



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

**CAIO GUSTAVO COELHO**  
**GUIMARÃES**

**ANÁLISE DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A VELOCIDADE DE VEÍCULOS –**  
**UM ESTUDO DA CIDADE DE FORTALEZA**

**FORTALEZA**  
**2021**  
**CAIO GUSTAVO COELHO GUIMARÃES**

ANÁLISE DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A VELOCIDADE DE VEÍCULOS – UM  
ESTUDO DA CIDADE DE FORTALEZA

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Ph.D. Francisco Moraes de Oliveira Neto.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

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

---

- G977a**    **Guimarães, Caio Gustavo Coelho.**  
    *Análise dos fatores que influenciam a velocidade de veículos : um estudo da cidade de Fortaleza / Caio Gustavo Coelho Guimarães. – 2021.*  
    60 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2021.  
    Orientação: Prof. Dr. Francisco Moraes de Oliveira Neto.
1. Velocidade média de percurso. 2. Relação Velocidade x Volume. 3. Análise de desempenho. 4. Regressão Múltipla. 5. Fiscalização Eletrônica. I. Título.
- CDD 620
-

ANÁLISE DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A VELOCIDADE DE VEÍCULOS – UM  
ESTUDO DA CIDADE DE FORTALEZA

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Aprovada em: 01/04/2021

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

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

---

Eng. Luana Viana de Paula Cabral  
Certare Engenharia e Consultoria

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe, por todo o apoio emocional e financeiro, por todos os ensinamentos, dedicação, esforço, pelo amor e carinho incondicional que me devotou durante toda a minha trajetória, por ter acreditado em mim e pela minha vida.

Aos meus avós maternos, por terem me criado como pais, por todo o amor que me deram, por terem acreditado em mim e me apoiado durante toda a minha vida.

Ao meu pai que mesmo longe sempre me incentivou e apoiou.

Ao meu segundo pai, Deoclécio, pelos ensinamentos e experiências que me proporcionou e que muito me engrandeceram e por todo o carinho e apoio.

À Aline, por todo o companheirismo e dedicação durante toda a graduação, pelas conversas e pelas experiências que impactaram fortemente na pessoa que me tornei, pelo amor dedicado e por todo apoio emocional.

A todos os meus professores da escola Governador Adauto Bezerra, em especial Isaura, Fernando, Andreza, Alana, Mario, Otacílio e Humberto, pela educação que me ajudarão a conquistar, pelas conversas e experiências, pelos direcionamentos e por terem aberto os meus olhos para mundo, a eles todo o meu respeito e admiração.

Ao Professor Moraes, por ter me apoiado, inspirado e me ensinado durante praticamente metade da graduação, por todo o apoio nesse trabalho, pelo tempo empenhado, pelas conversas, ensinamentos e por toda a humanidade e respeito com que me orientou.

Ao Professor Manoel e Bruno por terem me inspirado desde o começo da Graduação a ingressar na área dos Transportes.

Aos amigos, Gabriela Rezende, Everton, Tereza, Letícia, Sara P, Felipe, Cacau, Mariana, Ranielly, Joelia, Brenda, Bia, Diego, Sara J, Denilson, Bruna, por todos os momentos divertidos, pelas brincadeiras, e pelo apoio emocional que me ajudou a suportar os momentos difíceis e tornar a graduação uma experiência mais leve, que merece ser lembrada.

Aos amigos do GTTEMA, João, Kaio, Gabriel, Joana e Eugênio, que me ensinaram muito durante a experiência da iniciação científica.

Aos amigos da Certare, em especial Larinha, Lara, Daniel, Luana, Rebeca, Tamara, Thais, Fonte, Raquel, Talyson e Wellington, por todo o crescimento técnico que me proporcionaram, pelo desenvolvimento como profissional e por tornarem os dias de trabalho mais felizes.

E também aos professores Iran, Áurea e Gonzaga que me inspiraram e extraíram o melhor de mim durante a graduação.

## RESUMO

Nos últimos anos, assim como muitas cidades brasileiras, Fortaleza experimentou um crescimento considerável e desordenado, o número de veículos individuais cresceu consideravelmente enquanto o uso dos transportes coletivos tem diminuído. Essa realidade, dentre outros fatores, ocasionou problemas de mobilidade na cidade, culminando em elevados tempos de viagem. Diversos fatores influenciam para que esse tempo varie, desde fatores relacionados a demanda assim como as configurações da oferta do sistema, qualidade das vias, presença de faixas exclusivas e ciclovias, uso do solo, dentre outros. Em contraposição ao problema do aumento da complexidade do sistema, há também uma maior e melhor coleta de dados de trânsito, como é o exemplo dos equipamentos de detecção e fiscalização automática de veículos, que podem revelar um retrato do desempenho do sistema no espaço e no tempo. Nesse sentido, este trabalho busca usar os dados de fiscalização para compreender quais fatores podem influenciar o desempenho do sistema de transportes e da velocidade dos veículos no município de Fortaleza, além de procurar articular como essa influência ocorre. Com este estudo pretende-se melhorar a compreensão do fenômeno e prover aos tomadores de decisão ferramental para melhor solucionar os problemas de trânsito e mobilidade. O método está dividido em seis etapas, começando com a consolidação dos dados de Fiscalização Eletrônica, obtenção e tratamento dos dados secundários, caracterização espacial da velocidade, análise gráfica da influência das variáveis na relação velocidade/volume, análise da influência dos parâmetros através de um modelo de regressão múltipla e por fim uma segunda análise da influência dos fatores na relação velocidade/volume. Os resultados possibilitaram entender como as variáveis independentes estão relacionadas a variação espacial da velocidade, além da influência de alguns desses fatores na relação velocidade/volume. Foi possível evidenciar o efeito de variáveis importantes como: número de faixas, uso do solo, faixa exclusiva, densidade de semáforos, dentre outros no desempenho do sistema de transporte de Fortaleza.

**Palavras-chave:** Análise de desempenho, Dados de Fiscalização Eletrônica, Regressão Múltipla, Velocidade média de percurso, relação Velocidade x Volume.

## ABSTRACT

In recent years, like many Brazilian cities, Fortaleza has experienced an increase and disorderly growth. The number of individual vehicles has grown considerably while the use of public transport has decreased. This reality, and other factors, caused mobility problems in the city, culminating in long travel times. Several factors affect the travel time variability, from factors related to demand as well as configurations of the system's supply, quality of roads, presence of exclusive lanes and cycle paths, land use, among others. In contrast to the problem of increasing the complexity of the system, there is also a greater and better collection of traffic data, as is the example of automatic vehicle detection and surveillance equipment, which can reveal a picture of the system's performance in space and time. In this sense, this work seeks to use traffic sensor data to understand which factors may influence the performance of the transport system and the speed of vehicles in the city of Fortaleza, in addition to seeking to articulate how this influence occurs. The aim of this study is to improve the understanding of the phenomenon and provide the decision makers better tools to analyze and solve mobility problems. The method is divided into six stages, starting with the consolidation of the Electronic Surveillance data, obtaining and treating the secondary data, spatial characterization of the speed, graphical analysis of the influence of the variables on the speed / volume ratio, analysis of the influence of the parameters through a multiple regression model and finally a second analysis of the influence of factors on the speed / volume ratio. The results made it possible to understand how the independent variables are related to the spatial variation of speed, and the influence of some factors on the speed / volume ratio. It was possible to evidence the effect of important variables such as: number of lanes, land use, bus lane, traffic light density, among others on the performance of the Fortaleza's traffic network.

**Keywords:** Traffic performance analysis, Traffic sensor data, Multiple Regression, Average travel speed, Speed x Volume ratio.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Concentração de atividades econômicas em Fortaleza.....	12
Figura 2: Associações iniciais definidas na etapa de obtenção dos dados.....	27
Figura 3: Modelo conceitual da relação das variáveis independentes com a velocidade, elaborado com base na revisão da literatura.....	28
Figura 4: Indicadores de uso do solo investigados.....	30
Figura 5: Metodologia de remoção das observações em condição congestionada.....	31
Figura 6: Exemplo de conjunto de dados removidos da análise.....	37
Figura 7: Trechos de análise consolidados.....	38
Figura 8: Velocidade de percurso no pico de volume da noite.....	39
Figura 9: Taxa de uso comercial vs Velocidade de percurso.....	40
Figura 10: Fluxo por faixa vs Velocidade média de percurso.....	40
Figura 11: Número de faixas de tráfego vs Velocidade média de percurso.....	41
Figura 12: Presença de estrutura cicloviária vs Velocidade média de percurso.....	41
Figura 13: Presença de faixas exclusivas de ônibus vs Velocidade média de percurso.....	42
Figura 14: Tipo de sentido de tráfego vs Velocidade média de percurso.....	43
Figura 15: Densidade de semáforos vs Velocidade média de percurso.....	43
Figura 16: Densidade de paradas de ônibus vs Velocidade média de percurso.....	44
Figura 17: Relação Fluxo x Velocidade graduado pela taxa de uso comercial.....	45
Figura 18: Relação Fluxo x Velocidade categorizado pelo número de faixas.....	46
Figura 19: Relação Fluxo x Velocidade categorizado pela presença de estrutura cicloviária.....	46
Figura 20: Relação Fluxo x Velocidade categorizado pela presença de faixa exclusiva.....	47
Figura 21: Relação Fluxo x Velocidade graduado pela densidade de semáforos.....	48
Figura 22: Relação Fluxo x Velocidade graduado pela densidade de paradas de ônibus.....	49
Figura 23: Matriz de correlação entre variáveis.....	52

## LISTA DE TABELAS

	9
Tabela 1: Resumo das contribuições das referências.....	24
Tabela 2: Resultado da regressão múltipla para a velocidade de percurso.....	50
Tabela 3: Fator de Inflação da Variância.....	52
Tabela 4: Resultado da regressão múltipla para a taxa $v/v$ .....	53

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
ITS	Sistemas Inteligentes de Transporte
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
EFE	Equipamento de Fiscalização Eletrônica
PGV	Polo Gerador de Viagens
ANTP	Agência Nacional do Transporte Público
CCP	Coefficiente de Correlação de Pearson
RIST	Relatório de Impacto no Sistema de Transportes
FHWA	Federal Highway Administration

**SUMÁRIO**

1	INTRODUÇÃO.....	12
---	-----------------	----

	11
1.1 Contextualização.....	12
1.2 Problemática.....	14
1.3 Objetivos.....	15
2 MODELAGEM DA VELOCIDADE EM VIAS URBANAS E RURAIS.....	16
2.1 Modelagem da velocidade no fluxo livre.....	17
2.2 Modelagem da velocidade para qualquer fluxo.....	20
2.3 Conclusão.....	22
3 MÉTODO.....	25
3.1 Consolidação dos dados de Fiscalização Eletrônica.....	26
3.2 Obtenção e tratamento dos dados.....	27
3.3 Caracterização espacial da velocidade.....	33
3.4 Análise das curvas velocidade/volume.....	34
3.5 Modelo de regressão linear múltipla com a velocidade.....	34
3.6 Modelo de regressão linear múltipla com a taxa velocidade/volume.....	35
4 RESULTADOS.....	36
4.1 Caracterização espacial dos corredores.....	36
4.1.1 Uso do Solo.....	39
4.1.2 Fluxo.....	40
4.1.3 Número de faixas de tráfego.....	41
4.1.4 Estrutura cicloviária.....	41
4.1.5 Faixa exclusiva.....	42
4.1.6 Tipo de sentido de tráfego.....	42
4.1.7 Densidade de Semáforos.....	43
4.1.8 Densidade de paradas de ônibus.....	44
4.2 Relação da velocidade com o volume.....	44
4.3 Modelo de regressão para a velocidade.....	50
4.4 Modelo de regressão para a sensibilidade da velocidade ao volume.....	52
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

O tempo de deslocamento cresceu consideravelmente nas metrópoles brasileiras nos últimos anos (PEREIRA; SCHWANEN, 2013), esse fenômeno tem implicações fortíssimas no bem estar da população, uma vez que sobra menos tempo para atividades de lazer, esportes e convívio social, práticas essas que são fundamentais ao bem estar subjetivo da população.

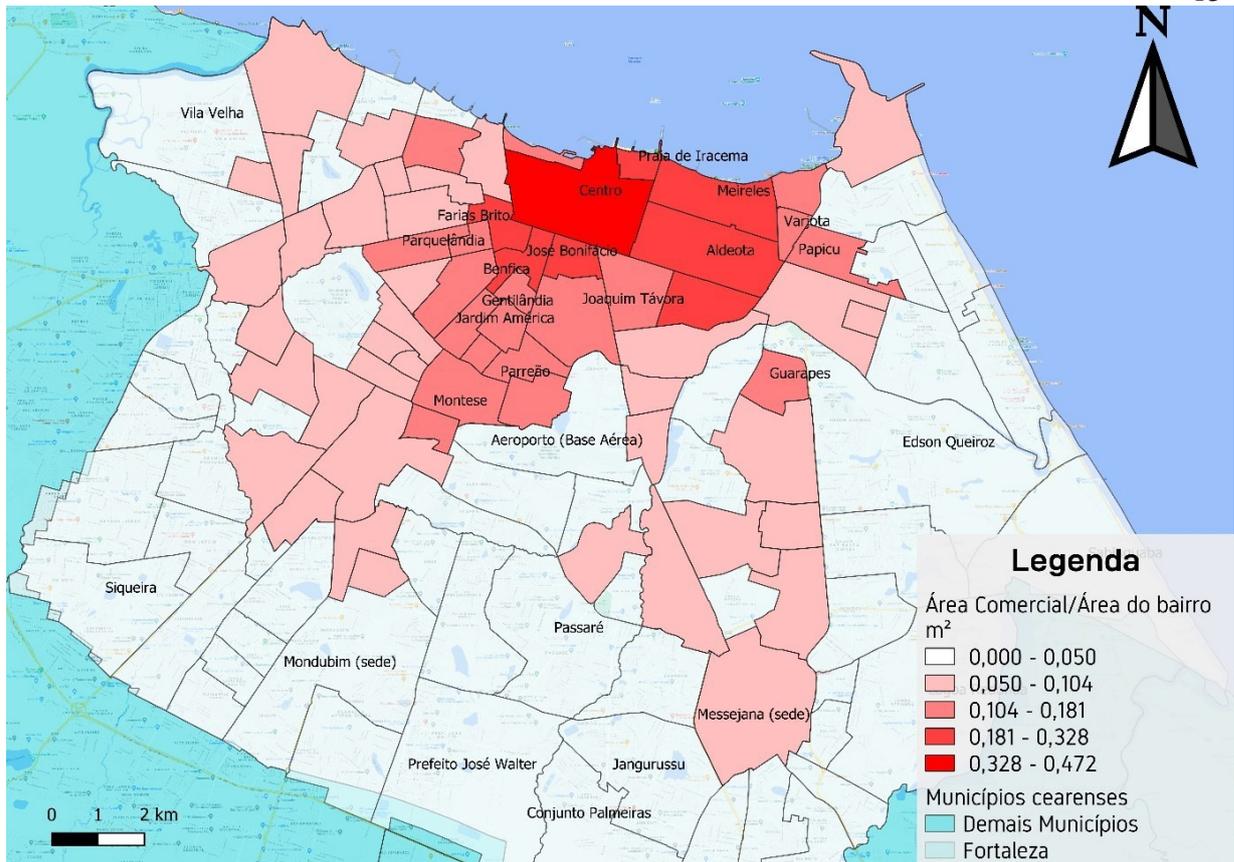
Além disso, esse crescimento ocorre de forma desigual para os diferentes extratos sociais, ainda segundo Pereira e Schwanen (2013), a população brasileira de baixa renda leva mais tempo nas viagens casa trabalho que a população de alta renda, a título de exemplo de um caso mais grave, no Distrito Federal em 2008 e 2009 as viagens chegaram a ser 75% mais demoradas para os grupos mais pobres. Isso possivelmente se deve ao fato dessa população estar marginalizada em regiões da cidade com baixa oferta de empregos acarretando viagens mais longas para alcançar os postos de trabalho.

“Existe um mecanismo de criação de assentamentos precários no Brasil, principalmente nos grandes centros urbanos e em sua maioria a população não tem acesso aos serviços essenciais. As cidades constituem o palco das contradições econômicas, sociais e políticas e o sistema viário é um espaço em permanente disputa entre pedestres, automóveis, caminhões, ônibus e motos.”(BOARETO *et al.*, 2015)

Essa realidade mundial não é diferente em Fortaleza de acordo com o Plano de Mobilidade de Fortaleza (2015), o desenvolvimento urbano foi alvo de interesses múltiplos que nem sempre levaram em consideração diretrizes técnicas que permitissem o desenvolvimento planejado e sustentável. Isso fez com que a população, de um modo geral, necessitasse realizar grandes deslocamentos para chegar a suas atividades aumentando dessa forma o tempo de deslocamento.

O mapa abaixo mostra como as atividades de comércio e serviços estão concentradas no município, reflexo desse crescimento urbano desordenado, mostra ainda como as atividades econômicas estão distantes do restante da população uma vez que a cidade tem área considerável.

Figura 1: Concentração de atividades econômicas em Fortaleza.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em paralelo ao crescimento dos tempos de viagem, segundo o comunicado IPEA (2013), 54% dos domicílios brasileiros possuem automóveis, o que por um lado mostra a evolução da capacidade de compra de veículos e melhoria de renda da população, acarreta eventuais desafios aos planejadores e operadores de transportes para acomodar tamanha demanda de transportes nas cidades.

Em paralelo a isso, a produção de automóveis no Brasil em 2010 cresceu 113% em relação ao ano 2000. Já em 2019 foram produzidos 2.5 milhões de carros, um crescimento de 2,5% em relação ao ano anterior, mesmo diante de uma crise econômica no país. (ANFAVEA, 2020). Vale ressaltar que esse aumento foi facilitado pela maior oferta de crédito e melhorias na distribuição de renda no período.

Ainda no que diz respeito aos modos de transporte no cenário nacional brasileiro, segundo a Agência Nacional de Transporte Urbano (NTU, 2017) de 1996 a 2017 houve queda da demanda por transporte público em nove capitais brasileiras, incluindo Fortaleza, sendo que nos últimos 4 anos de análise a queda foi mais expressiva, em média 7,2% ao ano, totalizando 25,9%. E em Fortaleza entre os anos de 2014 a 2018 houve uma perda de cerca de 110.000 validações diárias, o pior ano foi de 2016 para 2017 onde essas validações diárias caíram 16% (OLIVEIRA, 2019).

A realidade do espraiamento urbano e das elevadas distâncias aos serviços, alinhados a crescente motorização dos brasileiros e a ampliação principalmente do uso de transportes individuais, está diretamente ligada ao aumento dos níveis de congestionamento, que por sua vez, aumentam os tempos de viagem e diminuem a velocidade média dos veículos, impactando no bem estar da população.

## 1.2 Problemática

Muitos fatores influenciam os tempos de viagem e a velocidade dos veículos. Segundo o *Highway Capacity Manual* de 2010 (HCM-2010) alguns fatores que podem influenciar o tempo de viagem são:

- Incidentes de Tráfego, colisões, a presença de carros na pista ou mesmo fora dela pode ocasionar mudanças no comportamento do motorista afetando a velocidade.
- As zonas de trabalho (uso do solo), podem diminuir a velocidade devido ao impacto de faixas reduzidas ou objetos à beira da estrada.
- Condições ambientais, chuva, névoa, dentre outros.
- As flutuações na demanda.
- Dispositivos de controle, semáforos mal programados, ferrovias, etc.
- Capacidade de base da rodovia.

Muitas outras referências estudaram os fatores que podem influenciar a velocidade, no entanto a maioria destes foram realizados no contexto de rodovias fora do perímetro urbano e ainda pouquíssimo estudos foram realizados para estradas Brasileiras.

No caso de Fortaleza, por exemplo, pouco se sabe sobre como a velocidade varia ao longo do dia nas vias do município e ainda sobre que variáveis podem influenciar nessa velocidade. Portanto, podemos levantar algumas questões pertinentes ao desempenho do sistema de transportes no município; **como varia espacialmente a velocidade de percurso no município?** Ou seja, em que locais ela é normalmente mais elevada ou mais baixa?

Além da variação da velocidade, a fim de sermos capazes de descrever e explicar as razões pelas quais existem essa variação, podemos estar interessados em saber **que fatores influenciam e como influenciam essa variação?**

Além de saber quais fatores influenciam na variação espacial da velocidade, é interessante também entender como essa velocidade pode estar variando em cada trecho com

aumento do volume, a fim de entender como as variáveis podem afetar no desempenho da via. Dito isso podemos levantar as seguintes questões: **Como o desempenho da velocidade é afetado pelo aumento do volume? Que fatores influenciam nesse desempenho? Como esses fatores influenciam?**

A resposta para essas perguntas, se possível de ser determinada, poderia apoiar a tomada de decisão no âmbito dos transportes, uma vez que na medida em que se obtém conhecimento sobre o fenômeno a capacidade de propor soluções otimizadas e mais efetivas também aumenta. E no caso específico da cidade de Fortaleza, pouco se sabe sobre quais fatores de fato têm influência no desempenho da velocidade, assim como sobre as outras questões.

E é por esse motivo que este trabalho se propõe, a realizar uma análise deste fenômeno, a fim de gerar algum conhecimento que melhore o entendimento deste e dessa forma apoiar os tomadores de decisão nas melhorias propostas, para enfim mitigar os impactos do transporte no bem estar da população.

Nesse sentido os Equipamentos de Fiscalização Eletrônica de veículos EFE são tecnologias que facilitam a aquisição massiva de dados de velocidade e volume de tráfego, esses equipamentos funcionam através da captação de sinais elétricos que determinam além da presença de um veículo na estrada a velocidade, posição na faixa, volume e tamanho.

Em Fortaleza no ano de 2017 haviam 253 equipamentos de fiscalização eletrônica ativos, cujos dados estão disponíveis para serem usados. O uso dessa informação pode ser um poderoso diferencial na análise, possibilitando um aumento da amostra de dados.

### **1.3 Objetivos**

O objetivo geral desse trabalho é analisar os fatores que influenciam a velocidade em corredores do município de Fortaleza utilizando dados de fiscalização eletrônica de veículos, a fim de oferecer ferramental e subsídios para auxiliar os tomadores de decisão no âmbito do planejamento e operação do sistema de transportes. Os objetivos específicos relacionados as questões são as seguintes:

1. Realizar uma análise descritiva espacial dos padrões de velocidade no município de Fortaleza, a partir dos dados dos equipamentos de fiscalização.
2. Relacionar fatores operacionais, geométricos e de uso do solo com a velocidade de percurso e com sua relação com o volume.
3. Identificar através de uma regressão múltipla quais variáveis podem influenciar nas variações de velocidade.
4. Identificar através de uma regressão múltipla quais variáveis podem influenciar no desempenho da velocidade em relação ao aumento do volume.

## **2 MODELAGEM DA VELOCIDADE EM VIAS URBANAS E RURAIS**

A velocidade dos veículos é uma das variáveis mais estudadas na engenharia de tráfego, segundo o (HCM-2010), “As relações entre volume (taxa de fluxo), velocidade e densidade estão entre as mais fundamentais na engenharia de transporte.” Não à toa está é usada como principal medida de desempenho em vias urbanas no mundo e por consequência inúmeros esforços têm sido realizados para melhor entender o fenômeno da variação da velocidade em estradas urbanas e rurais.

Muitos desses esforços se propuseram a estudar a influência de fatores geométricos na escolha da velocidade pelos usuários principalmente no contexto das estradas rurais, um número menor de pesquisas atuou no ambiente urbano e uma quantidade menor ainda se propôs a estudar o impacto de mais variáveis independentes, logicamente devido ao aumento de complexidade.

Esse capítulo trará uma revisão dos principais esforços de pesquisa nessa área dividindo estes em 2 categorias, aqueles que estudarão os fatores que influenciam na escolha da velocidade pelo motorista na situação de fluxo livre e os que avaliarão a velocidade também ou somente nas situações onde o fluxo não é livre e a escolha é condicionada ao fluxo.

## **2.1 Modelagem da velocidade no fluxo livre**

A velocidade é uma medida muito utilizada na análise de desempenho de rodovias, é também input de muitos modelos de simulação de tráfego, de emissões e também está diretamente relacionada a ocorrência e severidade de acidentes, em situações de fluxo livre a escolha da velocidade do veículo por parte do condutor é influenciada fortemente pela agressividade dos condutores e pelas características da via e sofre pouca ou nenhuma influência dos demais veículos na via.

A velocidade então reflete a resposta do motorista às características geométricas e a sua percepção individual de risco, logo é fácil entender, porque na concepção de estradas a velocidade de projeto é um dos principais dados de entrada.

Muitos estudos foram realizados nas últimas décadas com o objetivo de melhor entender como essas e outras variáveis impactam na velocidade de fluxo livre. Lobo et al., (2013), realizaram um estudo em 176 trechos de cinco estradas de duas pistas portuguesas, localizadas fora da área urbana do país, com limites de velocidade variando entre 50 e 90 km/h. Nesse estudo é usado um modelo de regressão exponencial para avaliar características da estrada na seção onde a velocidade foi coletada a montante e a jusante.

As características levantadas foram presença de curva, raio da curva, grau da curva e comprimento, largura da seção e folga lateral a curvatura e também a densidade de edificações a montante e a jusante uma variável fictícia para visibilidade restrita, o modelo demonstra um efeito negativo da presença de curvas na velocidade de fluxo livre da ordem de 47%, quando há curvas horizontais o aumento do raio tem efeito positivo na velocidade e as demais variáveis do trecho possuem efeitos positivos, quanto as variáveis a montante e jusante todas apresentaram efeitos negativos na velocidade do trecho.

Os autores ainda compararam os resultados do modelo com outros trabalhos incluindo o HCM onde verificou-se resultados semelhantes do parâmetro calibrado para o raio com outros quatro modelos, e semelhanças também do efeito da largura e da densidade de interseções com o HCM; as diferenças foram atribuídas a fatores não observados referentes aos locais de estudo.

O manual (HCM-2010) também possui um modelo para estimativa de velocidade de fluxo livre em rodovias o modelo considera a influência de quatro variáveis na velocidade, que são: largura da faixa, folga lateral, tipo de divisor de faixa e densidade de acessos. O modelo está apresentado na equação 2.1 abaixo.

$$FFS = BFFS - f_{LW} - f_{LC} - f_M - f_A \quad (2.1)$$

onde,

BFFS = Velocidade de fluxo livre de base determinada a partir de rodovias semelhantes que não possuem o efeito das demais variáveis.

$f_{LW}$  = ajuste devido a largura da faixa de tráfego, quando a largura é menor que 12 o valor pode ser 1,9 ou 6,6.

$f_{LC}$  = ajuste devido a folga lateral extra presente quando há obstruções no canteiro ou na beira da estrada, igual a 0 quando a folga é igual a 12 pés e maior que 0 quando é menor.

$f_M$  = ajuste devido a ausência de divisor de faixa, rodovias de várias vias não divididas reduzem o BFFS em 1,6.

$f_A$  = ajuste devido a densidade de acessos é 0 quando a via não possui acessos e maior que 0 conforme a densidade aumenta. (Pontos de menor fluxo não são considerados no cálculo)

O HCM então considera todas essas variáveis influenciando negativamente na velocidade de fluxo livre, vale ressaltar que esse manual é um compilado das melhores práticas mundiais nos transportes e as equações dadas nele são bastante usadas em aplicações do mundo real.

Andersen (2016) também verificou através de um estudo de regressão linear multivariada a influência de fatores geométricos na velocidade de veículos no norte da Dinamarca, novamente o estudo é realizado em estradas rurais de duas pistas, e as velocidades abaixo de 60km/h são excluídas da análise, uma vez que o problema que motivou a análise são os acidentes, e, portanto, a autora se interessa em velocidades altas. Nesse estudo, no entanto,

diversas características dos motoristas e do veículo são trazidas para a análise, como gênero do condutor, tempo que ele(a) tem habilitação e ano do veículo, também traz as variáveis relacionadas a estrada como largura, comprimento e presença de marcação vertical no centro e separando as faixas, relacionadas a iteração com outras vias ou veículos como número de acessos e de intersecções.

Para o estudo são excluídas diversas observações consideradas outliers, inclusive observações de quando a velocidade varia num curto espaço de tempo, a fim de desprezar o efeito de uma ultrapassagem, do surgimento de obstáculo ou mesmo da iteração com outro veículo, desprezando, portanto, efeitos das iterações veículo a veículo.

Os resultados apontaram para o aumento da velocidade com maiores valores de comprimento, largura da faixa de tráfego, presença de marcações e quando o gênero é masculino, resultados já esperados e semelhantes aos encontrados por Lobo et al., (2013). No entanto, alguns resultados contraditórios foram encontrados, como o aumento da velocidade a densidade de intersecções é maior e também coeficientes negativos relacionados a largura do ombro da faixa e das marcações.

Fitzpatrick *et al.* (1999) realizaram um estudo publicado pela *Federal Highway Administration* (FHWA), nos Estados Unidos que semelhante aos trabalhos expostos, analisaram através de um modelo de regressão o impacto de características geométricas na velocidade de fluxo livre. O estudo tinha o objetivo de propor um modelo para a previsão do 85º percentil das velocidades em rodovias rurais de duas pistas dos Estados Unidos, foram analisados 176 locais do país. O resultado final são vários modelos para diferentes tipos de estradas, que dependem unicamente do raio da curva. As variáveis usadas para segregar os tipos de rodovias são relacionadas a geometria da curva como faixas de inclinação horizontal e vertical e também a limitação de visão.

Nenhum outro aspecto entrou diretamente no modelo, no entanto na seleção das rodovias as variáveis, tipo de local (rural ou urbano), classe da via, densidade de acessos, volume de tráfego, largura das pistas, comprimento e outras relacionadas a geometria, foram utilizadas para selecionar trechos de características iguais.

Além desses, muitos trabalhos relacionam características geométricas das vias com o 85º percentil das velocidades admitido como sendo a velocidade de fluxo livre, como é o exemplo de Gattis *et al.* (1999) e Lamm *et al.* (1988). Em geral esses trabalhos utilizam modelos de regressão para estimar a relação entre essas variáveis independentes e a velocidade e quando

se trata de velocidade de fluxo livre os modelos levam em consideração na maioria dos casos fatores geométricos e outros ligados a características unicamente da via.

## **2.2 Modelagem da velocidade para qualquer fluxo**

Essa seção traz alguns estudos que foram além da análise com base em uma única medida da velocidade em fluxo livre, mais comumente usado 85º percentil, para a avaliação de um perfil de velocidades ou na tentativa de avaliar a velocidade para períodos de maior volume que onde a interação entre veículos influencia na velocidade.

Na análise da velocidade como medida de desempenho da fluidez além da modelagem das velocidades altas, pode ser mais interessante modelar as situações críticas de alto fluxo e conseqüentemente baixas velocidades, nesse sentido muitos estudos se empenharam em estudar as variáveis que influenciam na variação da velocidade para situações de baixa velocidade ou para todo o perfil de velocidades.

Eluru et al. (2013) realizaram um estudo em Montreal a partir de dados de sensores de tráfego de 49 locais da cidade, os dados de velocidade são agregados em intervalo de 10km/h e a variável dependente usada foi a proporção de veículos em cada categoria de velocidade. O estudo usou um modelo de divisão fracionária para avaliar como variáveis relacionadas as características das vias (número de pistas, presença de ciclovia, estado do pavimento, presença de estacionamento, sentido da via, número de calçadas, inclinação) influenciam a velocidade em cada faixa de velocidade dessa forma sendo possível avaliar como essas variáveis impactam na variação da velocidade em regimes congestionados.

O estudo usou um modelo de probabilidade fracionária que calcula a proporção de veículos em cada faixa de velocidade a depender das características da estrada, na tentativa de descrever o perfil de velocidades. Os resultados mostraram que um bom pavimento assim como maior número de faixas ocasiona maiores velocidades, e também que a presença de estacionamentos aumenta a probabilidade de menores velocidades, no entanto mostrou que a presença de ciclovia e o número de calçadas (indicador de fluxo de pedestres) também estão associados a maiores velocidades o que é pouco intuitivo visto que em geral a presença de elementos conflitantes na estrada acarretam mais cautela do condutor. Outro resultado contraditório foi que as vias de sentido único apresentaram coeficiente negativo demonstrando maior probabilidade de velocidades baixas que não é esperado visto que muitos trabalhos verificaram que a implementação de vias de mão única são benéficas a velocidade, (Heber 2015) e (MENG; THU, 2004).

Ou *et al.* (2010) realizaram um estudo computacional através de um software de simulação de tráfego para avaliar o impacto do uso do solo no desempenho do sistema de transporte de Shandong na China, o estudo usou um modelo de regressão linear para estimar a velocidade média e a partir dos parâmetros calibrados avaliar o impacto do uso do solo, os resultados apontaram para um impacto negativo da densidade de urbanização e da atração de viagens do local na velocidade estimada.

Resultado semelhante foi encontrado por Alobaydi *et al.* (2020) que analisou o impacto de mudanças morfológicas no desempenho do tráfego ao longo de três décadas numa interseção em Bagdá, concluindo que a urbanização e o aumento do uso do solo comercial na interseção ao longo dos anos provocou prejuízos substanciais no desempenho do tráfego no local.

Ainda sobre o impacto do uso do solo na velocidade e o desempenho do tráfego Litman (2010), traz uma análise bastante completa sobre os impactos do uso do solo no transporte. Segundo a autora muitos impactos individuais do uso do solo se sobrepõem, por exemplo o aumento da densidade tende a aumentar o mix de uso do solo, os preços de estacionamentos, a centralidade, dentre outros fatores, fazendo com que a análise de apenas um fator leve a erros na estimação do seu verdadeiro impacto, uma vez que cada variável influencia de forma diferente o sistema. Por exemplo, a acessibilidade regional (presença de empregos e serviços próximo a residência) diminui a quantidade de viagens motorizadas locais, por outro lado a densidade do uso aumenta a quantidade de pessoas, veículos e demais atores conflitantes no tráfego. Dessa forma Litman (2010) conclui que o uso do solo tem diversos impactos diretos e indiretos no tráfego o que torna a análise complexa de ser realizada e ainda que separados os impactos são modestos, no entanto esses impactos são cumulativos e sinérgicos e causam grandes mudanças nos padrões de deslocamento.

E se tratando de estudos que tentaram avaliar algum aspecto da velocidade em diferentes condições de desempenho, Medina e Tarko, (2005) realizaram um estudo com o objetivo de obter um modelo de estimativa da velocidade através de regressão associados a dados de painel, o modelo estima percentis de velocidade através da inclusão de uma variável z normal padrão no modelo correspondente a um percentil qualquer. O estudo utilizou 67 trechos de estradas urbanas e rurais dos Estados Unidos onde foram levantadas as características de cada trecho como: distância de visão, tipo de segmento (rural ou urbano), densidade de interseções, densidade de acessos, largura da pista, distância de folga lateral, presença de faixa de conversão, distância da calçada ou guarda-corpo e distância da vala de drenagem.

O estudo concluiu que estradas rurais, com maior distância de visão, menor densidade de interseções e acessos e geometrias favoráveis (maiores tamanhos e larguras) tem maior propensão a velocidades de fluxo livre mais altas e que estradas rurais com maior distância de visão, presença de faixa de conversão e maiores folgas laterais tendem a ter uma menor variabilidade da velocidade.

Um outro fator que está diretamente ligado as variações na velocidade é o humano, os motoristas possuem comportamentos distintos nas situações cotidianas de trânsito, motoristas mais agressivos tendem a deixar um menor espaço entre o veículo da frente e a ter um tempo de reação reduzido, (LIZBETIN; BARTUSKA, 2017).

Por último um outro fator que pode impactar na velocidade é a composição veicular do tráfego, Maitra *et al.* (1999) realizaram um estudo para avaliar a contribuição de diferentes tipos de veículos na modelagem do congestionamento, os resultados revelam que quanto maior a relação volume/capacidade menor é a influência da composição do tráfego e ainda que a melhoria nos níveis de congestionamento ocasionado pela adição de uma faixa de tráfego diminui quanto maior for o número de faixas inicial, o que significa dizer que quanto menor a quantidade de faixas de tráfego maior a sensibilidade da velocidade ao aumento do volume.

### **2.3 Conclusão**

Diversos fatores influenciam o desempenho do sistema de transportes, incluindo a velocidade e sua variação. A revisão da bibliografia mostra que para diferentes estados da via, fluxo livre ou não, características geométricas da via são importantes para estimar a velocidade, uma vez que a velocidade de fluxo livre depende fortemente dessas características. Outros fatores relacionados ao uso do solo e a presença de conflitos na via, seja atrelado a outros veículos ou na interação com o pedestre e o meio urbano, são mais usados em estudos na região urbana e que objetivam analisar a velocidade além do fluxo livre.

Muitos autores propuseram modelos para a velocidade, em sua maioria para rodovias rurais, desde modelos lineares até modelos mais complexos que absorvem melhor as características do fenômeno, no entanto não há um consenso de qual modelo é o melhor para estimar a velocidade. A tabela 1 abaixo mostra um resumo dos modelos utilizados e variáveis analisadas de cada trabalho, exemplificando como cada referência poderá contribuir no desenvolvimento deste estudo.

Em síntese ao que foi exposto, pode-se concluir que a revisão da literatura possibilitou uma análise geral e uma melhor compreensão acerca das variáveis que podem influenciar a velocidade em diferentes tipos de vias e em diferentes condições. E dessa forma, a revisão possibilitará uma melhor definição das variáveis que podem influenciar o comportamento da velocidade e o desempenho dos trechos em Fortaleza.

Tabela 1: Resumo das contribuições das referências

<b>Autor</b>	<b>Tipo de via</b>	<b>Modelo Utilizado</b>	<b>Variáveis analisadas</b>
(LOBO et al. 2013)	Rural	Regressão Exponencial	presença de curva, raio da curva, grau e comprimento da curva, largura da seção, folga lateral, curvatura, densidade de edificações a montante e a jusante, variável fictícia para visibilidade restrita
(ANDERSEN, 2016)	Rural	Regressão Linear	gênero do condutor, tempo que ele(a) tem habilitação, ano do veículo, largura da pista, comprimento e presença de marcação vertical no centro e separando as faixas, número de acessos e de intersecções
(HCM-2010)	Rural	Função discreta	Largura da faixa, folga lateral extra, presença de divisor de faixa e densidade de acessos.
(FITZPATRICK et al., 1999)	Rural	Regressão Linear com o raio e curvatura	Raio da curva, curvatura vertical, inclinação horizontal e vertical e limitação de visão. (Considerou: classe da via, densidade de acessos, volume e largura das pistas)
(GATTIS; WATTS; MEMBER, 1999)	Urbano e Rural	Análise gráfica e de correlação	Largura da faixa, Presença de estacionamentos, Calçada e comprimento do segmento
(LAMM et al., 1988)	Rural	Vários tipos de análises de modelos pré-existent	Grau da curva, largura da faixa, largura do ombro e volume.
(ELURU et al., 2013)	Urbanas	Modelo de divisão fracionária	Número de faixas, estado do pavimento, presença de ciclovias, estacionamento, sentido da via, número de calçadas e inclinação.
(HEBER; OLIVEIRA, L. De, 2015)	Urbana	-	Sentido da via
(MENG; THU, 2004)	Urbana	-	Sentido da via
(OU; TANG; WANG, 2010)	Urbana	Modelagem microscópica de tráfego	Densidade de urbanização e atração de viagens. (uso do solo)
(ALOBAYDI et al., 2020)	Urbana	Análise gráfica	Morfologia e uso do solo
(LITMAN, 2010)	-	-	Uso do solo

(MEDINA; TARKO, 2005)	Urbano e Rural	Regressão associada a dados de painel	Densidade de interseções, densidade de acessos, distância de visão, tipo de segmento, largura da pista, folga lateral, presença de faixa de conversão, distância da calçada e distância da vala de drenagem.
(LIZBETIN; BARTUSKA, 2017)	Urbano	-	Fatores psicológicos
(MAITRA et al, 1999)	Urbano e Rural	Modelagem matemática	Composição veicular

Fonte: Elaborado pelo autor

### 3 MÉTODO

Esta seção apresentará o método utilizado no trabalho. O mesmo está dividido em seis etapas. A primeira trata-se basicamente da consolidação da base de dados de fiscalização eletrônica que será utilizada, posteriormente haverá uma etapa de obtenção e tratamento dos indicadores das variáveis independentes, e então a terceira parte traz uma caracterização espacial dos dados, seguida de uma análise gráfica da influência das variáveis sob a relação velocidade/volume e como consolidação da análise será utilizado a regressão múltipla para duas análises, a influência das variáveis na velocidade de percurso e na relação velocidade/volume.

### **3.1 Consolidação dos dados de Fiscalização Eletrônica**

Os dados utilizados para análise serão a velocidade média dos veículos nos trechos entre dois equipamentos de fiscalização eletrônica. No entanto essa não é a informação bruta obtida através dos EFE, será necessária uma modelagem dos dados para obter essa informação de forma agregada. Dessa forma essa seção tratará do processo de tratamento e agregação dos dados de fiscalização.

Os EFE, no seu período de funcionamento, coletam dados de velocidade, tamanho, faixa percorrida, hora e algumas vezes, placa criptografada de todos os veículos que passam por ele. Através da informação da placa, que é única num dia, e do horário é possível associar dois EFE para obter-se a velocidade média de percurso no trecho.

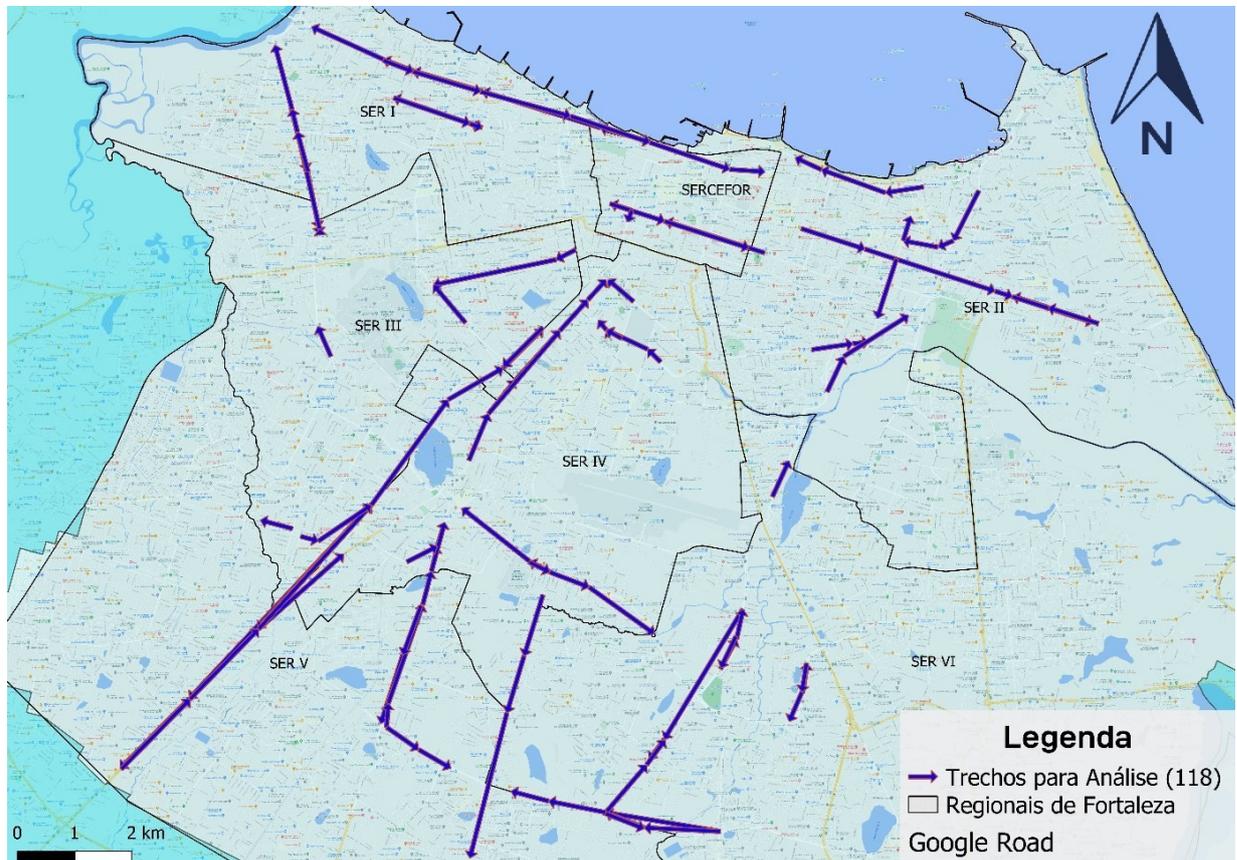
A variável obtida com os EFE é o momento da passagem do veículo por cada equipamento, a partir dela pode-se calcular o tempo entre equipamentos. A distância é obtida através de uma rotina computacional com a ferramenta fornecida pelo Google API, com ela é possível estimar a rota realizada e calcular a distância percorrida, uma vez que os pares são em geral na mesma via a estimativa de rota é muito próxima da real. Todos os equipamentos analisados possuem sincronização da hora online, dessa forma não há preocupações quanto a sincronização.

Os dados utilizados para análise serão os arquivos referentes ao mês de setembro de 2017, procurou-se adotar um mês com menos feriados e cujo as atividades de escola e trabalho funcionem normalmente.

Após uma análise minuciosa dos equipamentos ativos definiu-se um total de 118 pares de equipamentos com potencial para serem analisados mostrados na figura 2, então foi realizado um tratamento com apoio do software R, dos dados diários dos equipamentos, a fim de associar todos esses e determinar a velocidade média de percurso para cada trecho agregado em intervalos de 5 minutos.

Após esse tratamento inicial foi realizado uma análise visual da consistência dos dados em relação a medição de volume por dia, a fim de avaliar dias em que algum equipamento não funcionou corretamente, e aplicar uma correção dos volumes com base no histórico.

Figura 2: Associações iniciais definidas na etapa de obtenção dos dados



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2 Obtenção e tratamento dos dados

Os dados para a realização da regressão serão obtidos de diversas fontes, essas bases de dados deverão ser tratadas a fim de obtermos um único arquivo em formato shape com todas as informações necessárias. Esse arquivo, com a informação por par, será associado no R com os resultados de velocidade ao longo do tempo no trecho.

As variáveis independentes foram definidas com base nos resultados encontrados na revisão da literatura e na construção conceitual concebida a partir dela, também houve limitações relacionadas a impossibilidade de coletar variáveis em campo sendo necessário descartar variáveis que necessitassem um levantamento presencial.

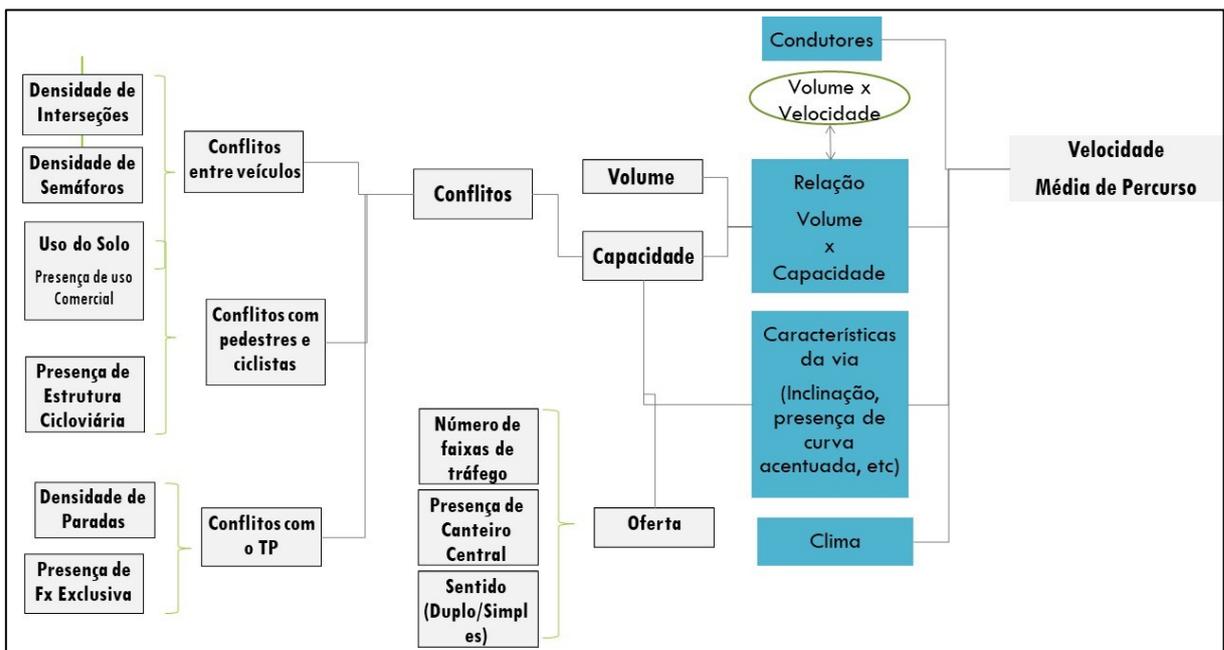
A figura 3, abaixo, representa as hipóteses levantadas quanto a relação das variáveis sob a velocidade, acredita-se que alguns fatores influenciam diretamente as velocidades de todos os veículos, como o comportamento e agressividade do condutor, o clima, a inclinação da via, etc. Uma variável importante é a relação volume/capacidade, conforme há um aumento

do volume a capacidade da via se aproxima de uma situação saturada onde a demanda é próxima a capacidade.

A capacidade por sua vez é influenciada pelos diversos conflitos no meio urbano, conflitos entre veículos devido a morfologia do meio ou a maior quantidade de infraestrutura como estacionamentos e acessos a lote, conflitos do veículo com os pedestres devido a uma maior densidade destes causando maior cautela pelo condutor, conflitos com o transporte público devido a sua velocidade reduzida, as paradas, conversões, dentre outros. Além da influência das questões geométricas sob a capacidade, como largura das faixas, quantidade de faixas, presença de canteiro central, dentre outras.

A existência desses conflitos por si só, podem causar a diminuição da velocidade, além disso a interação destes com o tráfego diminui a capacidade do trecho de forma variável ocasionando uma maior sensibilidade ao aumento do volume e diminuindo a velocidade.

Figura 3: Modelo conceitual da relação das variáveis independentes com a velocidade, elaborado com base na revisão da literatura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tendo em vista o exposto, foram levantados alguns indicadores relacionados a cada uma das variáveis, descritos a seguir:

### Uso do solo

O uso do solo é um dos principais fatores que podem influenciar as velocidades, Litman (2010), apresenta as diversas formas com que essa variável pode influenciar os transportes. No âmbito desse estudo, baseado no modelo exposto na figura 3 considera-se o impacto desta variável no aumento dos conflitos na via, portanto estamos interessados no impacto do uso comercial do solo, uma vez que este impacta na maior presença de pedestres

nas ruas, entre lojas ou acessando um grande PGV, na maior quantidade de estacionamentos ou acesso a lote, carga e descarga de grandes veículos, além de outros impactos que a conturbação gerada por esses usos pode causar.

Portanto a fim de considerar corretamente esse impacto analisou-se 3 possibilidades de indicadores para o uso do solo:

A entropia proposta por Frank *et al.* (2004), conhecida como *Land Use Mix* ou Uso Misto do Solo (LUM), representa o grau de uniformidade da distribuição do solo por unidade de área e pode ser calculada de acordo com a equação 3.1:

$$LUM = \{-\sum_i [p_i * \ln(p_i)]\} / \ln(k) \quad (3.1)$$

onde,

LUM = índice de uso misto do solo

$p_i$  = área do uso  $i$  sobre o somatório das áreas de todos os tipos de uso

$k$  = número de categorias de uso do solo (usado: comercial, residencial, institucional e outros)

Taxa de uso comercial por área construída ( $TUC_{AC}$ ), proposta pelo autor. Este índice calcula a proporção de área comercial sobre a área construída total, calcula-se conforme a equação 3.2:

$$TUC_{AC} = \frac{A_c}{\sum_k A} \quad (3.2)$$

onde,

$A_c$  = área em  $m^2$  de uso comercial

$A_k$  = área em  $m^2$  do uso  $k$

$k$  = categorias de uso do solo

Taxa de uso comercial pela área de impacto ( $TUC_{AB}$ ), proposta pelo autor. Para viabilizar os cálculos dos índices anteriores é necessário considerar uma área a partir da via, cujo uso impactará nesta. Não há um consenso de como essa área deve ser definida e para este estudo adotou-se um distanciamento a partir do eixo da via de 150 metros como área de impacto. A área foi determinada a partir do software Quantum Gis 3.8, utilizando a função “*buffer*”. Tendo em vista o exposto, esse índice calcula a área de uso comercial sobre a área do *buffer* calculado conforme a equação 3.3:

$$TUC_{AB} = \frac{A_c}{A_b} \quad (3.3)$$

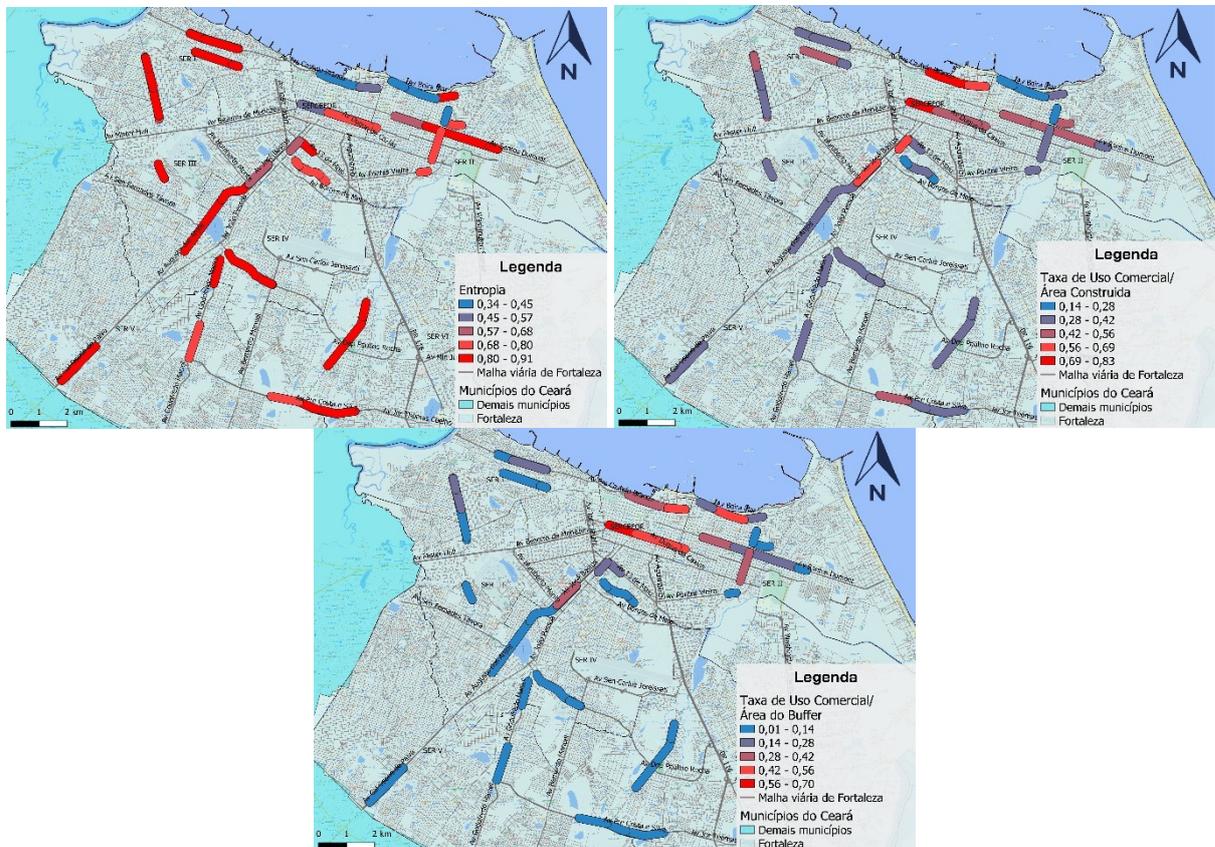
onde,

$A_c$  = área de uso comercial

$A_b$  = área do *buffer*

Analisou-se então espacialmente o comportamento dos indicadores, a fim de determinar qual seria o mais adequado para a análise. A figura 4 abaixo mostra a distribuição espacial dos três indicadores calculados.

Figura 4: Indicadores de uso do solo investigados



Fonte: Elaborado pelo autor

Avaliou-se que a Entropia apesar de muito usada na análise do uso do solo, não se adequa aos objetivos deste estudo, uma vez que reflete uma diferenciação entre uso homogêneo e heterogêneo, quando na verdade se está mais interessado em avaliar o impacto do aumento do uso do solo comercial, devido as hipóteses levantadas, já citadas. A partir de um conhecimento prévio da cidade de Fortaleza, exposto na figura 1 percebe-se que há uma grande distorção em comparação com os resultados mostrados pelo indicador, figura 4.

Os indicadores  $TUC_{AC}$  e  $TUC_{AB}$  não apresentam o mesmo problema da entropia, para este estudo adotou-se a  $TUC_{AB}$  devido a pequenas distorções causadas na taxa por área contruída na região do bairro Meirelles, percebeu-se que algumas vias com maior quantidade de uso comercial que outras são classificadas com um índice menor devido a distorção de área construída residencial dos grandes edificios do entorno, que inclusive podem significar mais motivo de conflito, no entanto não considerado nesse estudo.

## Fluxo

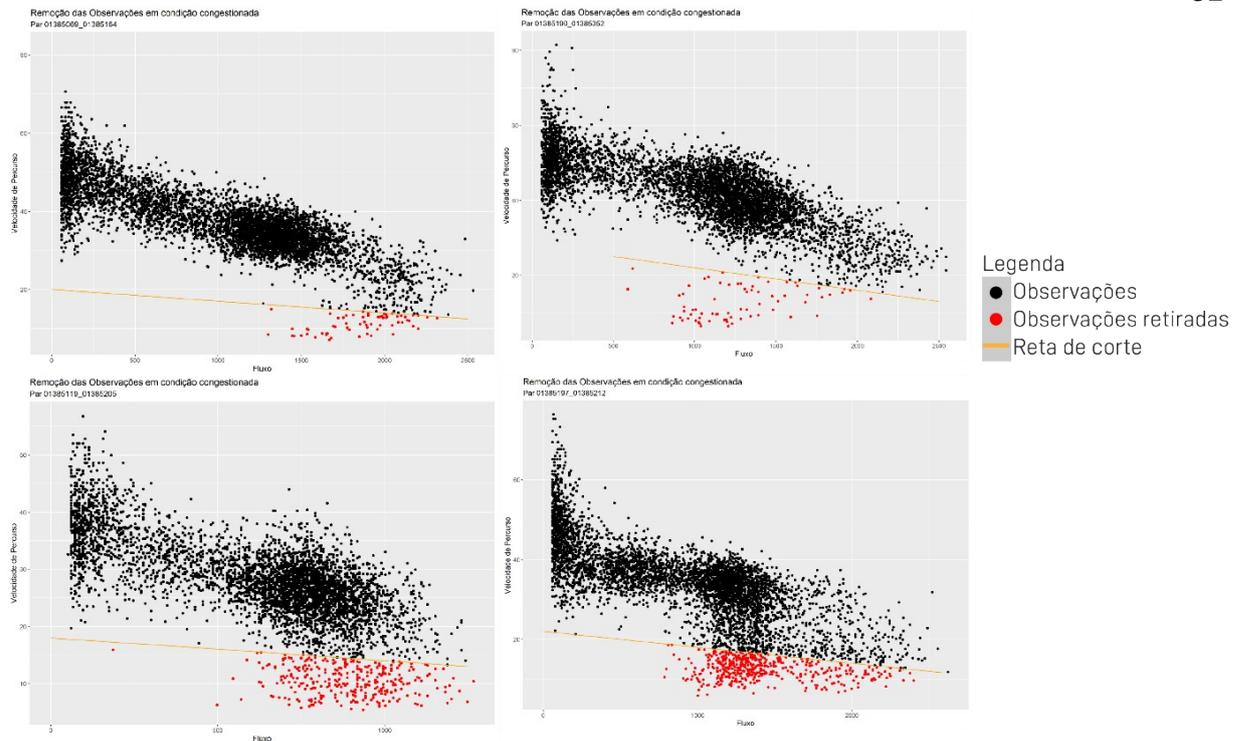
Outro fator fundamental para esta análise é o volume de veículos na via, a relação volume velocidade é uma variável crucial para o entendimento do fenômeno. De acordo com o HCM-2010 “As relações entre volume (taxa de fluxo), velocidade e densidade estão entre as mais fundamentais na engenharia de transporte.”

Os trechos considerados possuem volume variável ao longo do seu comprimento, uma vez que há intersecções com outras vias, algumas inclusive de mesma classe ou maior, ocasionando grandes mudanças no volume entre equipamentos. Para contornar isso, neste estudo considerou-se como representativo do volume no trecho a média dos volumes passantes nos dois EFE que compõe o trecho.

Além disso, as observações de volume e velocidade para situações congestionadas foram desconsideradas da análise. Uma vez que quando a capacidade é atingida o fluxo que passa tende a ser menor que a demanda real por efeito de um colapso do sistema de transportes fazendo com que valores de velocidade baixa fiquem associados a baixos volumes, o que pode causar uma distorção nos resultados.

Essas observações foram removidas para cada trecho através de um método gráfico, exemplificado na figura 5. As observações que apresentaram queda brusca da velocidade em situações de alto volume, foram considerados observações em situação saturada e removidas. A reta de corte foi definida de forma visual.

Figura 5: Metodologia de remoção das observações em condição congestionada



Fonte: Elaborado pelo autor.

### Número de faixas de tráfego

O número de faixas de tráfego foi obtido através da base de dados dos próprios EFE e das imagens históricas do Google Earth, uma vez que alguns desses trechos possuem a presença de faixas exclusivas para ônibus foi considerado apenas a quantidade de faixas destinadas ao tráfego geral para fins da análise, uma vez que o volume se divide apenas nessas faixas.

### Presença de estrutura cicloviária

Esse será um indicador tipo *dummy* que indica a simples presença de ciclovias ou ciclofaixas na via, ela é zero quando não há nenhuma estrutura e um quando há. Foi obtido através de Instituto de Planejamento de Fortaleza (2020), no portal Fortaleza em Mapas e também com o apoio do software Google Earth.

A hipótese levantada é de que a presença dessa infraestrutura possa ocasionar uma diminuição do conflito veículo-ciclista uma vez que estão separados por uma estrutura física.

### Presença de faixa exclusiva

Também representado por um indicador *dummy* onde zero significa ausência de faixa exclusiva para ônibus e um a presença. Foi obtido através de Instituto de Planejamento de Fortaleza (2020), no portal Fortaleza em Mapas e também com o apoio do software Google Earth.

A hipótese levantada é de que a presença dessa variável ocasiona uma organização dos modos de tráfego diminuindo a interação ônibus-carro e diminuindo o impacto na velocidade.

### **Sentido da via**

Esta variável reflete o tipo de sentido da via se possui sentido duplo ou único, sendo o último representado por zero e o sentido duplo por um. A hipótese é que as vias de sentido único promovem uma separação melhor dos tráfegos opostos dando ao condutor uma maior sensação de segurança.

### **Densidade de semáforos**

Esse indicador tem o objetivo de representar os conflitos veículo-veículo em vias onde há semaforização, na realidade é o indicador do atraso decorrente dessas infraestruturas uma vez que o conflito mesmo não ocorre exatamente por conta delas. É calculado segundo a equação 3.4:

$$\text{Dens Semáforos} = \frac{Q_s}{L} \quad (3.4)$$

onde,

$Q_s$  = Quantidade de semáforos.

$L$  = Comprimento do trecho em km.

### **Densidade de Paradas**

Esse indicador objetiva refletir o impacto dos conflitos do ônibus com os veículos individuais, a presença de paradas em vias que não possuem faixa exclusiva obriga alguns veículos a pararem totalmente o veículo por um momento ocasionando atrasos, o indicador é calculado conforme a equação 3.5 a seguir:

$$\text{Dens de Paradas} = \frac{Q_p}{L} \quad (3.5)$$

onde,

$Q_p$  = Quantidade de paradas de ônibus em faixa de fluxo geral, ou seja, quando há faixa exclusiva a quantidade é igual a zero.

$L$  = Comprimento do trecho em km.

### **3.3 Caracterização espacial da velocidade**

Essa seção tem o objetivo de realizar uma análise inicial de como a velocidade varia no território na situação de horário de pico e tentar relacionar essa variação com as variáveis independentes.

A hora pico será determinada a partir do intervalo de 15 minutos cujo a soma dos volumes em todos os trechos seja a maior, a fim de determinar uma hora pico geral para todos os trechos, a escolha dessa hora não é tão criteriosa, visto que se trata apenas de um indicador da velocidade em uma situação de maior volume.

A partir daí os indicadores propostos serão comparados visualmente com os indicadores das variáveis independentes, com o uso de mapas gerados no Quantum Gis. Além disso será utilizado o Coeficiente de Correlação de Pearson – aqui abreviado pela sigla (CCP), para mensurar a correlação entre as variáveis, sendo considerado representativo quando valor-p for menor que 10%

### **3.4 Análise das curvas velocidade/volume**

Esta seção tem o objetivo de realizar uma análise gráfica do impacto das variáveis independentes na relação velocidade/volume, o objetivo é obter uma compreensão inicial dessa possível influência e como ela ocorre. Para tal a partir dos dados agregados de volume e velocidade as vias foram agrupadas por semelhança, na tentativa de isolar o máximo de variáveis possíveis, devido a quantidade de trechos utilizou-se no máximo dois filtros para dividir os grupos.

A partir daí será feita uma comparação gráfica do comportamento da relação velocidade/volume a fim de compreendermos como cada variável impacta neste comportamento. Para cada variável analisada será plotado os gráficos categorizados ou graduados por cor a fim de perceber como a variável influencia o comportamento do agrupamento. Os critérios para definição dos agrupamentos foram específicos para cada variável, mas o uso do solo foi usado na maioria delas visto que há a hipótese de essa seja uma variável muito importante, com alta influência.

### **3.5 Modelo de regressão linear múltipla com a velocidade**

Essa seção tem o objetivo de promover uma análise para tentar compreender como as variáveis influenciam a velocidade, visto que nas análises anteriores não foi possível avaliar o impacto das variáveis isolando o efeito das demais. Propõem-se então um modelo de regressão linear múltipla que possibilite relacionar as variáveis independentes com as diferentes condições de desempenho do trecho ao longo do dia.

Uma vez que o objetivo não é determinar um modelo para estimar a velocidade, acredita-se que um modelo linear seja uma forma prática e suficientemente adequada para avaliar esse efeito. O modelo será definido conforme a equação 3.6 abaixo.

$$V_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * F_{ij} + \dots + \beta_k * X_{kj} + \varepsilon \quad (3.6)$$

onde,

$\beta$  = coeficiente ajustado da regressão para cada variável.

$\beta_0$  = intercepto do modelo

V = Velocidade de

percurso F = Fluxo

X = Variável independente

$\varepsilon$  = Erro aleatório

j = variável referente ao número de trechos analisados

i = variável referente ao número de observações de velocidade e fluxo no trecho j

k = número de variáveis

As variáveis fluxo e velocidade para cada trecho serão determinadas para os dias úteis do mês de setembro de 2017, agregados em intervalos de cinco minutos.

### 3.6 Modelo de regressão linear múltipla com a taxa velocidade/volume

A fim de complementar a análise e para responder as últimas questões de pesquisa, esta seção pretende calibrar um modelo de regressão linear múltipla para analisar o efeito das variáveis independentes já citadas, na taxa velocidade/volume ( $v/v$ ). O objetivo é analisar o impacto desses fatores na relação  $v/v$ , acreditando que alguns desses fatores podem estar relacionados com um aumento da sensibilidade da velocidade ao volume.

A taxa velocidade/volume será considerado pelo coeficiente linear de uma reta de regressão linear simples calibrada para cada trecho de análise. O modelo utilizado tem a seguinte forma:

$$v/v_j = \beta_0 + \beta_1 * X_{1j} + \beta_k * X_{kj} + \varepsilon \quad (3.7)$$

onde,

$v/v$  = taxa velocidade/volume

$\beta$  = coeficiente ajustado da regressão para cada variável.

$\beta_0$  = intercepto do modelo

X = Variável

independente  $\varepsilon$  = Erro

aleatório

j = variável referente ao número de trechos

analisados k = número de variáveis

## **4 RESULTADOS**

### **4.1 Caracterização espacial dos corredores**

O objetivo desta seção é apresentar os corredores finais consolidados após o tratamento inicial e remoção dos erros, e caracterizar os trechos escolhidos a fim de se ter uma noção inicial das características desses corredores, analisar como a velocidade se distribui espacialmente, e como as características dos corredores podem influenciar nessa distribuição.

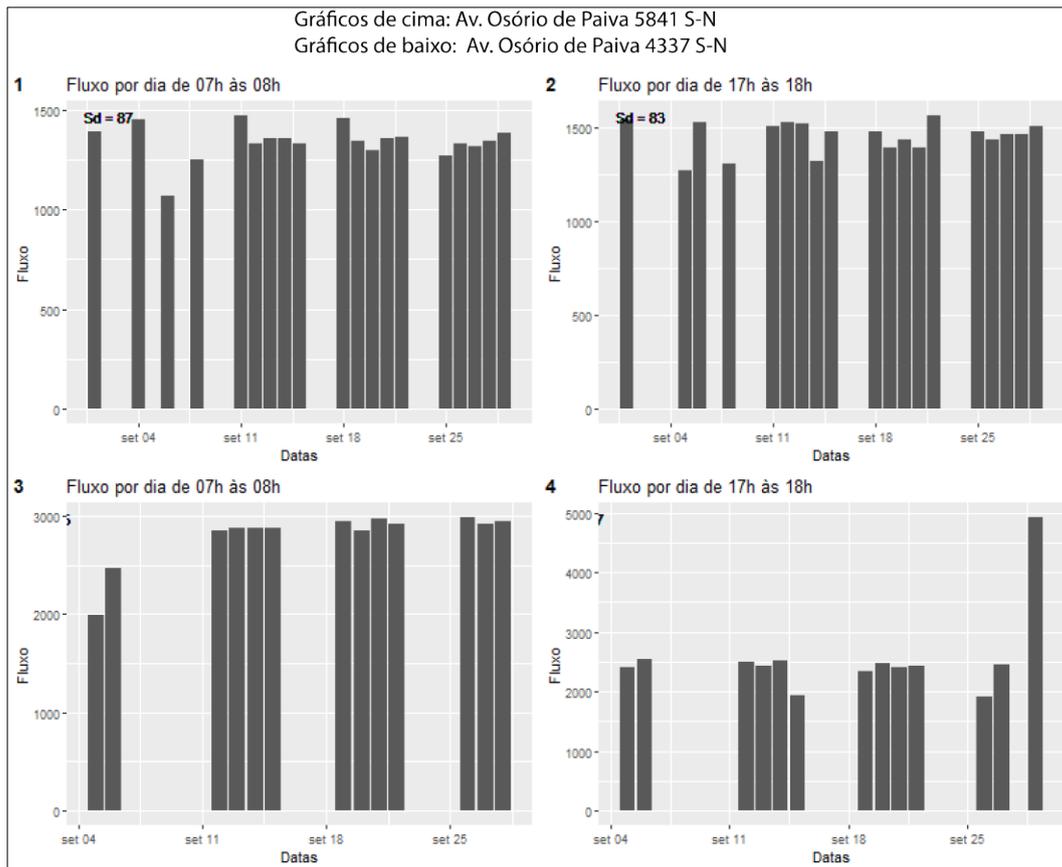
Após o tratamento dos dados verificou-se que muitos dos equipamentos pré-selecionados continham falhas na coleta de dados, possivelmente devido a algum mal

funcionamento, a figura 6 abaixo mostra um exemplo de pares de equipamentos que apresentaram uma quantidade significativa de falhas na coleta de dados, verifica-se que ambos os equipamentos possuem falta de pelo menos um dia típico, uma vez que os dados do fim de semana não foram usados, no entanto o equipamento inferior apresenta dados faltosos em inúmeros dias, além de uma variação muito grande de volume o que pode afetar a análise.

Após a devida remoção dos pares com notórios erros de coleta consolidou-se um total de 54 pares de equipamentos que definem os trechos da análise; todos os trechos analisados são vias arteriais ou coletoras. A figura 7 abaixo mostra a localização dos trechos analisados.

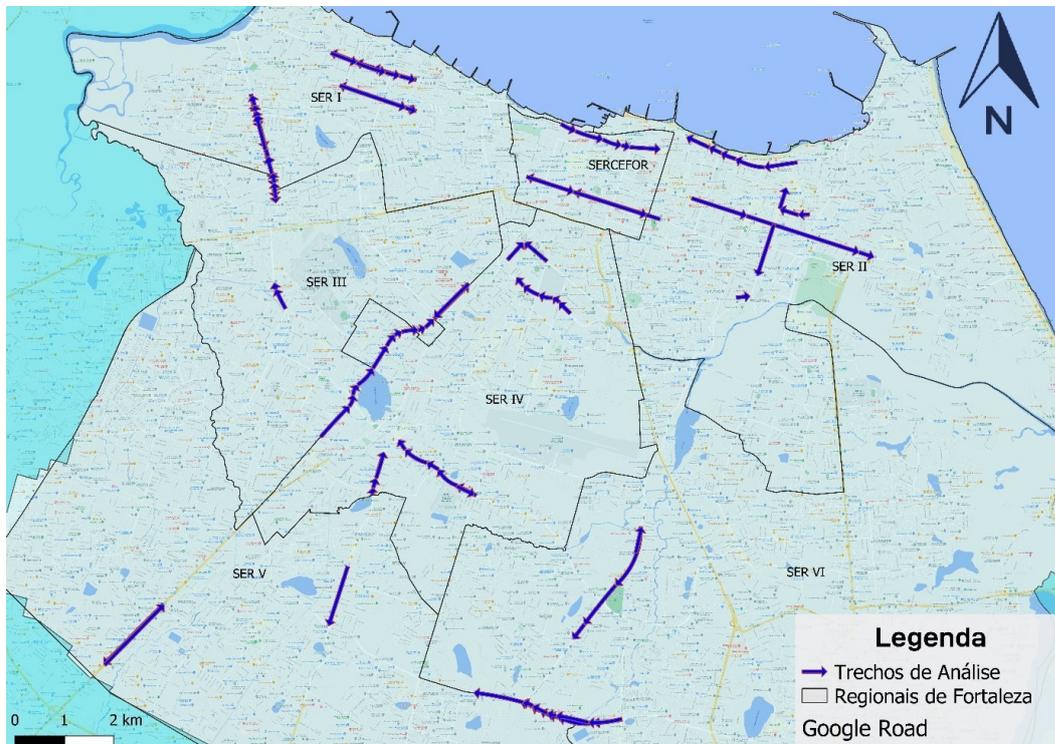
A escolha dos locais de análise foi, portanto, limitada pela disponibilidade de dados dos equipamentos de fiscalização eletrônica, observa-se, no entanto, que há locais de análise em todas as regionais do município ainda que com uma maior concentração nas regionais I, II, IV e Centro.

Figura 6: Exemplo de conjunto de dados removidos da análise



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 7: Trechos de análise consolidados



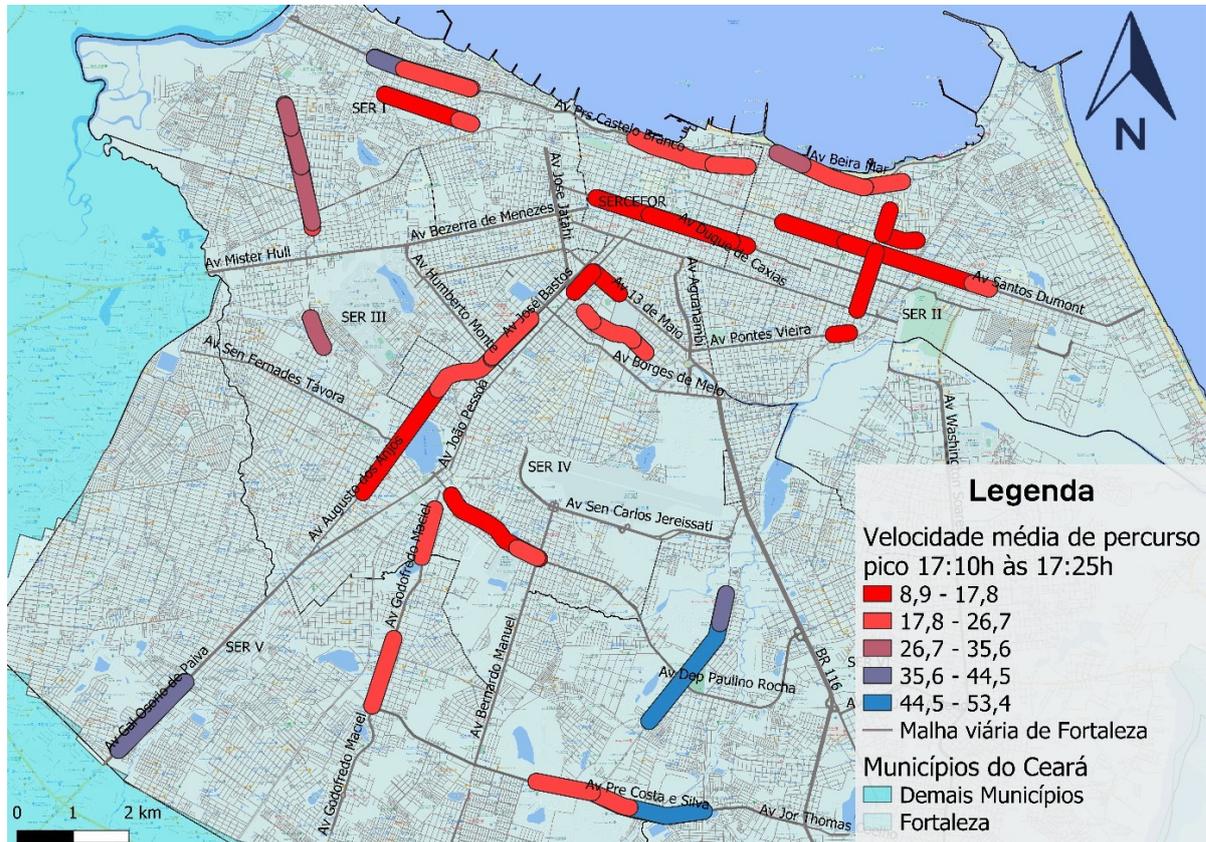
Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos dados dos equipamentos foi possível determinar então a velocidade de percurso entre os pares, a figura 8 abaixo mostra o resultado da velocidade de percurso nos trechos de análise no período de 17:10h às 17:25, esse período corresponde aos 15 minutos

mais carregados considerando toda a rede. Para ajudar a visualização foi adotado um Buffer de 150 metros a partir dos trechos analisados.

Pode-se observar que no período de pico de volume boa parte da rede analisada está em condições de baixas velocidades, evidenciando a hipótese de que de fato há um reduzido desempenho da rede de transportes no município.

Figura 8: Velocidade de percurso no pico de volume da noite



Fonte: Elaborado pelo autor

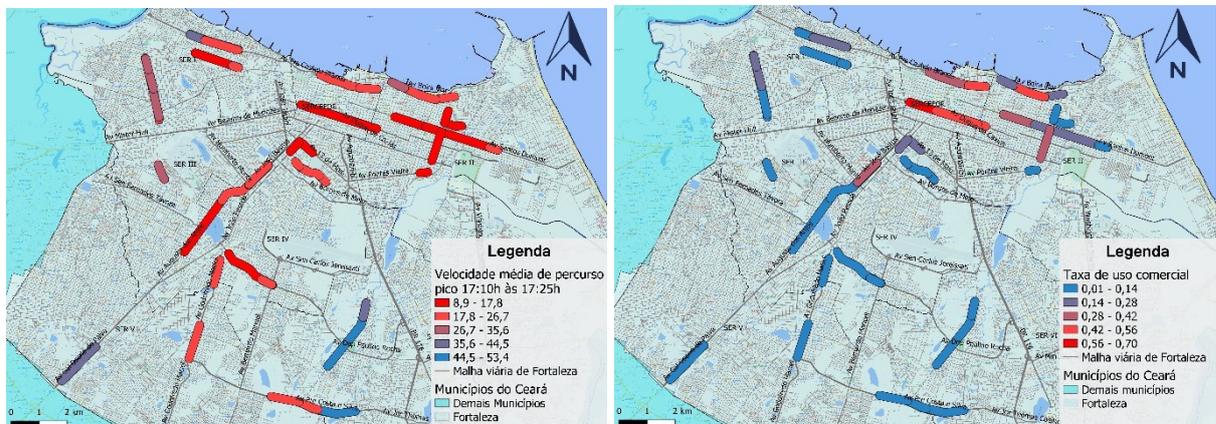
Para começar a compreender como as variáveis independentes se relacionam com a velocidade de percurso foram plotados alguns mapas dessas variáveis possibilitando também de caracterizar os trechos e realizar uma análise visual da relação dessas variáveis com a velocidade.

- **Uso do Solo**

A figura 9 abaixo mostra a distribuição espacial da taxa de uso do solo comercial nos trechos de análise ao lado do resultado de velocidade média de percurso no pico da noite. Visualmente, pode-se observar que há alguma coincidência dos trechos com valores mais altos de uso comercial com os trechos de menores velocidade. Dos trechos com velocidade de percurso menor que o 20º percentil das velocidades (15km/h), 55% estão entre a metade superior de valores de taxa de uso comercial, o que pode significar um indicio de correlação

negativa entre as variáveis, de fato o CCP entre as variáveis é de  $-0,3$  com valor-p menor que 5%, mostrando uma correlação negativa entre elas.

Figura 9: Taxa de uso comercial vs Velocidade de percurso

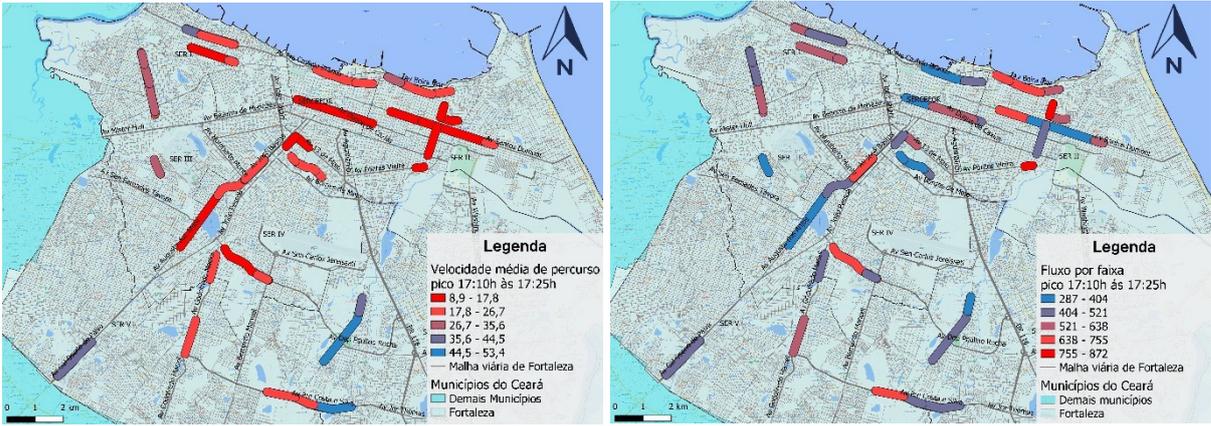


Fonte: Elaborado pelo autor

- **Fluxo**

E em relação ao fluxo de tráfego no intervalo de 17:10h às 17:25h a figura 10 apresenta a distribuição espacial desse fluxo por faixa de tráfego. Nota-se que em relação ao fluxo, visualmente, há também algumas coincidências em comparação com a velocidade, vias de maior fluxo em geral coincidem com as baixas velocidades; vale destacar que o fluxo apresentado é o fluxo que de fato consegue passar pelo trecho e não a demanda de tráfego, que pode ser maior. O CCP nesse caso foi igual a  $-0,32$  com valor-p menor que 5%, demonstrando correlação negativa entre as variáveis, fato que já era esperado dado o amplo conhecimento da relação entre velocidade e volume.

Figura 10: Fluxo por faixa vs Velocidade média de percurso

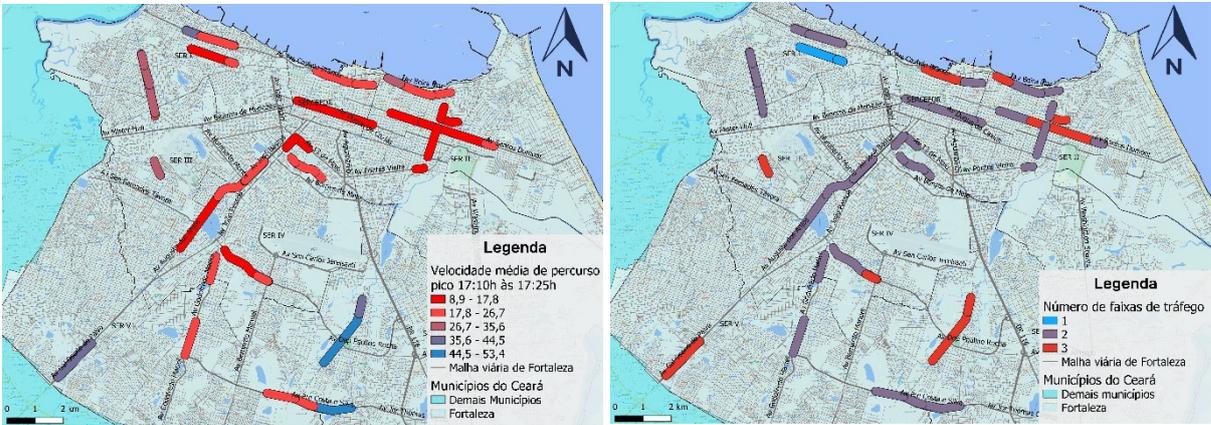


Fonte: Elaborado pelo Autor

- **Número de faixas de tráfego**

No que diz respeito ao número de faixas dedicada ao tráfego geral observa-se que a maioria dos trechos possuem duas ou três faixas, excluindo as faixas exclusivas. Visualmente é difícil perceber se há correlação entre as variáveis e se é positiva ou negativa, algumas vias com maior quantidade de faixas possuem também baixas velocidade apesar de intuitivamente se esperar o contrário, também não se identifica a relação oposta. No entanto o CCP é positivo igual a 0,28 entre as variáveis, com valor-p menor que 5%, demonstrando uma correlação positiva com a quantidade de faixas.

Figura 11: Número de faixas de tráfego vs Velocidade média de percurso

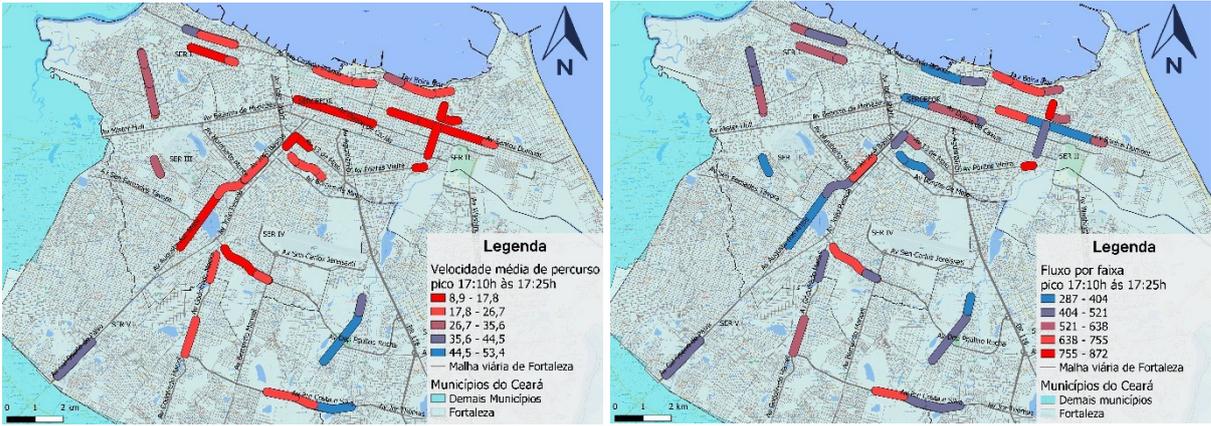


Fonte: Elaborado pelo autor

- **Estrutura cicloviária**

Quanto a presença de estrutura cicloviária a figura 12 apresenta a localização dos trechos que possuem alguma dessas estruturas, ciclovia ou ciclofaixa. Nota-se que todos os trechos que na hora pico apresentaram velocidades acima de 44 km/h coincidem com os trechos que possuem estrutura cicloviária. Vale reforçar que isso não significa que essas velocidades mais altas são devido a estrutura cicloviária, pelo menos não somente a isso. O CCP revelou uma correlação positiva igual a 0,38 e valor-p menor que 5%.

Figura 12: Presença de estrutura cicloviária vs Velocidade média de percurso



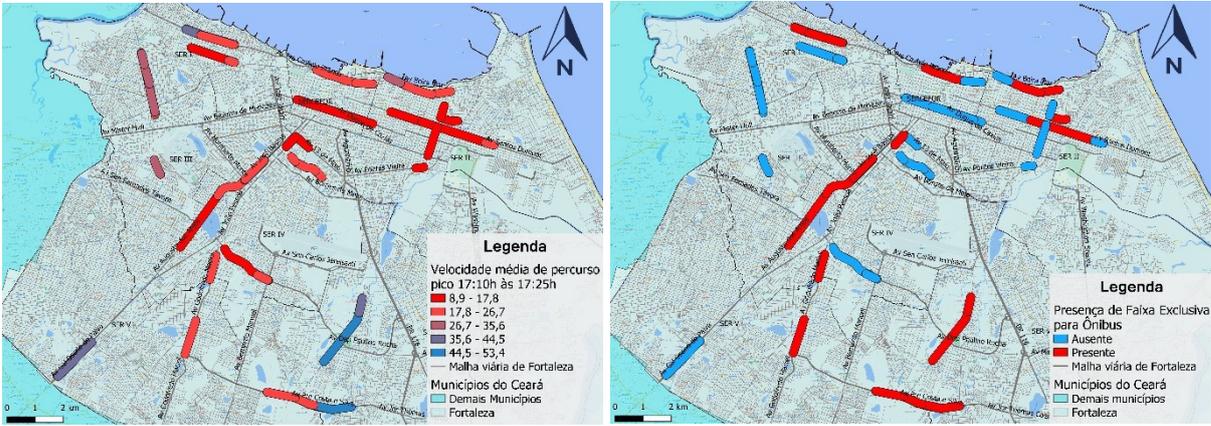
Fonte: Elaborado pelo autor

• **Faixa exclusiva**

A figura 13 apresentada abaixo mostra a localização dos trechos que possuem faixa exclusiva para ônibus. No caso da faixa exclusiva é difícil perceber visualmente alguma relação desta com a velocidade média na hora pico, então calculou-se o CCP que resultou num valor de 0,26 com valor-p igual a 6%, mostrando uma correlação ainda significativa entre as variáveis.

Esse resultado mostra que a presença de faixa exclusiva pode estar associada a maiores velocidades, possivelmente porque essa estrutura gera uma organização do tráfego e diminui a disputa entre transporte individual e coletivo.

Figura 13: Presença de faixas exclusivas de ônibus vc Velocidade média de percurso



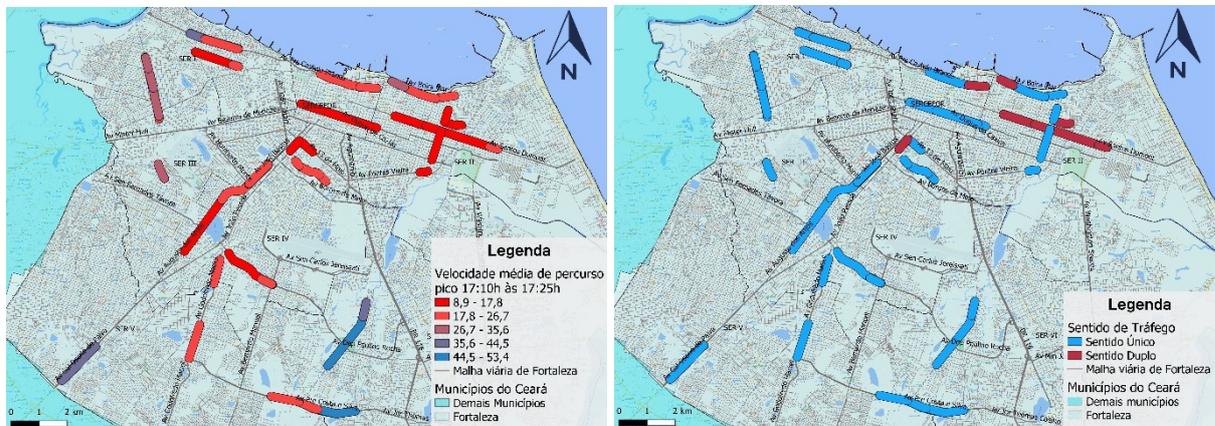
Fonte: Elaborado pelo autor.

• **Tipo de sentido de tráfego**

No que diz respeito ao sentido de tráfego a figura 14 abaixo apresenta a distribuição de trechos de duplo sentido e de sentido único, verifica-se que é imperceptível a relação da variável com a velocidade média de percurso. De fato, verificou-se não haver correlação entre as variáveis, o valor do CCP calculado foi igual a -0,18 com um valor-p igual a 18%.

Embora o resultado encontrado não aponte correlação da variável com a velocidade, não significa dizer que a implantação de sentido único em trechos de via não impacte nas velocidades, esse resultado não incorpora a influência das demais variáveis.

Figura 14: Tipo de sentido de tráfego vs Velocidade média de percurso



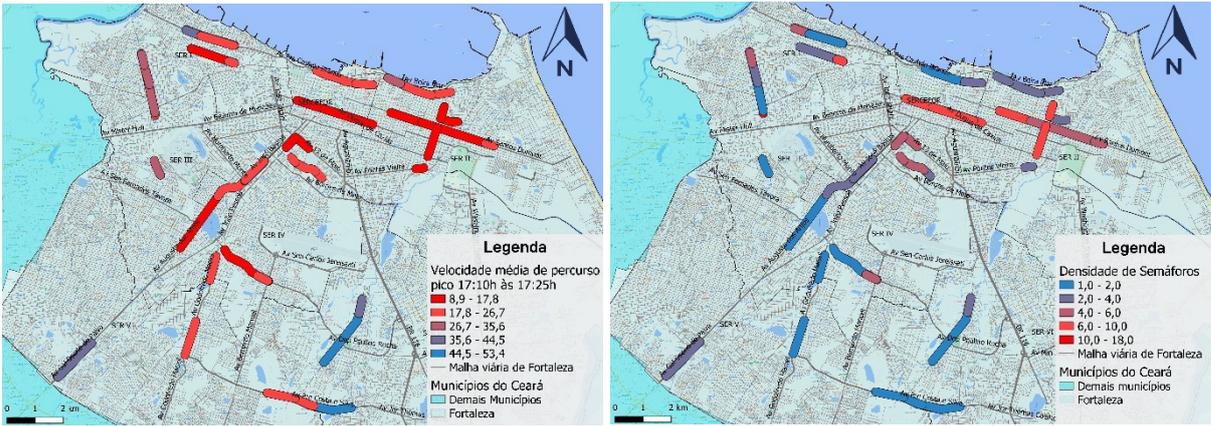
Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Densidade de Semáforos**

Quanto a densidade de semáforos a figura 15 abaixo mostra a distribuição espacial nos trechos de análise da densidade de semáforos. Pode-se perceber que conforme as variáveis anteriores há uma relação inversa entre o aumento da densidade de semáforos e a velocidade; o coeficiente de correlação de Pearson foi igual a -0,28 com valor-p menor que 5%.

Nota-se também que há uma concentração dos maiores valores das variáveis analisadas na regional dois da cidade, possivelmente pelo fato de ser uma região bastante adensada, com altos volumes coincidindo com uma realidade urbana conturbada, surgindo também a necessidade de maior controle do tráfego.

Figura 15: Densidade de semáforos vs Velocidade média de percurso

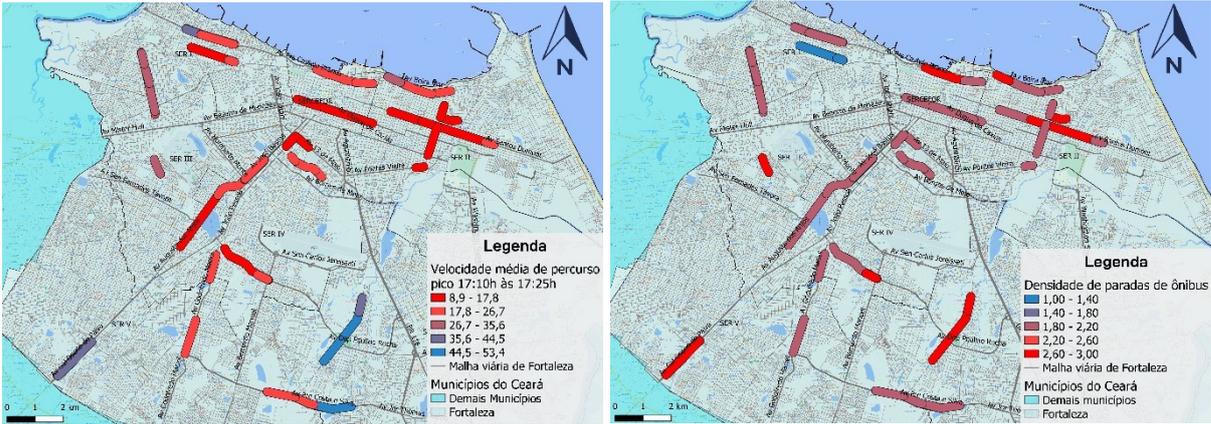


Fonte: Elaborado pelo autor

- **Densidade de paradas de ônibus**

Quanto a densidade de paradas de ônibus, após os cálculos verificou-se que não há correlação desta variável com a velocidade média de percurso no pico da tarde, o CCP foi igual a 0,01 com valor-p igual a 94%. Visualmente também não é possível perceber relação desta variável com a velocidade, conforme pode ser visto na figura 16.

Figura 16: Densidade de paradas de ônibus vs Velocidade média de percurso



Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.2 Relação da velocidade com o volume

A partir dos dados de velocidade e volume agregado em cinco minutos é possível obtermos outra relação bastante estudada nos transportes, que é o gráfico da variação da velocidade com o aumento do volume. HCM-2010 utiliza essa relação na estimativa de capacidade para rodovias.

Os subtópicos a seguir apresentam o resultado da análise do comportamento dessa relação comparado a variação das diferentes variáveis independentes, a fim de compreender inicialmente essa possível influência e como ela ocorre

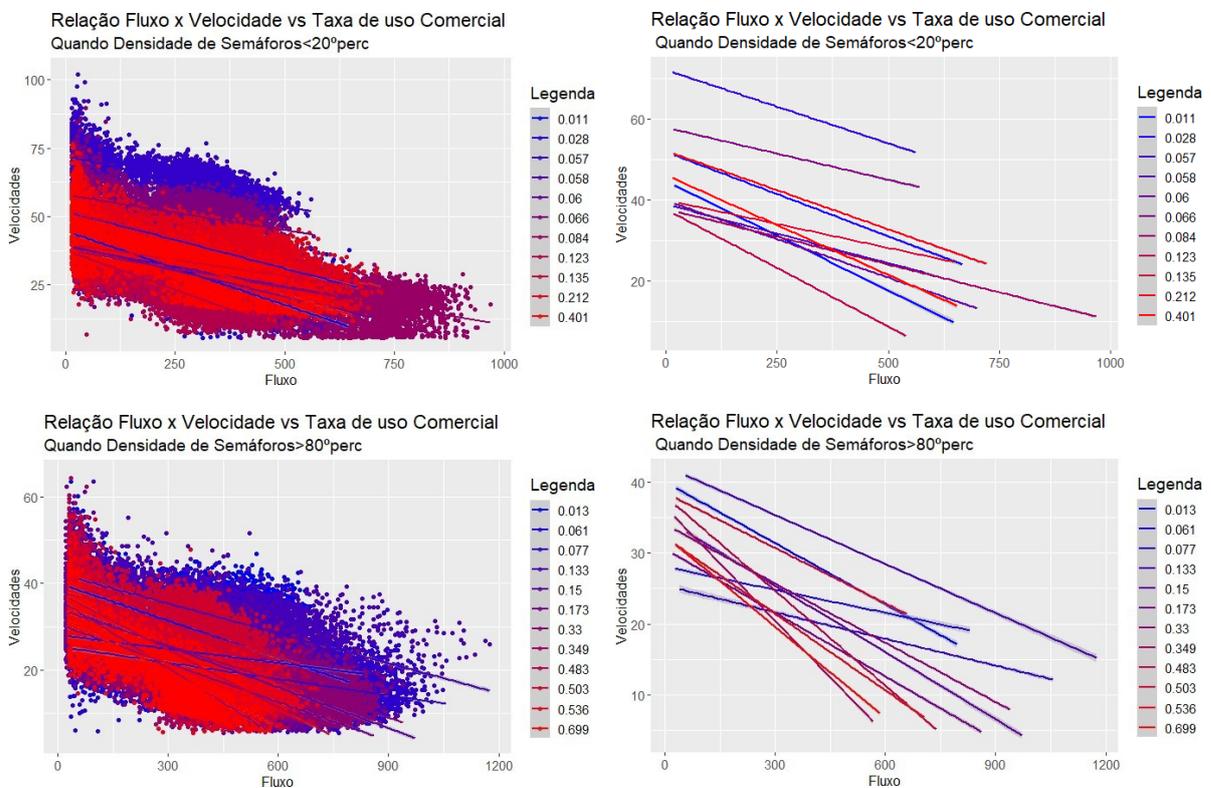
- **Uso do Solo**

A figura 17 abaixo apresenta quatro gráficos que mostram a relação velocidade x volume em duas condições diferentes, trechos com densidade de semáforos menor que o 20º

percentil de densidades de semáforo e trechos maiores que o 80º percentil de densidade de semáforos. Os gráficos apresentam os respectivos trechos classificados por taxa de uso do solo comercial.

Nota-se que para ambas as condições há uma tendência de que os trechos com uso mais comercial tenham um perfil mais abaixo, no entanto não o suficiente para chegar-se a alguma conclusão mais precisa. Na condição de densidade de semáforos maior que o 80º percentil, observa-se que há alguns trechos com inclinações bastante altas do modelo linear ajustado, o que pode significar que algo causa uma maior sensibilidade da velocidade ao volume, também não é possível concluir se é isso é causado pelo uso do solo, mas cerca de 80% das linhas mais avermelhadas estão entre as mais inclinadas.

Figura 17: Relação Fluxo x Velocidade graduado pela taxa de uso comercial



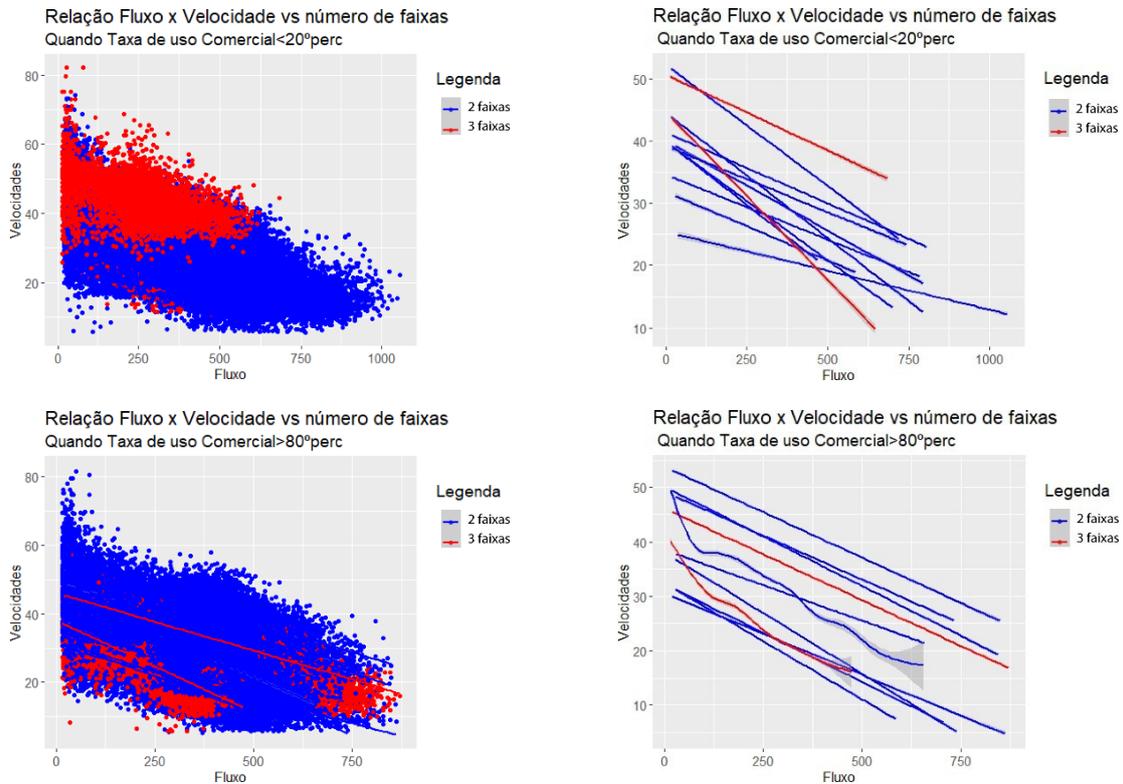
Fonte: Elaborado pelo autor

- **Número de Faixas de Tráfego**

No que diz respeito ao número de faixas de tráfego a figura 18 abaixo apresenta a relação velocidade x volume categorizado pela quantidade de faixas destinadas ao tráfego. Não é possível perceber visualmente alguma influência da quantidade de faixas, uma vez que ao

tentar isolar o efeito do uso do solo acabou-se por diminuir a quantidade de trechos de 3 faixas diminuindo a variabilidade da variável.

Figura 18: Relação Fluxo x Velocidade categorizado pelo número de faixas



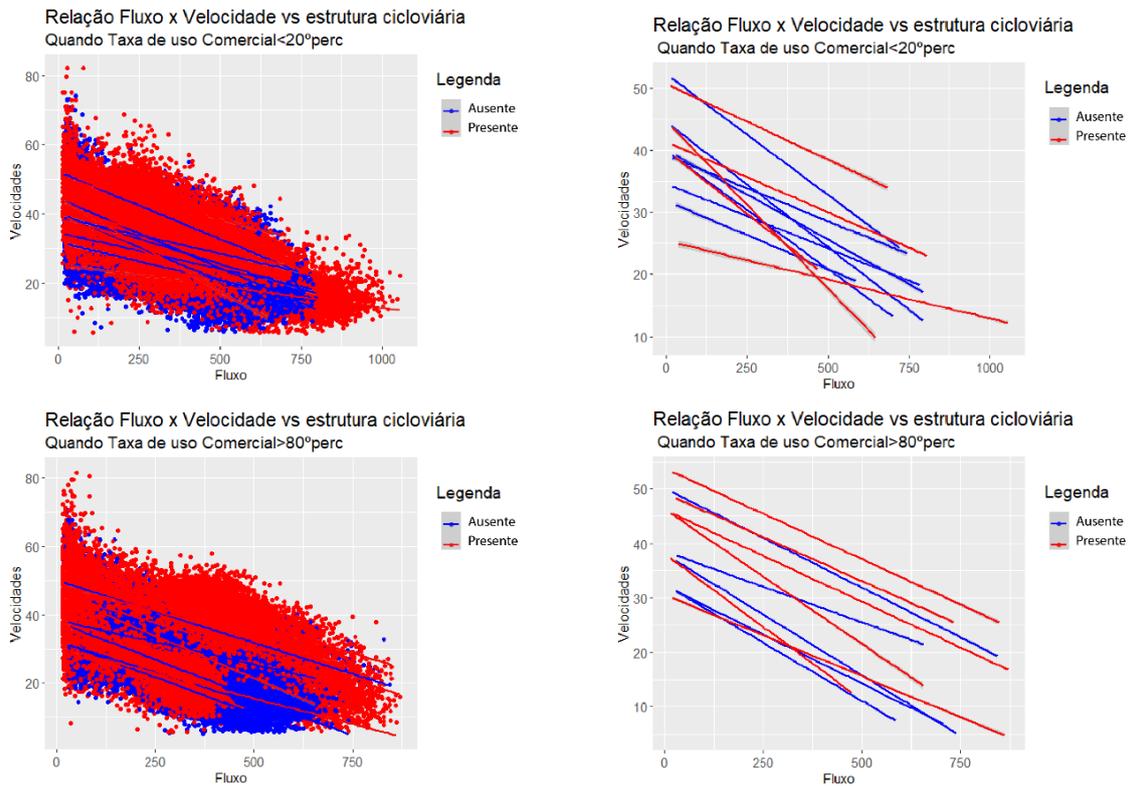
Fonte: Elaborado pelo autor

### • Estrutura Ciclovária

Quanto a estrutura ciclovária os gráficos da figura 19 mostram a relação da velocidade com o volume de tráfego por faixa. Nota-se, principalmente na condição de uso do solo mais comercial, que os trechos que possuem estrutura ciclovária, simbolizados na cor vermelha, estão mais acima associados a maiores velocidades para um mesmo volume, em detrimento dos trechos sem essa estrutura.

No entanto não é suficiente para explicar a relação entre as variáveis, ainda mais quando na condição de uso do solo menos comercial esse comportamento não é observado. Esse resultado não mostra que as hipóteses levantadas estão erradas, pois a ausência da evidência pode estar relacionada ao impacto de outras variáveis que não conseguiram ser isoladas.

Figura 19: Relação Fluxo x Velocidade categorizado pela presença de estrutura ciclovária



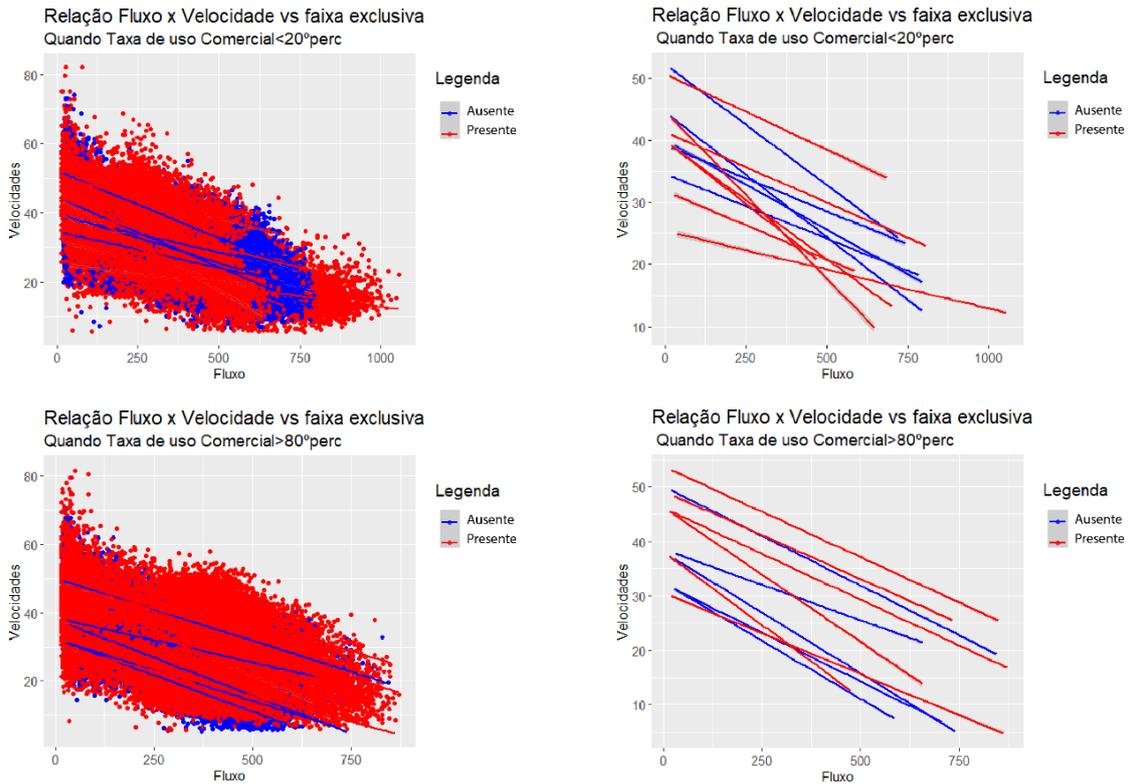
Fonte: Elaborado pelo autor

- **Faixa Exclusiva**

A relação velocidade x volume para a variável presença de faixa exclusiva mostra um resultado semelhante ao encontrado para a estrutura ciclovária, na condição de uso do solo mais comercial os trechos que possuem faixa exclusiva coincidem com os trechos que possuem estrutura ciclovária. Esse resultado revela que possivelmente esses trechos são mais estruturados que os demais, é possível que outros fatores também sejam melhores como sinalização ou programação semafórica.

Dessa forma não é possível dizer se o comportamento encontrado é fruto do impacto das faixas exclusivas ou da estrutura ciclovária ou mesmo um efeito combinado desses e de outros fatores.

Figura 20: Relação Fluxo x Velocidade categorizado pela presença de faixa exclusiva



Fonte: Elaborado pelo autor

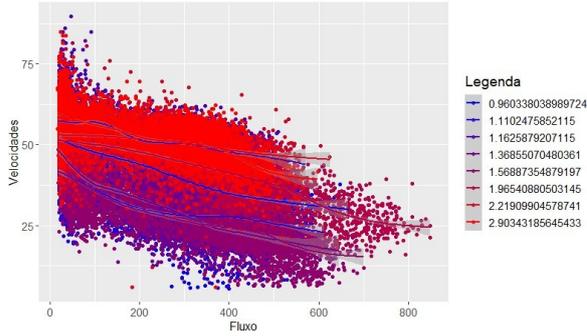
- **Densidade de Semáforos**

No que diz respeito a densidade de semáforos a figura 21 mostra os gráficos da relação velocidade x volume para trechos de três faixas de tráfego em duas condições de uso do solo e graduado pela densidade. Nota-se que nas distintas condições de uso do solo a densidade de semáforos tem um efeito oposto na relação velocidade volume, no uso do solo menos comercial ela está associada a velocidades mais altas e o contrário quando o uso do solo é bastante comercial.

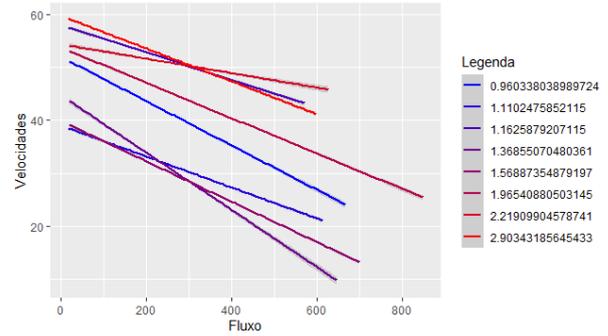
Esse comportamento pode estar associado ao estado de congestão em que os trechos localizados em uso do solo adensado geralmente operam, fazendo com que a velocidade seja mais sensível a densidade de semáforos nesses pontos.

Figura 21: Relação Fluxo x Velocidade graduado pela densidade de semáforos

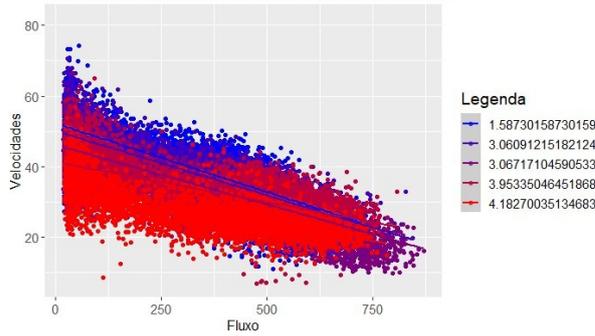
Relação Fluxo x Velocidade vs densidade de semáforos  
Taxa de uso Comercial < 25% e Número de faixas = 3



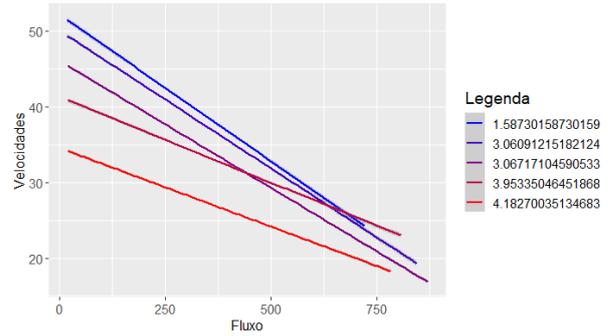
Relação Fluxo x Velocidade vs densidade de semáforos  
Taxa de uso Comercial < 25% e Número de faixas = 3



Relação Fluxo x Velocidade vs densidade de semáforos  
Taxa de uso Comercial > 75% e Número de faixas = 3



Relação Fluxo x Velocidade vs densidade de semáforos  
Taxa de uso Comercial > 75% e Número de faixas = 3



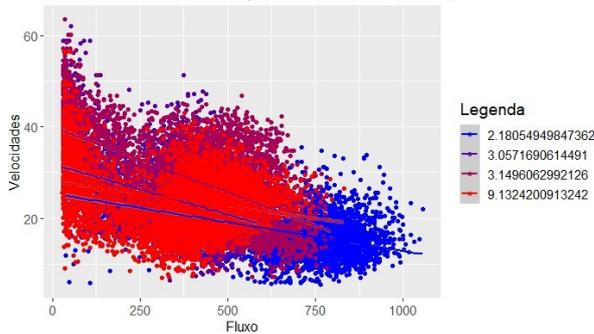
Fonte: Elaborado pelo autor

### • Densidade de Paradas

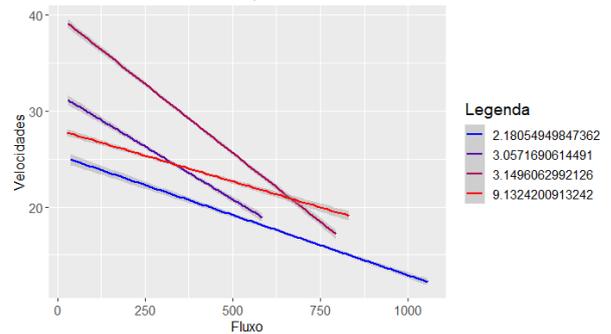
Em relação a densidade de paradas a análise da relação velocidade x volume está apresentada na figura 22. Não é possível perceber uma relação entre o comportamento dos gráficos com a variável, para ambas as condições a relação velocidade volume não parece estar relacionada com a variável.

Figura 22: Relação Fluxo x Velocidade graduado pela densidade de paradas de ônibus

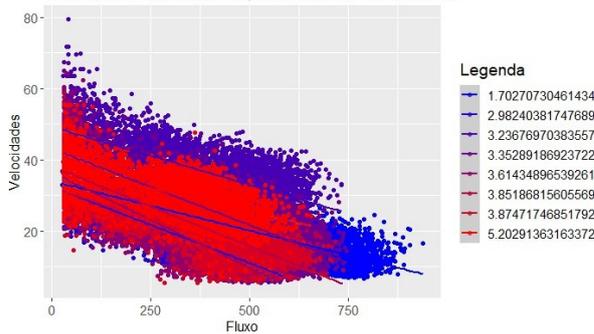
Relação Fluxo x Velocidade vs densidade de paradas  
Taxa de uso Comercial <25%perc e Número de faixas = 2



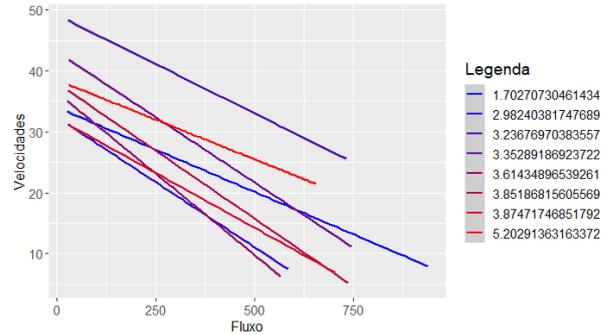
Relação Fluxo x Velocidade vs densidade de paradas  
Taxa de uso Comercial <25%perc e Número de faixas = 2



Relação Fluxo x Velocidade vs densidade de paradas  
Taxa de uso Comercial >75%perc e Número de faixas = 2



Relação Fluxo x Velocidade vs densidade de paradas  
Taxa de uso Comercial >75%perc e Número de faixas = 2



Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.3 Modelo de regressão para a velocidade

Uma dificuldade em analisar o efeito de variáveis na velocidade pode ser dada pelo fato de não conseguirmos isolar o efeito de outras variáveis; no contexto urbano essa dificuldade pode ser ainda maior devido a maior quantidade de variáveis. É difícil saber se a correlação positiva de uma variável com a velocidade é efeito da influência desta variável somente, se é o efeito agregado da variável com outra ou se é efeito de outras variáveis somente.

A resposta para essas perguntas é muito difícil de ser encontrada, uma vez que não se sabe quais variáveis influenciam a velocidade, no entanto a fim de avaliar a influência das variáveis deste estudo isolando a influência das demais variáveis do mesmo estudo foi calibrado no software *R Studio* um modelo de regressão linear múltipla, conforme descrito no item 3.5 Modelo de regressão linear múltipla com a velocidade.

O resultado do modelo de regressão calibrado está apresentado na tabela 2 abaixo, o modelo possui  $R^2 = 0,44$  e valor-p <0,01. Avaliou-se também a correlação entre as variáveis do modelo através de uma matriz de correlação exposta na figura 23 ex calculou-se o fator de inflação da variância (VIF) apresentado na tabela 3.

Tabela 2: Resultado da regressão múltipla para a velocidade de percurso

	Estimativa	Erro Padrão
Intercepto	34,07	0,1***
Volume por faixa	-0,0251	8e-5***
Faixa Exclusiva	7,27	0,07***
Estrutura Ciclovária	3,48	0,05***
Densidade de Semáforos	-0,7	7,5e-3***
Densidade de Paradas	0,7	0,02***
Número de Faixas	3,43	0,05***
Tipo de Sentido	-5,7	
Taxa de Uso Comercial	-8,24	0,1***
*** Significativo, valor-p<0,01		
Resíduos não normais.		
Não passou no teste de homoscedasticidade		
Não passou no teste de independência		

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados do modelo de regressão mostram que o volume por faixa, a densidade de semáforos, a taxa de uso comercial e o tipo de sentido estão associados a valores mais baixos da velocidade de percurso, o coeficiente negativo para o volume já era esperado, uma vez que se trata de uma relação que já é conhecida e evidenciada em diversos estudos na área de transportes.

A relação negativa com a taxa de uso comercial está de acordo com as hipóteses iniciais e pode estar relacionada ao aumento dos conflitos relacionados a esse tipo de uso, como aumento da quantidade de acessos a lote, estacionamentos, pedestres na via, maior quantidade de obstruções na beira da estrada, além de impactos na própria demanda uma vez que esse tipo de uso atrai uma maior quantidade de viagens. Os resultados expostos em 4.1.1 *4.1.1 Uso do Solo* e 4.2 também já apontavam para esse resultado.

Também já se era esperado que a densidade de semáforos impactasse de forma negativa na velocidade uma vez que outros autores já haviam evidenciado isso. Além de que uma maior quantidade de semáforos aumenta os atrasos que impacta diretamente na velocidade de percurso, uma vez que está é uma função do tempo de percurso.

No entanto, esperava-se que vias de sentido único estivessem associadas a maiores velocidades. O resultado inconsistente encontrado pode estar associado ao método de análise, talvez o impacto dessa variável fosse melhor percebido numa análise microscópica do antes e depois da implantação no mesmo trecho, isolando-se os fatores externos. Ou ainda podemos levantar a hipótese de que após a implantação dessas estruturas o tráfego se realoque de forma a aumentar a demanda nesses trechos e isso pode estar associado também a mudanças nos padrões de uso dessas vias.

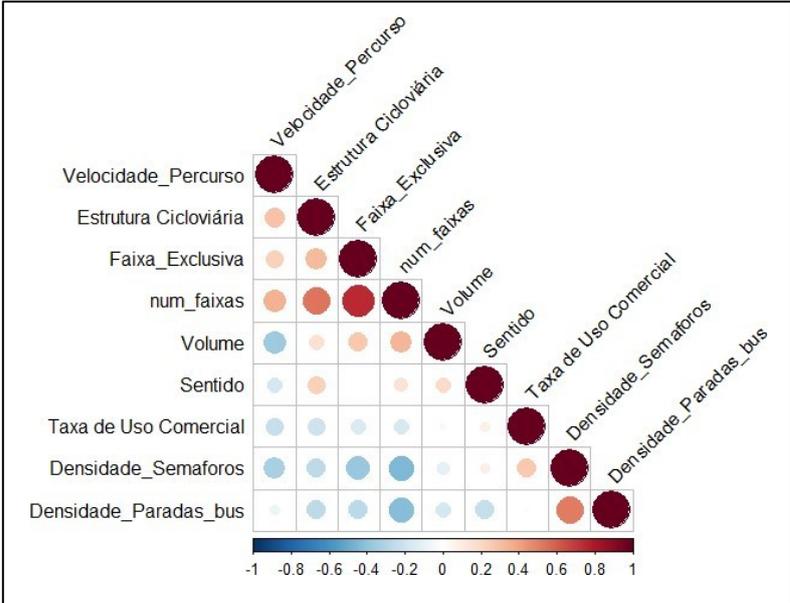
A presença de faixa exclusiva assim como a de estrutura ciclovária estão

associadas a maiores valores de velocidade, esse resultado também já era esperado uma vez que a presença dessas estruturas causa uma organização da via diminuindo os conflitos carro-pedestre e carro-

ônibus. Também já era esperado que o número de faixas de tráfego estivesse associado a maiores valores de velocidade, pois se trata de um indicador de maior oferta e está associado a maiores capacidades base. No entanto a densidade de paradas apresentou um resultado inconsistente, uma vez era esperado que ela estivesse associada a menores valores de velocidade já que é um indicador de maior conflito carro-ônibus.

A matriz de correlação e os resultados da análise do VIF mostraram que não há problemas sérios de multicolinearidade nos dados, uma vez que o maior valor do fator de inflação da variância foi igual a 4,7. Valores de VIF menores que 10 indicam que há correlação, mas não tão alta, ou seja, pode-se relaxar quanto a multicolinearidade.

Figura 23: Matriz de correlação entre variáveis.



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 3: Fator de Inflação da Variância

Velocidade de Percurso	Volume por faixa	Faixa Exclusiva	Estrutura Ciclovial	Número de Faixas
1,8	1,5	3,9	1,5	1,5
Densidade de Semáforos	Densidade de Paradas de Ônibus	Taxa de Uso Comercial	Tipo de Sentido	
1,7	4,7	1,2	1,2	

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4 Modelo de regressão para a sensibilidade da velocidade ao volume

A fim de avaliar também como as variáveis podem estar associadas ao desempenho das vias estudadas, calibrou-se um modelo de regressão cujo a variável y é a taxa de variação

velocidade/volume ( $v/v$ ) que representa a inclinação da curva volume velocidade, considerando uma linearidade. A tabela 4 abaixo mostra o resultado do modelo calibrado.

A taxa  $v/v$  representa o coeficiente de inclinação da curva, variando entre -0,053 e -0,0091, logo vemos que todos são negativos e o objetivo é avaliarmos a intensidade deste coeficiente a fim de perceber que variáveis influenciam numa maior inclinação desta reta. O coeficiente de cada reta representa uma estimativa de quanto a velocidade diminui para um aumento de uma unidade de volume, quer dizer que por exemplo em média para os trechos de Fortaleza a velocidade cai 0,019 km/h para cada veículo adicionado ao fluxo por faixa. Obviamente essa queda não é linear, mas para efeitos da análise considerou-se esse um bom indicador.

Tabela 4: Resultado da regressão múltipla para a taxa  $v/v$

	Estimativa	Erro Padrão
Intercepto	-0,019	0,008**
Faixa Exclusiva	0,0038	0,004
Estrutura Ciclovária	0,0043	0,003
Densidade de Semáforos	0,0009	0,0005*
Densidade de Paradas	0,00064	0,001
Número de Faixas	-0,0052	0,003*
Tipo de Sentido	-0,0001	0,003
Taxa de Uso Comercial	-0,02	0,008**
* Significativo, valor- $p < 0,1$		
** Significativo, valor- $p < 0,05$		
Resíduos não normais.		
Passou no teste de homocedasticidade		
Passou no teste de independência		

Fonte: Elaborado pelo autor

As variáveis presença de faixa exclusiva, presença de estrutura ciclovária, densidade de paradas e tipo de sentido não foram significativamente relevantes na explicação do modelo, o que não significa necessariamente que elas não possuam impacto na variável  $v/v$ , apenas não é possível confirmar.

O intercepto da função calibrada é negativo o que mostra obviamente que o aumento do volume causa um efeito negativo na velocidade, mesmo quando não há nenhuma

influência de nenhuma outra variável. Resultado que já era esperado uma vez que essa relação é bastante conhecida.

Para que fique claro, é importante notar que quando o coeficiente calibrado referente a uma variável qualquer é positivo isso significa que a taxa  $v/v$  é menos negativa e a inclinação é menor. Isso quer dizer que para um aumento de volume  $x$  a velocidade cai menos, isso pode estar associado a capacidades base por faixas maiores então na relação volume/capacidade ( $v/c$ ) quando a capacidade é alta um aumento de uma unidade de volume é menos impactante do que quando a capacidade é baixa. Podemos dessa forma associar essa influência na relação  $v/v$  como sendo uma influência da variável na capacidade do trecho.

A densidade de semáforos mostrou-se estar associada a maiores valores de  $v/v$  diferente do resultado para o modelo de velocidade, esse comportamento possivelmente está associado ao fato de que mesmo causando um impacto negativo na velocidade de percurso, já que a presença de semáforos inevitavelmente gera atraso, os semáforos tendem a proporcionar uma maior organização do tráfego no trecho fazendo assim com que a velocidade seja menos sensível ao aumento do volume e mantendo os padrões de desempenho do sistema. O fato de os semáforos de programação estática serem programados para situações de maior demanda também podem estar associados a esse resultado, porém é importante ressaltar que em Fortaleza muitos dos semáforos são controlados em tempo real.

Como esperado e evidenciado nas seções anteriores o uso comercial está associado também a menores valores de  $v/v$ , demonstrando que de fato essa variável impacta negativamente no desempenho do sistema. A maior quantidade de conflitos no meio urbano impacta na maior sensibilidade da velocidade ao volume, quer dizer que os trechos com uso do solo mais comerciais estão associados a relações velocidade/volume com maiores inclinações. Fazendo novamente um paralelo a relação  $v/c$  isso pode significar que uma maior quantidade de conflitos no meio urbano impacta na capacidade da via, uma vez que esse conflito são variáveis essa capacidade também é variável.

Em contraste a isso a quantidade de faixas de tráfego está associada também a menores valores de  $v/v$ , de acordo com os resultados. Esse comportamento é inesperado e inconsistente com as hipóteses levantadas inicialmente, não há estudos que avaliem o impacto dessa variável na relação  $v/v$  porém o (HCM-2010), aponta para o fato de que maiores capacidades de base estão geralmente associadas a melhores velocidade uma vez que numa via com quatro faixas a obstrução de uma das faixas impacta menos na velocidade do que uma via com duas faixas. Não foi possível portanto, levantar hipóteses da razão desse resultado.

## **5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

A análise descritiva dos padrões de velocidade demonstrou que a velocidade em Fortaleza é bastante baixa em todo o território com poucas exceções, em geral esse desempenho, principalmente na hora pico, está associado às vias com maiores volumes por faixa e uso do solo mais comercial, a região do centro e na regional 2 são as áreas mais afetadas. A variação da velocidade ao longo do dia é extremamente dispersa nos trechos, existem diversos padrões de distribuição que dificultam a análise e a comparação com as variáveis consideradas, porém

é uma análise que poderia ser realizada, talvez com um método de clusterização, a fim de determinar os grupos com padrões semelhantes.

A caracterização inicial da velocidade ajudou a definir melhor o que seria esperado como resultado dos modelos de regressão. Foi possível ter uma visão espacial de como as variáveis independentes estão relacionadas com a velocidade. A análise da relação volume velocidade com as variáveis independentes mostrou que não é possível tirar conclusões válidas com a aplicação desse método, uma vez que seria necessário conseguir isolar o efeito das demais variáveis.

O modelo de regressão com a velocidade de percurso (modelo 1) teve sérias limitações relacionadas ao não atendimento das premissas de normalidade, homocedasticidade e heterocedasticidade dos erros da regressão, possivelmente causado pela utilização de todas as observações de velocidade ao invés de um único indicador, o que implicou na repetição das características do trecho associadas a cada observação agregada de velocidade, ou ainda a agregação em intervalos de cinco minutos pode ter ocasionado alguma correlação temporal. No entanto, considerou-se para efeito desse estudo que essa limitação não impactou no sinal dos parâmetros calibrados. Dessa forma embora não possamos confiar nos parâmetros calibrados podemos analisar o sinal da regressão e avaliar como a influência das variáveis ocorre.

O resultado encontrado no modelo 1 possibilitou uma melhor compreensão dos fatores que influenciam a velocidade em Fortaleza atendendo, assim, o que foi colocado como objetivo. Obviamente não somos capazes de dizer quais são todas as variáveis que impactam na velocidade, mas fomos capazes de, com base na revisão da literatura, levantar hipóteses bastante fundamentadas de algumas das variáveis que poderiam ter algum efeito e confirmar essas hipóteses. Ressalta-se que as variáveis foram também limitadas pelo levantamento de indicadores, que precisou se restringir a bases de dados encontradas ou desenvolvidas pelo autor na internet.

Alguns dos resultados encontrados no modelo 1 concordam com outros estudos relatados na revisão. A densidade de semáforos, por exemplo, pode ser considerada um equivalente à densidade de acessos e interseções utilizadas nos modelos de (HCM-2010), (ANDERSEN, 2016) e (MEDINA; TARKO, 2005). E assim como nesses modelos, evidenciou-se que a densidade de semáforos causa um impacto negativo na velocidade, pelo menos em situação de fluxo livre, já que o modelo para a relação velocidade/volume (modelo 2) mostrou que a densidade de semáforos está associada a trechos com desempenho mais estável, ou seja, onde a velocidade é menos sensível ao aumento do volume.

Resultado semelhante pode ser dito quanto ao uso do solo. Os resultados encontrados coincidem com os resultados citados pelos autores Lobo *et al.* (2013), Litman

(2010), Alobaydi *et al.* (2020), e Ou *et al.* (2010). E esse estudo em especial mostrou que o uso do solo não só está associado a menores velocidades de percurso como impacta no desempenho da relação  $v/v$ . Essa informação é bastante relevante para o planejamento do sistema de transportes uma vez que se pode propor ações voltadas a reduzir o impacto dos PGVs no sistema de transporte, através de melhores acessos para veículos e pedestres, algumas ações urbanísticas ou mesmo uma maior exigência a elaboração de RISTs.

Verificou-se também o impacto positivo da implementação de sistemas de priorização do Transporte Público, como as faixas exclusivas e das estruturas cicloviárias. No entanto, ressalta-se que esse resultado não significa que a implementação indiscriminada dessas estruturas sempre trará resultados positivos, cabendo uma análise de cada caso. Os resultados mostraram que os trechos que possuem essas estruturas estão associados a maiores velocidades, já isolando a influência do uso do solo e das demais variáveis, evidenciando um impacto positivo dessas estruturas não só para os modos para os quais elas foram projetadas, mas também para o tráfego geral.

Uma variável que não pôde ser avaliada nesse estudo foi a capacidade dos trechos e a relação da capacidade com o volume ( $v/c$ ) é também muito estudada nos transportes. O (HCM-2010), por exemplo, traz inúmeras análises do impacto da relação  $v/c$  na velocidade para alguns tipos de estradas, sabe-se que conforme o volume se aproxima da capacidade da via o comportamento da velocidade muda e há uma queda desta até o ponto de colapso da via, próximo da capacidade. Podemos fazer um paralelo desse conceito com os resultados do modelo 2, visto que o que influencia a mudança de comportamento da velocidade é a relação  $v/c$ . Podemos levantar a hipótese de que as variáveis têm influência na capacidade da via, tornando a velocidade mais suscetível ao volume. Desta forma estamos considerando a capacidade variável e que o uso do solo por exemplo ao aumentar a quantidade de conflitos implica na diminuição da capacidade e logo no aumento da relação  $v/c$  e na redução da velocidade, o contrário para a densidade de semáforos.

Percebemos, então, que o impacto das variáveis pode mudar a depender do estado da via. A densidade de semáforos pode impactar negativamente quando o fluxo é baixo, mas conforme o volume se aproxima da capacidade da via uma maior quantidade de semáforos, desde que bem programados, podem contribuir para uma maior estabilidade do trecho.

O efeito da variabilidade temporal do impacto das variáveis não foi considerado nesse estudo, porém entende-se que variáveis como o uso do solo, presença de ciclovias, densidade de semáforos, densidade de paradas e presença de faixa exclusiva possuem impactos diferentes ao longo do dia. Como em horários de pico de volume há também um aumento dos conflitos externos, com mais ciclistas e ônibus conflitando com os veículos, mais pessoas

utilizando os PGVs e mais veículos entrando e saindo destes, o volume nos acessos também é maior. Por isso, uma sugestão para os próximos pesquisadores pode ser avaliar este impacto ao longo do dia, necessitando o uso de outros indicadores como densidade de pessoas, volume de bicicletas e ônibus no tempo, dentre outros.

Diante do exposto e do atual estado de desenvolvimento do estudo, foram estabelecidos como sugestão para trabalhos futuros os seguintes temas:

- a) Análise dos fatores que influenciam na variação temporal da velocidade;
- b) Análise dos fatores que influenciam no perfil de velocidade diária;
- c) Analisar como o impacto dos fatores pode mudar comparando o pico e o entre pico; e
- d) Avaliar o impacto temporal de variação dos fatores, através de indicadores que possam detectar essa variação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALOBAYDI, D. *et al.* Impact of urban morphological changes on traffic performance of Jadriyah intersection. **Cogent Engineering**, 2020. v. 7, n. 1. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1772946>>.

BHARGAB MAITRA, P. K. SIKDAR, S. L. D. Modeling congestion on urban roads and assessing level of service. **Journal of Transportation Engineering**, 1999. v. 125, n. 6, p. 508–514.

BOARETO, R. *et al.* **Mobilidade Urbana Sustentável. Anais do Congresso de Iniciação Científica da Unicamp**. São Paulo: [s.n.], 2015. Disponível em: <[http://files-server.antp.org.br/\\_5dotSystem/download/dcmDocument/2013/01/10/15FBD5EB-F6F4-4D95-B4C4-6AAD9C1D7881.pdf](http://files-server.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2013/01/10/15FBD5EB-F6F4-4D95-B4C4-6AAD9C1D7881.pdf)>.

CAMILLA SLOTH ANDERSEN; KRISTIAN HEGNER REINAU; NIELS AGERHOLM. The Relationship between Road Characteristics and Speed Collected from Floating Car Data.

**Journal of Traffic and Transportation Engineering**, 2016. v. 4, n. 6, p. 1–10.

CAVENETT *et al.* **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira. Revista dos Transportes Públicos - ANTP**. [S.l.]: [s.n.], 2020. Disponível em: <<http://files.antp.org.br/2019/7/29/rtp152-4.pdf>>.

ELURU, N. *et al.* Modeling vehicle operating speed on urban roads in Montreal: A panel mixed ordered probit fractional split model. **Accident Analysis and Prevention**, 2013. v. 59, p. 125–134. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2013.05.016>>.

FITZPATRICK, K. *et al.* **Speed Prediction for Two-Lane Rural Highways. Fhwa-Rd-99-171**. Texas: [s.n.], 1999. Disponível em: <[http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/104-103#.U\\_9KaEu3I6I](http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/104-103#.U_9KaEu3I6I)>.

FRANK, L. D.; ANDRESEN, M. A.; SCHMID, T. L. Obesity relationships with community design, physical activity, and time spent in cars. **American Journal of Preventive Medicine**, 2004. v. 27, n. 2, p. 87–96.

GATTIS, B. J. L.; WATTS, A.; MEMBER, S. Urban street speed related to width and functional class. **Journal of Transportation Engineering**, 1999. v. 125, n. June, p. 193–200. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1999\)125:3\(193\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1999)125:3(193))>.

HAMIEL, J. W. **Highway Capacity Manual V3**. Washington: [s.n.], 2010.

HEBER, F.; OLIVEIRA, L. De. O Impacto sobre o Tráfego Urbano devido Implantação de Sistema Binário de Avenidas na Cidade de Fortaleza-CE. 2015. n. February 2018.

IMPLAM, I. De P. De F. Fortaleza em Mapas. **Prefeitura de Fortaleza**, [s.d.]. Disponível em: <<https://mapas.fortaleza.ce.gov.br/#/>>. Acesso em: 6 abr. 2020.

IPEA. **Indicadores de Mobilidade Urbana da PNAD 2012. Comunicados do IPEA**. [S.l.]: [s.n.], 2013.

IPLAM. **Plano de Mobilidade de Fortaleza PlanMob**. Disponível em: <[http://fortaleza2040.fortaleza.ce.gov.br/site/assets/files/publications/fortaleza2040\\_plano\\_de\\_mobilidade\\_urbana\\_17-08-2015.pdf](http://fortaleza2040.fortaleza.ce.gov.br/site/assets/files/publications/fortaleza2040_plano_de_mobilidade_urbana_17-08-2015.pdf)>.

LAMM, R. *et al.* Possible design procedure to promote design consistency in highway geometric design on two-lane rural roads. **Transportation Research Record**, 1988. n. 1195, p. 111–122. Disponível em: <<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1988/1195/1195-011.pdf>>.

LITMAN, T. **Land Use Impacts on Transport**. [S.l.]: [s.n.], 2010.

LIZBETIN, J.; BARTUSKA, L. The Influence of Human Factor on Congestion Formation on Urban Roads. **Procedia Engineering**, 2017. v. 187, p. 206–211. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.366>>.

LOBO, A.; RODRIGUES, C.; COUTO, A. Free-flow speed model based on portuguese roadway design features for two-lane highways. **Transportation Research Record**, 2013. n. 2348, p. 12–18.

MEDINA, A. M. F.; TARKO, A. P. Speed factors on two-lane rural highways in free-flow conditions. **Transportation Research Record**, 2005. n. 1912, p. 39–46. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1177/0361198105191200105>>.

MENG, L. K.; THU, S. Two-Way Street Network Versus One-Way. **Network**, 2004. v. 44, n. 2, p. 111–122.

NTU. **Anuário NTU 20172018**. Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos. Disponível em:

<<https://www.ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub636687203994198126.pdf>>.

OLIVEIRA, J. L. A. **ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA DEMANDA NO TRANSPORTE COLETIVO POR ÔNIBUS EM FORTALEZA UTILIZANDO BIG DATA**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2019. ISBN 9788578110796.

OU, Y.; TANG, S.; WANG, F. Y. Computational experiments for studying impacts of land use on traffic systems. **IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC**, 2010. p. 1813–1818.

UNIVERSITÁRIA, B. **Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará**.