ondas de choque como um fenômeno que ocorre nas transições entre os estados de tráfego saturado e não saturado. O estado saturado, em rodovias de fluxo ininterrupto, conforme consta em ITE (2016), é quando a demanda excede a capacidade. Percebe-se, portanto, a ligação entre os conceitos de onda de choque e congestionamento.

A Figura 15 destaca, em verde, a ocorrência de ondas de choque. O fenômeno inicia próximo a marca de 35 segundos, com uma leve mudança de inclinação da curva de deslocamento do veículo, aproximando-se do eixo horizontal. Esta mudança é observada até, aproximadamente, 70 segundos. Entre 45 e 70 segundos a curva de deslocamento encontra-se tangente ao plano horizontal, indicando que não houve deslocamento neste período de tempo, caracterizando um possível congestionamento.

Figura 15: Exemplo de diagrama espaço-tempo na *California State Route 99* destacando, em verde, a região de possível congestionamento. Fonte: Adaptado de (TREIBER; KESTING, 2012)



2.3 Calibração e validação

De acordo com Ortuzar e Willumsen (2011), os conceitos gêmeos de calibração e estimação de modelos possuem significados diferentes no ramo de transportes. De acordo com os autores, calibrar um modelo significa escolher os seus parâmetros, assumindo que estes possuam valores não nulos, a fim de otimizar uma ou mais medidas de qualidade do modelo em questão.

Em contrapartida, a estimação envolve encontrar os valores dos parâmetros que tornam os dados observados mais prováveis a se encaixarem sob a especificação do modelo. Neste caso, um ou mais parâmetros podem ser julgados não significados e excluídos do modelo. A estimação também considera a possibilidade de examinar empiricamente certas especificações. Esse procedimento tende a ser associado com engenheiros e econométristas responsáveis por modelos desagregados, que deram muita importância às possibilidades de testes estatísticos oferecidos por seus métodos.

O processo de validação, ainda para os autores, como a maioria dos modelos de transporte foi construído com base em dados de corte transversal, há uma tendência de interpretar a validação do modelo exclusivamente em termos da qualidade de ajuste alcançada entre o comportamento observado e previsões para os dados. Embora necessário, isso não é uma condição suficiente para validar o modelo. Ortuzar e Willumsen (2011) afirmam que o processo de validação deve ser realizado com um conjunto de dados que não tenha sido utilizado no processo de calibração.

2.4 Conceitos estatísticos

O método de análise proposto neste trabalho utiliza de conceitos e análises estatísticas para a identificação de congestionamentos. Nesta seção serão abordados os principais conceitos utilizados no procedimento.

2.4.1 Medidas de tendência central

Conforme consta em Oliveira (2017), medidas de tendência central são os valores que em estatística caracterizam os valores médios de um conjunto. Entre as principais medidas de tendência central, também chamadas de medidas de posição por Neto (2002), destacam-se:

- (a) média aritmética;
- (b) moda;
- (c) mediana.

A média aritmética é o protótipo das medidas de tendência central. Oliveira (2017) define-a como o quociente entre a soma de todos os valores da variável e o número de elementos desta. A média também representa a abcissa do centro de gravidade da distribuição de frequência do sistema formado pela variável. Geralmente é um valor que não pertence ao conjunto original de dados e pode ser visualizada na Equação 8.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (8)$$

A moda é descrita por Neto (2002) como o valor de máxima frequência no conjunto. Oliveira (2017) classifica os conjuntos de dados de acordo com o número de modas que ele apresenta. As distribuições podem ser:

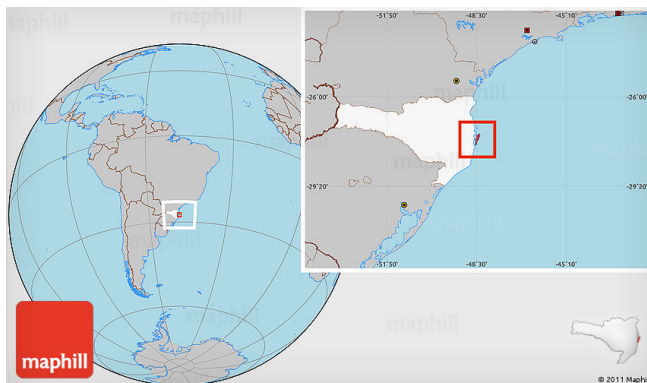
- amodais, quando não possuem moda;
- unimodais, quando apresentam apenas uma moda;
- bimodais, quando apresentam duas modas;
- multimodais, quando apresentam mais de duas modas.

Por fim, a mediana, para Neto (2002), um valor que visa dividir o conjunto ordenado de tamanho n em duas partes com igual número de elementos. Caso n seja ímpar, a mediana é o valor que ocupa a posição $(n + 1)/2$ com o conjunto ordenado. Porém, se n for par, o valor da mediana é simplificado com a média aritmética dos valores nas posições $n/2$ e $(n/2 + 1)$.

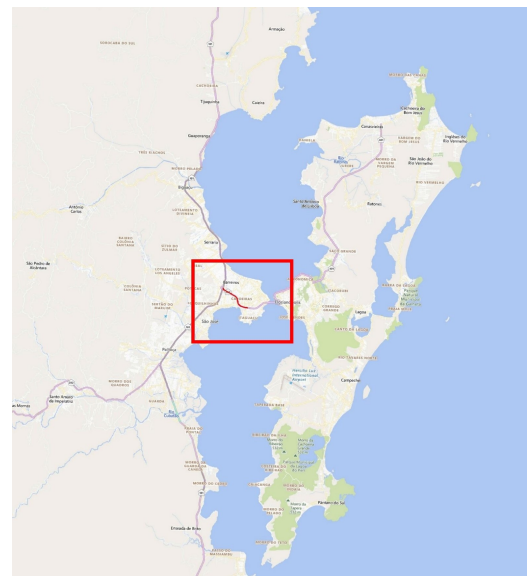
3 Área de estudo

A área de estudo utilizada neste trabalho é sintética, sua única aproximação com a realidade é a modelagem da infraestrutura de um trecho existente. A região na qual os dados estruturais foram mapeados compreende um segmento de trecho da BR-282, na cidade de Florianópolis-SC. O segmento inicia-se, aproximadamente, no km 2 da rodovia, e se estende até o elevado de intersecção com a BR-101 (km 5,5). O Sistema Nacional de Viação (SNV) do DNIT é constituído pela infraestrutura física e operacional dos vários modos de transporte de pessoas e bens, sob jurisdição federal, foi instituído pela Lei 12.379 de 6 de janeiro de 2011 (BRASIL, 2011). O SNV apresenta códigos para os trechos de suas rodovias. O código do trecho que engloba o segmento de estudo é 282BSC0010. Por se tratar de uma via expressa, o comportamento apresentado neste trecho é o de fluxo ininterrupto. A Figura 16 ilustra a localização e delimitação da área de estudo.

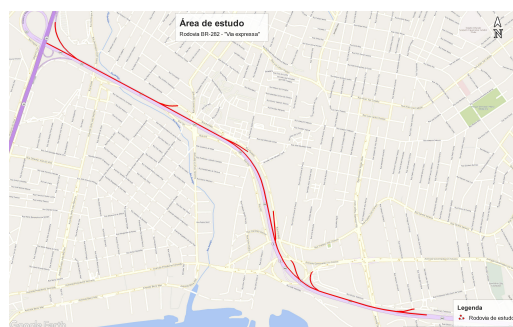
Figura 16: Localização da área de estudo



(a) Fonte: Maphill¹



(b) Fonte: Adaptado de Google Maps



(c) Fonte: Adaptado de Google Maps

Os dados de demanda utilizados neste trabalho foram gerados de forma sintética, por um procedimento efetuado pelo professor orientador deste trabalho. O procedimento foi baseado no uso do *software* para simulação microscópica de tráfego SUMO² e na linguagem de programação Python. Todos os parâmetros do simulador foram deixados nos seus valores *default*.

Para a modelagem da infraestrutura foram utilizados recursos de vetorização do *software* Quantum GIS sobre uma imagem de satélite do Google para a criação de uma camada de dados geográficos em formato *shapefile*. A partir desta camada de dados foi criado um modelo da infraestrutura no SUMO com o auxílio da sua ferramenta *netconvert*. Após isso foi necessário corrigir alguns detalhes relacionados com os movimentos entre seções utilizando a ferramenta *Netedit* do SUMO. A cada seção transversal de entrada e de saída da rede resultante foram atribuídos códigos, para a definição de origens e destinos.

A modelagem da demanda foi feita com o objetivo de criar um número de cenários diferentes, sendo a demanda randomicamente diferente em cada um. Cada cenário tem a abrangência temporal de um dia inteiro. O processo envolveu a determinação de um valor base para o volume total diário de demanda e a determinação de proporções base de demanda para cada par origem-destino da área de estudo. Assim, o valor da demanda para cada par origem-destino é determinado pela aplicação da sua proporção ao valor da demanda total diária. No processo foi incluída ainda uma curva básica de variação de volume ao longo do dia, sendo especificadas proporções para cada intervalo de 15 minutos. Além disso, foram determinadas proporções base entre as classes de veículos adotadas. Para a determinação da demanda em cada cenário, o volume total diário, as proporções de viagens entre os pares origem-destino, as proporções de distribuição da demanda ao longo do tempo e as proporções de distribuição dos veículos entre as classes receberam variações randômicas da ordem de no máximo 10%.

Os valores base das proporções de viagens entre os pares origem-destino foram determinados de forma arbitrária, mas procurando reproduzir o que ocorre na realidade da área de estudo, com base na percepção do professor orientador. Os valores base para a curva de variação nos intervalos de 15 minutos foram determinados nesta mesma forma, procurando reproduzir o comportamento da maior demanda trafegando no sentido centro-bairro no período da tarde. Da mesma forma foram determinadas as proporções base entre as classes de veículos.

O valor base para o volume total diário foi determinado por tentativas, com a sucessiva observação dos resultados, de forma que aproximadamente metade dos cenários apresentasse algum congestionamento e que a outra metade ficasse em regime estável de fluxo.

Detectores virtuais foram inseridos no modelo para coletar dados relacionados com a passagem dos veículos em três seções transversais da rodovia e também nas seções transversais de todas as

¹<<http://www.maphill.com/>>.

²<<https://www.eclipse.org/sumo/>>.

rampas de entrada e de saída existentes na área de estudo. Estes detectores, posicionados conforme a Figura 17, registraram para cada veículo, dados do momento da passagem (*timestamp*), do seu comprimento e da sua velocidade pontual. Dois tipos de detectores comerciais que se assemelham aos modelados, conforme apresentado na Seção 2.2.5 são os laços indutivos e sensores por micro-ondas. Estes dados foram posteriormente processados de forma a classificar os veículos conforme o seu comprimento e agregar em forma de volumes e velocidades médias no tempo com agregação temporal de 15 minutos, separadamente por faixas de tráfego. O resultado foi organizado em planilhas eletrônicas, uma para cada posto de monitoramento, com a estrutura como mostra a Tabela 4.

Os detectores virtuais são nomeados com a seguinte codificação: 'XXX-YY', onde 'XXX' indica o posicionamento dos detectores na rodovia, ou em rampas de acesso. Os valores 'YY' são referentes à numeração destes postos de acordo com seu posicionamento. O segundo posto posicionado nas rampas de acesso, então, é o RAM-02, enquanto o terceiro posto posicionado na rodovia, portanto, é o ROD-03.

A rodovia de estudo não é homogênea em relação ao número de faixas existentes no posicionamento dos detectores virtuais. Isto ocorre pois foram instalados detectores em rampas de acessos, que possuem um menor número de faixas em relação a via arterial em análise.

Por este método foram gerados dados para 40 dias, utilizando 10 detectores virtuais na via.

Um conjunto de dados no contexto deste trabalho é definido por todos os registros de contagens de tráfego referente a um posto de contagem (detector virtual), em um período de 24 horas, totalizando, então, 400 conjuntos de dados.

Figura 17: Posicionamento dos detectores virtuais na área de estudo

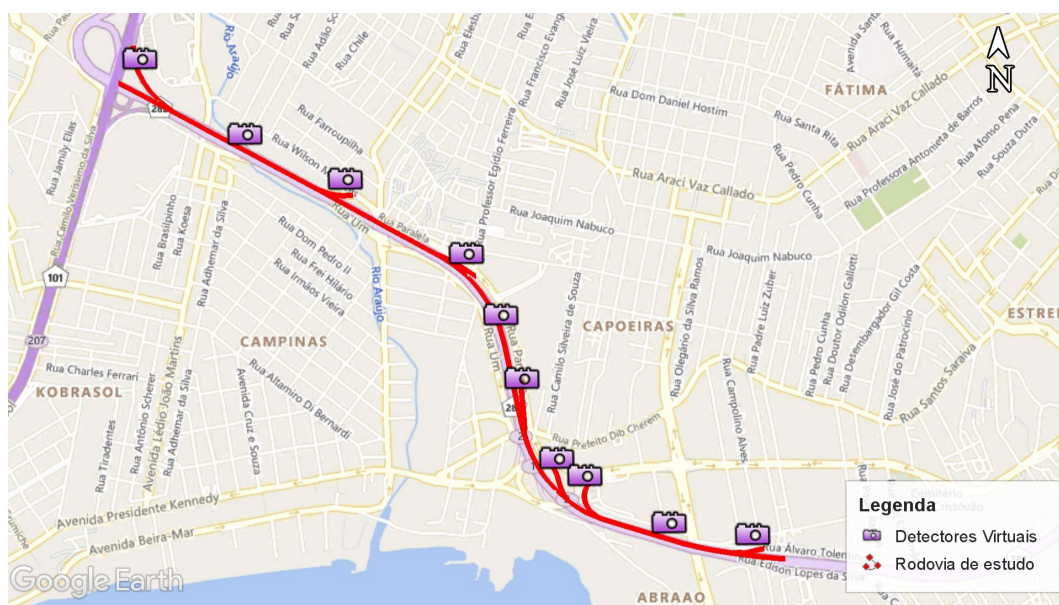
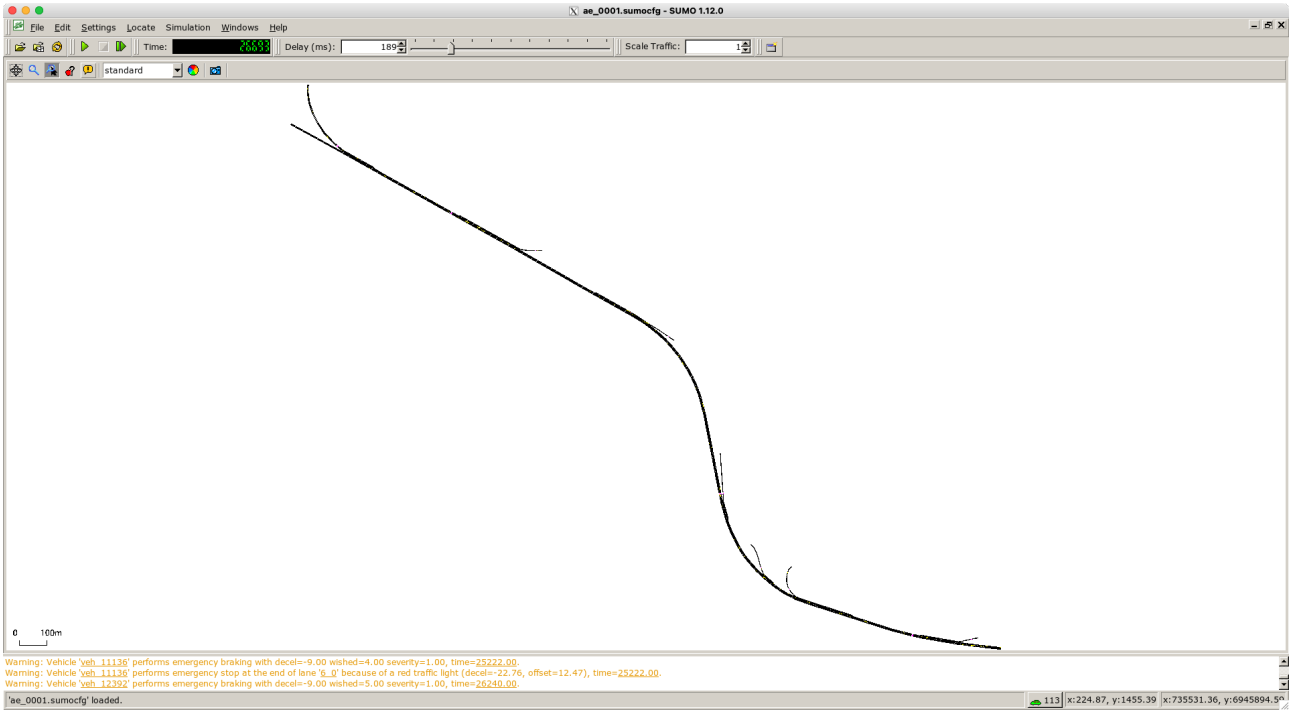


Tabela 4: Estrutura de dados de demanda: exemplo mostrando os dez primeiros registros para um posto de monitoramento com três faixas de tráfego

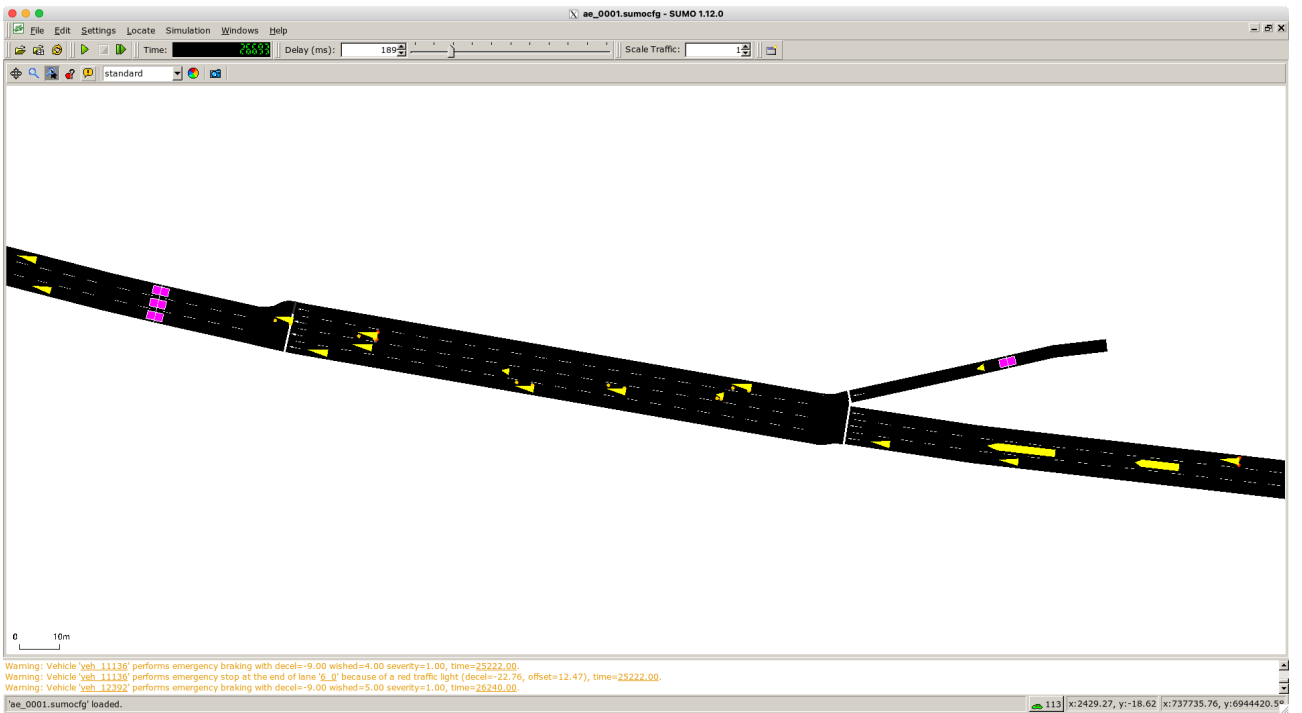
<i>Timestamp</i> do início do intervalo	Faixa	Moto	Carro	Caminhão leve	Caminhão pesado	Veículo especial	Velocidade média no tempo (km/h)
2021-08-18 00:00:00	0	14	42	12	7	0	92,97
2021-08-18 00:00:00	1	8	32	10	6	0	94,07
2021-08-18 00:00:00	2	7	12	0	0	0	98,64
2021-08-18 00:15:00	0	13	49	7	11	0	91,50
2021-08-18 00:15:00	1	13	31	8	6	0	93,33
2021-08-18 00:15:00	2	10	19	3	1	0	95,30
2021-08-18 00:30:00	0	18	48	9	10	0	92,54
2021-08-18 00:30:00	1	4	28	6	5	0	93,72
2021-08-18 00:30:00	2	2	19	0	2	0	97,70
2021-08-18 00:45:00	0	16	43	10	5	0	92,10

A Figura 18 exibe o modelo de simulação no *software* SUMO em execução, onde em amarelo estão representados os veículos de análise e, em magenta, os detectores virtuais.

Figura 18: Modelo de simulação microscópica em execução no SUMO



(a)

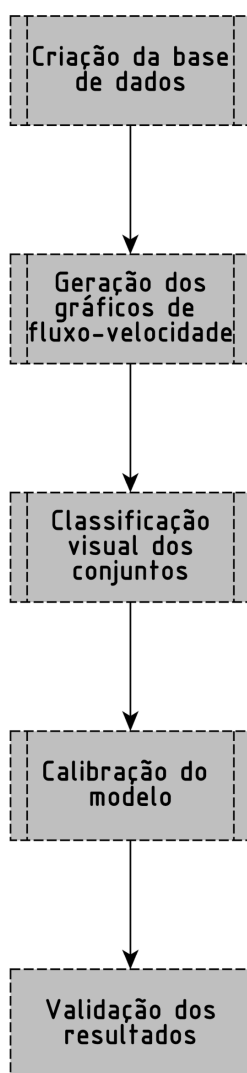


(b)

4 Desenvolvimento do sistema

O fluxograma exibido na Figura 19 ilustra o procedimento adotado para a elaboração deste trabalho, cujos símbolos utilizados para a descrição dos elementos seguem o padrão determinado pela ISO 5807:1985. Cada elemento deste fluxograma é detalhado na sequência deste capítulo, nas Seções 4.2 a 4.5. O estudo aborda a detecção de congestionamento de forma automatizada em rodovias, comparando-as com as classificações obtidas utilizando-se das relações fundamentais propostas no modelo de Greenshields.

Figura 19: Fluxograma geral do desenvolvimento do sistema



Conforme apresentado na Seção 3, os dados são registrados de maneira independente para cada faixa presente na rodovia, separados por intervalos de 15 minutos, com um total de 400 conjuntos.

4.1 Recursos de *software* utilizados

Os recursos de *software* utilizados neste trabalho estão dispostos a seguir.

1. PostgreSQL

O PostgreSQL³ é um sistema de base de dados de código aberto objeto-relacional que utiliza a linguagem *Structured Query Language* (SQL) para armazenar dados.

2. pgAdmin

O pgAdmin⁴ é uma ferramenta de gerenciamento de banco de dados do PostgreSQL. Ele permite a visualização das informações armazenadas em tabelas, bem como o envio de comandos em SQL.

3. Pandas

Pandas⁵ é uma ferramenta construída sobre a linguagem de programação Python com o objetivo de análise e processamento de dados de maneira rápida, fácil e flexível.

4. Matplotlib.pyplot

O matplotlib.pyplot⁶ é uma coleção de funções da biblioteca de *software* matplotlib para a linguagem de programação Python. Fornece um método de plotagem semelhante ao MATLAB, permitindo gerar gráficos e figuras customizáveis.

5. Tkinter

O pacote tkinter⁷ fornece construções de interfaces gráficas para o usuário em um ambiente em Python. Permite a criação e organização de formulários para entrada e validação de dados por parte do usuário.

6. NumPy

O NumPy⁸ é uma biblioteca de funções para a linguagem Python que fornece matrizes de objetos multidimensionais para o processamento de dados e rotinas para operações rápidas. Algumas das funções oferecidas pela biblioteca incluem operações matemáticas, lógicas, de manipulação da estrutura de dados e de ordenamento.

³<<https://www.postgresql.org/>> .

⁴<<https://www.pgadmin.org/>> .

⁵<<https://pandas.pydata.org/>> .

⁶<<https://matplotlib.org/stable/tutorials/introductory/pyplot.html>> .

⁷<<https://tkdocs.com/shipman/>> .

⁸<<https://numpy.org/doc/stable/>> .

7. Psycopg2

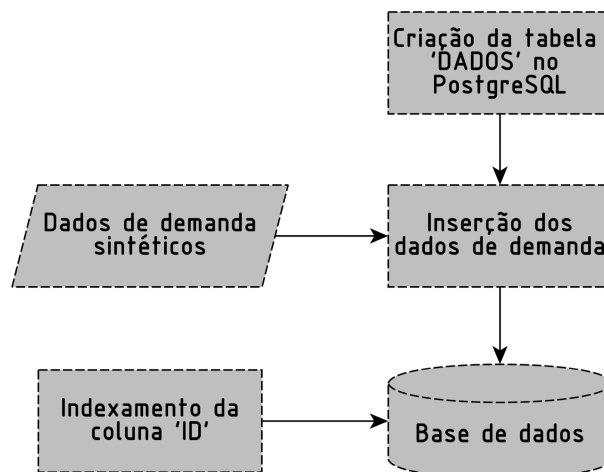
O `psycopg2`⁹ é uma biblioteca que fornece um objeto de conexão com bases de dados do PostgreSQL.

A automatização para os procedimentos deste trabalho é realizada por meio de *scripts* na linguagem de programação Python, com uma conexão com os bancos de dados PostgreSQL.

4.2 Criação da base de dados geral

Os dados utilizados estão armazenados em formato de planilha eletrônica conforme apresentado na Seção 3. Entretanto, para facilitar o manuseio, visualização e organização dos dados, é criada uma tabela no banco de dados PostgreSQL, para qual os dados são importados. A Figura 20 apresenta o fluxograma dos processos desta seção.

Figura 20: Fluxograma representativo da criação da base de dados geral



A criação da tabela e a inserção dos dados são realizados através de um *script* em Python, disponível no Apêndice A. Dois objetos de conexão entre o *script* em Python e a base de dados PostgreSQL são criados. Um com auxílio da biblioteca `psycopg2`, permite o envio de comandos SQL para o sistema de armazenamento. O outro objeto é criado através das funções fornecidas pela biblioteca `pandas`, cujo objetivo é a inserção dos dados na tabela do PostgreSQL. Os dados, inicialmente armazenados em planilhas eletrônicas, são lidos e, então, armazenados em listas dentro do *script* através da função `read_excel` do `Pandas`. Esta biblioteca importa os dados dos arquivos de planilha eletrônica e armazena-os na mesma estrutura de colunas utilizada no arquivo. Assim, neste ponto, a lista possui as mesmas 8 colunas apresentadas na Tabela 4 da Seção 3: *timestamp*, *faixa*, *moto*, *carro*, *caminhão leve*, *caminhão pesado*, *veículo especial* e *velocidade média no tempo*.

⁹<<https://pypi.org/project/psycopg2/>>.

Além das colunas de dados importadas, o *script* insere manualmente três colunas de identificação e uma para os resultados da etapa de classificação visual no banco de dados. As colunas 'posto' e 'dados' representam, respectivamente, o código do posto de contagem e a identificação numérica do conjunto de dados do registro. A coluna 'ID' foi elaborada utilizando-se da junção das duas colunas de identificação, com o seguinte formato: 'dados'-'posto'. A coluna 'classificação' permanece vazia (com valores nulos) até a etapa de classificação visual.

Após a adequação das colunas, os dados são inseridos na tabela através da função *to_sql* do pandas, fazendo uso do objeto de conexão da mesma biblioteca. A estrutura da final da tabela do PostgreSQL é exibida na Figura 21.

Figura 21: Visualização da estrutura da base de dados no pgAdmin, mostrando os primeiros 16 registros

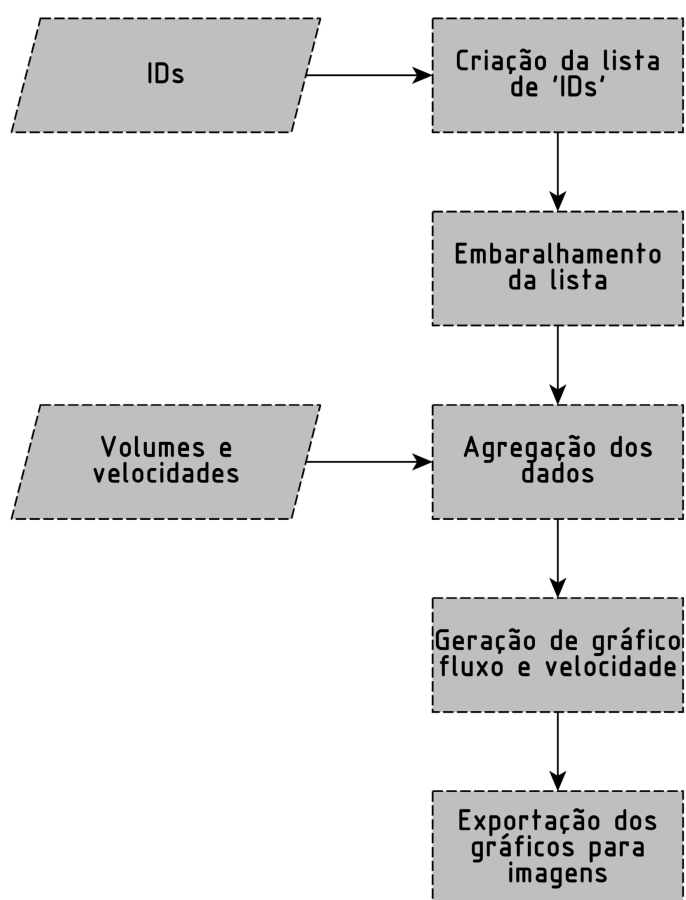
	ts_inicio timestamp without time zone	faixa bigint	moto bigint	carro bigint	cam_leve bigint	cam_pesado bigint	especial bigint	vel_media double precision	id text	posto text	dados text	classificacao integer
1	2021-08-18 21:15:00	0	18	53	8	0	0	56.15453164556964	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	[null]
2	2021-08-18 21:30:00	0	16	50	7	0	0	55.91391780821917	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	[null]
3	2021-08-18 21:45:00	0	14	42	7	0	0	55.80742857142859	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	[null]
4	2021-08-18 22:00:00	0	9	29	12	0	0	56.81664	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	[null]
5	2021-08-18 22:15:00	0	10	24	4	0	0	58.39768421052629	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	[null]
6	2021-08-18 22:30:00	0	12	24	5	0	0	57.54819512195122	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	[null]
7	2021-08-18 22:45:00	0	14	21	3	0	0	58.69042105263159	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	[null]
8	2021-08-18 23:00:00	0	1	26	2	0	0	59.34041379310344	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	[null]
9	2021-08-18 23:15:00	0	5	17	9	0	0	58.47561290322582	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	[null]
10	2021-08-18 23:30:00	0	5	22	1	0	0	58.79314285714285	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	[null]
11	2021-08-18 23:45:00	0	7	15	5	0	0	55.28400000000001	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	[null]
12	2021-08-18 00:00:00	0	4	18	5	3	0	59.61	dados_0008-RAM-06	RAM-06	dados_0008	[null]
13	2021-08-18 00:15:00	0	5	14	0	5	0	60.687	dados_0008-RAM-06	RAM-06	dados_0008	[null]
14	2021-08-18 00:30:00	0	6	18	7	4	0	57.44674285714287	dados_0008-RAM-06	RAM-06	dados_0008	[null]
15	2021-08-18 00:45:00	0	8	11	1	1	0	57.37885714285715	dados_0008-RAM-06	RAM-06	dados_0008	[null]
16	2021-08-18 01:00:00	0	2	20	3	3	0	59.50285714285715	dados_0008-RAM-06	RAM-06	dados_0008	[null]

Com os dados devidamente inseridos no banco de dados, escolhe-se a coluna 'ID' para o indexamento. Um índice em um banco de dados SQL é uma chave exclusiva para cada registro de dados. Através dele é fornecida uma maneira rápida e eficiente de se realizar buscas nos dados presentes, além de permitir conexões em base de dados relacionais. A coluna 'ID' serve para facilitar a localização dos dados de cada conjunto de maneira organizada e simples, por isso foi escolhida para o indexamento da base de dados utilizada, visto que seu valor serve como objeto de busca em todos os *scripts* deste trabalho.

4.3 Geração dos gráficos de fluxo-velocidade

A técnica utilizada para identificação da presença de congestionamento é o modelo de Greenshields. Como apresentado na Seção 2.2.4, este procedimento é realizado através da análise de gráficos entre fluxo, velocidade e densidade. Devido a disponibilidade dos dados fornecidos, o gráfico a ser avaliado é referente a relação entre fluxo e velocidade. O procedimento para a geração destes está ilustrado na Figura 22.

Figura 22: Fluxograma representativo do processo de geração dos gráficos fluxo-velocidade



Este procedimento é realizado através de um *script* em Python, disponível no Apêndice B. Com o objeto de conexão da biblioteca `psycopg2`, o *script* cria uma lista com todos os valores distintos da coluna 'ID' da base de dados. Os conjuntos de dados nesta lista estão ordenados de maneira sequencial para cada dia de contagem. Isto é, os primeiros 10 dados da lista são referentes aos 10 detectores para o primeiro dia, seguidos pelos dados do segundo dia gerado e assim sucessivamente. Esta lista é usada tanto no procedimento de geração dos gráficos, quanto para indicar a ordem de exibição dos gráficos no processo de classificação.

O procedimento de classificação visual do modelo de Greenshields é independente para cada detector. É possível que dois postos de contagem instalados na mesma rodovia apresentem classificações distintas ao se tratar da presença de congestionamento. Um congestionamento trava a locomoção dos veículos, e a tendência é o crescimento constante das filas. Entretanto, a frente do congestionamento o fluxo pode estar normalizado, visto que o congestionamento é propagado no sentido contrário do fluxo.

Como o processo de identificação de congestionamentos utilizando o modelo de Greenshields é feito de maneira visual, realiza-se um embaralhamento da lista que contém os 'IDs'. Esta randomização dos dados é feita para evitar possíveis vícios de identificação em situações de detectores consecutivos, com o primeiro apresentando uma situação clara de congestionamento, com o outro no limite entre os cenários congestionado e não congestionado.

O *script*, então, inicia um *loop* para percorrer todos os elementos da lista ('IDs'), individualmente. Com o 'ID' selecionado e com o auxílio da biblioteca *psycopg2*, o *script* busca na base de dados os valores de contagem relativos ao 'ID' em questão, para um registro, com a agregação temporal de 15 minutos.

Os dados de contagem fornecidos são distinguidos por classes, conforme apresentado na Seção 3. Para o escopo desta análise, os veículos são utilizados em UTM. Com isso, o comando enviado pelo *script* ao banco de dados PostgreSQL retorna os valores de volumes somados diretamente, sem a utilização de fatores de correção. A Tabela 5 exemplifica os dados brutos, enquanto a Tabela 6 ilustra os dados retornados pelo *script*.

Tabela 5: Ilustração dos dados conforme armazenamento na base de dados

<i>Timestamp</i> do início do intervalo	Faixa	Moto	Carro	Caminhão leve	Caminhão pesado	Veículo especial	Velocidade média no tempo (km/h)
2021-08-18 00:00:00	0	9	39	10	11	0	91,87
2021-08-18 00:00:00	1	13	25	1	6	0	95,96
2021-08-18 00:00:00	2	11	14	1	1	0	97,11

$$V_0 = 9 + 39 + 10 + 11 + 0 = 69 \text{ UTM}$$

$$V_1 = 13 + 25 + 1 + 6 + 0 = 45 \text{ UTM}$$

$$V_2 = 11 + 14 + 1 + 1 + 0 = 27 \text{ UTM}$$

Além de estarem separados por classes, os dados estão, também, distinguidos quanto as faixas devido a não homogeneização do número destas, conforme apresentado na Seção 3. Em virtude disso, uma vez com os dados de volume (em UTM) e velocidade, para cada registro, o *script* realiza um procedimento de agregação dos dados, para que cada registro de 15 minutos represente apenas um ponto no gráfico de fluxo por velocidade. Esta agregação é realizada para que todos os gráficos apresentem o mesmo número de pontos, padronizando-os para a análise visual. Para os volumes, o procedimento para agregação é, novamente, uma soma direta dos registros.

$$V_{total} = 69 + 45 + 27 = 141 \text{ UTM}$$

Tabela 6: Estrutura dos dados importados para o *script*

<i>Timestamp</i> do início do intervalo	Faixa	Veículos (UTM)	Velocidade média no tempo (km/h)
2021-08-18 00:00:00	0	69	91,87
2021-08-18 00:00:00	1	45	95,96
2021-08-18 00:00:00	2	27	97,11

Entretanto, a agregação das velocidades deve ser diferente. Para manter uma equivalência em relação aos registros de volume, as velocidades são agregadas através de uma média ponderada, onde os valores de velocidade para cada faixa são utilizados como rol, com os respectivos volumes tomados como peso.

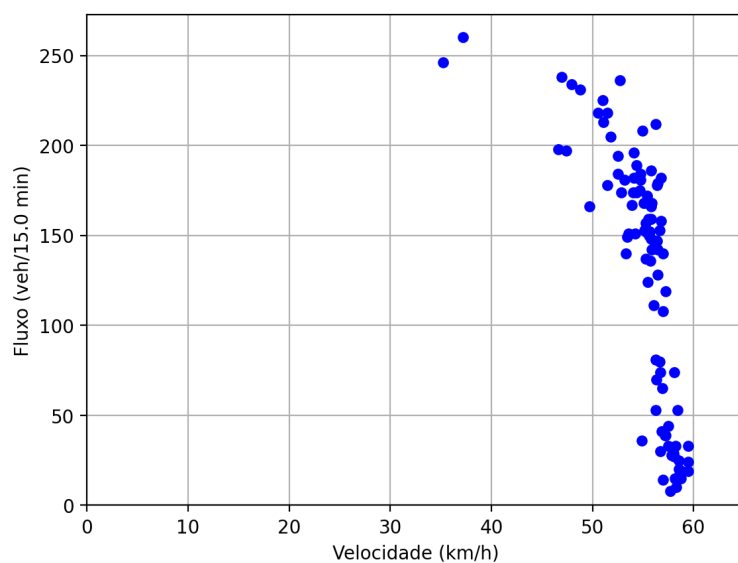
$$vel_{eqv} = \frac{69 \cdot 91,87 + 45 \cdot 95,96 + 27 \cdot 97,11}{69 + 45 + 27} = 94,18 \text{ km/h}$$

Durante um procedimento de monitoramento de rodovias, é possível que em um determinado intervalo de tempo, não seja observado nenhum veículo, resultando em um volume igual a zero. Estes registros com volumes zerados não possuem, também, valores de velocidade. Em função disto, estes registros não foram incluídos no gráfico, visto que estariam posicionados sobre a origem, e poderiam prejudicar a análise.

Com os dados do registro reduzidos a um par ordenado, estes valores são inseridos em listas distintas no *script*, uma para cada característica. Com os valores do registro inseridos nas listas, encerra-se o procedimento para este registro, e o *loop* é reiniciado, seguindo para os dados dos próximos 15 minutos.

Com todos os registros do conjunto de dados representados como um par ordenado equivalente, e devidamente inseridos nas listas correspondentes, gera-se, então, um arquivo com o gráfico de fluxo por velocidade com auxílio da biblioteca *matplotlib.pyplot*, que é salvo em uma pasta do computador. A Figura 23 ilustra um gráfico gerado pelo sistema.

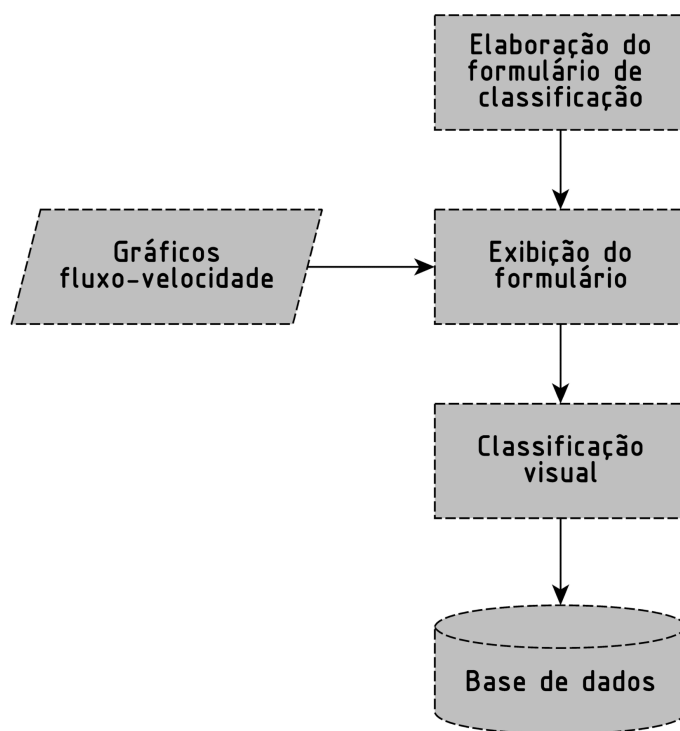
Figura 23: Gráfico fluxo por velocidade gerado pelo sistema



4.4 Classificação visual

Depois do desenvolvimento do procedimento para a geração dos gráficos, elabora-se uma interface, cujo procedimento é exibido na Figura 24, que permite a interação do usuário, com auxílio das ferramentas disponíveis na biblioteca TKinter.

Figura 24: Fluxograma representativo do processo de classificação visual



Esta interface, exibida na Figura 25, segue a ordem da lista embaralhada de 'IDs'. Nele, é exibido ao usuário o gráfico de fluxo por velocidade, juntamente com informações de identificação do conjunto: 'ID', 'dados' e 'posto'. Nesta interface o usuário deve avaliar o gráfico exibido, selecionar a opção correspondente à presença, ou ausência, de congestionamento e clicar no botão 'próximo'. Ao pressionar, o resultado da classificação é inserido na coluna 'classificação' da base de dados. A representação para o armazenamento da resposta é feita de maneira binária, onde o valor 0 significa a ausência de congestionamento, e o valor 1 indica sua ocorrência. Então o procedimento prossegue para análise do restante dos conjuntos. A Figura 26 ilustra a base de dados auxiliar com a coluna 'classificação' preenchida.

Para determinar a presença de congestionamento, o usuário deverá utilizar o modelo de Greenshields. Neste método, deve-se avaliar a aderência ao comportamento parabólico nos dados, conforme descrito na Seção 2.2.4, avaliando a presença de instabilidade dos dados próximos ao vértice.

Figura 25: Interface de classificação visual exibido ao usuário

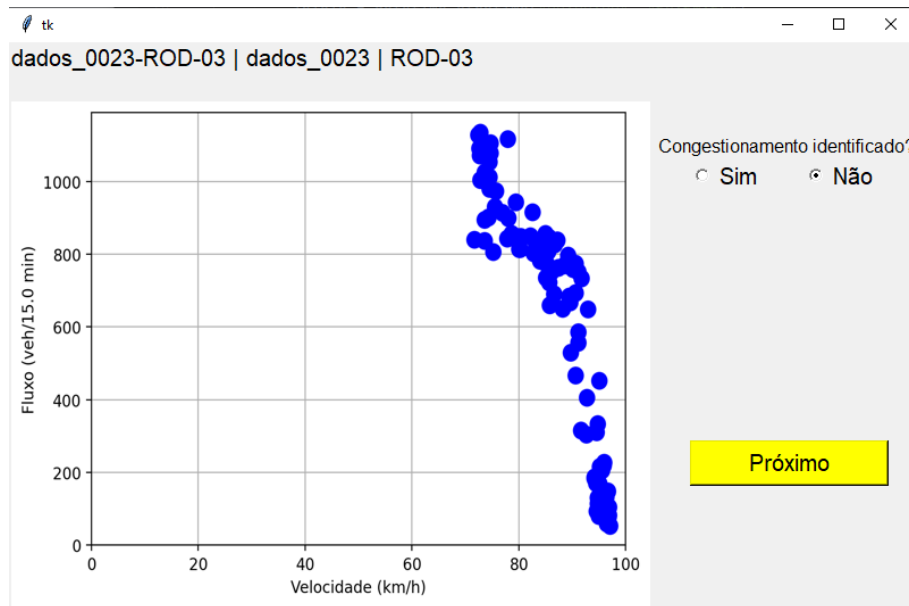


Figura 26: Ilustração do preenchimento da coluna de 'classificação', para 20 primeiros registros, no pgAdmin

	ts_inicio timestamp without time zone	faixa bigint	moto bigint	carro bigint	cam_leve bigint	cam_pesado bigint	especial bigint	vel_media double precision	id text	posto text	dados text	classificacao integer
1	2021-08-18 21:15:00	0	18	53	8	0	0	56.15453164556964	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	0
2	2021-08-18 21:30:00	0	16	50	7	0	0	55.91391780821917	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	0
3	2021-08-18 21:45:00	0	14	42	7	0	0	55.80742857142859	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	0
4	2021-08-18 22:00:00	0	9	29	12	0	0	56.81664	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	0
5	2021-08-18 22:15:00	0	10	24	4	0	0	58.39768421052629	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	0
6	2021-08-18 22:30:00	0	12	24	5	0	0	57.54819512195122	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	0
7	2021-08-18 22:45:00	0	14	21	3	0	0	58.69042105263159	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	0
8	2021-08-18 23:00:00	0	1	26	2	0	0	59.34041379310344	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	0
9	2021-08-18 23:15:00	0	5	17	9	0	0	58.47561290322582	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	0
10	2021-08-18 23:30:00	0	5	22	1	0	0	58.79314285714285	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	0
11	2021-08-18 23:45:00	0	7	15	5	0	0	55.28400000000001	dados_0003-RAM-05	RAM-05	dados_0003	0
12	2021-08-18 00:00:00	0	4	18	5	3	0	59.61	dados_0008-RAM-06	RAM-06	dados_0008	1
13	2021-08-18 00:15:00	0	5	14	0	5	0	60.687	dados_0008-RAM-06	RAM-06	dados_0008	1
14	2021-08-18 00:30:00	0	6	18	7	4	0	57.44674285714287	dados_0008-RAM-06	RAM-06	dados_0008	1
15	2021-08-18 00:45:00	0	8	11	1	1	0	57.37885714285715	dados_0008-RAM-06	RAM-06	dados_0008	1
16	2021-08-18 01:00:00	0	2	20	3	3	0	59.50285714285715	dados_0008-RAM-06	RAM-06	dados_0008	1
17	2021-08-18 01:15:00	0	7	17	5	1	0	57.4368	dados_0008-RAM-06	RAM-06	dados_0008	1
18	2021-08-18 00:00:00	0	5	11	3	1	0	58.19040000000001	dados_0009-RAM-06	RAM-06	dados_0009	0
19	2021-08-18 00:15:00	0	8	20	2	1	1	58.77562500000001	dados_0009-RAM-06	RAM-06	dados_0009	0
20	2021-08-18 00:30:00	0	3	19	2	4	0	56.58814285714286	dados_0009-RAM-06	RAM-06	dados_0009	0

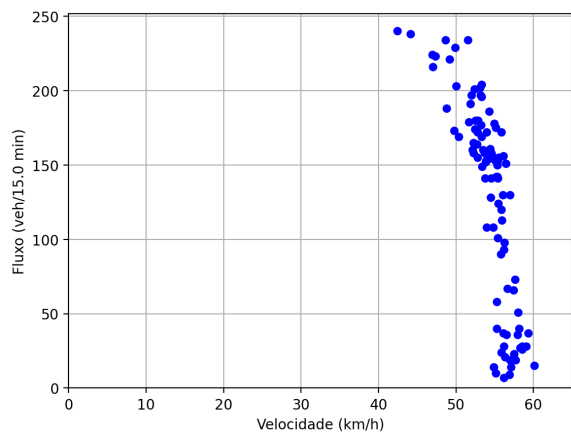
A Figura 27 apresenta seis gráficos de fluxo por velocidade, com suas respectivas classificações visuais, na perspectiva do autor, quanto a presença de congestionamento. A Figura 27(a) ilustra um cenário com uma boa aderência ao comportamento parabólico, sem instabilidade de pontos, indicando um cenário não congestionado. Na Figura 27(b) observa-se uma maior dispersão entre os pontos, mas ainda seguindo a tendência de um comportamento parabólico. A Figura 27(c) ilustra

o limite de um comportamento estável dos dados, onde há pontos no vértice da parábola, sem que haja uma instabilidade em seu posicionamento.

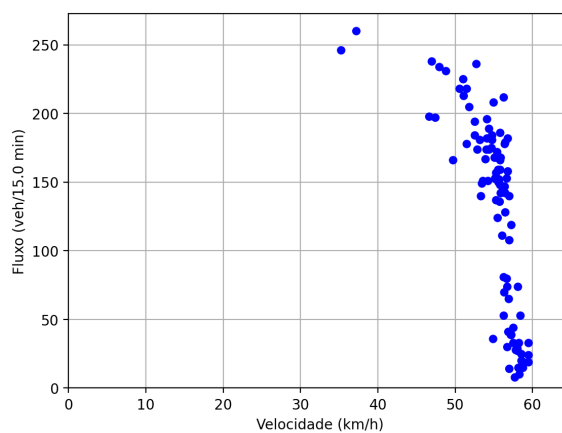
A partir do gráfico exibido na Figura 27(d) exibem-se situações congestionadas. A Figura 27(d) ilustra um início de perda de estabilidade dos pontos ao atingir seus maiores valores de fluxo. Entretanto o congestionamento é apenas fortemente evidenciado em situações como as ilustradas nas Figuras 27(e) e 27(f). Em ambos os casos a instabilidade é visível, percebendo que não é possível identificar um comportamento parabólico, além da grande dispersão entre os pontos.

Todos os 400 conjuntos de dados fornecidos para este trabalho são visualmente classificados.

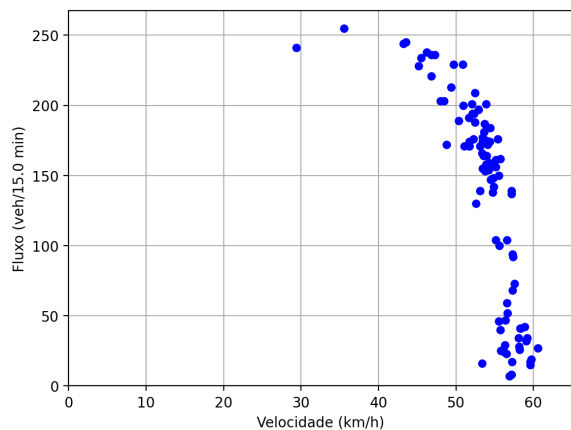
Figura 27: Ilustração de gráficos de fluxo por velocidade com o resultado da classificação visual



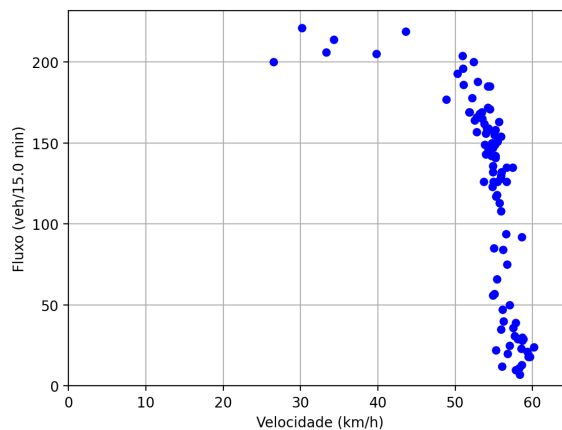
(a) Não congestionado



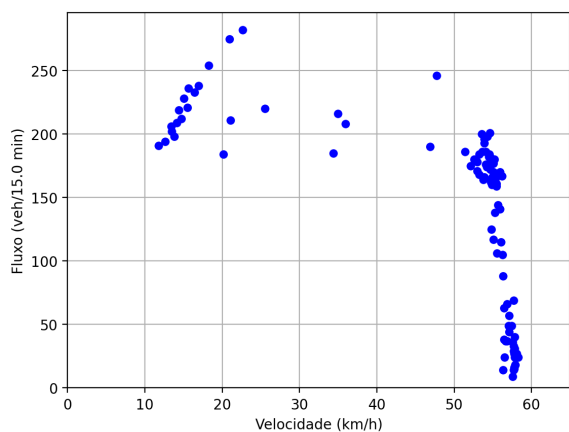
(b) Não congestionado



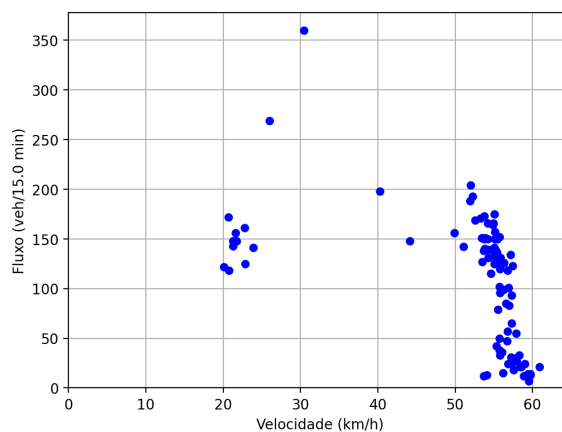
(c) Não congestionado



(d) Congestionado



(e) Congestionado

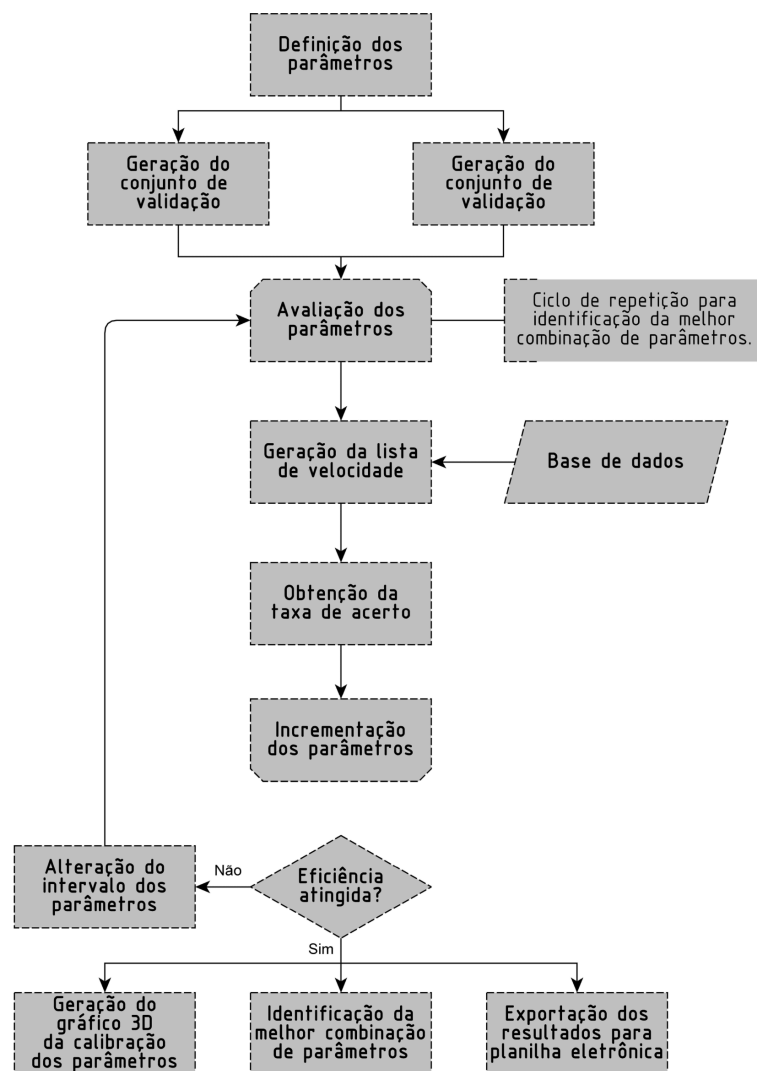


(f) Congestionado

4.5 Calibração do modelo

O modelo desenvolvido neste trabalho realiza uma análise estatística com os dados de velocidade. A Figura 28 exibe o fluxograma das etapas realizadas para a calibração dos parâmetros do modelo, realizada através do *script* em Python exibido no Apêndice C.

Figura 28: Fluxograma representativo da calibração dos parâmetros



O processamento estatístico do modelo consiste na avaliação da diferença percentual δ entre a média aritmética simples de todos os registros de velocidade do conjunto, em relação a média dos $N\%$ maiores valores de velocidades registrados.

A Figura 29 exibe um conjunto de dados visualmente classificado como não congestionado, o posto ROD-01 do conjunto de dados 0004, destaca, em verde, a região que compreende as 90% maiores velocidades ($N = 90$). Observa-se na Tabela 7 que a diferença percentual δ foi inferior a 1%.

Figura 29: Região das 90% maiores velocidades destacada em um cenário não congestionado

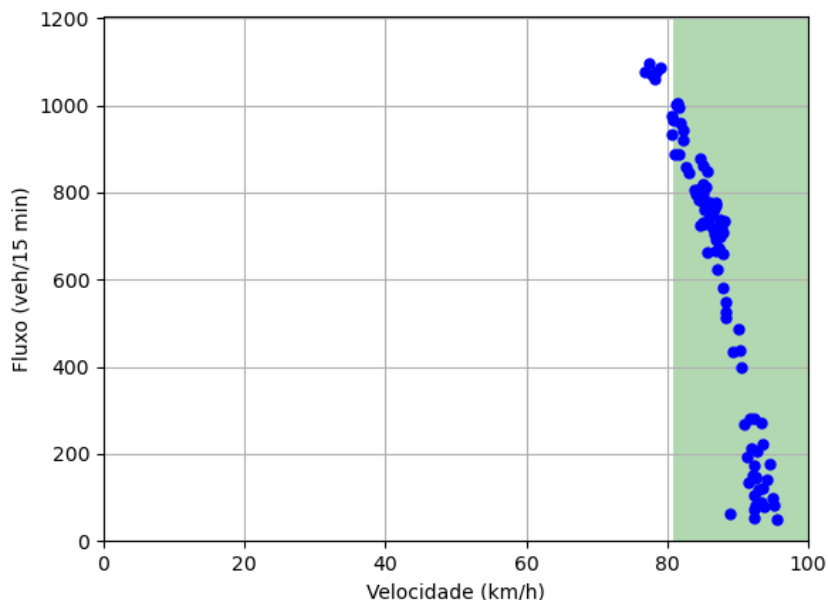


Tabela 7: Comparação das médias para o posto ROD-01 do conjunto de dados 0004 (não congestionado)

Média de todos os registros (km/h)	Média das 90% maiores velocidades (km/h)	δ
87,16	88,02	0,98%

Ao realizar o mesmo procedimento para um cenário congestionado, como o ilustrado Figura 30 (em vermelho, a região de $N=90\%$), obtém-se um valor superior de δ em relação ao obtido para um conjunto não congestionado, conforme a Tabela 7.

Figura 30: Região das 90% maiores velocidades destacada em um cenário congestionado

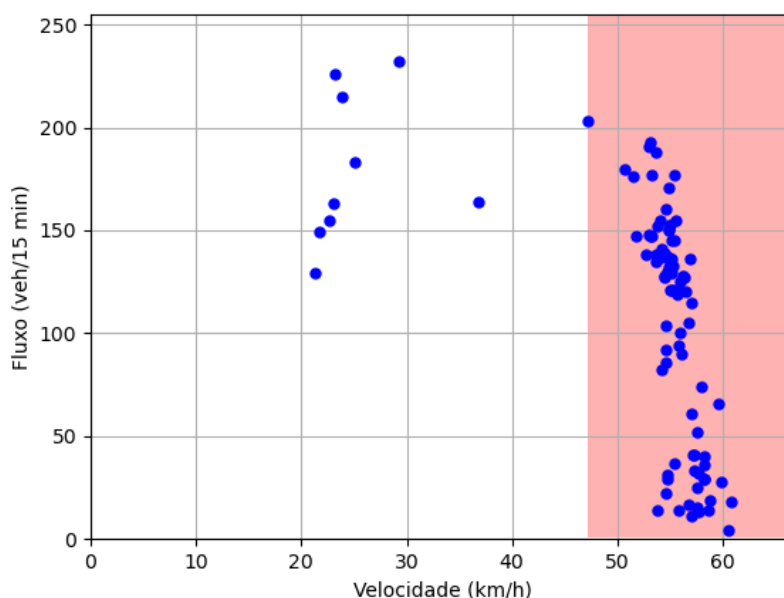


Tabela 8: Comparação das médias para o posto RAM-05 do conjunto de dados 0007 (congestionado)

Média de todos os registros (km/h)	Média das 90% maiores velocidades (km/h)	δ
52,66	55,50	5,39%

Com o método de análise definido, deve-se definir, inicialmente, dois parâmetros bases para a execução do *script*. Deve-se escolher um valor de N para o percentual das maiores velocidades do conjunto a ser analisado, juntamente com um valor limitante α das diferenças percentuais entre cenários congestionados e não congestionados. Estes parâmetros passam, então, por um processo de calibração.

Além dos parâmetros de calibração, deve-se estipular, anteriormente à execução do método, uma taxa de acerto mínima μ a ser atingida em uma comparação direta entre a classificação pelo método e a classificação visual do usuário.

Para o procedimento de calibração dos parâmetros estatísticos da análise, inicialmente elaboram-se um ambiente de dados de testes. Este ambiente é composto por 25 conjuntos de dados visualmente classificados como que não possuíram congestionamento, e a mesma quantidade de conjuntos congestionados. Optou-se por reduzir o conjunto de dados para obter uma calibração dos parâmetros da análise, conforme definido por Ortuzar e Willumsen (2011), com um conjunto balanceado, evitando

possíveis erros de calibração devido a um ambiente de testes com uma amostragem insuficiente de cenários congestionados.

O *script* importa da base dados os 'IDs' de todos os cenários congestionados e armazenamos em uma lista juntamente com sua classificação. O mesmo é realizado para os cenários não congestionados. Então, de maneira randômica, é gerado o ambiente de calibração, composto por 50 conjuntos de dados. Todos os conjuntos não pertencentes ao ambiente de calibração compõe o ambiente de validação.

Cada conjunto do ambiente de calibração é processado em um *loop*, onde os parâmetros α e N são incrementados em um processo iterativo, cujos intervalos de verificação são pré-definidos pelo usuário, com o objetivo de identificar a combinação que resulta no maior valor de μ .

No *loop* de calibração são novamente geradas as listas de velocidades para o conjunto de dados. Desta lista é calculada o δ , comparando-o com o fator α da iteração. Se $\delta > \alpha$, o cenário é classificado como congestionado. Entretanto, se $\delta < \alpha$ não foi identificada a presença de congestionamento para o conjunto.

Para a obtenção de μ para a combinação de α e N utilizados, é realizado uma comparação entre a classificação obtida no método, e a classificação visual de acordo com o usuário. A taxa de acerto μ é obtida dividindo o número de classificações equivalentes pela quantidade total de comparações realizadas.

Identificada a combinação de parâmetros α e N que resulta no maior valor de μ , o *script* exporta os resultados do procedimento de comparação um arquivo de planilha eletrônica. Além disso, é gerado um gráfico com os valores de todas as combinações de parâmetros avaliadas na calibração. Se o maior valor para o fator μ for superior a taxa de acerto mínima inicialmente definida, o procedimento segue para a etapa de validação, utilizando o ambiente com os conjuntos de dados não utilizados na para a calibração.

Concluída a análise dos 50 conjuntos de teste, o *script* avalia se a taxa de acerto do método atende a taxa definida pelo usuário inicialmente. Se o resultado obtido for suficiente, o método segue para a validação, conforme os conceitos de Ortuzar e Willumsen (2011), processando todo o conjunto de dados disponível. Este resultado de testes é armazenado em um arquivo de planilha eletrônica conforme modelo exibido na Tabela 9. Caso contrário, o *script* deverá ser executado novamente, aplicando um relaxamento no parâmetro limitante, até que a taxa de acerto seja igual ou superior ao valor inicialmente definido.

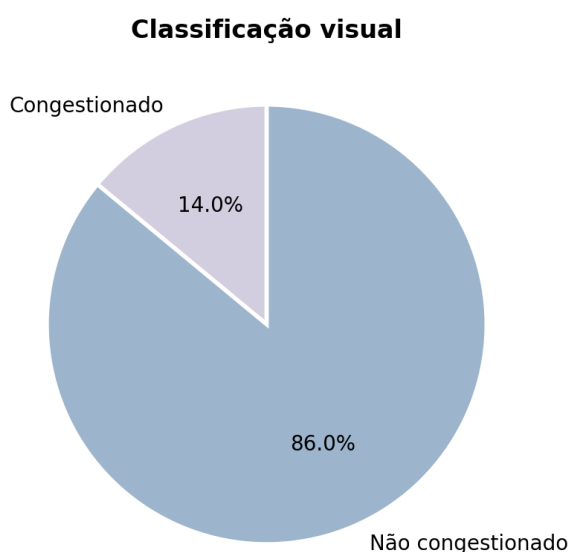
Tabela 9: Ilustração de estrutura de dados para os resultados da calibração

	ID	Diferença percentual δ	Classificação método	Classificação visual	Comparação entre classificações
0	dados_0004-ROD-01	0,009848	0	0	1
0	dados_0007-RAM-02	0,005378	0	0	1
0	dados_0006-RAM-05	0,00643	0	0	1
0	dados_0005-RAM-02	0,006497	0	0	1
0	dados_0007-RAM-07	0,062768	1	1	1
0	dados_0003-RAM-02	0,003993	0	0	1
0	dados_0009-RAM-01	0,009913	0	0	1
0	dados_0006-ROD-02	0,002537	0	0	1
0	dados_0001-RAM-04	0,004837	0	0	1
0	dados_0010-RAM-01	0,008673	0	0	1
0	dados_0005-RAM-04	0,006183	0	0	1
0	dados_0008-ROD-01	0,01822	0	0	1
0	dados_0011-RAM-02	0,005934	0	0	1
0	dados_0011-RAM-03	0,01093	0	0	1

5 Resultados

O ambiente de validação dos dados foi composto pelos 350 conjuntos de dados para análise não englobados na calibração. Destes, 49 conjuntos, aproximadamente 14%, apresentaram congestionamentos de acordo com a análise visual do modelo de Greenshields, conforme Figura 31.

Figura 31: Proporção entre classificações pelo método visual



Conforme descrito na Seção 4.5, para a calibração devem-se estipular valores iniciais para α e N . Além disso, para cada parâmetro deve-se adotar, também, um intervalo de iteração e um valor incremental, que é somado ao parâmetro a cada interação, além de uma taxa mínima de acerto. Os valores iniciais de α e N , intervalos e taxas de variação utilizadas podem ser visualizados na Tabela 10. A taxa de acerto mínima de classificação foi fixada em 95%.

Tabela 10: Configuração inicial de parâmetros utilizada na calibração

Parâmetro	Valor inicial	Intervalo de iteração	Valor incremental
$N\%$	85%	85% a 99%	1%
$\alpha\%$	1,0%	1,0% a 2,0%	0,05%

O procedimento iterativo de calibração avaliou 315 combinações de α e N , disponíveis no Apêndice D, e gerou o gráfico exibido na Figura 32. A melhor combinação de parâmetros pode ser visualizada na Tabela 11. Os resultados para cada conjunto de dados de validação estão dispostos no Apêndice E.

Figura 32: Gráfico entre os parâmetros α , N e μ

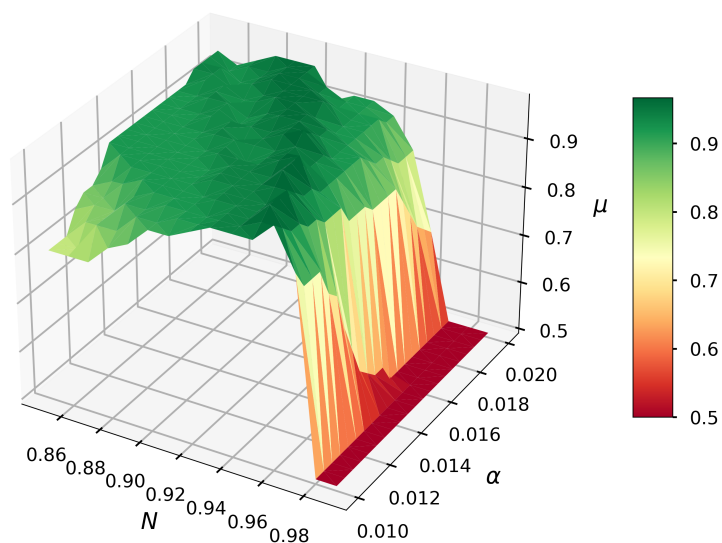
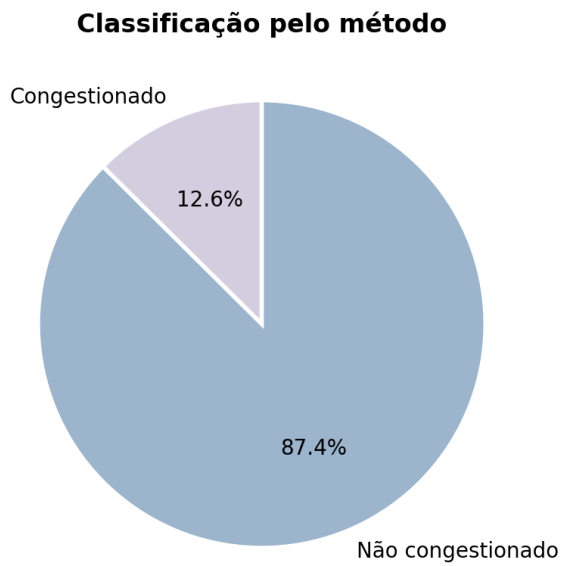


Tabela 11: Parâmetros obtidos no processo de calibração

Parâmetro	Melhor valor
μ	98%
$N\%$	93%
$\alpha\%$	1,55%

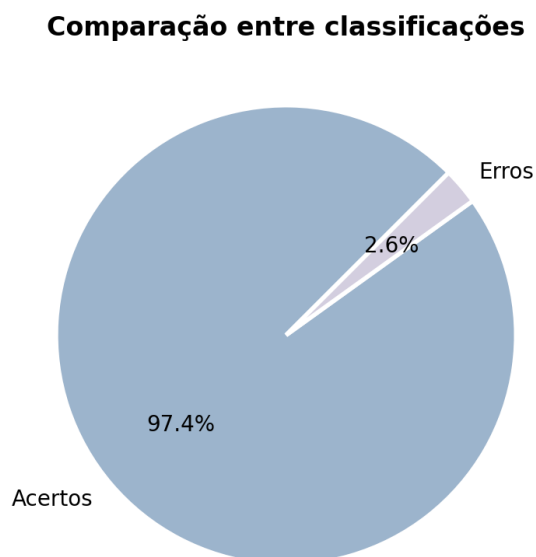
Com os parâmetros calibrados, iniciou-se o procedimento de validação para todos os conjuntos de dados do ambiente de validação. Em 44 ocasiões foram identificados valores da diferença percentual δ tais que $\delta > \alpha$ (fator limitante), categorizando-os como cenários congestionados. Este valor é equivalente a 12,6% dos conjuntos de validação, conforme exibido na Figura 33.

Figura 33: Proporção entre classificações pelo método proposto



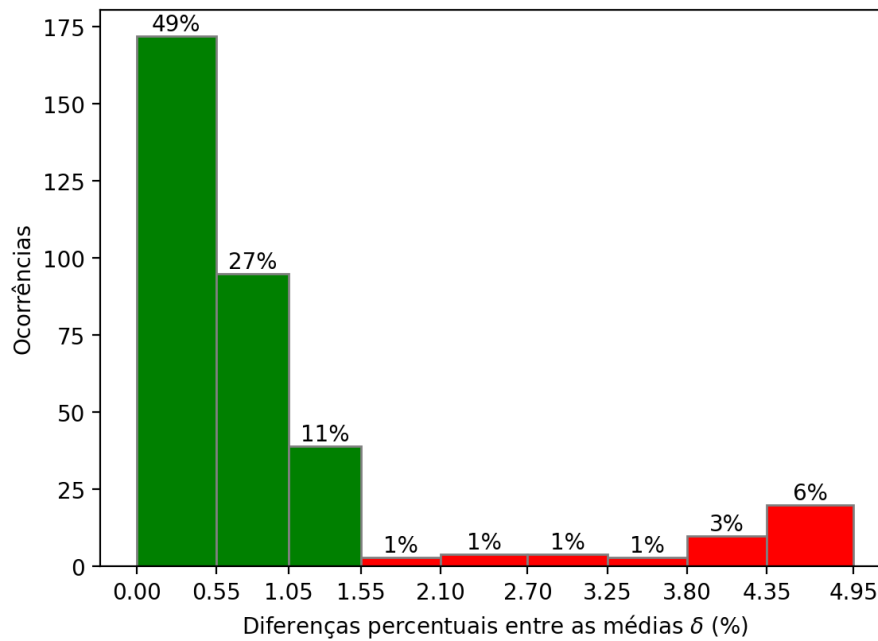
Entretanto é necessário comparar as classificações para cada cenário, a fim de validar a eficiência do procedimento utilizado. Nesta comparação, 341 conjuntos obtiveram a mesma classificação em ambos os métodos, resultando em uma taxa de acerto de 97,4%. A Figura 34 ilustra a proporção entre erros e acertos na comparação direta dos métodos.

Figura 34: Proporção entre erros e acertos na comparação entre resultados dos métodos



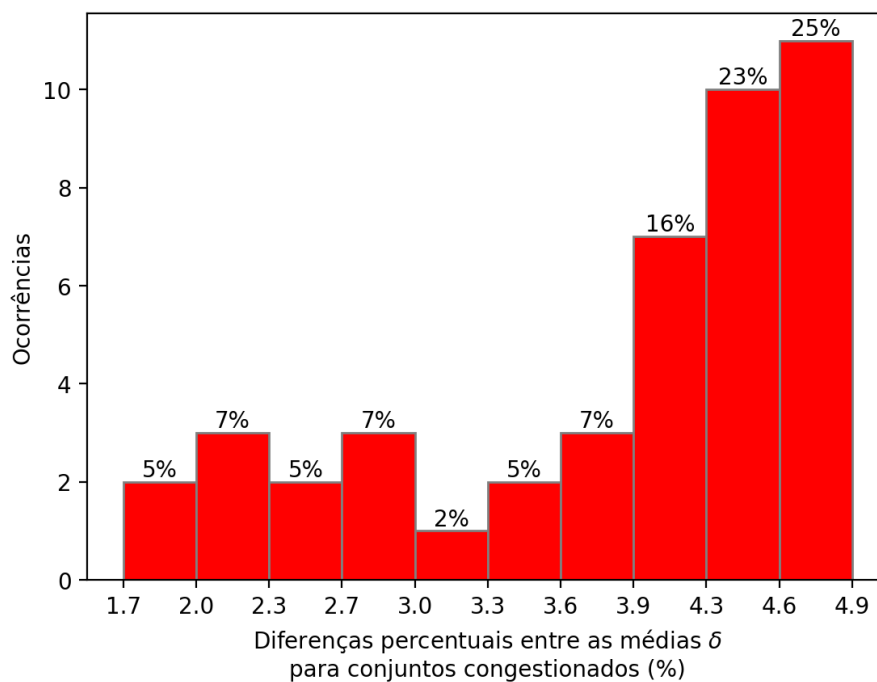
A Figura 35 apresenta um histograma com a distribuição dos valores das diferenças percentuais δ dos conjuntos de validação, enquanto separa-os de acordo com a classificação obtida, sendo a cor de barra verde os cenários não congestionados, enquanto o vermelho indica os que apresentaram congestionamentos.

Figura 35: Histograma com os valores de δ para os conjuntos de validação



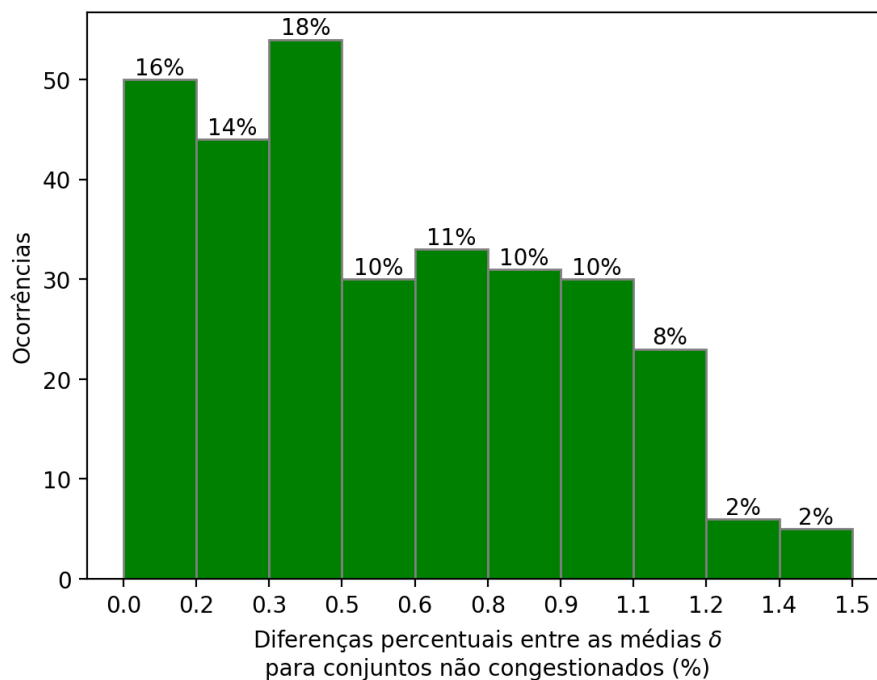
Entre os 44 conjuntos considerados congestionados pelo método, 49% apresentaram uma diferença percentual δ inferior a 0,55%. Em contrapartida, aproximadamente 6% possuíram uma diferença percentual, entre 4,35% e 4,95%, como mostra a Figura 36.

Figura 36: Histograma com os resultados das diferenças percentuais δ dos cenários congestionados



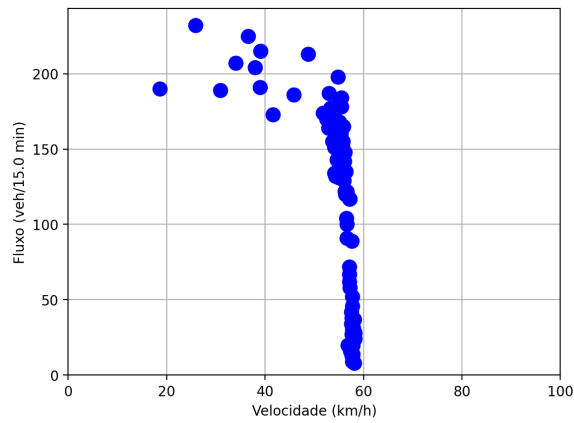
Nos 306 conjuntos não congestionados, apenas 5% encontram-se no primeiro intervalo do histograma, com uma diferença percentual δ entre 1,7% e 2,0%, enquanto 25% dos conjuntos com uma diferença percentual δ entre 4,6% e 4,98%, conforme mostra a Figura 37.

Figura 37: Histograma com os resultados das diferenças percentuais δ dos cenários não congestionados

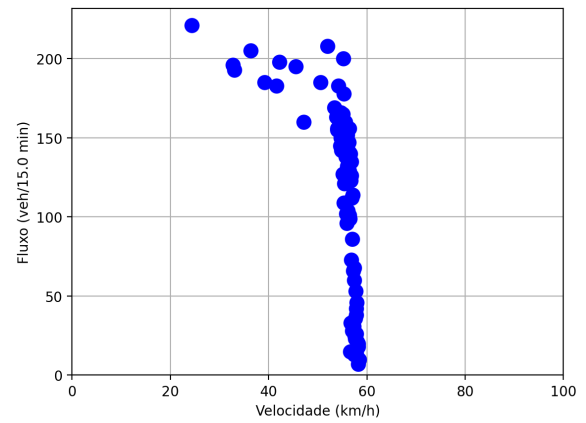


A Figura 38 apresenta 6 gráficos de fluxo por velocidade em que a classificação pelo método, e a obtida utilizando o modelo de Greenshields, foram iguais. A Figura 39, em contrapartida, exhibe outros 6 gráficos que apresentaram divergências nas classificações entre os métodos.

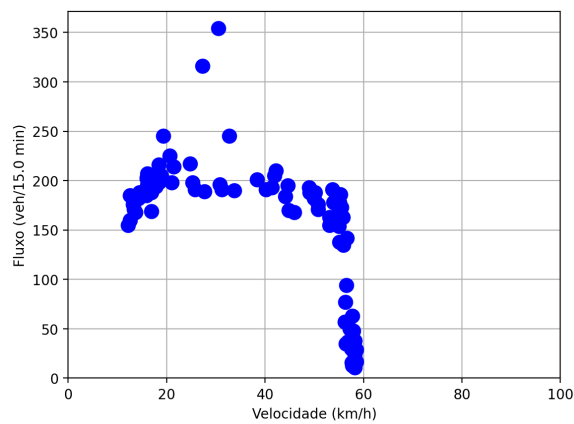
Figura 38: Gráficos de fluxo por velocidade igualmente classificados por ambos os métodos



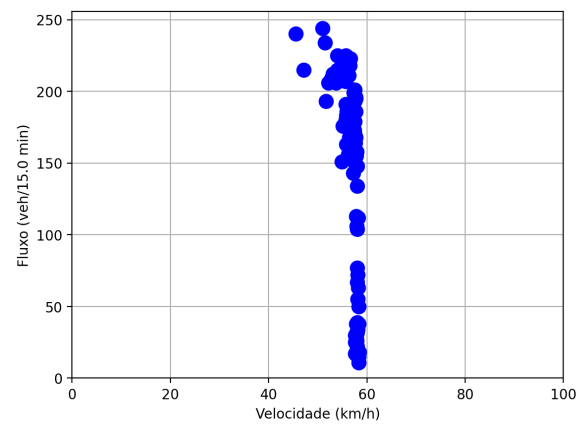
(a) Método: congestionado | Visual: congestionado



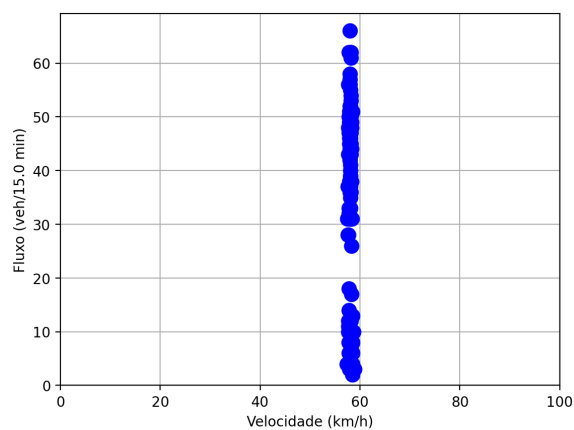
(b) Método: congestionado | Visual: congestionado



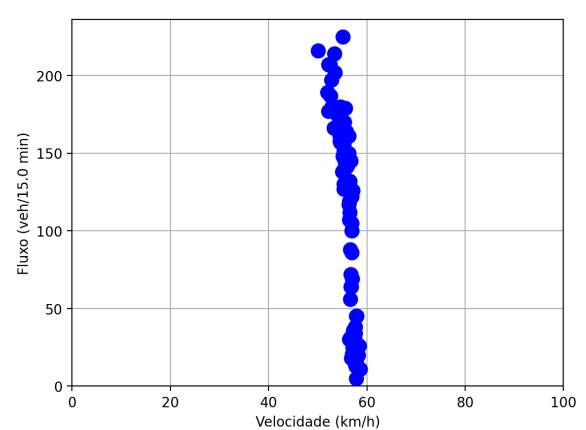
(c) Método: congestionado | Visual: congestionado



(d) Método: não congestionado | Visual: não congestionado

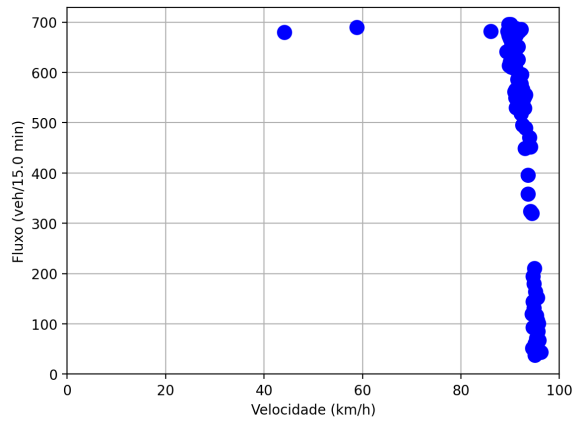


(e) Método: não congestionado | Visual: não congestionado

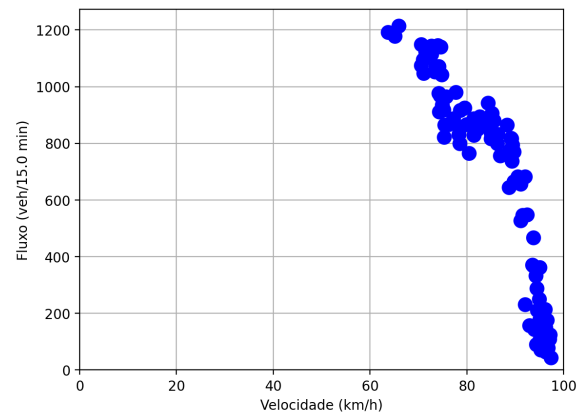


(f) Método: não congestionado | Visual: não congestionado

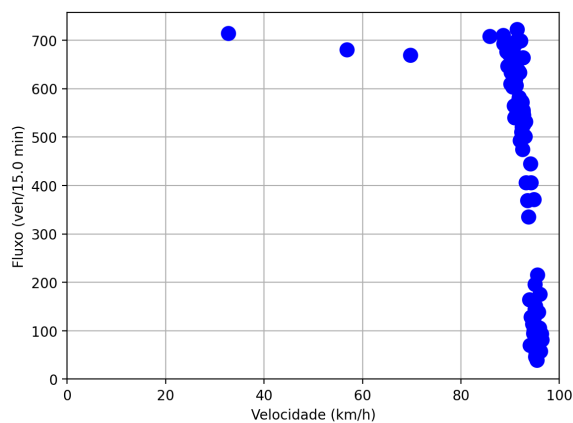
Figura 39: Gráficos de fluxo por velocidade com classificações distintas de acordo com cada método



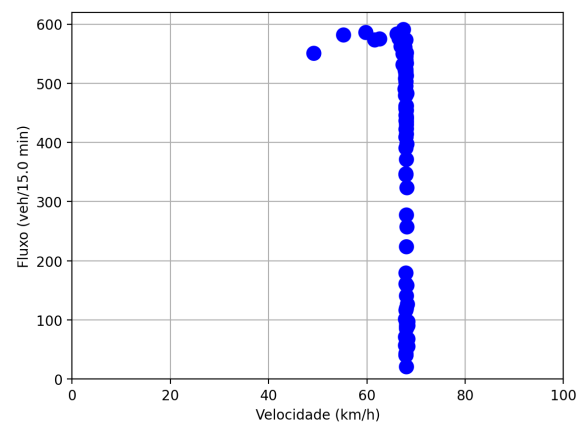
(a) Método: não congestionado | Visual: congestionado



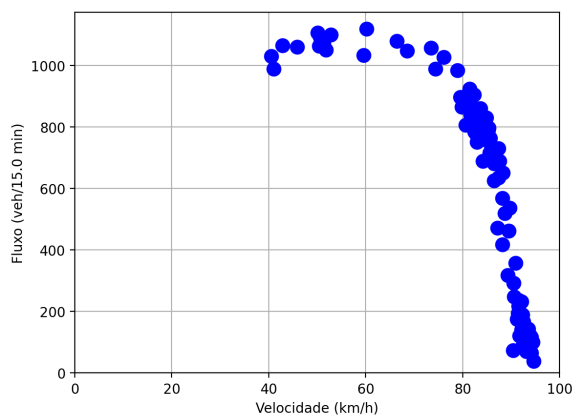
(b) Método: não congestionado | Visual: congestionado



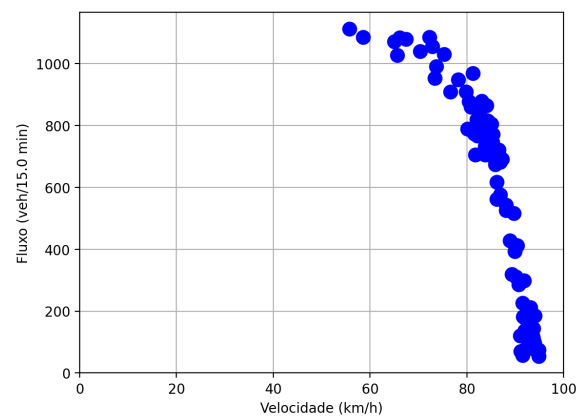
(c) Método: não congestionado | Visual: congestionado



(d) Método: não congestionado | Visual: congestionado



(e) Método: congestionado | Visual: não congestionado



(f) Método: congestionado | Visual: não congestionado

Embora a taxa de acerto μ seja superior a esperada, ainda houveram discordâncias entre a classificação visual e a classificação do método. Apesar de alguns cenários estarem no limite de decisão, como os observados nas Figuras 39(e) e 39(f), outros não se encontram em zonas limites, como as Figuras 39(c) e 39(a) que não iniciam o comportamento parabólico.

6 Conclusões

Com o desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso foi possível obter uma compreensão melhor do impacto dos congestionamentos para a sociedade e nos projetos de engenharia de tráfego, além da experiência de desenvolver uma ferramenta para automatizar a identificação de congestionamento, comparando os resultados com uma classificação visual realizada com auxílio do modelo de Greenshields.

Com os dados de contagem utilizados no trabalho foi possível observar as diferentes formas de como os dados de demanda podem ser explorados pela engenharia de tráfego. A utilização de diferentes agregações temporais permite adaptar os dados da melhor maneira possível para o escopo da análise a ser realizada. Entretanto, pode ser limitada pelos dados de contagem disponíveis. As identificações de congestionamentos utilizam agregações temporais curtas, de maneira a se aumentar a quantidade de dados disponível para análise. Além da agregação temporal, os dados de demanda podem ser agregados de outras maneiras, como a utilização dos veículos como unidades de tráfego misto (UTM), ou convertê-los a nível de unidades carros de passeio (UCP).

Frente a presença de congestionamento, o incremento dos tempos de viagens fazem com que os motoristas alterem seu comportamento no trânsito, dirigindo de maneira mais agressiva e, em alguns casos, irresponsável. Além disso, existe a possibilidade dos motoristas realizarem outro trajeto para escapar da via congestionada, transferindo a demanda originalmente projetada para uma rodovia, à outra de menor capacidade e, assim, congestionando-a. Assim, através da identificação dos congestionamentos em uma rodovia, é possível sanar este problema em outras vias.

Além do impacto comportamental nos motoristas, os congestionamentos também causam um impacto financeiro na região. Os maiores tempos de viagem resultam em um consumo maior de combustível, podendo aumentar o preço de mercadorias transportadas nas rodovias. A maior queima de combustível fóssil amplifica os impactos causados ao meio ambiente.

No aspecto de análise operacional de tráfego é necessário identificar a presença de congestionamentos nos dados de contagens, para avaliar a possibilidade de utilizá-los como dados de demanda para em projetos de determinação de nível de serviço e dimensionamento de rodovias.

Com o auxílio de bibliotecas para a linguagem de programação Python foi elaborado um método para a detecção automatizada de congestionamentos, avaliando uma diferença percentual entre a média das N maiores velocidades do conjunto e média de todos os valores registrados. Ao comparar a classificação obtida deste modo, com a obtida através da análise de gráficos de fluxo por velocidade do modelo de Greenshields, foi obtida um de acerto de 97,4%. Este valor foi superior a taxa de acerto mínima esperada de 95%.

Um ponto a se destacar é que a taxa de acerto do modelo está diretamente relacionada à classificação visual dos conjuntos. Diferentes interpretações de gráficos no limite entre cenários

congestionado e não congestionados podem impactar diretamente no resultado obtido. Os casos em que as classificações visuais não foram iguais as obtidas pelo método podem se enquadrar neste caso, como observado na Figura 39.

O procedimento de calibração do fator limitante da diferença percentual foi feito de maneira iterativa por um dos *scripts* desenvolvidos. Os valores da diferença percentual limite α e o valor indicativo da porcentagem das maiores velocidades N foram incrementados de forma sistemática, analisando 315 combinações.

Ressalta-se que a área de estudo deste trabalho é totalmente sintética, sendo sua única semelhança com a realidade a infraestrutura modelada conforme trecho da BR-282, portanto estes valores não podem ser aplicados diretamente como uma análise da detecção de congestionamentos deste trecho.

Conclui-se, portanto, que o método é capaz de identificar a presença de congestionamentos com dados de velocidade obtidos em postos de contagem. Entretanto, o método deve ser aprofundado a fim de aperfeiçoar a identificação em cenários limites, apesar deste fenômeno estar diretamente relacionado com a classificação visual do usuário. Cenários limites sempre vão gerar dúvidas nos usuários quanto a sua classificação. Entretanto, o programa deve buscar padronizá-los, mesmo que o usuário discorde do resultado.

Além disso, deve-se aprimorar o método para validar a equivalência entre os dados de contagem e demanda. Um cenário pode ser classificado como não congestionado pelo método desenvolvido e, ainda assim, apresentar um instante de 15 minutos congestionado. Assim, em um intervalo de 15 minutos a demanda não é igual ao volume obtido pela contagem, portanto a equivalência não é atingida.

6.1 Recomendação para trabalhos futuros

Durante a elaboração deste trabalho foram identificados pontos que passíveis a serem explorados visando um aperfeiçoamento do método aqui proposto. Deste modo, são recomendadas as seguintes abordagens para trabalhos futuros:

1. incluir os volumes de fluxo na análise de classificação;
2. realização do procedimento com dados de contagem obtidos em situações reais de campo;
3. comparação dos resultados convertendo os veículos para carros de passeio (UCP);
4. utilização de inteligência artificial para identificação dos congestionamentos.

Referências

- Brasil, . Lei nº 13.415, de 16 de fevereiro de 2017. 2011.
- Brasil. *Manual de projeto geométrico de rodovias rurais*. [S.l.], 1999.
- BRASIL. *Transportes no Brasil - Síntese Histórica*. 2014. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transportes-no-brasil-sintese-historica>>.
- CNT. *Plano CNT de transporte e logística 2018*. Brasília: [s.n.], 2018.
- DNER. *Classificação funcional do sistema rodoviário do Brasil*. 1974.
- DNIT/IPR. *Manual de projeto de interseções*. [S.l.], 2005. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Publicação IPR - 718. 528 p.
- DNIT/IPR. *Manual de estudos de tráfego*. Rio de Janeiro, 2006. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Publicação IPR - 723. 384 p.
- ECLAC. *Traffic Congestion*. New York, NY: United Nations, 2004. (Cuadernos de la CEPAL).
- Eleferiadou, L. *An introduction to traffic flow theory*. New York: Springer Science+Business Media, Inc., 2014. v. 84. (Springer Optimization an Its Applications, v. 84).
- FHWA. *Traffic Monitoring Guide*. 2016. U.S. Department of Transportation.
- Frascaria, D.; Olver, N.; Verhoef, E. Emergent hypercongestion in vickrey bottleneck networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 139, p. 523–538, 09 2020.
- Garber, N.; Hoel, L. A. *Traffic & Highway Engineering*. 4. ed. Florence, KY: Nelson Engineering, 2008.
- Gerlough, D. L.; Huber, M. J. *Traffic flow theory: a monograph*. Washington D.C.: National research council. Transportation research board, 1975.
- Hoel, L. A.; Garber, N. J.; Sadek, A. W. *Engenharia de infraestrutura de transporte*. [S.l.: s.n.], 2011. ISBN 9788522113934.
- ITE. *Traffic Engineering Handbook*. 7. ed. [S.l.]: Institute of Transportation Engineers, 2016.
- Leong, H. J. W. The distribution and trend of free speeds on two-lane rural highways in new south wales. v. 4, p. 791–814, 1968.
- Li, G. et al. Influence of traffic congestion on driver behavior in post-congestion driving. Elsevier BV, v. 141, p. 105508, 2020.
- Lieu, H. et al. *Revised Monograph on Traffic Flow Theory*. 2017.
- Maerivoet, S.; Moor, B. D. Traffic flow theory. *Physics*, v. 1, 08 2005.
- Mannering, F. L.; Washburn, S. S. *Principles of highway engineering and traffic analysis*. 5. ed. Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2012.
- Neto, P. L. d. O. d. C. *Estatística*. [S.l.: s.n.], 2002. ISBN 9788521203001.

- Oliveira, F. M. D. *Estatística e probabilidade: Com Ênfase em exercícios resolvidos e propostos*. [S.l.]: LTC — Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2017.
- Ortuzar, J. de D.; Willumsen, L. G. *Modelling Transport*. 4. ed. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, 2011.
- Papacostas, C. *Fundamentals of Transportation Engineering*. Prentice-Hall, 1987. ISBN 9780133448702. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=LWsgAQAAMAAJ>>.
- Roess, R. P.; Prassas, E. S.; McShane, W. R. *Traffic Engineering*. 4. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2010. v. 07458.
- Schrank, D.; Lomax, T. *Annual Urban Mobility Report*. Texas Transportation Institute, 2021. Disponível em: <<http://mobility.tamu.edu/ums/>>.
- Slinn, M.; Matthews, P.; Guest, P. *Traffic Engineering Design: Principles and practice*. 2. ed. [S.l.: s.n.], 2005.
- TRB. *Highway Capacity Manual*. 6. ed. [S.l.], 2016. Transportation Reserach Board, 2016. v. 1: Concepts.
- Treiber, M.; Kesting, A. *Traffic Flow Dynamics*. Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN 3642324592. Disponível em: <https://www.ebook.de/de/product/19320913/martin_treiber_arne_kesting_traffic_flow_dynamics.html>.
- Wu, C. et al. Flow: A modular learning framework for mixed autonomy traffic. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, v. 38, n. 2, p. 1270–1286, 2022.
- Younis, O. et al. A hazard detection and tracking system for people with peripheral vision loss using smart glasses and augmented reality. *The Science and Information Organization*, v. 10, n. 2, 2019.

A *script* para gerar a base de dados

```
1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 # =====
3 # Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
4 # Departamento de Engenharia Civil (ECV)
5 # Trabalho de Conclusao de Curso
6 # Autor: Arthur Martins Vitoreti de Oliveira
7 # Script para criar a base de dados geral
8 # =====
9 import psycopg2
10 import sys
11 import glob
12
13 from multiprocessing.pool import ThreadPool
14 import pandas as pd
15 from sqlalchemy import create_engine
16
17 # =====
18 database = "host=localhost dbname=postgres user=postgres password=arthur"
19 # =====
20
21
22 def processa_arquivo( input_file ):
23
24     engine = create_engine('postgresql://postgres:arthur@localhost:5432/postgres')
25     ws = pd.read_excel(input_file)
26     input_file_split = input_file.split("\\")
27
28     dados = input_file_split[1]
29     posto_break = input_file_split[2].split("_")
30     posto = posto_break[5] + "-" + posto_break[6].split(".")[0]
31     reg_id = dados + "-" + posto
32     ws['id']=reg_id
33     ws['posto']=posto
34     ws['dados']=dados
35     ws.to_sql('dados_teste',engine, if_exists='append', index = False)
36
37 con = psycopg2.connect( database )
38 con.set_isolation_level( psycopg2.extensions.ISOLATION_LEVEL_AUTOCOMMIT )
39
40 with con:
41
42     cur = con.cursor()
43
44     cur.execute( "DROP TABLE IF EXISTS dados_teste" )
45
46     lista_arquivos = glob.glob('dados/dados/**/*.xlsx')
47
48     pool = ThreadPool( 6 )
49     pool.map( processa_arquivo, lista_arquivos )
50     pool.close()
51     pool.join()
```

```
52 cur.execute("ALTER TABLE dados_teste ADD classificacao text")
53 index_string = "CREATE INDEX index ON public.dados_teste ( id )"
54 cur.execute( index_string )
55 cur.execute("update public.dados set vel_media = 0 where vel_media is Null")
56 print ("FIM")
```

B *script* para geração de gráficos e classificação visual

```
1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 #=====
3 #Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
4 #Departamento de Engenharia Civil (ECV)
5 #Trabalho de Conclusao de Curso
6 #Autor: Arthur Martins Vitoreti de Oliveira
7 #Script para gerar graficos e classificar visualmente
8 #=====
9 import psycopg2
10 import numpy as np
11 import matplotlib.pyplot as plt
12 from datetime import timedelta
13 from datetime import datetime
14 import pandas as pd
15 import sys
16 import glob
17 import decimal
18 from scipy.optimize import curve_fit
19 from multiprocessing.pool import ThreadPool
20 from tkinter import *
21 import tkinter
22 from tkinter import ttk
23 from PIL import Image, ImageTk
24 import random
25 from sklearn.metrics import r2_score
26 #=====
27 database = "host=localhost dbname=postgres user=postgres password=arthur"
28 agregacao_temporal = 15.0
29 hora_para_decimal = "cast(avg(extract(hour from timestamp) + extract(minute from timestamp)
30 )/60 + extract(second from timestamp)/3600) as float)"
31 hora_timestamp = "to_char(avg(cast(timestamp as time)), 'HH24:MI:SS')"
32 contagem = "(moto + carro + cam_leve + cam_pesado + especial)"
33 db_dados = "public.dados"
34 db_conjuntos = "public.conjuntos"
35 #=====
36
37 def grafico_f_v(input_file):
38     label = str(input_file)
39     input_file_split = label.split("-")
40     input_dados = input_file_split [0]
41     input_posto = input_file_split [1] + "-" + input_file_split [2]
42     sep_por_faixa = False
43
44     local_con = psycopg2.connect(database)
45     local_con.set_isolation_level(psycopg2.extensions.ISOLATION_LEVEL_AUTOCOMMIT)
46
47     with local_con:
48
49         local_cur = local_con.cursor()
50         inicio = datetime.strptime("00:00:00", "%H:%M:%S")
```

```

51
52
53     valores_fluxo = []
54     valores_velocidade = []
55     for periodo in range( int( ( 24.0 * 60.0 ) / float( agregacao_temporal ) ) ):
56         fim = inicio + timedelta(minutes=agregacao_temporal)
57         select_string = f"SELECT {contagem} as contagem, vel_media FROM {db_dados}
WHERE id = '{input_file}' and cast(ts_inicio as time) = '{inicio.time()}'"
58         #print( select_string )
59         local_cur.execute(select_string)
60         result = local_cur.fetchall()
61         inicio = fim
62         #print(result)
63         if len(result) > 0:
64             if len(result) > 1:
65                 pesos = 0
66                 media_vel = 0
67                 for i in range(len(result)):
68                     pesos = pesos + result[i][0]
69                     media_vel = media_vel + result[i][0]*result[i][1]
70                 valores_fluxo.append(pesos) #pesos da media (fluxo)
71                 valores_velocidade.append(media_vel/pesos)#resultado da media
72             else:
73                 valores_fluxo.append(result[0][0])
74                 valores_velocidade.append(result[0][1])
75
76     y = valores_velocidade
77     x = valores_fluxo
78
79     #plt.plot( x, y, "o", markersize=10, color='r', label="%s" % label)
80     plt.plot( y, x, "o", markersize=10, color='b', label="%s" % label)
81
82     plt.xlabel("Velocidade (km/h)")
83     plt.ylabel(f"Fluxo (veh/{agregacao_temporal} min)")
84     # plt.legend(loc="center left", bbox_to_anchor=(1, 0.5), numpoints=1)
85     if input_file_split[1] == "RAM":
86         plt.xlim(right=70)
87     else:
88         plt.xlim(right=100)
89     plt.ylim(bottom=0)
90     plt.xlim(left=0)
91     # plt.xticks(rotation=90)
92     plt.grid(True)
93     plt.savefig(f"graficos/{input_dados}/{input_posto}.png", bbox_inches="tight", dpi=200)
94     plt.clf()
95
96
97 def media_ponderada(dados):
98     arr = np.array(dados)
99     a = np.average(arr,axis=0)
100     return a
101
102 def formulario(arquivo):
103     s_label = str(arquivo)

```

```

104 arquivo_split = s_label.split("-")
105 arquivo_dados = arquivo_split[0]
106 arquivo_posto = arquivo_split[1] + "-" + arquivo_split[2]
107 root = Tk()
108 var = IntVar()
109 frm = root.geometry('800x500')
110 root.eval('tk::PlaceWindow . center')
111 ttk.Label(frm, text=f"{arquivo} | {arquivo_dados} | {arquivo_posto}", font=("Arial",
112     15)) \
113     .place(x=0, y=0)
114 ttk.Label(frm, text="Congestionamento identificado?", font=("Arial", 12)) \
115     .place(x=570, y=80)
116 Radiobutton(frm, text="Sim", font=("Arial", 15), variable=var, value=1).place(x=600, y
117     =100)
118 Radiobutton(frm, text="Nao", font=("Arial", 15), variable=var, value=0).place(x=700, y
119     =100)
120 imagem = Image.open(f"graficos\{arquivo_dados}\{arquivo_posto}.png").resize((563, 445)
121     )
122 img = ImageTk.PhotoImage(imagem)
123 ttk.Label(frm, image=img).place(x=0, y=50)
124 tkinter.Button(frm, text="Proximo", width=15, height=1, font=("Arial", 15), bg='yellow
125     ',
126     command=root.destroy).place(x=600, y=350)
127 root.wait_window()
128 congest = var.get()
129 root.mainloop()
130 return congest
131
132 con = psycopg2.connect( database )
133 con.set_isolation_level( psycopg2.extensions.ISOLATION_LEVEL_AUTOCOMMIT )
134
135 with con:
136     cur = con.cursor()
137     cur.execute (f"select distinct id from {db_dados} order by id")
138     arquivos = cur.fetchall()
139     list_arquivos = []
140     for j in range(len(arquivos)):
141         list_arquivos.append(arquivos[j][0])
142         #print(list_arquivos)
143
144     random.shuffle(list_arquivos)
145
146     for k in list_arquivos:
147         grafico_f_v(k)
148         congestionado = formulario(k)
149         cur.execute(f"update {db_dados} set classificacao = '{congestionado}' where id =
150             '{k}'")

```

C *script* de calibração e validação

```
1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 #=====
3 #Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
4 #Departamento de Engenharia Civil (ECV)
5 #Trabalho de Conclusão de Curso
6 #Autor: Arthur Martins Vitoreti de Oliveira
7 #Script para a calibração dos parâmetros
8 #=====
9 import math
10 import psycopg2
11 import pandas as pd
12 import numpy as np
13 from mpl_toolkits import mplot3d
14 from sklearn.model_selection import train_test_split
15 import numpy as np
16 import matplotlib.pyplot as plt
17 plt.style.use('seaborn-poster')
18 from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures
19 from sklearn.linear_model import LinearRegression, LogisticRegression
20 from sklearn.metrics import roc_curve, roc_auc_score, classification_report,
    accuracy_score, confusion_matrix, r2_score, mean_squared_error, recall_score,
    precision_score
21 from sklearn.svm import SVC
22 #=====
23 database = "host=localhost dbname=postgres user=postgres password=arthur"
24 db_dados = "public.dados_teste"
25 contagem = "(moto + carro + cam_leve + cam_pesado + especial)"
26 dados = []
27 calibracao_cenarios = []
28 calibracao_n = []
29 calibracao_alfa = []
30 calibracao_omega = []
31 verificacao_cenarios = []
32 verificacao_n = []
33 verificacao_alfa = []
34 verificacao_omega = []
35 agregacao_temporal = 15.0
36 from datetime import timedelta
37 from datetime import datetime
38 n = 0.85
39 passo_n = 0.01
40 n_rep = 14
41 alfa = 1.0/100
42 passo_alfa = 0.05/100
43 alfa_rep = 20
44 num_registros = (24.0 * 60.0)/float(agregacao_temporal)
45 #=====
46
47 con = psycopg2.connect( database )
48 con.set_isolation_level( psycopg2.extensions.ISOLATION_LEVEL_AUTOCOMMIT )
49
```

```

50 def classificar(input_file, classificacao, n_inc, alfa_inc):
51
52     resultado = []
53
54     local_con = psycopg2.connect(database)
55     local_con.set_isolation_level(psycopg2.extensions.ISOLATION_LEVEL_AUTOCOMMIT)
56
57     with local_con:
58
59         local_cur = local_con.cursor()
60         inicio = datetime.strptime("00:00:00", "%H:%M:%S")
61         valores_fluxo = []
62         valores_velocidade = []
63         for periodo in range(int(num_registros)):
64             fim = inicio + timedelta(minutes=agregacao_temporal)
65             select_string = f"SELECT {contagem} as contagem, vel_media FROM {db_dados}
66 WHERE id = '{input_file}' and cast(ts_inicio as time) = '{inicio.time()}'"
67             #print(select_string)
68             local_cur.execute(select_string)
69             result = local_cur.fetchall()
70             #print(result)
71             if len(result) > 0:
72                 if len(result) > 1:
73                     pesos = 0
74                     media_vel = 0
75                     for i in range(len(result)):
76                         pesos = pesos + result[i][0]
77                         media_vel = media_vel + result[i][0]*result[i][1]
78                     valores_fluxo.append(pesos) # pesos da media (fluxo)
79                     valores_velocidade.append(media_vel / pesos) # resultado da media
80                 else:
81                     valores_fluxo.append(result[0][0])
82                     valores_velocidade.append(result[0][1])
83
84             y = valores_velocidade
85             x = valores_fluxo
86             y_soma = 0
87             y_soma_perc = 0
88             sort_y = frozenset(y)
89             sort_y = sorted(sort_y, reverse=True)
90             for i in range(0, len(y)):
91                 y_soma = y_soma + y[i]
92                 limit = (math.ceil((n+n_inc) * (num_registros)))
93                 if i < limit:
94                     y_soma_perc = y_soma_perc + sort_y[i]
95
96             y_media_perc = y_soma_perc/math.ceil((n+n_inc) * (num_registros))
97             y_media = y_soma / len(y)
98
99             dif_perc = y_media_perc/y_media - 1
100
101             if dif_perc >= (alfa + alfa_inc):
102                 res_met = 1

```

```

103         else:
104             res_met = 0
105
106         if res_met == classificacao:
107             comp = 1
108         else:
109             comp = 0
110
111
112         resultado.append((n+n_inc),(alfa+alfa_inc),input_file,dif_perc,res_met,
classificacao,comp))
113
114     result = pd.DataFrame(data = resultado, columns=['N','alfa','ID','DIF_PERC', 'MET_CLAS
','VISUAL_CLAS','COMP'])
115     return result
116
117 with con:
118
119     result_completo = pd.DataFrame(data = None, columns=['N','alfa','ID','DIF_PERC', '
MET_CLAS','VISUAL_CLAS','COMP'])
120     result_validacao = pd.DataFrame(data = None, columns=['N','alfa','ID','DIF_PERC', '
MET_CLAS','VISUAL_CLAS','COMP'])
121     cur = con.cursor()
122     # Selecionar cenarios congestionados para gerar base de dados de calibracao e
validacao
123     cur.execute(f"select distinct id, classificacao from {db_dados} where classificacao =
'1'")
124     prov_clas = cur.fetchall()
125     for i in range(0,len(prov_clas)):
126         if i < 25:
127             calibracao_cenarios.append((prov_clas[i][0], prov_clas[i][1]))
128         else:
129             verificacao_cenarios.append((prov_clas[i][0], prov_clas[i][1]))
130     cur.execute(f"select distinct id, classificacao from {db_dados} where classificacao =
'0'")
131     prov_clas = cur.fetchall()
132     for i in range(0,len(prov_clas)):
133         if i < 25:
134             calibracao_cenarios.append((prov_clas[i][0], prov_clas[i][1]))
135         else:
136             verificacao_cenarios.append((prov_clas[i][0], prov_clas[i][1]))
137     conj_calibracao = pd.DataFrame(data =calibracao_cenarios, columns=['ID','VISUAL_CLASS'
])
138     conj_verificacao = pd.DataFrame(data = verificacao_cenarios, columns=['ID','
VISUAL_CLASS'])
139     #print(conj_teste)
140     for n_inc in range(0,n_rep+1):
141
142         for alfa_inc in range(0,alfa_rep+1):
143             result_calibracao = pd.DataFrame(data = None, columns=['N','alfa','ID','
DIF_PERC', 'MET_CLAS','VISUAL_CLAS','COMP'])
144             for i in range (0,len(conj_calibracao)):
145                 #print(f"ID={conj_teste['ID'][i]} e VISUAL_CLASS = {conj_teste['
VISUAL_CLASS'][i]}")

```



```

146         result_metodo = classificar(conj_calibracao['ID'][i], conj_calibracao['
    VISUAL_CLASS'][i], n_inc*passo_n, alfa_inc*passo_alfa)
147         result_calibracao = result_calibracao.append(result_metodo)
148         result_completo = result_completo.append(result_calibracao)
149         omega = result_calibracao['COMP'].sum() / len(conj_calibracao)
150         calibracao_omega.append(omega)
151         calibracao_n.append(n+(n_inc*passo_n))
152         calibracao_alfa.append(alfa+(alfa_inc*passo_alfa))
153 result_completo.to_excel("Calibracao.xlsx")
154
155 fig = plt.figure(figsize=(12,10))
156 ax = plt.axes(projection='3d')
157
158 surf = ax.plot_trisurf(n, alfa, omega, cmap = plt.cm.gist_earth.reversed())
159
160 ax.set_xlabel('N', labelpad = 20)
161 ax.set_ylabel('$\alpha$', labelpad = 25)
162 ax.set_zlabel('$\omega$', labelpad = 20)
163
164 fig.colorbar(surf, shrink=0.5, aspect = 8, pad = 0.1)
165
166 plt.savefig("calibracao3d.png", bbox_inches="tight", dpi=300)
167
168 melhor_omega = max(calibracao_omega)
169 index_melhor_omega = calibracao_omega.index(melhor_omega)
170 melhor_alfa = calibracao_alfa[index_melhor_omega]
171 melhor_n = calibracao_n[index_melhor_omega]
172
173 print(f'A melhor situacao ocorre com N = {melhor_n}, alfa = {melhor_alfa}, com um omega de
    {melhor_omega}')
174
175 for i in range(0, len(conj_verificacao)):
176     # print(f"ID={conj_teste['ID'][i]} e VISUAL_CLASS = {conj_teste['VISUAL_CLASS'][i]}")
177     result_metodo = classificar(conj_verificacao['ID'][i], conj_verificacao['VISUAL_CLASS'
    ][i], melhor_n - n,
178                               melhor_alfa - alfa)
179     result_validacao = result_validacao.append(result_metodo)
180
181 result_validacao.to_excel("Validacao.xlsx")
182 print("FIM")

```

D Tabela de combinações dos fatores α e N avaliados

Tabela 12: Combinações de parâmetros avaliada na calibração do modelo

N	α	μ
0,85	0,01	0,8
0,85	0,0105	0,8
0,85	0,011	0,8
0,85	0,0115	0,84
0,85	0,012	0,86
0,85	0,0125	0,86
0,85	0,013	0,88
0,85	0,0135	0,92
0,85	0,014	0,92
0,85	0,0145	0,92
0,85	0,015	0,92
0,85	0,0155	0,92
0,85	0,016	0,92
0,85	0,0165	0,92
0,85	0,017	0,92
0,85	0,0175	0,92
0,85	0,018	0,92
0,85	0,0185	0,94
0,85	0,019	0,94
0,85	0,0195	0,94
0,85	0,02	0,94
0,86	0,01	0,8
0,86	0,0105	0,8
0,86	0,011	0,84
0,86	0,0115	0,86
0,86	0,012	0,86
0,86	0,0125	0,88
0,86	0,013	0,92
0,86	0,0135	0,92

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 12

<i>N</i>	α	μ
0,86	0,014	0,92
0,86	0,0145	0,92
0,86	0,015	0,92
0,86	0,0155	0,92
0,86	0,016	0,92
0,86	0,0165	0,92
0,86	0,017	0,92
0,86	0,0175	0,92
0,86	0,018	0,94
0,86	0,0185	0,94
0,86	0,019	0,94
0,86	0,0195	0,92
0,86	0,02	0,92
0,87	0,01	0,8
0,87	0,0105	0,86
0,87	0,011	0,86
0,87	0,0115	0,86
0,87	0,012	0,9
0,87	0,0125	0,92
0,87	0,013	0,92
0,87	0,0135	0,92
0,87	0,014	0,92
0,87	0,0145	0,92
0,87	0,015	0,92
0,87	0,0155	0,92
0,87	0,016	0,92
0,87	0,0165	0,92
0,87	0,017	0,94
0,87	0,0175	0,94
0,87	0,018	0,94
0,87	0,0185	0,92
0,87	0,019	0,92
0,87	0,0195	0,94

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 12

<i>N</i>	α	μ
0,87	0,02	0,94
0,88	0,01	0,84
0,88	0,0105	0,86
0,88	0,011	0,9
0,88	0,0115	0,9
0,88	0,012	0,92
0,88	0,0125	0,92
0,88	0,013	0,92
0,88	0,0135	0,92
0,88	0,014	0,92
0,88	0,0145	0,92
0,88	0,015	0,92
0,88	0,0155	0,92
0,88	0,016	0,94
0,88	0,0165	0,94
0,88	0,017	0,94
0,88	0,0175	0,92
0,88	0,018	0,92
0,88	0,0185	0,94
0,88	0,019	0,94
0,88	0,0195	0,94
0,88	0,02	0,96
0,89	0,01	0,86
0,89	0,0105	0,9
0,89	0,011	0,9
0,89	0,0115	0,92
0,89	0,012	0,92
0,89	0,0125	0,92
0,89	0,013	0,92
0,89	0,0135	0,92
0,89	0,014	0,92
0,89	0,0145	0,92
0,89	0,015	0,94

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 12

<i>N</i>	α	μ
0,89	0,0155	0,94
0,89	0,016	0,94
0,89	0,0165	0,92
0,89	0,017	0,92
0,89	0,0175	0,94
0,89	0,018	0,94
0,89	0,0185	0,96
0,89	0,019	0,96
0,89	0,0195	0,96
0,89	0,02	0,96
0,9	0,01	0,9
0,9	0,0105	0,9
0,9	0,011	0,92
0,9	0,0115	0,92
0,9	0,012	0,92
0,9	0,0125	0,92
0,9	0,013	0,92
0,9	0,0135	0,92
0,9	0,014	0,94
0,9	0,0145	0,94
0,9	0,015	0,94
0,9	0,0155	0,92
0,9	0,016	0,94
0,9	0,0165	0,94
0,9	0,017	0,94
0,9	0,0175	0,96
0,9	0,018	0,96
0,9	0,0185	0,96
0,9	0,019	0,96
0,9	0,0195	0,96
0,9	0,02	0,96
0,91	0,01	0,9
0,91	0,0105	0,92

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 12

<i>N</i>	α	μ
0,91	0,011	0,92
0,91	0,0115	0,92
0,91	0,012	0,92
0,91	0,0125	0,94
0,91	0,013	0,94
0,91	0,0135	0,94
0,91	0,014	0,94
0,91	0,0145	0,92
0,91	0,015	0,94
0,91	0,0155	0,94
0,91	0,016	0,94
0,91	0,0165	0,96
0,91	0,017	0,96
0,91	0,0175	0,96
0,91	0,018	0,96
0,91	0,0185	0,96
0,91	0,019	0,94
0,91	0,0195	0,94
0,91	0,02	0,9
0,92	0,01	0,92
0,92	0,0105	0,92
0,92	0,011	0,92
0,92	0,0115	0,94
0,92	0,012	0,94
0,92	0,0125	0,94
0,92	0,013	0,94
0,92	0,0135	0,94
0,92	0,014	0,94
0,92	0,0145	0,94
0,92	0,015	0,94
0,92	0,0155	0,96
0,92	0,016	0,96
0,92	0,0165	0,96

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 12

<i>N</i>	α	μ
0,92	0,017	0,96
0,92	0,0175	0,94
0,92	0,018	0,96
0,92	0,0185	0,94
0,92	0,019	0,92
0,92	0,0195	0,92
0,92	0,02	0,92
0,93	0,01	0,94
0,93	0,0105	0,94
0,93	0,011	0,94
0,93	0,0115	0,94
0,93	0,012	0,94
0,93	0,0125	0,94
0,93	0,013	0,94
0,93	0,0135	0,94
0,93	0,014	0,96
0,93	0,0145	0,96
0,93	0,015	0,96
0,93	0,0155	0,98
0,93	0,016	0,96
0,93	0,0165	0,94
0,93	0,017	0,94
0,93	0,0175	0,92
0,93	0,018	0,92
0,93	0,0185	0,92
0,93	0,019	0,92
0,93	0,0195	0,92
0,93	0,02	0,92
0,94	0,01	0,94
0,94	0,0105	0,94
0,94	0,011	0,94
0,94	0,0115	0,94
0,94	0,012	0,94

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 12

<i>N</i>	α	μ
0,94	0,0125	0,96
0,94	0,013	0,98
0,94	0,0135	0,98
0,94	0,014	0,98
0,94	0,0145	0,94
0,94	0,015	0,94
0,94	0,0155	0,94
0,94	0,016	0,92
0,94	0,0165	0,92
0,94	0,017	0,92
0,94	0,0175	0,92
0,94	0,018	0,92
0,94	0,0185	0,92
0,94	0,019	0,92
0,94	0,0195	0,9
0,94	0,02	0,9
0,95	0,01	0,94
0,95	0,0105	0,96
0,95	0,011	0,98
0,95	0,0115	0,98
0,95	0,012	0,98
0,95	0,0125	0,96
0,95	0,013	0,94
0,95	0,0135	0,94
0,95	0,014	0,92
0,95	0,0145	0,92
0,95	0,015	0,92
0,95	0,0155	0,92
0,95	0,016	0,92
0,95	0,0165	0,92
0,95	0,017	0,9
0,95	0,0175	0,88
0,95	0,018	0,88

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 12

<i>N</i>	α	μ
0,95	0,0185	0,86
0,95	0,019	0,84
0,95	0,0195	0,84
0,95	0,02	0,84
0,96	0,01	0,98
0,96	0,0105	0,96
0,96	0,011	0,94
0,96	0,0115	0,94
0,96	0,012	0,92
0,96	0,0125	0,92
0,96	0,013	0,9
0,96	0,0135	0,9
0,96	0,014	0,9
0,96	0,0145	0,86
0,96	0,015	0,86
0,96	0,0155	0,86
0,96	0,016	0,84
0,96	0,0165	0,84
0,96	0,017	0,84
0,96	0,0175	0,84
0,96	0,018	0,8
0,96	0,0185	0,76
0,96	0,019	0,72
0,96	0,0195	0,7
0,96	0,02	0,68
0,97	0,01	0,9
0,97	0,0105	0,86
0,97	0,011	0,86
0,97	0,0115	0,86
0,97	0,012	0,8
0,97	0,0125	0,78
0,97	0,013	0,7
0,97	0,0135	0,64

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 12

<i>N</i>	α	μ
0,97	0,014	0,58
0,97	0,0145	0,56
0,97	0,015	0,54
0,97	0,0155	0,54
0,97	0,016	0,5
0,97	0,0165	0,5
0,97	0,017	0,5
0,97	0,0175	0,5
0,97	0,018	0,5
0,97	0,0185	0,5
0,97	0,019	0,5
0,97	0,0195	0,5
0,97	0,02	0,5
0,98	0,01	0,5
0,98	0,0105	0,5
0,98	0,011	0,5
0,98	0,0115	0,5
0,98	0,012	0,5
0,98	0,0125	0,5
0,98	0,013	0,5
0,98	0,0135	0,5
0,98	0,014	0,5
0,98	0,0145	0,5
0,98	0,015	0,5
0,98	0,0155	0,5
0,98	0,016	0,5
0,98	0,0165	0,5
0,98	0,017	0,5
0,98	0,0175	0,5
0,98	0,018	0,5
0,98	0,0185	0,5
0,98	0,019	0,5
0,98	0,0195	0,5

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 12

N	α	μ
0,98	0,02	0,5
0,99	0,01	0,5
0,99	0,0105	0,5
0,99	0,011	0,5
0,99	0,0115	0,5
0,99	0,012	0,5
0,99	0,0125	0,5
0,99	0,013	0,5
0,99	0,0135	0,5
0,99	0,014	0,5
0,99	0,0145	0,5
0,99	0,015	0,5
0,99	0,0155	0,5
0,99	0,016	0,5
0,99	0,0165	0,5
0,99	0,017	0,5
0,99	0,0175	0,5
0,99	0,018	0,5
0,99	0,0185	0,5
0,99	0,019	0,5
0,99	0,0195	0,5
0,99	0,02	0,5

E Tabela de resultados da validação

Tabela 13: Resultado do processo de validação do modelo

ID	δ	Classificação método	Classificação visual	Comparação resultados
dados_0022-RAM-06	0,0287	1	1	1
dados_0023-RAM-01	0,0475	1	1	1
dados_0023-RAM-06	0,0354	1	1	1
dados_0024-RAM-01	0,047	1	1	1
dados_0024-RAM-06	0,0244	1	1	1
dados_0025-RAM-01	0,0448	1	1	1
dados_0025-RAM-06	0,0439	1	1	1
dados_0025-ROD-02	0,0287	1	1	1
dados_0026-RAM-01	0,0484	1	1	1
dados_0026-RAM-06	0,0218	1	1	1
dados_0027-RAM-01	0,046	1	1	1
dados_0027-RAM-06	0,0425	1	1	1
dados_0028-RAM-01	0,0451	1	1	1
dados_0028-RAM-06	0,041	1	1	1
dados_0028-RAM-07	0,0226	1	1	1
dados_0028-ROD-02	0,0112	0	1	0
dados_0029-RAM-01	0,0455	1	1	1
dados_0029-RAM-06	0,0433	1	1	1
dados_0030-RAM-01	0,0459	1	1	1
dados_0030-RAM-06	0,0377	1	1	1
dados_0030-ROD-03	0,0134	0	1	0
dados_0031-RAM-01	0,0473	1	1	1
dados_0031-RAM-06	0,0395	1	1	1
dados_0032-RAM-01	0,0456	1	1	1
dados_0032-RAM-06	0,039	1	1	1
dados_0033-RAM-01	0,0447	1	1	1
dados_0033-RAM-06	0,0424	1	1	1
dados_0033-RAM-07	0,0285	1	1	1

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 13

ID	δ	Classificação método	Classificação visual	Comparação resultados
dados_0034-RAM-01	0,0441	1	1	1
dados_0034-RAM-06	0,0438	1	1	1
dados_0034-RAM-07	0,0191	1	1	1
dados_0034-ROD-02	0,0152	0	1	0
dados_0034-ROD-03	0,0112	0	1	0
dados_0035-RAM-01	0,0475	1	1	1
dados_0035-RAM-06	0,0202	1	1	1
dados_0036-RAM-01	0,0489	1	1	1
dados_0036-RAM-06	0,038	1	1	1
dados_0036-ROD-03	0,0109	0	1	0
dados_0037-RAM-01	0,0487	1	1	1
dados_0037-RAM-06	0,033	1	1	1
dados_0037-ROD-03	0,011	0	1	0
dados_0038-RAM-01	0,0453	1	1	1
dados_0038-RAM-06	0,0424	1	1	1
dados_0038-RAM-07	0,0082	0	1	0
dados_0038-ROD-02	0,0394	1	1	1
dados_0039-RAM-01	0,048	1	1	1
dados_0039-RAM-06	0,0261	1	1	1
dados_0040-RAM-01	0,0477	1	1	1
dados_0040-RAM-06	0,0401	1	1	1
dados_0003-RAM-07	0,0028	0	0	1
dados_0003-ROD-01	0,0069	0	0	1
dados_0003-ROD-02	0,0017	0	0	1
dados_0003-ROD-03	0,0066	0	0	1
dados_0004-RAM-01	0,0054	0	0	1
dados_0004-RAM-02	0,0038	0	0	1
dados_0004-RAM-03	0,0073	0	0	1
dados_0004-RAM-04	0,0052	0	0	1
dados_0004-RAM-05	0,0037	0	0	1
dados_0004-RAM-06	0,0045	0	0	1
dados_0004-RAM-07	0,0046	0	0	1

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 13

ID	δ	Classificação método	Classificação visual	Comparação resultados
dados_0004-ROD-01	0,0071	0	0	1
dados_0004-ROD-02	0,0022	0	0	1
dados_0004-ROD-03	0,0096	0	0	1
dados_0005-RAM-02	0,0049	0	0	1
dados_0005-RAM-03	0,0144	0	0	1
dados_0005-RAM-04	0,0047	0	0	1
dados_0005-ROD-01	0,0142	0	0	1
dados_0006-RAM-01	0,0058	0	0	1
dados_0006-RAM-02	0,0033	0	0	1
dados_0006-RAM-03	0,0064	0	0	1
dados_0006-RAM-04	0,0036	0	0	1
dados_0006-RAM-05	0,0046	0	0	1
dados_0006-RAM-06	0,0042	0	0	1
dados_0006-RAM-07	0,0017	0	0	1
dados_0006-ROD-01	0,0073	0	0	1
dados_0006-ROD-02	0,0018	0	0	1
dados_0006-ROD-03	0,0087	0	0	1
dados_0007-RAM-01	0,0134	0	0	1
dados_0007-RAM-02	0,0041	0	0	1
dados_0007-RAM-04	0,0042	0	0	1
dados_0007-ROD-02	0,0112	0	0	1
dados_0007-ROD-03	0,0297	1	0	0
dados_0008-RAM-01	0,0145	0	0	1
dados_0008-RAM-02	0,0046	0	0	1
dados_0008-RAM-03	0,0106	0	0	1
dados_0008-RAM-04	0,0033	0	0	1
dados_0008-ROD-01	0,0138	0	0	1
dados_0008-ROD-02	0,003	0	0	1
dados_0009-RAM-01	0,0071	0	0	1
dados_0009-RAM-02	0,0034	0	0	1
dados_0009-RAM-03	0,0111	0	0	1
dados_0009-RAM-04	0,0041	0	0	1

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 13

ID	δ	Classificação método	Classificação visual	Comparação resultados
dados_0009-RAM-05	0,0049	0	0	1
dados_0009-RAM-06	0,004	0	0	1
dados_0009-RAM-07	0,0016	0	0	1
dados_0009-ROD-01	0,0078	0	0	1
dados_0009-ROD-02	0,002	0	0	1
dados_0009-ROD-03	0,0095	0	0	1
dados_0010-RAM-01	0,0066	0	0	1
dados_0010-RAM-02	0,0031	0	0	1
dados_0010-RAM-03	0,0063	0	0	1
dados_0010-RAM-04	0,0019	0	0	1
dados_0010-RAM-05	0,0044	0	0	1
dados_0010-RAM-06	0,0039	0	0	1
dados_0010-RAM-07	0,0014	0	0	1
dados_0010-ROD-01	0,0062	0	0	1
dados_0010-ROD-02	0,0016	0	0	1
dados_0010-ROD-03	0,0061	0	0	1
dados_0011-RAM-01	0,0059	0	0	1
dados_0011-RAM-02	0,0046	0	0	1
dados_0011-RAM-03	0,008	0	0	1
dados_0011-RAM-04	0,0051	0	0	1
dados_0011-RAM-05	0,0041	0	0	1
dados_0011-RAM-06	0,0062	0	0	1
dados_0011-RAM-07	0,0018	0	0	1
dados_0011-ROD-01	0,0064	0	0	1
dados_0011-ROD-02	0,0017	0	0	1
dados_0011-ROD-03	0,0107	0	0	1
dados_0012-RAM-01	0,0053	0	0	1
dados_0012-RAM-02	0,002	0	0	1
dados_0012-RAM-03	0,0071	0	0	1
dados_0012-RAM-04	0,0051	0	0	1
dados_0012-RAM-05	0,0032	0	0	1
dados_0012-RAM-06	0,0051	0	0	1

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 13

ID	δ	Classificação método	Classificação visual	Comparação resultados
dados_0012-RAM-07	0,0031	0	0	1
dados_0012-ROD-01	0,0069	0	0	1
dados_0012-ROD-02	0,0018	0	0	1
dados_0012-ROD-03	0,0082	0	0	1
dados_0013-RAM-01	0,0104	0	0	1
dados_0013-RAM-02	0,0044	0	0	1
dados_0013-RAM-03	0,0123	0	0	1
dados_0013-RAM-04	0,0031	0	0	1
dados_0013-RAM-05	0,0046	0	0	1
dados_0013-RAM-06	0,0067	0	0	1
dados_0013-ROD-01	0,0092	0	0	1
dados_0013-ROD-02	0,0024	0	0	1
dados_0013-ROD-03	0,0169	1	0	0
dados_0014-RAM-01	0,0084	0	0	1
dados_0014-RAM-02	0,0036	0	0	1
dados_0014-RAM-03	0,0088	0	0	1
dados_0014-RAM-04	0,0031	0	0	1
dados_0014-RAM-05	0,005	0	0	1
dados_0014-RAM-06	0,0045	0	0	1
dados_0014-RAM-07	0,0023	0	0	1
dados_0014-ROD-01	0,0087	0	0	1
dados_0014-ROD-02	0,0021	0	0	1
dados_0014-ROD-03	0,0098	0	0	1
dados_0015-RAM-01	0,0082	0	0	1
dados_0015-RAM-02	0,0038	0	0	1
dados_0015-RAM-03	0,0048	0	0	1
dados_0015-RAM-04	0,0034	0	0	1
dados_0015-RAM-05	0,0043	0	0	1
dados_0015-RAM-06	0,0051	0	0	1
dados_0015-RAM-07	0,0046	0	0	1
dados_0015-ROD-01	0,0069	0	0	1
dados_0015-ROD-02	0,0017	0	0	1

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 13

ID	δ	Classificação método	Classificação visual	Comparação resultados
dados_0015-ROD-03	0,0094	0	0	1
dados_0016-RAM-01	0,0072	0	0	1
dados_0016-RAM-02	0,0039	0	0	1
dados_0016-RAM-03	0,0065	0	0	1
dados_0016-RAM-04	0,0036	0	0	1
dados_0016-RAM-05	0,0041	0	0	1
dados_0016-RAM-06	0,005	0	0	1
dados_0016-RAM-07	0,0038	0	0	1
dados_0016-ROD-01	0,0074	0	0	1
dados_0016-ROD-02	0,0018	0	0	1
dados_0016-ROD-03	0,0088	0	0	1
dados_0017-RAM-01	0,0113	0	0	1
dados_0017-RAM-02	0,0031	0	0	1
dados_0017-RAM-04	0,0031	0	0	1
dados_0017-RAM-06	0,0114	0	0	1
dados_0017-ROD-01	0,0106	0	0	1
dados_0017-ROD-02	0,008	0	0	1
dados_0018-RAM-01	0,0083	0	0	1
dados_0018-RAM-02	0,0037	0	0	1
dados_0018-RAM-03	0,0106	0	0	1
dados_0018-RAM-04	0,0038	0	0	1
dados_0018-RAM-05	0,0057	0	0	1
dados_0018-RAM-06	0,0064	0	0	1
dados_0018-ROD-01	0,0086	0	0	1
dados_0018-ROD-02	0,0021	0	0	1
dados_0018-ROD-03	0,0132	0	0	1
dados_0019-RAM-01	0,008	0	0	1
dados_0019-RAM-02	0,0031	0	0	1
dados_0019-RAM-03	0,0075	0	0	1
dados_0019-RAM-04	0,0045	0	0	1
dados_0019-RAM-05	0,0046	0	0	1
dados_0019-RAM-06	0,0052	0	0	1

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 13

ID	δ	Classificação método	Classificação visual	Comparação resultados
dados_0019-RAM-07	0,0099	0	0	1
dados_0019-ROD-01	0,0078	0	0	1
dados_0019-ROD-02	0,0021	0	0	1
dados_0019-ROD-03	0,0115	0	0	1
dados_0020-RAM-01	0,0069	0	0	1
dados_0020-RAM-02	0,003	0	0	1
dados_0020-RAM-03	0,0089	0	0	1
dados_0020-RAM-04	0,0041	0	0	1
dados_0020-RAM-05	0,0039	0	0	1
dados_0020-RAM-06	0,0045	0	0	1
dados_0020-RAM-07	0,0075	0	0	1
dados_0020-ROD-01	0,0084	0	0	1
dados_0020-ROD-02	0,0022	0	0	1
dados_0020-ROD-03	0,0112	0	0	1
dados_0021-RAM-02	0,0007	0	0	1
dados_0021-RAM-03	0,0076	0	0	1
dados_0021-RAM-04	0,0005	0	0	1
dados_0021-RAM-05	0,0038	0	0	1
dados_0021-RAM-07	0,0014	0	0	1
dados_0021-ROD-01	0,0092	0	0	1
dados_0021-ROD-02	0,0014	0	0	1
dados_0021-ROD-03	0,0107	0	0	1
dados_0022-RAM-02	0,0022	0	0	1
dados_0022-RAM-03	0,0063	0	0	1
dados_0022-RAM-04	0,0012	0	0	1
dados_0022-RAM-05	0,0037	0	0	1
dados_0022-RAM-07	0,0017	0	0	1
dados_0022-ROD-01	0,0102	0	0	1
dados_0022-ROD-02	0,0017	0	0	1
dados_0022-ROD-03	0,0114	0	0	1
dados_0023-RAM-02	0,002	0	0	1
dados_0023-RAM-03	0,0064	0	0	1

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 13

ID	δ	Classificação método	Classificação visual	Comparação resultados
dados_0023-RAM-04	0,0006	0	0	1
dados_0023-RAM-05	0,0042	0	0	1
dados_0023-RAM-07	0,0005	0	0	1
dados_0023-ROD-01	0,0102	0	0	1
dados_0023-ROD-02	0,0014	0	0	1
dados_0023-ROD-03	0,0104	0	0	1
dados_0024-RAM-02	0,0011	0	0	1
dados_0024-RAM-03	0,0051	0	0	1
dados_0024-RAM-04	0,0008	0	0	1
dados_0024-RAM-05	0,0032	0	0	1
dados_0024-RAM-07	0,0002	0	0	1
dados_0024-ROD-01	0,0104	0	0	1
dados_0024-ROD-02	0,0017	0	0	1
dados_0024-ROD-03	0,011	0	0	1
dados_0025-RAM-02	0,0029	0	0	1
dados_0025-RAM-03	0,0096	0	0	1
dados_0025-RAM-04	0,0006	0	0	1
dados_0025-RAM-05	0,006	0	0	1
dados_0025-RAM-07	0,0119	0	0	1
dados_0025-ROD-01	0,0084	0	0	1
dados_0025-ROD-03	0,0134	0	0	1
dados_0026-RAM-02	0,0013	0	0	1
dados_0026-RAM-03	0,0047	0	0	1
dados_0026-RAM-04	0,0011	0	0	1
dados_0026-RAM-05	0,0037	0	0	1
dados_0026-RAM-07	0,0012	0	0	1
dados_0026-ROD-01	0,01	0	0	1
dados_0026-ROD-02	0,0016	0	0	1
dados_0026-ROD-03	0,0112	0	0	1
dados_0027-RAM-02	0,002	0	0	1
dados_0027-RAM-03	0,0079	0	0	1
dados_0027-RAM-04	0,0008	0	0	1

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 13

ID	δ	Classificação método	Classificação visual	Comparação resultados
dados_0027-RAM-05	0,0065	0	0	1
dados_0027-RAM-07	0,0096	0	0	1
dados_0027-ROD-01	0,0087	0	0	1
dados_0027-ROD-02	0,0022	0	0	1
dados_0027-ROD-03	0,0113	0	0	1
dados_0028-RAM-02	0,0035	0	0	1
dados_0028-RAM-03	0,0081	0	0	1
dados_0028-RAM-04	0,0006	0	0	1
dados_0028-RAM-05	0,0052	0	0	1
dados_0028-ROD-01	0,0076	0	0	1
dados_0028-ROD-03	0,0109	0	0	1
dados_0029-RAM-02	0,0034	0	0	1
dados_0029-RAM-03	0,0069	0	0	1
dados_0029-RAM-04	0,0002	0	0	1
dados_0029-RAM-05	0,0053	0	0	1
dados_0029-RAM-07	0,0049	0	0	1
dados_0029-ROD-01	0,0085	0	0	1
dados_0029-ROD-02	0,0022	0	0	1
dados_0029-ROD-03	0,011	0	0	1
dados_0030-RAM-02	0,0012	0	0	1
dados_0030-RAM-03	0,0086	0	0	1
dados_0030-RAM-04	0,001	0	0	1
dados_0030-RAM-05	0,0047	0	0	1
dados_0030-RAM-07	0,0049	0	0	1
dados_0030-ROD-01	0,0093	0	0	1
dados_0030-ROD-02	0,0018	0	0	1
dados_0031-RAM-02	0,0018	0	0	1
dados_0031-RAM-03	0,0075	0	0	1
dados_0031-RAM-04	0,0008	0	0	1
dados_0031-RAM-05	0,0046	0	0	1
dados_0031-RAM-07	0,0025	0	0	1
dados_0031-ROD-01	0,0097	0	0	1

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 13

ID	δ	Classificação método	Classificação visual	Comparação resultados
dados_0031-ROD-02	0,0022	0	0	1
dados_0031-ROD-03	0,0113	0	0	1
dados_0032-RAM-02	0,002	0	0	1
dados_0032-RAM-03	0,0098	0	0	1
dados_0032-RAM-04	0,0009	0	0	1
dados_0032-RAM-05	0,0051	0	0	1
dados_0032-RAM-07	0,0111	0	0	1
dados_0032-ROD-01	0,0084	0	0	1
dados_0032-ROD-02	0,0027	0	0	1
dados_0032-ROD-03	0,0107	0	0	1
dados_0033-RAM-02	0,002	0	0	1
dados_0033-RAM-03	0,0101	0	0	1
dados_0033-RAM-04	0,0006	0	0	1
dados_0033-RAM-05	0,0049	0	0	1
dados_0033-ROD-01	0,0077	0	0	1
dados_0033-ROD-02	0,0082	0	0	1
dados_0033-ROD-03	0,0117	0	0	1
dados_0034-RAM-02	0,0028	0	0	1
dados_0034-RAM-03	0,0092	0	0	1
dados_0034-RAM-04	0,0005	0	0	1
dados_0034-RAM-05	0,0052	0	0	1
dados_0034-ROD-01	0,0074	0	0	1
dados_0035-RAM-02	0,0013	0	0	1
dados_0035-RAM-03	0,0066	0	0	1
dados_0035-RAM-04	0,0008	0	0	1
dados_0035-RAM-05	0,0051	0	0	1
dados_0035-RAM-07	0,0003	0	0	1
dados_0035-ROD-01	0,0097	0	0	1
dados_0035-ROD-02	0,0013	0	0	1
dados_0035-ROD-03	0,0115	0	0	1
dados_0036-RAM-02	0,0012	0	0	1
dados_0036-RAM-03	0,0099	0	0	1

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 13

ID	δ	Classificação método	Classificação visual	Comparação resultados
dados_0036-RAM-04	0,0006	0	0	1
dados_0036-RAM-05	0,0037	0	0	1
dados_0036-RAM-07	0,0012	0	0	1
dados_0036-ROD-01	0,0094	0	0	1
dados_0036-ROD-02	0,0017	0	0	1
dados_0037-RAM-02	0,0029	0	0	1
dados_0037-RAM-03	0,0069	0	0	1
dados_0037-RAM-04	0,001	0	0	1
dados_0037-RAM-05	0,0044	0	0	1
dados_0037-RAM-07	0,0024	0	0	1
dados_0037-ROD-01	0,0101	0	0	1
dados_0037-ROD-02	0,002	0	0	1
dados_0038-RAM-02	0,0019	0	0	1
dados_0038-RAM-03	0,0099	0	0	1
dados_0038-RAM-04	0,0008	0	0	1
dados_0038-RAM-05	0,0047	0	0	1
dados_0038-ROD-01	0,0086	0	0	1
dados_0038-ROD-03	0,013	0	0	1
dados_0039-RAM-02	0,0013	0	0	1
dados_0039-RAM-03	0,0078	0	0	1
dados_0039-RAM-04	0,0007	0	0	1
dados_0039-RAM-05	0,0034	0	0	1
dados_0039-RAM-07	0,0007	0	0	1
dados_0039-ROD-01	0,0103	0	0	1
dados_0039-ROD-02	0,0015	0	0	1
dados_0039-ROD-03	0,0106	0	0	1
dados_0040-RAM-02	0,0021	0	0	1
dados_0040-RAM-03	0,0063	0	0	1
dados_0040-RAM-04	0,0008	0	0	1
dados_0040-RAM-05	0,0045	0	0	1
dados_0040-RAM-07	0,0052	0	0	1
dados_0040-ROD-01	0,009	0	0	1

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 13

ID	δ	Classificação método	Classificação visual	Comparação resultados
dados_0040-ROD-02	0,0017	0	0	1
dados_0040-ROD-03	0,0102	0	0	1