

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ARNOR AGRELI FERREIRA

**ANÁLISE DE MODELOS SIMPLIFICADOS PARA DETERMINAÇÃO
DO FLUXO DE SATURAÇÃO EM INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS
DA CIDADE DE TOLEDO-PR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO
2016

ARNOR AGRELI FERREIRA

ANÁLISE DE MODELOS SIMPLIFICADOS PARA DETERMINAÇÃO DO
FLUXO DE SATURAÇÃO EM INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS DA
CIDADE DE TOLEDO-PR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Ma. Patricia Casarotto de
Oliveira

Coorientadora: Profa. Dra. Rosangela
Aparecida Botinha Assumpção

TOLEDO

2016



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 020

ANÁLISE DE MODELOS SIMPLIFICADOS PARA DETERMINAÇÃO DO FLUXO DE SATURAÇÃO EM INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS DA CIDADE DE TOLEDO-PR

por

ARNOR AGRELI FERREIRA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 10:30h do dia **16 de junho de 2016** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof^a Dr. Elmagno Catarino Santos Silva
(UTFPR – TD)

Arq. Fabiano de Paula Leite Faria
(DEPTRANS – TD)

Prof^a Dra. Rosangela Aparecida Botinha
Assumpção
(UTFPR – TD)
Coorientadora

Prof Ma. Patricia Casarotto de Oliveira
(UTFPR – TD)
Orientadora

Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim
Coordenador da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

Aos meus pais, irmãs e a toda minha família, que acreditaram na minha capacidade e não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, em primeiro lugar, a Deus, pela força e coragem durante toda esta longa caminhada.

Agradeço também a todos os professores que me acompanharam durante a graduação, em especial a Prof^a. Patricia Casarotto de Oliveira e à Prof^a. Rosangela Aparecida Botinha Assumpção, que me orientaram durante a realização deste trabalho.

Não poderia deixar de agradecer aos amigos e colegas, pelo incentivo e pelo apoio constante.

RESUMO

FERREIRA, Arnor Agreli. Análise de modelos simplificados para determinação do fluxo de saturação em interseções semaforizadas da cidade de Toledo-PR. 2016. 85f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Coordenação do Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica federal do Paraná. Toledo, 2016.

Para projetos de programação semafórica, independentemente do método, é necessário a obtenção do fluxo de saturação (*FS*) para definição dos tempos de verde. O manual do DENATRAN indica a obtenção desse parâmetro a partir da contagem de veículos e análise de histograma de frequência. No entanto, esse método pode ser caro e dispendioso. Com isso, verifica-se a existência de vários métodos, nacionais e internacionais, para a estimativa do *FS*. Geralmente esses métodos foram desenvolvidos em cidades de grande porte, com alto fluxo de veículos. Nesse sentido, realizou-se uma análise dos principais modelos simplificados para a estimativa do *FS* em interseções semaforizadas da cidade de Toledo, Paraná. No total foram avaliados cinco modelos nacionais e oito internacionais. Para validação desses modelos, compararam-se os resultados com os valores obtidos pela curva acumulativa de Shanteau, que consiste na análise de filmagem de tráfego *in loco*. Foram validados os modelos que apresentaram resíduo relativo inferior a 20%. No total, foram considerados aplicáveis para o levantamento do *FS* na cidade de Toledo-PR sete, dos treze modelos analisados. Também foram gerados três diferentes modelos a partir de regressão múltipla dos dados de campo, que permitiram resíduo relativo inferior à 13%. Mesmo assim, todos os modelos apresentaram coeficiente de determinação inferior à 50%. De maneira geral, verifica-se que os valores de fluxo de saturação são influenciados pelo comportamento do motorista, especialmente pela proximidade dos veículos na fila (*gap*) e velocidade e, por isso, a obtenção de valores de coeficiente de determinação baixo. O estudo também permitiu analisar os fatores de equivalência veicular (análise do *headway* duplo saturado) e o tempo perdido inicial (curva acumulativa de Shanteau) *in loco*.

Palavras-chave: Fluxo de saturação. Programação semafórica. Fator de Equivalência Veicular. Regressão Múltipla.

ABSTRACT

FERREIRA, Arnor Agreli. Analysis of simplified models for determining the saturation flow at signalized intersections in the city of Toledo-PR. 2016. 85f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Coordenação do Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica federal do Paraná. Toledo, 2016.

Regarding traffic lights planning projects, no matter the method, the obtainment the saturation flow ratio is required (FS), in order to define the green time. The DENATRAN manual indicates the obtaining of this parameter through vehicle-counting and frequency histogram analysis. However, this method may be costly. Thus, it is verified the existence of a range of methods, both national and international ones, which aims to estimate FS. Generally, these methods have been developed in large cities with high vehicle flows. In this way, there was an analysis of the main simplified models in order to estimate the FS in intersections with traffic lights in Toledo, Paraná. In total, it were evaluated five national and eight international models. For the validation of these models, the results were compared to values obtained from the Shanteau's cumulative curve, which consists of the analysis of onsite video records. The models that presented a relative-residue lower than 20% were validated. In total, seven out of thirteen models analyzed were considered applicable for the FS data collection at the city of Toledo-PR. In addition, three different models were generated from multiple regression resulting from field data, which resulted in a relative residue lower than 13%. Nonetheless, all the models have presented a determination coefficient lower than 50%. In a general way, it is verified that the saturation flow values are influenced by the driver's behavior, especially because of line vehicles close proximity (gap), and speed and, therefore, resulting in the obtainment of a low determination coefficient. The research also allowed the analysis of the passenger car equivalent factor (double saturated headway analysis) and the initial time loss (Shanteau's cumulative curve) onsite.

Keywords: Saturation flow, Traffic lights planning, Passenger car equivalent factor, Multiple regression.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxo de saturação e tempo perdido em estágio saturado.....	17
Figura 2: Fluxo direto e fluxo de conversão à direita.....	22
Figura 3: Esquema gráfico de medição do <i>headway</i>	24
Figura 4: <i>Headway</i> de saturação.....	24
Figura 5: Fluxograma das diferentes fases do trabalho.....	35
Figura 6: Processo de levantamento de dados a partir das filmagens.....	37
Figura 7: <i>Headway</i> duplo saturado.....	41
Figura 8: Fluxo de saturação por curva cumulativa.....	43
Figura 9: Cruzamento da R. S. Dumont. com as R. 12. Outubro. e Largo S. V. de Paula.....	57
Figura 10: Cruzamento da R. D. Pedro II com a A. Maripá.....	58
Figura 11: Cruzamento da R. S. Dumont com a A. Maripá.....	59
Figura 12: Cruzamento da R. A. Barroso com a A. Maripá.....	60
Figura 13: Cruzamento da R. S. Dumont com a A. Parigot de Souza.....	61
Figura 14: Levantamento de alguns parâmetros com base na análise dos ciclos.....	62
Figura 15: Variação do fluxo de saturação 30 ciclos consecutivos.....	65
Figura 16: Histograma de frequência para o fluxo de saturação.....	67
Figura 17: Comparação entre os valores obtidos in loco e encontrados pela equação 43 para ciclos com grau de saturação menor que 70%.....	74
Figura 18: Comparação entre os valores obtidos in loco e encontrados pela equação 44 para ciclos com grau de saturação igual ou maior que 70%.....	75
Figura 19: Comparação entre os valores obtidos in loco e encontrados pela equação 45 para todos os ciclos estudados.....	76
Figura 20: Comparação entre os valores obtidos in loco e encontrados pela equação 46 para todos os ciclos estudados.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores de equivalência veicular	23
Tabela 2: Valores de fluxo de saturação para aproximações com largura inferior a 5,5m	29
Tabela 3: Dias das realizações das filmagens	38
Tabela 4: Tabela da ANOVA	53
Tabela 5: Posição dos veículos em descarga na fila em Regime Saturado (intervalo fechado).....	63
Tabela 6: Fatores de equivalência veicular (UCP) obtidos	64
Tabela 7: Comparação entre valores sugeridos de fator de equivalência veicular (UCP) e valores obtidos pelo método do <i>headway</i> duplo saturado.....	65
Tabela 8: Variação do fluxo de saturação entre ciclos.....	66
Tabela 9: Fluxo de saturação médio (UCP/htv) obtido <i>in loco</i> , dentro de limites de confiança de 95%, por faixa de rolamento.....	68
Tabela 10: Variação do fluxo de saturação dentro e ente os picos do dia	69
Tabela 11: Intervalo de confiança no nível de 95% para o tempo perdido inicial e final	70
Tabela 12: Intervalo de valores de fluxo de saturação (570 ciclos) para diferentes modelos e resíduos relativos ao observado <i>in loco</i>	71
Tabela 13: Coeficiente de correlação r para diferentes graus de saturação, tendo como base os valores obtidos <i>in loco</i>	72
Tabela 14: Coeficiente de determinação r^2 para diferentes graus de saturação, tendo como base os valores obtidos <i>in loco</i>	72
Tabela 15: Coeficiente de determinação r^2 para diferentes graus de saturação, tendo como base os valores obtidos <i>in loco</i>	77
Tabela 16: Aplicabilidade de Modelos a Toledo-PR	79
Tabela 17: Variáveis utilizadas nos modelos.....	80
Tabela 18: Fatores de equivalência veicular sugeridos para Toledo-PR	81

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Justificativa	12
1.2. Objetivos	13
1.2.1. Objetivo Geral	13
1.2.2. Objetivos Específicos	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. Programação Semafórica	14
2.1.1. Método do Grau de Saturação Máximo	15
2.1.2. Método do Ciclo Ótimo de Webster	18
2.1.3. Tempo de Verde Real e Tempo de Verde Efetivo	18
2.1.4. Relação Entre o Fluxo de Saturação (FS) e o Tempo de Verde (t_v)	20
2.1.5. Sincronismo Semafórico	20
2.2. Volume de Tráfego	21
2.2.1. Equivalência Veicular	22
2.3. <i>Headway</i>	23
2.4. Fluxo de Saturação	25
2.4.1. Fórmulas Empíricas para a Determinação do Fluxo de Saturação	26
2.4.2. Medições em Campo	32
2.4.3. Variabilidade do Fluxo de Saturação	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1. Considerações Iniciais	35
3.2. Estudo Piloto	35
3.3. Coleta de Dados	37
3.3.1. Número de Amostras	37
3.3.2. Localização dos cruzamentos e filmagem das filas de veículos	38
3.3.3. Levantamento das Condições Operacionais dos Semáforos	39
3.3.4. Levantamento Geométrico das Interseções	39
3.3.5. Levantamento dos Fatores Ambientais	40
3.4. Tratamento dos Dados	40
3.4.1. Análise das Filmagens	40
3.4.2. Estudo Estatístico dos Dados	46

3.5. Modelagem Numérica.....	49
3.5.1. Variáveis Dummy	50
3.5.2. Regressão Linear Simples	50
3.5.3. Regressão Linear Múltipla	50
3.5.4. Resíduos e ANOVA na regressão	51
3.6. Validação e Aplicabilidade dos modelos existentes de FS	54
3.7. Modelagem.....	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1. Descrição e Caracterização das Faixas de Rolamento Analisadas.....	56
4.2. Quantidade Mínima de Veículos para a Determinação do Fluxo de Saturação.....	62
4.3. Fatores de Equivalência	64
4.4. Valores de Fluxo de Saturação Obtidos <i>In Loco</i>	65
4.4.1. Fluxo de Saturação médio e intervalo de confiança.....	67
4.4.2. Variação do Fluxo de Saturação Entre e Dentro dos Picos do Dia.....	68
4.5. Tempo Perdido Inicial e Final dos estágios semaforicos	69
4.6. Validação dos Modelos Existentes.....	70
4.7. Modelos Propostos	73
5. CONCLUSÕES	78
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
REFERÊNCIAS	83

1. INTRODUÇÃO

Estudos sobre a fluidez do trânsito fomentam melhorias na mobilidade urbana, especialmente na segurança dos usuários, sejam eles motoristas, motociclistas, ciclistas ou pedestres. Nesse contexto, o semáforo surge da necessidade de organizar e promover a segurança no trânsito em interseções críticas quanto ao volume de veículos e número de acidentes, entre outros fatores.

A determinação do tempo de verde necessário para atender um determinado grupo de movimentos de veículos, depende diretamente da taxa média de descarga das filas, em outras palavras, do fluxo de saturação. Sendo assim, conhecer o fluxo de saturação possibilita não só a determinação de parâmetros importantes como a capacidade de tráfego e os tempos perdidos no ciclo semafórico, mas também, parâmetros de desempenho como a fila máxima de veículos, o número de paradas e o atraso médio. Desta forma, adotar um valor para o fluxo de saturação é tarefa de grande responsabilidade, pois uma estimativa equivocada deste parâmetro compromete a eficiência do semáforo, podendo gerar congestionamentos e acidentes de trânsito.

Na literatura nacional e internacional podem ser encontradas várias fórmulas empíricas simplificadas para estimar o fluxo de saturação. No entanto, são baseadas nas condições de tráfego do local e da data da pesquisa, geralmente em grandes cidades. Além disso, as constantes transformações ocorridas no trânsito podem exercer influência no desempenho do sistema viário urbano e conseqüentemente no valor do fluxo de saturação. O surgimento de veículos cada vez mais potentes e tecnológicos proporciona uma melhora no desempenho, por outro lado o crescimento da frota, os fatores culturais e de educação do condutor também são condicionantes do fenômeno. Sendo assim, as fórmulas empíricas simplificadas, desenvolvidas em outras realidades de tráfego, podem divergir da realidade onde está sendo aplicada. Uma relação funcional inadequada assumida entre as variáveis do modelo e a taxa de fluxo de saturação, pode acrescentar um erro de previsão.

Neste sentido, o presente trabalho buscou-se analisar os principais modelos existentes a fim de validar ou não seu uso para estimar o fluxo de saturação na cidade de Toledo, Paraná. Além disso, foram elaborados modelos empíricos simplificados por meio de regressão linear múltipla para a determinação de modelos próprios.

1.1. Justificativa

Uma programação semafórica ineficiente, além de ser desconfortável aos usuários, pode gerar situações como atrasos, tempo de verde ocioso ou insuficiente e até avanço de sinal vermelho por ciclos semafóricos extensos. Neste sentido, é de grande importância o levantamento em campo dos parâmetros de dimensionamento dos tempos semafóricos. Entre eles destaca-se o fluxo de saturação, pois indica a taxa veicular horária de veículos que pode ser atendida na aproximação e interfere diretamente no cálculo da fração de verde requerida para cada estágio da programação.

Sempre que possível o valor do fluxo de saturação deve ser obtido *in loco* por meio de medidas diretas. Estas medidas podem ser realizadas de maneira manual, ou através de análise de filmagens (DENATRAN, 1984). No entanto, os levantamentos de campo não são muito utilizados nos municípios por razões econômicas, pois necessita da disponibilização ou relocação temporária de mão-de-obra e equipamentos específicos de análise de tráfego. Além disso, os métodos de obtenção *in loco* não se aplicam para o projeto de novas interseções. Desta forma, este valor muitas das vezes é atribuído de maneira experimental ou, no melhor dos casos, pelo uso de fórmulas empíricas simplificadas.

Todavia, muitas destas fórmulas foram desenvolvidas em outros países sob condições específicas de tráfego. Com isso, a aplicabilidade no tráfego dos municípios brasileiros é questionável, visto que fatores como o comportamento dos motoristas, padrão socioeconômico e de infraestrutura urbana, são influenciadores dos valores observados de fluxo de saturação (JACQUES, 1995).

Partindo deste pressuposto, o presente estudo buscou por meio da validação destas fórmulas simplificadas, contribuir no levantamento do fluxo de saturação para algumas situações representativas da cidade de Toledo-PR. O método consiste na comparação entre o valor de fluxo de saturação levantado *in loco* e aqueles obtidos por estimativas, baseando-se nas principais fórmulas simplificadas encontradas na bibliografia.

1.2. Objetivos

1.2.1. *Objetivo Geral*

Analisar a aplicabilidade de fórmulas empíricas utilizadas na estimativa do fluxo de saturação para as condições atuais de interseções semaforizadas da cidade de Toledo-PR.

1.2.2. *Objetivos Específicos*

- a) Definir as interseções a serem utilizadas nos estudos e o número de ciclos saturados a serem analisados por faixa de rolamento;
- b) Identificar os fatores de equivalência veicular para obter o volume de tráfego em UCP (Unidade de Carro de Passeio) e comparar com os recomendados na bibliografia;
- c) Levantar o fluxo de saturação *in loco* nas faixas de rolamento por meio de análise de filmagem do tráfego;
- d) Validar ou não os principais modelos matemáticos utilizados para estimar o fluxo de saturação; e
- e) Modelar expressões que representem o fluxo de saturação para as faixas de rolamento selecionadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Programação Semafórica

O Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito define semáforo como um dispositivo de indicações luminosas que controla o tráfego, regulando o direito de passagem de veículos ou pedestres (DENATRAN, 1984). O Código de Trânsito Brasileiro - CTB (BRASIL, 2008) complementa que os semáforos podem ser de regulamentação, se a função é efetuar o controle do trânsito, ou de advertência, quando notifica o usuário da existência de obstáculo ou situação perigosa à frente. As indicações luminosas são (BRASIL, 2008):

- Verde: permite a passagem dos condutores de veículos ao receberem a indicação luminosa. No entanto, mesmo com a indicação verde, os condutores devem ceder o direito de passagem aos veículos ou pedestres que se encontrem na área de conflito da interseção (centro do cruzamento);
- Amarelo: requer uma análise dos condutores quanto à segurança. Deve-se verificar a possibilidade de parar o veículo antes de entrar na interseção, sem colocar em risco a segurança do tráfego. Caso não seja possível a parada segura, pela proximidade com o cruzamento, o condutor deve continuar em frente e cruzar a interseção para evitar colisão do tipo traseira;
- Vermelho: proíbe a passagem dos condutores que recebem esta indicação luminosa antes de entrar na interseção. A parada é obrigatória e o não cumprimento implica em infração;
- Amarelo intermitente: Empregado na sinalização semafórica de advertência, o condutor fica obrigado a reduzir a velocidade e respeitar o disposto no Art. 29, inciso III, do Código de Trânsito Brasileiro (BRASIL, 2008):

Quando veículos, transitando por fluxos que se cruzem, se aproximarem de local não sinalizado, terá preferência de passagem:

- a) no caso de apenas um fluxo ser proveniente de rodovia, aquele que estiver circulando por ela;
- b) no caso de rotatória, aquele que estiver circulando por ela;
- c) nos demais casos, o que vier pela direita do condutor. (BRASIL, 2008).

Nesse sentido, uma programação semafórica consiste em configurar os parâmetros operacionais dos semáforos (tempos), levando em conta suas medidas de desempenho (COSTA, 2012). Essas medidas de desempenho são indicadores que permitem avaliar o desempenho do tráfego em decorrência da programação semafórica. Existem várias medidas

de desempenho, as mais empregadas são fila máxima, velocidade média, número de paradas, atraso e custo monetário (DENATRAN, 2007).

De acordo com o IMEP (2000), o modo de operação dos semáforos pode ser fixo, atuado ou manual. O modo de operação fixo faz uso de controladores para executar uma sequência lógica de indicações luminosas, previamente dimensionadas pelo plano de tráfego, obtido por contagens volumétricas e outros levantamentos de campo. Segundo o DENATRAN (2007), os principais tipos de controle atuado pelo tráfego são o semi-atuado e totalmente atuado. O controle semi-atuado é indicado para cruzamentos em que as vias apresentem diferença considerável de fluxo. Nesse tipo de controle a indicação verde é dada continuamente para os veículos da via de maior fluxo, sendo interrompida quando detectores implantados nas aproximações da via de menor fluxo indicarem a presença de veículos motorizados. No controle totalmente atuado as alterações nos tempos dos estágios decorrem do monitoramento da demanda de tráfego na interseção, por meio de detectores de tráfego em todas as suas aproximações. Neste tipo de controle o tempo de verde associado a cada estágio de sinalização é determinado a cada ciclo, variando entre um valor mínimo e um valor máximo pré-estabelecidos, desta forma é possível realizar ajustes em tempo real dos valores de alguns dos parâmetros de programação. Por outro lado, o modo de operação manual é controlado por um agente de trânsito, que determina o direito de passagem de cada estágio, de acordo com o julgamento do agente.

O DENATRAN (2007), no manual brasileiro de sinalização de trânsito, apresenta dois métodos que podem ser utilizados para a determinação do tempo de ciclo na programação semaforica. São eles, o método do grau de saturação máximo e o método do tempo de ciclo ótimo de Webster, conforme detalhados na sequência.

2.1.1. Método do Grau de Saturação Máximo

Neste método o projetista escolhe o grau de saturação máximo que deve ocorrer no pico de fluxo máximo. O fluxo máximo é obtido por meio de contagens volumétricas, sendo a projeção para uma hora do volume, a soma dos movimentos dos veículos (direita, esquerda ou direto), registrados geralmente em intervalos de 15 minutos para análise do Fator Hora Pico (FHP, analisa a flutuação dos dados). O método inicia pela definição do grupo de movimentos críticos para cada estágio, que consiste no grupo de movimentos provenientes de uma mesma faixa de rolamento que apresenta a maior taxa de ocupação (Equação 1) dentre as faixas que recebem verde no mesmo estágio.

$$y_i = \frac{F_i}{FS_i} \quad (1)$$

Onde,

- y_i : taxa de ocupação do grupo de movimentos críticos da fase i ;
- F_i : fluxo crítico do grupo de movimentos da fase i , em UCP por hora;
- FS_i : fluxo de saturação de uma faixa de rolamento crítico da fase i , em UCP por hora de tempo de verde (UCP/htv).

A fração de verde (Equação 2) para cada estágio é determinada de acordo com o grau de saturação adotado (geralmente $0,75 \leq xm_i \leq 0,9$). Vale ressaltar que o grau de saturação é um indicador que reflete a existência de reserva de capacidade para o atendimento do grupo de movimentos ($xm_i \leq 0,9$), ou se a aproximação correspondente está próxima da saturação ($xm_i > 0,9$).

$$p_i = \frac{y_i}{xm_i} \quad (2)$$

Onde,

- p_i : Fração de verde requerida para o estágio i ;
- y_i : Taxa de ocupação do grupo de movimentos crítico do estágio i (Equação 1);
- xm_i : Grau de saturação máximo definido para o grupo de movimentos crítico do estágio i .

O conceito de tempo perdido total é de fundamental importância na programação semafórica, consiste na parte do ciclo que não é efetivamente (taxa de descarga reduzida) utilizada pelos veículos. Sua existência pode decorrer da alternância entre o direito de passagem das correntes de tráfego e da existência de estágio para pedestres.

Em toda mudança de estágio, por razões de segurança, ocorre um período de amarelo, durante o qual o fluxo dos veículos que estão perdendo o direito de passagem vai se reduzindo até chegar a zero. Na sequência, programa-se o tempo de vermelho geral, considerado como o tempo de limpeza do ciclo em que todos os estágios recebem a sinalização vermelha. A soma

dos tempos de amarelo e vermelho geral é denominada de tempo de entreverdes. Ao sinalizar a cor verde, que indica o direito de passagem, o fluxo de veículos demora certo tempo até que se atinja o valor do fluxo de saturação. Portanto, existe uma perda representada pela diferença entre o número de veículos que poderia ter passado se o fluxo se mantivesse no patamar do fluxo de saturação e o número de veículos que conseguiu efetivamente passar.

Uma representação gráfica de quando o tempo perdido é derivado da alternância do verde pode ser observada na Figura 1, que mostra uma representação ideal do fenômeno do tempo perdido nas filas em aproximações semaforizadas.

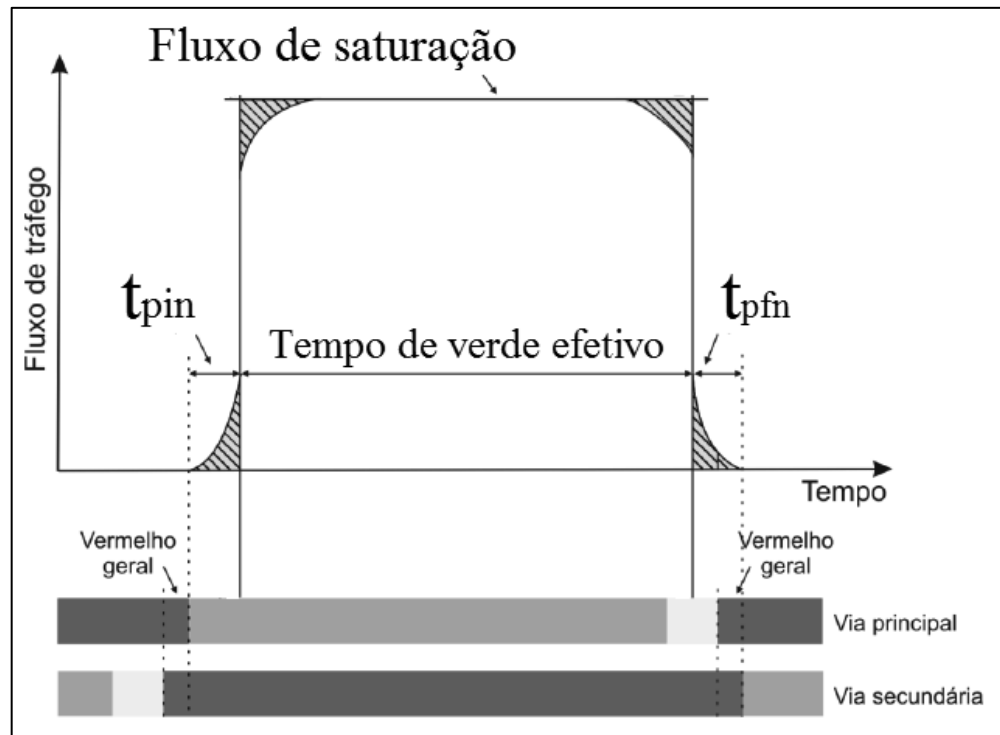


Figura 1: Fluxo de saturação e tempo perdido em estágio saturado
Fonte: Denatran (2007).

Desta maneira o tempo perdido total pode ser definido pela Equação 3.

$$T_p = t_{ep} + \sum_{i=1}^n (t_{pin_i} + t_{pfn_i}) \quad (3)$$

Onde,

- T_p : tempo perdido total, em segundos;
- t_{ep} : tempo de estágio exclusivo para pedestres, caso existe, em segundos;
- n : número de estágios veiculares existentes;
- t_{pin_i} : tempo perdido no início do estágio i , em segundos;

t_{pfn_i} : tempo perdido no final do estágio i , em segundos.

Finalmente, o tempo de ciclo pode ser definido utilizando as frações de verde de cada estágio e o tempo perdido total, como pode ser observado na Equação 4.

$$t_c = \frac{T_p}{1 - \sum_{i=1}^n p_i} \quad (4)$$

Onde,

t_c : Tempo de ciclo, em segundos;

T_p : Tempo perdido total, em segundos;

n : Número de estágios;

p_i : Fração de verde requerida para o estágio i .

2.1.2. Método do Ciclo Ótimo de Webster

Determina o tempo de ciclo, de forma que o tempo de espera veicular seja mínimo. Este método deve ser usado quando se verifica chegadas aleatórias dos veículos nas aproximações, e não deve ser usado no caso de interseções com alto grau de saturação (DENATRAN, 2007).

O tempo de ciclo ótimo é calculado por meio da Equação 5.

$$t_{co} = \frac{(1,5 * T_p) + 5}{1 - \sum_{i=1}^n y_i} \quad (5)$$

Onde,

t_{co} : tempo de ciclo ótimo, em segundos;

T_p : tempo perdido total, em segundos;

n : número de estágios;

y_i : taxa de ocupação do grupo de movimentos críticos do estágio i (Equação 1).

2.1.3. Tempo de Verde Real e Tempo de Verde Efetivo

O tempo de verde real de um estágio consiste na duração do período em que o respectivo grupo focal permanece em verde, durante um ciclo. Enquanto que o tempo de verde efetivo de um

estágio consiste no tempo de verde de um ciclo que seria efetivamente utilizado pelo fluxo do grupo de movimentos crítico, se este fosse descarregado com valor igual ao fluxo de saturação.

O tempo de verde efetivo pode ser calculado pela Equação 6, quando o ciclo for determinado pelo Método do grau de saturação máximo.

$$t_{v,efet_i} = p_i * t_c \quad (6)$$

Onde,

- $t_{v,efet_i}$: Tempo de verde efetivo do estagio i em segundos;
- p_i : Fração de verde requerida para o estágio i (Equação 2);
- t_c : Tempo de ciclo, em segundos (Equação 4).

Quando o tempo de ciclo for calculado pelo método de Webster, deve-se utilizar a Equação 7 para determinar o tempo de verde efetivo.

$$t_{v,efet_i} = (t_{co} - T_p) * \frac{y_i}{\sum_{i=1}^n y_i} \quad (7)$$

Onde,

- $t_{v,efet_i}$: Tempo de verde efetivo do estagio i em segundos;
- T_p : tempo perdido total, em segundos (Equação 3);
- t_{co} : Tempo de ciclo ótimo, em segundos (Equação 5);
- y_i : taxa de ocupação do grupo de movimentos críticos do estagio i (Equação 1);
- n : número de estágios.

Como pode ser observado na Figura 1, finalmente o tempo de verde real para cada estágio pode ser obtido pela Equação 8:

$$t_{v,real_i} = t_{v,efet_i} + t_{pin_i} + t_{pfn_i} - t_{amarelo_i} - t_{ver.geral_i} \quad (8)$$

Onde,

- $t_{v,real_i}$: Tempo de verde real do estagio i em segundos;
- $t_{v,efet_i}$: Tempo de verde efetivo do estagio i em segundos;

- $t_{amarelo_i}$: Tempo de amarelo do estagio i em segundos;
- $t_{ver.geral_i}$: Tempo de vermelho geral do estagio i em segundos;
- t_{pin_i} : tempo perdido no inicio do estágio i , em segundos;
- t_{pfn_i} : tempo perdido no final do estágio i , em segundos.

2.1.4. Relação Entre o Fluxo de Saturação (FS) e o Tempo de Verde (t_v)

Como foi mostrado nos itens anteriores, independente do método utilizado para a determinação do tempo de ciclo, o FS impacta diretamente nos valores de verde encontrados. Ambos os métodos utilizam a taxa de ocupação (y_i) do grupo de movimentos críticos, que por definição é inversamente proporcional ao FS dos grupos de movimentos críticos das fases, e diretamente proporcional ao fluxo crítico do grupo de movimentos das fases.

Nesse sentido, o valor do fluxo de saturação afeta significativamente a programação semafórica, além dos tempos de verdes, as medidas de desempenho utilizadas na avaliação dos planos semafóricos derivam diretamente desta taxa (LUNA, 2003).

2.1.5. Sincronismo Semafórico

É grande o desconforto quando o motorista recebe parada consecutivamente nas interseções semaforizadas. Por isso, quando os semáforos se encontram próximos faz-se necessário o agrupamento em redes semafóricas, o que possibilita uma melhora na eficiência dos semáforos. Desta maneira pode-se executar a “onda verde” entre as interseções semafóricas consecutivas e próximas, de maneira que fiquem defasadas proporcionalmente ao tempo médio de deslocamento entre as interseções, reduzindo o desconforto da espera nas interseções (NETO, 2001).

Neste sentido, Azeredo (2014) ressalta que o sincronismo melhora não só a fluidez no trânsito, mas também a segurança para os usuários. De uma forma geral, é recomendável que semáforos espaçados a menos de 600 metros sejam sincronizados.

Azeredo (2014) ainda cita alguns fatores estruturais necessários para a obtenção e manutenção da “onda verde”. Sendo eles:

- Interligação em rede; essencial para que os relógios internos dos controladores semafóricos tenham a mesma referência horária (hora, minuto e segundo);
- Programação Semafórica: dentro de uma mesma rede, todos os cruzamentos devem ter o mesmo ciclo ou múltiplos do ciclo com sua respectiva defasagem;

- Monitoramento em campo; fundamental que ocorram vistorias periódicas para verificar se as redes semaforicas estão em perfeito funcionamento, identificando assim possíveis locais com falta de sincronismo;
- Manutenção Semaforica; Por melhores que sejam os controladores de semaforo eles podem apresentar avarias ao longo do tempo, sendo indispensável ter uma estrutura que dê o suporte corretivo e preventivo no sistema semaforico instalado;
- Fator Humano; os profissionais que atuam, quer em campo, quer em central semaforica, devem ser capacitados tecnicamente para que saibam promover mudancas nas programacoes semaforicas de modo a melhorar o tráfego;
- Procedimentos de trabalho: são os métodos utilizados, os quais são fundamentais para a obtenção de bons resultados.

2.2. Volume de Tráfego

De acordo com DNIT (2006), contagem volumétrica é o processo de determinação da quantidade, sentido e composição do fluxo de veículos que passam por um ou vários pontos selecionados do sistema viário, numa determinada unidade de tempo. As contagens podem ser classificadas em globais, direcionais ou classificatórias. Nas contagens globais registra-se o número de veículos que solicitam a via, independentemente de seu sentido. Nas contagens direcionais quantifica-se o volume por sentido do fluxo. Já nas contagens classificatórias são registrados os volumes para os vários tipos ou classes de veículos.

Quanto ao método de realização das contagens, destaca-se (DNIT, 2006):

- Contagens manuais: são realizadas por pesquisadores, com auxílio de fichas e contadores manuais;
- Contagens automáticas: feitas por meio de contadores automáticos de diversos tipos. Sensores captam a passagem dos veículos, sendo registrados os dados na memória do dispositivo;
- Videoteipe: consiste na filmagem por meio de câmeras de vídeo. Quando a câmera é bem posicionada permite o levantamento dos volumes de tráfego de uma interseção inteira. Existem sistemas de processamento que permitem a extração automática de dados de tráfego de veículos e de pedestres diretamente das imagens de vídeo;

- Observador móvel: método destinado a obtenção do número de veículos, não em um ponto da via, mais num determinado trecho.

Para a execução de contagens de tráfego de qualidade, ou seja, representativas do fenômeno observado, é necessário que sejam cuidadosamente planejadas, executadas com precisão, condensadas e analisadas (SOARES, 1975). Para isso, é necessário definir previamente os movimentos executados pelo condutor, de acordo com cada objetivo de estudo. De acordo com o Denatran (1984), os movimentos existentes numa interseção podem ser divididos em duas categorias básicas, os de fluxo direto e os de conversão (Figura 2). No primeiro o condutor segue em frente no cruzamento e no segundo o condutor pode fazer uma conversão à direita ou à esquerda.

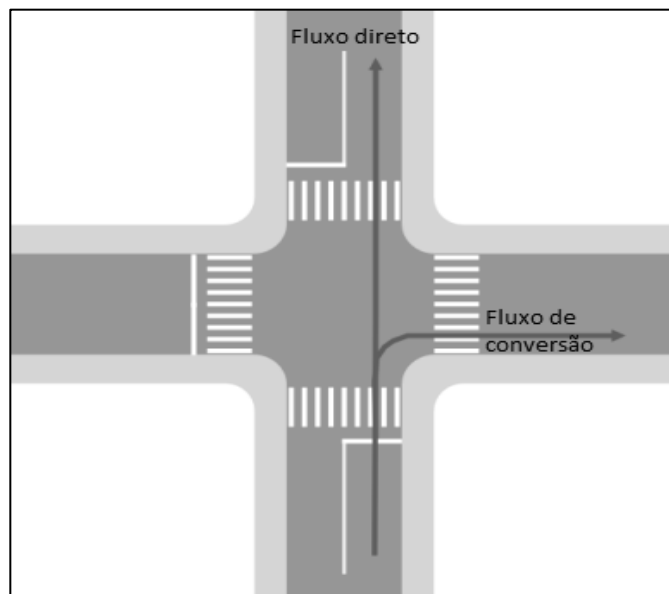


Figura 2: Fluxo direto e fluxo de conversão à direita
Fonte: Adaptado de Denatran (2007).

2.2.1. Equivalência Veicular

Equivalência veicular consiste em determinar o fator que permita a conversão do fluxo veicular em Unidades de Carro de Passeio (UCP). Esta conversão ocorre pela diferença de desempenho entre os diversos tipos de veículos que solicitam as vias, sendo adotado o carro de passeio como veículo padrão (UCP=1). Esta escolha tem como base o fato de o carro de passeio ser o maior componente do trânsito em vias urbanas (DENATRAN, 2007).

A Tabela 1 apresenta os principais fatores de equivalência veicular sugeridos por diversos autores e manuais.

Tabela 1: Fatores de equivalência veicular

Classe Veicular	DENATRAN	ANDRADE (SE)	SETTI	CCG	HBS	HCM	ARRB
Carro de Passeio	1	1	1	1	1	1	1
Caminhão Leve	1	1,36	1,4	1,5	1,5	2	2
Caminhão Pesado	1,75	2,01	2,2	2,5	2	2	2
Ônibus Pesado	2,25	1,72	1,8	1,75	2	2	2
Motocicleta	0,33	0,46	0,4	0,5	1	1	1

Fonte: Adaptado de Santos (2007)

Converter unidades de veículos em UCP significa que o fluxo de saturação deixa de ser dependente da composição do tráfego. Luna (2003), alerta que os métodos de capacidade e programação semaforica trazem consigo valores estimados para a equivalência entre veículos. Esses valores são representativos dos locais de procedência dos métodos, mas são aplicados a qualquer situação.

Segundo Andrade (1994), o método de Webster para a determinação dos fatores de equivalência, faz a proporção entre valores médios de fluxo de saturação para as filas onde se observa a presença de veículos da classe de interesse e os valores médios de fluxo de saturação para filas com somente carros de passeio.

Outro método de determinar os fatores de equivalência consiste em uma medida de impacto denominada *headway* duplo saturado, definido como o tempo compreendido entre a passagem de dois veículos padrões, intercalados pela passagem do veículo que se deseja estimar o fator de equivalência. Os fatores de equivalência são obtidos através da razão entre o *headway* duplo saturado médio de cada tipo de veículo pelo *headway* duplo saturado do veículo padrão (OLIVEIRA NETO, et al., 2002).

A conversão em unidades de carro de passeio tem aplicação exclusiva na obtenção do fluxo de saturação e não devem ser usadas para nenhum outro propósito. Deve-se tomar cuidado ao converter a demanda veicular para veículos equivalentes, pois pode gerar erros de resultados em alguns parâmetros de desempenho, por exemplo, a avaliação do tamanho de filas, o número de paradas e o atraso médio (AKÇELIK, 1993).

2.3.Headway

De acordo com Santos (2007), *headway* consiste no intervalo de tempo, medido em segundos, entre a passagem de dois veículos sucessivos de uma corrente de tráfego sobre uma determinada seção da via, tendo como referência um mesmo ponto em cada veículo. Faria

(2013) também mostra que é possível analisar o *headway* de maneira espacial, sendo caracterizado pela distância linear que separa os dois veículos consecutivos (Figura 3).

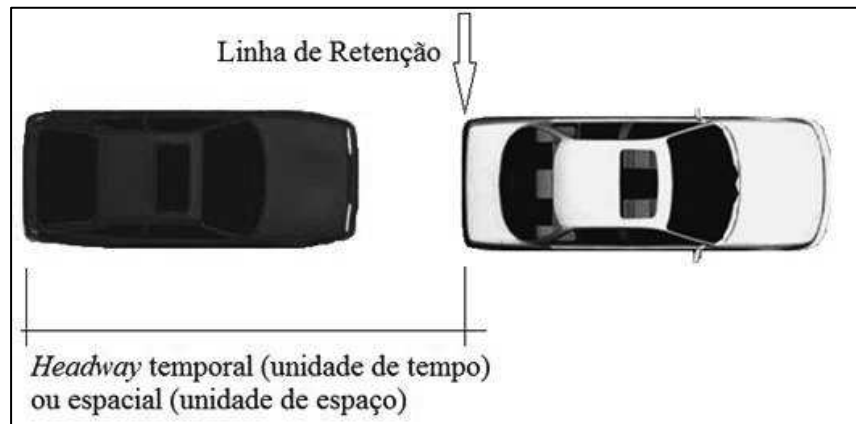


Figura 3: Esquema gráfico de medição do *headway*

Em programação semafórica, ao analisar os *headways* dos veículos, considerando suas posições na fila, é possível observar que os valores tendem a decrescer a partir do primeiro veículo, até um valor aproximadamente constante na medida em que se reduz o tempo perdido (tempo necessário para que o veículo atinja a velocidade do pelotão), Figura 4. Quando a fila observada opera na saturação (*headway* aproximadamente constante), a este valor dá-se o nome de *headway* de saturação, que consiste no inverso do fluxo de saturação (LUNA, 2003).

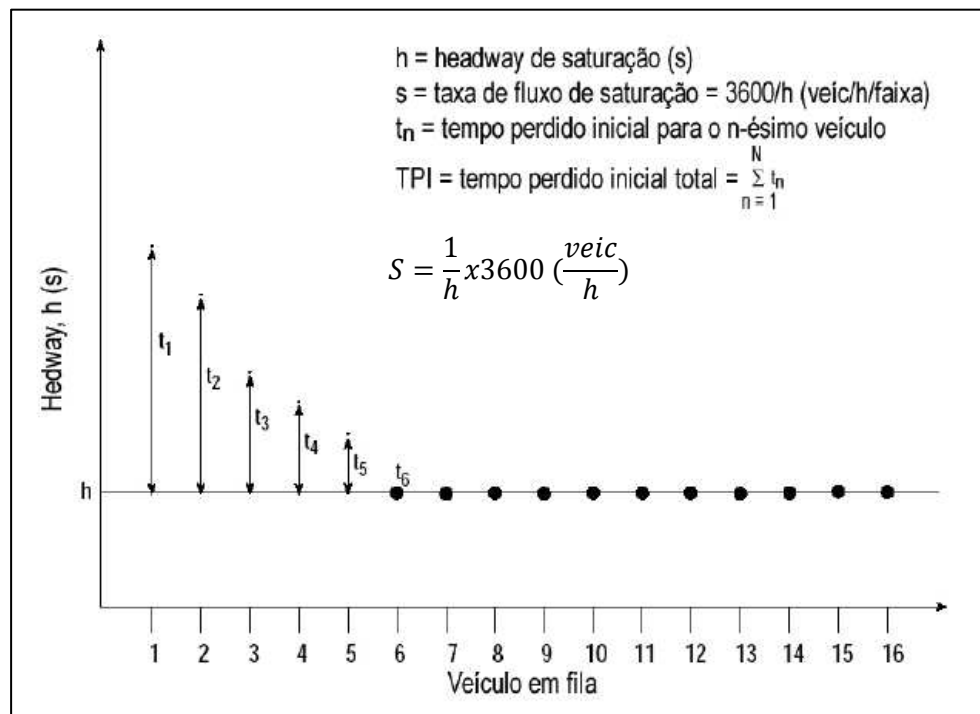


Figura 4: *Headway* de saturação
Fonte: Luna (2003).

A percepção individual do motorista quanto à liberdade de movimento e segurança relativa, influencia diretamente o *headway*, sendo reflexo da escolha da velocidade e distância entre os veículos (DNIT, 2006).

2.4. Fluxo de Saturação

Existem varias definições de fluxo de saturação na bibliografia, dentre as quais pode-se citar:

- Fluxo de veículos comportado por uma faixa de tráfego controlada por sinalização semafórica, que recebesse o direito de passagem (verde) de maneira contínua (DENATRAN, 1984; TRB, 2000; WEBSTER, 1964);
- Taxa de descarga máxima que pode ser alcançada enquanto há fila (AKÇELIK, 1993);
- A taxa máxima possível de fluxo para um elemento em uma faixa de tráfego (TAYLOR, et al., 1996);
- Taxa média ou representativa do comportamento de descarga da fila saturada de veículos, que quando usada num modelo de tráfego, resulte em medidas de desempenho coerentes como aquelas observadas na prática (LUNA, 2003);
- Taxa horária de fluxo na qual os veículos atravessam uma faixa de maneira constante, assumindo que recebesse o direito de passagem (verde) de maneira contínua, e que não experimente nenhum tempo perdido (MAY, 1990);
- Fluxo máximo que pode ocorrer durante o direito de passagem, em interseções semaforizadas (STOKES, 1988).

Como pode ser observada, a definição de fluxo de saturação é bastante variável, necessitando de uma contextualização da aplicação do parâmetro. Vários autores utilizam hora o termo taxa máxima, hora o termo taxa média, podendo levar a um equivoco na sua aplicação e entendimento. Como foi esclarecido por Luna (2003), ao se observar os modelos de determinação do fluxo de saturação, fica evidente que este se trata de uma taxa média e não máxima.

A unidade representativa do fluxo de saturação é bastante variada na bibliografia, sendo comum os termos de UCP por tempo de verde efetivo (UCP/tv,efet) e veículos equivalentes por hora de verde (VEQ/hv).

2.4.1. Fórmulas Empíricas para a Determinação do Fluxo de Saturação

O fluxo de saturação (FS) nem sempre é possível de ser determinado em campo, seja por razões econômicas, ou mesmo pela inexistência da via (aproximações em construção). Sendo assim, métodos simplificados podem fornecer estimativas com precisão aproximada.

Dentre os vários autores que modelaram estimativas para o fluxo de saturação destaca-se a seguir alguns modelos nacionais.

Queiroz e Jacques (2002) através de uma calibração do modelo de Kimber et al. Obtiveram a Equação 9 com coeficiente de correlação (R^2) de 0,525.

$$F_s = \frac{1705,12 - (28,25 * G * \delta_G) + (196,74 * (w - 3,25)) - (30,66 * \delta_P) - (120,44 * L) + (275,58 * F)}{1 + \frac{(1,5 * (VD + VE))}{R}} \quad (9)$$

Onde,

F_s : fluxo de saturação (UCP/htv);

G : Declividade (%);

δ_G : variável *dummy* correspondente ao greide. assume 1 (um) para greide ascendente e 0 (zero) para outro caso;

w : variável correspondente a largura da faixa;

δ_P variável *dummy* correspondente a posição. assume 1 (um) para faixas que possuem movimentos de conversão a direita e 0 (zero) para outro caso;

L variável *dummy* correspondente a localização, Assume 1 (um) para região central e 0 (zero) para outro caso;

F variável *dummy* correspondente a condição de fluidez, Assume 1 (um) para condição de boa fluidez e 0 (zero) para fluidez ruim;

VD variável correspondente aos movimentos de conversão à direita. É a relação entre o número de veículos que convertem à direita e o número total de veículos da faixa;

VE variável correspondente aos movimentos de conversão à esquerda.

É a relação entre o número de veículos que convertem à esquerda e o número total de veículos da faixa;

^R variável correspondente ao raio de conversão, expressa em metros.

Andrade (1989) *apud* (QUEIROZ, et al., 2002) deriva seus modelos de previsão de fluxo de saturação baseados em dados amostrais coletados em estados das regiões Norte e Sudeste do Brasil. A Equação 10 foi obtida por análise de regressão sucessivas sobre o fluxo de saturação, considerando cada fator de forma isolada e posteriormente, combinando os coeficientes obtidos para cada regressão isolada.

$$FS = \frac{1621 - (23 * G) - (200 * l) + (150 * (w - 3,14))}{1 + \left(125 * \frac{f}{R}\right)} \quad (10)$$

Onde,

FS: fluxo de saturação (UCP/htv);

G: Declividade (%);

l: variável *dummy* correspondente a localização, Assume 1 (um) para região central e 0 (zero) para outro caso;

w: variável correspondente a largura da faixa;

f: variável correspondente porcentagem de conversão. É a relação entre o número de veículos que convertem e o número total de veículos da faixa;

R: variável correspondente ao raio de conversão, expressa em metros.

Andrade (1989) *apud* (QUEIROZ, et al., 2002) ainda em seu estudo usa regressão múltipla, onde todos os fatores que afetam o fluxo de saturação foram considerados simultaneamente, Equação 11.

$$FS = \frac{1735 - (18 * G) - (202 * l) + (183 * (w - 3,14))}{1 + \left(125 * \frac{f}{R}\right)} \quad (11)$$

Onde,

FS: fluxo de saturação (UCP/htv);

G: Declividade (%);

- l : variável *dummy* correspondente a localização, Assume 1 (um) para região central e 0 (zero) para outro caso;
- w : variável correspondente a largura da faixa;
- f : variável correspondente porcentagem de conversão. É a relação entre o número de veículos que convertem e o número total de veículos da faixa;
- R : variável correspondente ao raio de conversão, expressa em metros.

Ribeiro (1992) *apud* (QUEIROZ, et al., 2002) a partir de resultados de pesquisas de campo realizadas em Fortaleza-CE e no Rio de Janeiro-RJ, sugere uma alteração do modelo proposto por Webster e Cobbe (Equação 12).

$$FS = 400 * L \quad (12)$$

Onde,

- FS : fluxo de saturação (UCP/htv);
- w : variável correspondente a largura da aproximação em metros;

Magalhães et al. (1998) *apud* (QUEIROZ, et al., 2002) através de pesquisas realizadas em Belo Horizonte-MG, desenvolveram um modelo a partir de regressão linear simples, sendo a variável independente a largura útil da aproximação, como pode ser observado pela Equação 13.

$$FS = 1005 + 432 * Lu \quad (13)$$

Onde,

- FS : fluxo de saturação (UCP/htv);
- Lu : variável correspondente a largura útil da aproximação, em metros;

Na bibliografia internacional são apresentados outros modelos simplificados para a obtenção do fluxo de saturação.

Webster (1964) apresenta um equação simples, elaborada na Inglaterra na década de 60, que permite uma aproximação do fluxo de saturação. O método é indicado quando não é observada a presença de veículos estacionados próximos à aproximação, não existir movimentos de conversão à esquerda e com até 10% de conversão à direita. Para

aproximações com larguras (L) entre 5,5 e 18 metros pode-se estimar o FS (UCP/htv) pela Equação 14. Para valores de aproximação menores que 5,5 metros os valores são tabelados, Tabela 2.

$$FS = 525 * L \quad (14)$$

Tabela 2: Valores de fluxo de saturação para aproximações com largura inferior a 5,5m

L (m)	3	3,3	3,6	3,9	4,2	4,5	4,8	5,2
FS (UCP/htv)	1850	1875	1900	1950	2075	2250	2475	2700

Fonte: Webster (1964)

Vale ressaltar aqui uma confusão a respeito da definição da largura da aproximação, se esta medida contempla ou não o acostamento. Segundo o DENATRAN (2007), aproximação refere-se ao trecho da via por onde naturalmente os veículos se aproximam. Desta forma se o acostamento for frequentemente utilizado nas descargas das filas deve sim entrar na largura da aproximação, caso contrario não.

Posteriormente, Webster e Cobbe (1966 *apud* SANTOS, 2007), na busca de encontrar equações que permitam a determinação FS para faixas com acentuado movimento de conversão à esquerda, sugerem para pista simples a Equação 15 e para pista dupla a Equação 16.

$$FS = 1800 * \frac{r}{r + 5} \quad (15)$$

$$FS = 3000 * \frac{r}{r + 5} \quad (16)$$

Onde,

r : raio de giro do respectivo movimento de conversão em metros;

FS : fluxo de saturação (UCP/htv) para cada faixa de rolamento.

O HCM (1994 *apud* QUEIROZ, et al., 2012), propõe um modelo para a estimativa do fluxo de saturação (Equação 17) onde um valor básico é corrigido através do número de faixas e de nove fatores de ajuste, tabelados no manual, correspondentes aos aspectos locais onde as condições ideais não são atingidas.

$$FS = FS_0 * N * f_w * f_{HV} * f_g * f_p * f_{bb} * f_a * f_{LU} * f_{LT} * f_{RT} * f_{Lpb} * f_{Rpb} \quad (17)$$

Onde,

- FS : fluxo de saturação (UCP/htv);
- FS_0 : fluxo de saturação básico (UCP/htv);
- N : número de faixas;
- f_w : fator de correção do efeito da largura da faixa;
- f_{HV} : fator de correção do efeito de veículo pesado;
- f_g : fator de correção do efeito de greide;
- f_p : fator de bloqueio devido ao estacionamento;
- f_{bb} : fator de correção do devido o efeito de parada de ônibus;
- f_a : fator de área;
- f_{LU} : fator de correção do fluxo desigual;
- f_{LT} : fator de correção do efeito de conversão à esquerda;
- f_{RT} : fator de correção do efeito de conversão à direita;
- f_{Lpb} : fator do efeito de pedestres e bicicletas a esquerda;
- f_{Rpb} : fator do efeito de pedestres e bicicletas a direita.

Os estudos de Kimber e Semmens (1982) *apud* (SANTOS, 2007), também realizados na Inglaterra, constataram que o número de faixas tinha pouca influência no valor do fluxo de saturação. Desta forma, por meio de regressão polinomial, desenvolveram a Equação 18 que expressa o FS em (UCP/htv) em função da largura da faixa de tráfego (L).

$$S = 196 * L^2 - 979 * L + 2964 \quad (18)$$

Besters e Meyers (2007), por meio de regressão linear múltipla, chegam em uma equação que explica 94,3 % da variação da taxa de fluxo de saturação ($R^2 = 0,943$) e todos os coeficientes são significativos ao nível de confiança de 97,5 % (Equação 19).

$$FS = 990 + (288 * nf) + (8,5 * vl) - (26,8 * i) \quad (19)$$

Onde,

- FS : fluxo de saturação (UCP/htv);
- nf : número de faixas de rolamento (1 ou 2);

vl : velocidade limite da via (60 ou 80 km/h);
 i : Declividade (%).

Turner e Harahap (1993) apresentam três métodos elaborados por regressão linear, em quatro interseções, com 57 amostras de 100 ciclos semaforicos. O estudo foi realizado na Indonésia, entre 1989 e 1990, numa cidade de porte médio, com cerca de 2 milhões de habitantes. A composição do tráfego no país como um todo é de aproximadamente 42,5% motocicletas, 45% automóveis e os restantes 12,5% uma mistura de animais e modos de tração humana. Com base nestas amostras elaborou-se um modelo de regressão linear simples (Equação 20), que fornece uma estimativa do FS (UCP/htv), por aproximação, utilizando apenas a largura da aproximação (L) como variável independente.

$$FS = 964 + 349 * L \quad (20)$$

Continuando os estudos, Turner e Harahap (1993), na busca por aumentar a representatividade do modelo, utilizam regressão linear múltipla para criar a Equação 21.

$$FS = 1035 + (425 * L) - (110 * C) + (32 * Lfc) - (11 * M) + (47 * B) \quad (21)$$

Onde,

FS : fluxo de saturação (UCP/htv) para a aproximação;
 L : largura da aproximação em metros;
 C : porcentagem de caminhões (em taxa);
 Lfc : largura da faixa de fluxo contínuo em metros (total se mais de uma);
 M : porcentagem de motocicletas (em taxa);
 B : porcentagem de Ônibus (em taxa).

Outro modelo de múltiplas variáveis desenvolvido por Turner e Harahap (1993) é apresentado na Equação 22. Este modelo se baseia no tempo de verde (tv), largura da aproximação (L) e largura da faixa de fluxo contínuo (Lfc).

$$FS = (318 * tv) + (173 * L) + (67 * Lfc) - 4667 \quad (22)$$

2.4.2. *Medições em Campo*

Sempre que possível os valores do fluxo de saturação e tempo perdido devem ser obtidos *in loco*, por meio de medidas diretas.

O Método australiano da ARRB *apud* (AKÇELIK, 1993) requer que seja contado o número de veículos que atravessam a faixa de retenção em três períodos distintos: os dez primeiros segundos de verde, o período restante de verde enquanto saturado e o tempo após o término do verde. O Método norte-americano divulgado no Highway Capacity Manual (HCM) tem poucas diferenças do Método australiano da ARRB, se distinguindo basicamente quanto à consideração do início do período saturado. Este método considera a passagem dos quatro primeiros veículos e não os 10 segundos iniciais.

O Método sugerido pelo (DENATRAN, 1984), busca identificar o fluxo de saturação (UCP/htv), usando histogramas de tráfego. O histograma de tráfego tem por finalidade reproduzir o gráfico fluxo equivalente x tempo. Requer existência de fila durante o período de verde e de amarelo, com recomendação de análise de 5 ciclos no mínimo. A taxa do fluxo de saturação será o valor médio que se observa no patamar do histograma.

Luna (2003) propõe o método H/P, definido como a razão entre o número total de veículos descarregados pela soma de seus *headways*, contados a partir do sexto veículo, de um mínimo de 15 ciclos semafóricos dentro de um período contínuo de medição com filas de no mínimo 6 veículos.

O método da curva acumulada de veículos proposto por Shanteau (1988), consiste na elaboração de um gráfico fluxo equivalente acumulado x tempo. O método além de fornecer a taxa do fluxo de saturação (a declividade da curva), permite a obtenção dos tempos perdidos no início (onde a reta cruza o eixo do tempo) e final do ciclo (tempo entre o último ponto da reta e o final da curva), bem como o número médio de veículos atendidos (ponto de máximo). Se não houver segmento retilíneo no gráfico, não se pode garantir a existência do regime de saturação.

2.4.3. *Variabilidade do Fluxo de Saturação*

Stokes, 1989 *apud* (JACQUES, 1995), apresenta vários fatores que podem influenciar no fluxo de saturação em interseções semaforizadas:

- Fatores geométricos: largura da aproximação e de suas faixas de trânsito, quantidade de faixas, inclinação da pista e raio de curva, etc;

- Condições operacionais: sequência de fases e tempos dos semáforos, localização de pontos de ônibus, estacionamentos, etc;
- Características do tráfego: composição do tráfego, movimentos de conversão, atividades de pedestres, etc;
- Fatores ambientais: condições do tempo, condições do pavimento, comportamento dos motoristas, etc.

A esses fatores Turner e Harahap (1993) acrescentam o tipo de transporte público e a atividades no acostamento. Bonneson et al., (2005) *apud* (BESTER, et al., 2007) investigaram a variação do fluxo de saturação causado pelo efeito de veículos pesados, do limite de velocidade, da densidade do tráfego, da população da área e do número de faixas. Foi constatado que a taxa de fluxo de saturação em condições ideais (denominada taxa de base) é 1905 UCP/htv, e que vai diminuindo em 9 UCP/htv para cada redução de 1,6 km/h médio do fluxo em relação ao limite de velocidade da via. Além disso, em pista dupla a taxa de fluxo de saturação é 130 UCP/htv superior a que é encontrada em faixa de pista simples.

As condições ideais de levantamento do *FS* segundo TRB (2000), assumem o seguinte:

- Largura das faixas de 3,6 metros;
- Não há presença de veículos pesados;
- Interseção plana;
- Sem estacionamento ou pontos de ônibus perto do cruzamento;
- Tipo de movimento uniforme, ou seja, apenas um tipo de movimento; e que
- Não haja influência de pedestres ou ciclistas.

O Highway Capacity Manual (TRB, 2000) usa a Equação 23 para o efeito da declividade, onde busca ajustar o fluxo de saturação para as condições ideais de medição. Em outras palavras, permite estimar qual seria o valor do fluxo de saturação se a interseção fosse plana (declividade $i=0\%$).

$$f_g = 1 - \frac{\%i}{200} \quad (23)$$

Onde,

f_g : fator de ajuste da declividade;

$\%i$: declividade em percentual.

No entanto, Besters e Meyers (2007), constataram que em seu modelo a influência do fator de correção de declividade é três vezes o fator utilizado na Highway Capacity Manual.

2.4.3.1. Variação do Fluxo de Saturação ao Longo dos Dias da Semana

Luna (2003) em seu estudo sobre o fluxo de saturação constatou que o comportamento geral da demanda é razoavelmente repetido em dias distintos, com diferenças da ordem de 100 veículos. O sábado se apresenta com comportamento característico e atípico em relação a um dia útil. Ainda afirma que, o fluxo de saturação varia em função de sua característica espacial e não temporal. Desta maneira, o fluxo de saturação em determinada interseção tende a se repetir ao longo dos dias, desde que não haja variação espacial da interseção.

No entanto, Tarko (2000) apresenta três principais fontes de erros nas previsões de fluxo de saturação relacionados aos modelos de estimativa: a variação temporal de um fluxo de saturação provoca um erro de medição; a omissão de alguns fatores que afetam significativamente o modelo de previsão; a má interpretação das relações entre os fatores do modelo.

2.4.3.2. Interferência da Hora de Pico no Fluxo de Saturação

Branston (1979) investigou os efeitos do horário do dia no fluxo de saturação e encontrou diferenças no fluxo de saturação entre a hora de pico e entre-pico, assim como entre dia e noite. Os valores observados nos picos foram em média 9% maiores que os de entre-picos. Nos estudos de Webster *apud* (LUNA, 2003), os valores de fluxo de saturação foram 6% maiores nos picos. Enquanto que Niittymaki e Pursula (1997) *apud* (LUNA, 2003), acharam valores 10% superiores para o fluxo de saturação nos períodos de pico.

2.4.3.3. Faixa de Tráfego

Luna (2003) observou o comportamento de duas faixas de tráfego simultaneamente buscando uma correlação dos valores de fluxo de saturação entre as faixas. Usando observações provenientes de aproximações com sete metros de largura como uma amostra única, não foi possível identificar uma correlação entre o número de conversões e o valor do fluxo de saturação na faixa esquerda. Assumindo, então, que as conversões da faixa direita não afetam significativamente os valores do fluxo de saturação da faixa esquerda. O mesmo se aplica para a relação entre o número de veículos pesados e o fluxo de saturação.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Considerações Iniciais

O ordenamento lógico desta pesquisa segue a seguinte sequência de etapas: Revisão bibliográfica, coleta dos dados, tratamento dos dados, validação, modelagem e apresentação dos resultados. Como pode ser observado na Figura 5.

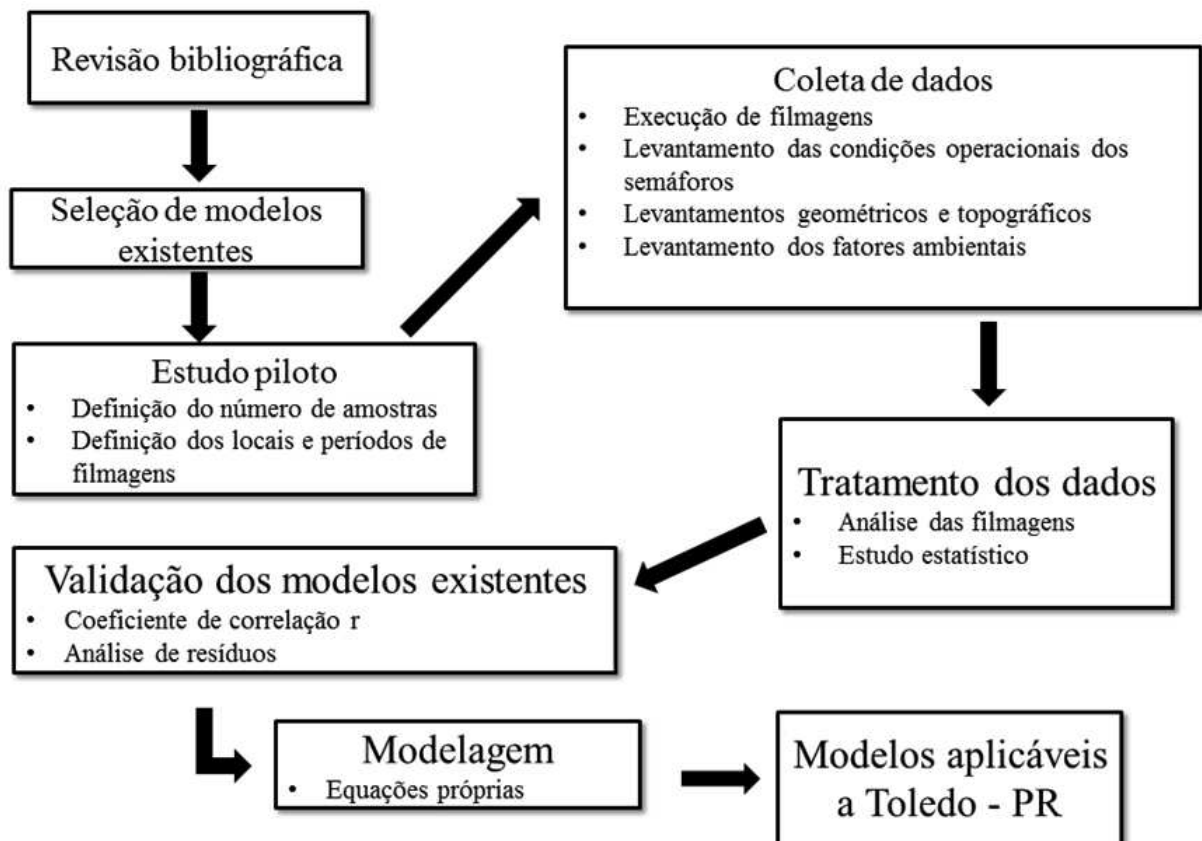


Figura 5: Fluxograma das diferentes fases do trabalho

3.2. Estudo Piloto

O estudo piloto consiste em desenvolver a rotina de campo e análise de dados em uma interseção teste, de maneira a evitar propagação de erros de execução ou análise.

Após seleção da interseção teste, inicialmente foi verificada a possibilidade de registrar a descarga das filas por meio de filmagem, assim como testar as propriedades da filmadora, o enquadramento simultâneo da fila, do sinal luminoso e da linha de retenção.

Posteriormente a gravação, os dados foram trabalhados de maneira manual, com auxílio do programa da Microsoft Windows Movie Maker, que possibilita a visualização do vídeo em câmera lenta com precisão de centésimos de segundos.

Os dados levantados nas gravações foram:

- Headway duplo saturado (equivalência veicular);
- Headways das descargas das filas;
- Tempos da fase (período de verde, amarelo e vermelho) e tempo de ciclo;
- Demanda veicular;
- Composição do tráfego;
- Porcentagem do fluxo direto e de conversão;
- Fluxo de saturação;
- Tempo perdido inicial e final;
- Número de veículos na fila;
- Velocidade média no período saturado;
- Capacidade;
- Grau de saturação;
- Taxa de ocupação; e
- Número de paradas.

As relações existentes entre estas variáveis podem ser observadas pela Figura 6, que elucida o processo de levantamento de dados a partir das filmagens.

Para a validação dos métodos simplificados de obtenção de fluxo de saturação, pretende-se confrontar os resultados obtidos pelos modelos, com os obtidos *in loco*, por meio da determinação do coeficiente de correlação e análise dos resíduos.

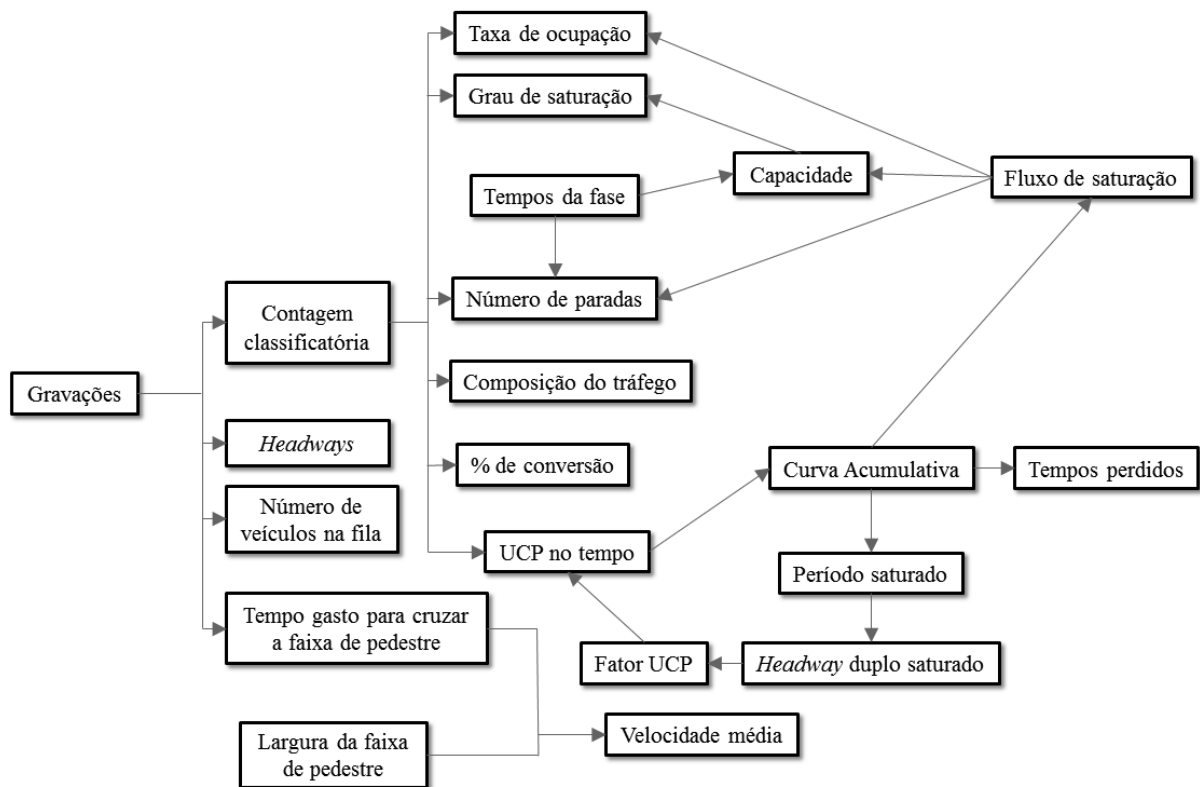


Figura 6: Processo de levantamento de dados a partir das filmagens
Fonte: Autor.

3.3. Coleta de Dados

Os seguintes critérios foram utilizados para a seleção das interseções semaforizadas de estudo:

- Se a interseção é frequente e representativa;
- Se as filas formadas nos semáforos são longas o suficiente para o levantamento do fluxo de saturação; e
- Se possui uma visão ampla e conveniente para criação de vídeos.

3.3.1. Número de Amostras

A quantidade desejada de amostras para cada faixa de rolamento analisada foi de 30 ciclos, este valor possibilita tanto o uso da distribuição normal (z), quanto a de *Student* (t). Entretanto, a quantidade de amostras pode ser inferior a 30, dependendo da disponibilidade de

ciclos com fila significativa (mais de 6 veículos), neste caso o uso da distribuição de *Student* é obrigatório e será aplicado a todos os casos.

3.3.2. Localização dos cruzamentos e filmagem das filas de veículos

A coleta de dados foi realizada em horários de pico de intersecções semaforizadas com alto fluxo de tráfego. Todas as observações foram feitas em boas condições climáticas, uma vez que situações climáticas atípicas, como chuva e neblina, podem afetar os valores de fluxo de saturação. As filmagens foram realizadas em dias úteis de segunda a sexta-feira, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Dias das realizações das filmagens

Interseção	Data	Dia da semana	Horário	Aproximação	Faixa ¹	Nº de Ciclos
Maripá X Almirante Barroso	25/02/2016	Quinta-feira	12:30 Às 13:30	Leste	B	30
Maripá X Almirante Barroso	29/01/2016	Sexta-feira	12:30 Às 13:30	Leste	A	30
Maripá X Almirante Barroso	02/02/2016	Terça-feira	18:30 Às 19:30	Norte	C	18
Maripá X Almirante Barroso	02/02/2016	Terça-feira	18:30 Às 19:30	Norte	B	10
Maripá X Almirante Barroso	02/02/2016	Terça-feira	18:30 Às 19:30	Norte	A	6
Maripá X Almirante Barroso	25/02/2016	Quinta-feira	18:30 Às 19:30	Leste	B	30
Maripá X Almirante Barroso	29/01/2016	Sexta-feira	18:30 Às 19:30	Leste	A	30
Maripá X Dom Pedro II	23/02/2016	Terça-feira	12:30 Às 13:30	Norte	A	30
Maripá X Dom Pedro II	24/02/2016	Quarta-feira	12:30 Às 13:30	Oeste	B	30
Maripá X Dom Pedro II	26/02/2016	Sexta-feira	12:30 Às 13:30	Oeste	A	30
Maripá X Dom Pedro II	23/02/2016	Terça-feira	18:30 Às 19:30	Norte	A	30
Maripá X Dom Pedro II	27/01/2016	Quarta-feira	18:30 Às 19:30	Sul	B	15
Maripá X Dom Pedro II	27/01/2016	Quarta-feira	18:30 Às 19:30	Sul	A	4
Maripá X Dom Pedro II	24/02/2016	Quarta-feira	18:30 Às 19:30	Oeste	B	30
Maripá X Dom Pedro II	26/02/2016	Sexta-feira	18:30 Às 19:30	Oeste	A	30
Maripá X Santos Dumont	20/01/2016	Quarta-feira	12:30 Às 13:30	Norte	A	5
Maripá X Santos Dumont	29/01/2016	Sexta-feira	12:30 Às 13:30	Leste	B	30
Maripá X Santos Dumont	29/01/2016	Sexta-feira	12:30 Às 13:30	Leste	A	30
Maripá X Santos Dumont	08/12/2015	Terça-feira	12:30 Às 13:30	Oeste	B	13
Maripá X Santos Dumont	08/12/2015	Terça-feira	12:30 Às 13:30	Oeste	A	7
Maripá X Santos Dumont	24/02/2016	Quarta-feira	18:30 Às 19:30	Oeste	B	15
Maripá X Santos Dumont	24/02/2016	Quarta-feira	18:30 Às 19:30	Oeste	A	13
Parigot X Santos Dumont	07/12/2015	Segunda-feira	12:30 Às 13:30	Oeste	B	30
Parigot X Santos Dumont	07/12/2015	Segunda-feira	12:30 Às 13:30	Oeste	C	11
Santos Dumont X Largo São Vicente	03/03/2016	Quinta-feira	12:30 Às 13:30	Norte	A	30
Santos Dumont X Largo São Vicente	21/01/2016	Quinta-feira	12:30 Às 13:30	Sul	A	11
Santos Dumont X Largo São Vicente	03/03/2016	Quinta-feira	18:30 Às 19:30	Norte	A	30

1: Classificação das faixas da direita para esquerda do condutor (A; B; C... etc)

Para todas as faixas de rolamento selecionadas, foram registrados os movimentos dos veículos usando um sistema de câmera de vídeo digital portátil. Todas as gravações de vídeo das interseções foram realizadas de dezembro de 2015 a março de 2016. Todos os dados foram registrados durante os picos das 12:30 às 13:30 e das 18:30 às 19:30. Durante a filmagem, os movimentos de tráfego foram filmados, de maneira que a área de filmagem permitisse registrar o veículo, a faixa de retenção e o foco semafórico.

Conforme descrito anteriormente, as filmagens foram analisadas em câmera lenta para reduzir a influência do erro humano na leitura dos dados.

3.3.3. *Levantamento das Condições Operacionais dos Semáforos*

Os levantamentos dos parâmetros operacionais dos semáforos foram realizados em duas etapas: observação em campo e posterior análise em laboratório.

Os dados levantados em campo foram:

- diagrama de estágios; e
- grupos semafóricos.

Posteriormente, por meio da análise das filmagens verificou-se os seguintes parâmetros:

- Tempo de verde;
- tempo de amarelo;
- tempo de ciclo; e
- vermelho geral.

3.3.4. *Levantamento Geométrico das Interseções*

O levantamento geométrico foi realizado posterior às gravações, em horário de fluxo reduzido, aumentando a segurança durante as medições e sem interferir no trânsito:

- Largura total das pistas e das faixas de rolamento;
- Largura das faixas de estacionamentos;
- Largura dos canteiros centrais;
- Largura das faixas de pedestre;
- Raios de giro à direita e/ou à esquerda; e
- Declividades das aproximações.

3.3.5. *Levantamento dos Fatores Ambientais*

Os fatores ambientais foram levantados de maneira visual pelo pesquisador durante a execução das gravações:

- Parada de ônibus próximo à aproximação;
- Má visibilidade: vegetação, nevoeiro, prédios, etc;
- Obras nas vias da região de estudo: restauração do pavimento, caçamba de entulho, operações de descarga de materiais, atividade de limpeza pública, etc;
- Obstáculos no pavimento: buracos, pedras ou redutores de velocidade;
- Vias interditadas ou de acesso restrito nas proximidades; e
- Pista molhada: água, óleos, etc.

3.4. Tratamento dos Dados

3.4.1. *Análise das Filmagens*

As gravações dos vídeos de descarga das filas nos períodos de pico foram primeiramente examinadas para filtrar os ciclos que não foram adequados para utilização no estudo. Isto significa que o ciclo foi desconsiderado se as seguintes condições ocorreram:

- Fluxo irregular: quando por um motivo não frequente o motorista comprometer a fluidez (Ex: deixar o veículo apagar, não arrancar no verde porque esta conversando com pedestre ou motorista da pista lateral, etc.);
- Número de veículos baixo: para uma melhor identificação do período saturado, foi selecionado ciclos com pelo menos 7 veículos em fila (melhorar a confiabilidade dos valores obtidos de fluxo de saturação); e
- Quando pedestres interromperam o fluxo de tráfego.

3.4.1.1 *Headways das Descargas das Filas*

A análise das gravações permitiu levantar os *headways* de descarga das filas. Para o primeiro veículo da fila, o *headway* foi considerado o tempo decorrido entre o momento de início de verde e o momento em que o para-choque traseiro do veículo passou pela linha de retenção do cruzamento.

Para os outros veículos na fila, o *headway* foi o tempo decorrido entre a passagem dos para-choques traseiros dos veículos consecutivos.

3.4.1.2 Equivalência Veicular

Para determinar os fatores de equivalência foi necessário determinar o *headway* duplo saturado, como mostrado na Figura 7. Esse parâmetro é definido pelo intervalo de tempo referente à passagem de um grupo de veículos composto por dois veículos padrões intercalados pelo veículo que se deseja estimar o fator de equivalência, durante o regime saturado.

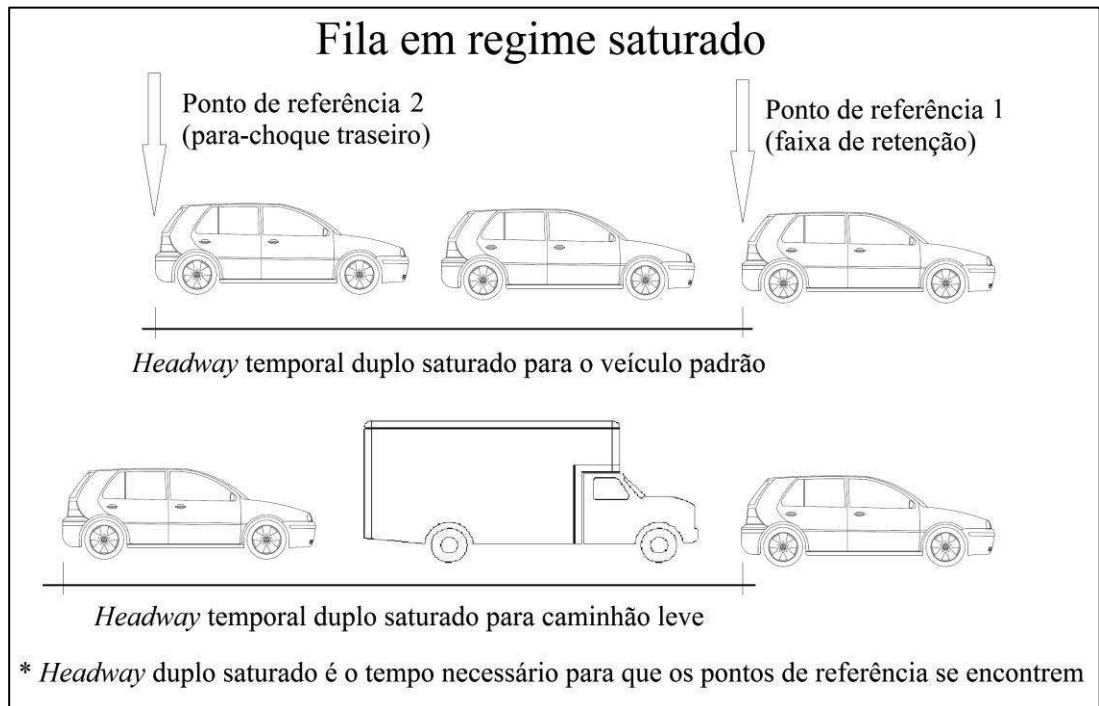


Figura 7: *Headway* duplo saturado

O levantamento do *headway* duplo saturado foi realizado para as seguintes categorias:

- Motocicletas: Veículo leve, com dois eixos e rodagem simples, incluindo motos, motonetas, triciclos e bicicletas a motor.
- Carros de passeio: Veículo utilitário ou passeio, com dois eixos e rodagem simples, incluindo jeeps, vans e kombis.
- Microônibus : Veículo utilitário, com dois eixos e rodagem simples, destinado a transporte de passageiros.

- Caminhão leve: Veículo utilitário, com dois eixos e rodagem simples, destinado a transporte de cargas.
- Ônibus: Veículo grande, com dois eixos ou mais, destinado ao transporte de passageiros.
- Caminhão pesado: Veículo pesado, com mais de dois eixos, destinado a transporte de cargas.

Os fatores de equivalência foram obtidos utilizando-se os dados coletados de todas as filmagens no modelo proposto por Luna (2003), através da razão entre o *headway* duplo saturado médio de cada tipo de veículo, pelo *headway* duplo saturado do veículo padrão (Equação 24).

$$Feq_i = \frac{H_i}{H_p} \quad (24)$$

Onde,

Feq_i : fator de equivalência para a categoria i ;

H_i : *headway* duplo saturado médio da categoria i ;

H_p : *headway* duplo saturado médio do veículo padrão.

3.4.1.3 Fluxo de Saturação e Tempo Perdido

Segundo Setti (1986), é possível usar um método simples que permita a determinação do fluxo de saturação e demais informações, baseando-se na observação de um vídeo do cruzamento. O autor sugere, ao se utilizar filmagens, a utilização do método da curva acumulada de veículos proposto por Shanteau (1988), por julgar ser um método de fácil aplicação que proporciona bons resultados. Nesse sentido, seguiu-se essa recomendação para levantamento do fluxo de saturação e tempos perdidos do estágio de cada aproximação.

Nesse sentido, foi elaborado um gráfico fluxo equivalente acumulado x tempo (Figura 8), de maneira individual para cada ciclo e faixa, que permitiu determinar rapidamente o fluxo de saturação e os tempos perdidos. No trecho onde a curva acumulada apresentou um comportamento linear foi ajustado uma reta, sendo seu coeficiente angular o fluxo de saturação. O tempo perdido inicial é o intervalo entre o ponto onde a reta ajustada cruza o eixo do tempo e a origem. Já o tempo perdido final é a diferença de tempo entre a reta ajustada e a curva para o ponto que representa o último veículo da fila que recebeu parada.

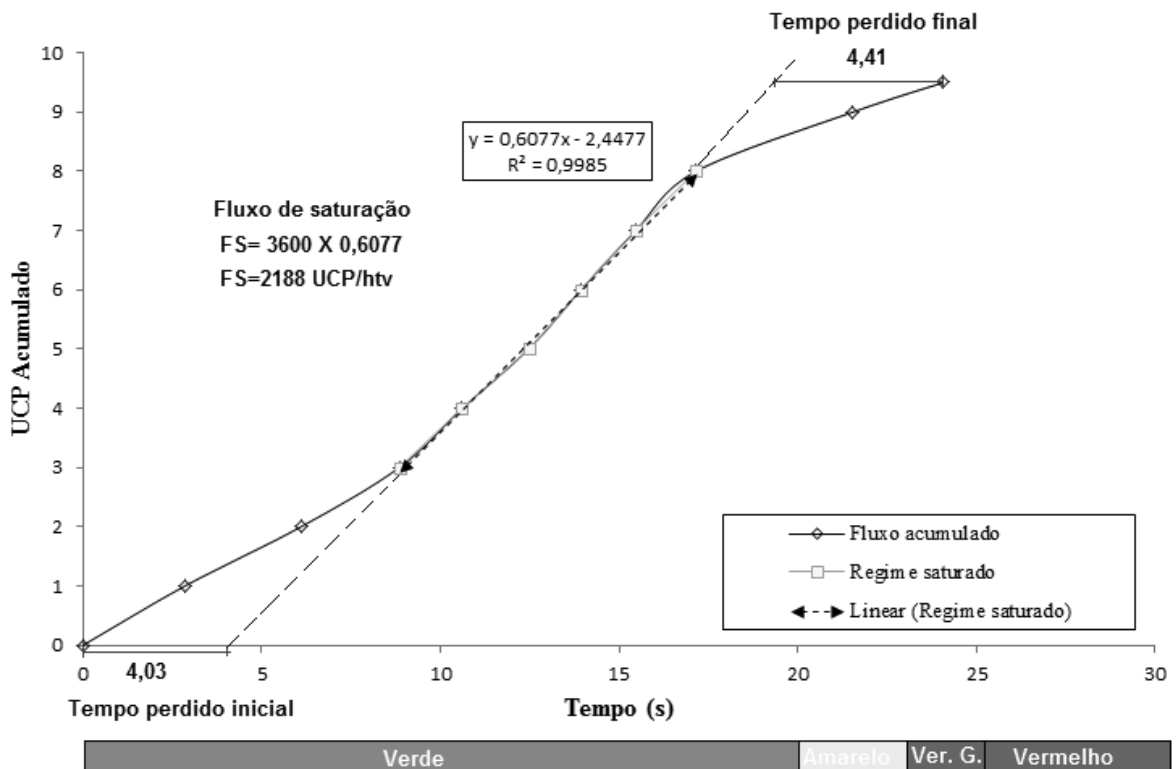


Figura 8: Fluxo de saturação por curva cumulativa

3.4.1.4 Velocidade Média

A velocidade média dos veículos ao cruzar a faixa de pedestres é outro dado interessante de ser determinado ao se realizar filmagens. A velocidade de cada veículo foi determinada a partir da razão entre a largura da faixa de pedestres, e o tempo que o veículo leva para percorrê-la, Equação 25. Vale ressaltar que este dado é bastante sensível a posição da câmera e a precisão da filmadora.

$$v_m = \frac{\Delta t}{L} \quad (25)$$

Onde,

v_m : velocidade média ao cruzar a faixa de pedestre;

Δt : intervalo de tempo necessário;

L : largura da faixa de pedestre.

3.4.1.5 Demanda Veicular

A demanda veicular foi determinada fazendo-se uma contagem classificatória por meio da análise das filmagens. O volume de veículos foi projetado para 1 hora e convertido em UCP utilizando o fator de equivalência veicular obtido pelo próprio estudo. Ressalta-se que gravações com intervalo de tempo reduzido, podem não fornecer volumes horários representativos. Entretanto como será determinado o fluxo de saturação a cada ciclo, esta projeção do volume horário permite a determinação dos demais parâmetros de desempenho para cada ciclo.

3.4.1.6 Composição do Tráfego

A Composição do tráfego na faixa foi definida pela porcentagem de presença das categorias de veículos na faixa observada. Consiste na razão entre o volume da categoria a ser analisada e o volume total observado.

3.4.1.7 Porcentagem do Fluxo Direto e de Conversão

Na mesma faixa de rolamento foi possível dividir o fluxo na interseção quanto ao seu movimento, sendo levantada a representatividade de cada movimento no fluxo total da faixa.

3.4.1.8 Taxa de Ocupação

Para se determinar a taxa de ocupação da faixa (Equação 26), verificou-se a razão entre o fluxo veicular horário projetado (demanda) na faixa de rolamento e o seu respectivo fluxo de saturação obtido *in loco*.

$$Tx_{oc} = \frac{V_f}{FS_f} \quad (26)$$

Onde,

Tx_{oc} : taxa de ocupação da faixa de rolamento;

V_f : volume horário projetado para a faixa de rolamento;

FS_f : fluxo de saturação da faixa de rolamento em (UCP/htv).

3.4.1.9 Capacidade de tráfego por faixa

A capacidade da faixa de rolamento (Equação 27) consiste no número máximo de veículos da faixa de rolamento que pode passar por uma interseção semaforizada durante uma hora de sua operação normal (DENATRAN, 2007);

$$C_f = FS_f * \frac{tv,efet}{tc} \quad (27)$$

Onde,

C_f : capacidade da faixa de rolamento (UCP/h);

FS_f : fluxo de saturação da faixa de rolamento em (UCP/htv);

$tv,efet$: tempo de verde efetivo para a faixa de rolamento (s);

tc : tempo de ciclo (s).

3.4.1.10 Grau de Saturação

O grau de saturação da faixa de rolamento (Equação 28) pode ser determinado pela razão entre o fluxo veicular da faixa de rolamento e a capacidade para atender este volume no período de tempo considerado (DENATRAN, 2007).

$$GS_f = \frac{V_f}{C_f} \quad (28)$$

Onde,

GS_f : grau de saturação da faixa de rolamento;

V_f : volume horário projetado para a faixa de rolamento;

C_f : capacidade da faixa de rolamento (UCP/h).

3.4.1.11 Número Médio de Paradas

O número de paradas (UCP/CICLO) de acordo com o Denatran (2007) é um dos principais indicadores da qualidade da operação do trânsito, podendo ser caracterizado pelo número total de veículos que param no cruzamento devido à sinalização semafórica. Permite,

também, verificar a relação dos veículos que pararam em relação ao volume que passou pelo local.

O número de paradas n_p , no caso de operação não saturada e fluxos de chegada e partida constantes, pode ser calculado pela Equação 29.

$$n_p = \frac{V_f * FS_f}{FS_f - V_f} * \frac{(t_c - tv, efet)}{3600} \quad (29)$$

Onde,

n_p : número de UCP, que sofrem parada por ciclo na faixa de rolamento em análise;

V_f : volume horário projetado para a faixa de rolamento;

FS_f : fluxo de saturação da faixa de rolamento;

$tv, efet$: tempo de verde efetivo para a faixa de rolamento;

t_c : tempo de ciclo.

3.4.2. Estudo Estatístico dos Dados

De acordo com Montgomery et al (1943), os métodos estatísticos são usados para nos ajudar a entender a variabilidade dos dados. Por variabilidade, entende-se que sucessivas observações de um fenômeno não produzem exatamente o mesmo resultado.

Outro fato que causa variabilidade, consiste no fato de ser impraticável trabalhar com a distribuição de frequências completa, razão pela qual se costuma lançar mão de determinadas medidas. Essas medidas representariam certas características importantes da distribuição de frequências. Há diversas medidas que possibilitam condensar as informações dentro da fase analítica da estatística descritiva (TOLEDO, 1985).

Como explica Barbeta, Reis e Bornia (2010 p. 24), “ao desenvolver uma pesquisa, planejamos fazer com que as conclusões sejam válidas para toda a população previamente definida, mesmo que a pesquisa seja feita por amostragem”.

O tratamento estatístico se deu por meio de planilha eletrônica, para o valor do fluxo de saturação encontrado em cada faixa de rolamento. Os seguintes parâmetros estatísticos foram considerados:

- Média aritmética;

Toledo (1985), explica que a medida de tendência central mais comumente usada para descrever resumidamente uma distribuição de frequências é a média, ou mais propriamente a média aritmética (Equação 30).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (30)$$

Onde,

\bar{x} : média aritmética;

n : número total de elementos;

x_i : elemento i .

- Variância;

De acordo com Montgomery et. al (1943), dado um conjunto de dados, a variância é uma medida de dispersão que mostra o quão distante cada valor desse conjunto está do valor central (médio). Quanto menor a variância, mais próximos os valores estão da média. Da mesma forma, quanto maior ela é, mais os valores estão distantes da média. Quando este valor é obtido através de uma amostra (S^2), representa apenas uma parte dos dados e pode ser determinado pela Equação 31.

$$S^2 = \frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (31)$$

Onde,

S^2 : variância amostral;

\bar{x} : média da amostra;

x_i : valor i observado na amostra;

n : tamanho da amostra.

- Desvio Padrão;

O desvio padrão é a medida mais comum da dispersão estatística. Ele mostra o quanto de variação existe em relação à média. Um baixo desvio padrão indica que os dados tendem a

estar próximos da média; um desvio padrão alto indica que os dados estão espalhados por uma gama de valores (MEYER, 1983).

Faz-se uma distinção entre o desvio padrão (σ) do total de uma população, e o desvio padrão de um subconjunto em amostra (S). Ambos são calculados pela raiz quadrada de suas respectivas variâncias (TOLEDO, 1985).

Desta forma, o desvio padrão amostra pode ser calculado pela Equação 32.

$$S = \sqrt{S^2} \quad (32)$$

Onde,

S : desvio padrão amostral.

S^2 : variância amostral;

- Coeficiente de variação;

O desvio padrão depende das unidades de medida dos dados, e isto é uma desvantagem. Uma medida de variabilidade que independe de unidades de medida é o coeficiente de variação (CV). Ele expressa o desvio padrão como porcentagem do que está sendo medido como pode ser observado na Equação 33.

$$CV = \frac{S}{\bar{x}} \times 100 \quad (33)$$

Onde,

CV : coeficiente de variação;

S : desvio padrão amostral;

\bar{x} : média amostral.

- Significância e confiabilidade;

Como é explicado em Toledo (1985), um resultado tem significância (α) uma vez que não tenha ocorrido por acaso, a significância está relacionada ao nível de confiança ao rejeitar a hipótese nula.

De acordo com Montgomery et. al (1943), quando o desvio padrão da população (σ) é desconhecido é necessário utilizar sua estimativa amostral (S). Entretanto, para um número de amostras inferior a trinta, a distribuição deixa de ser uma normal padrão (Z). Neste caso, o comportamento segue uma distribuição simétrica em torno de zero, porém com uma variabilidade maior do que a da normal padrão. A distribuição acima é conhecida como distribuição t de *Student*.

- Intervalo de confiança t de uma amostra;

Segundo Kokoska (2013), dada uma amostra de tamanho n , com desvio padrão S , de uma população com média populacional (μ), se a distribuição da população subjacente for normal, um intervalo de confiança de $100(1 - \alpha)\%$ para μ tem como extremos os valores da Equação 34. Desta forma o intervalo de confiança estabelece quão confiante você pode ser de que a média populacional esteja entre os dois valores obtidos pela Equação 34.

$$\bar{x} \pm t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (34)$$

Onde,

- $t_{\alpha/2}$: valor crítico da distribuição t de Student com $(n - 1)$ graus de liberdade;
- \bar{x} : média da amostra;
- S : desvio padrão amostral;
- n : tamanho da amostra.

3.5. Modelagem Numérica

Os modelos de regressão simulam relacionamentos entre as variáveis de maneira a proporcionar uma previsão de resposta para o FS . Esse relacionamento poderá ser do tipo linear ou não linear. Entretanto para o presente trabalho será utilizado somente modelos de regressão linear simples e múltipla.

3.5.1. Variáveis Dummy

Missio e Jacobi (2007), definem variável *dummy* como uma variável artificial criada para representar um atributo com duas ou mais categorias. Sendo assim, foram utilizadas para representar as variações quantitativas a partir de valores qualitativos.

Para a se criar as variáveis *dummy*, faz-se necessário a utilização da linguagem e lógica binária, é usual atribuir os números 0 e 1 para indicar a participação (1) ou não (0) em uma categoria. Desta maneira para que a lógica binária funcione é necessário que o número de variáveis *dummy* necessárias para representar uma única variável atributo seja igual ao número de categorias em que é variável menos um. Outro fator decisivo é a inexistência de redundância, isso significa que entre as variáveis *dummy* não pode haver relação linear simples ou constante múltipla. A interação entre duas variáveis é representado por uma terceira variável *dummy* que é simplesmente o produto das duas variáveis binárias individuais.

3.5.2. Regressão Linear Simples

No modelo de regressão linear simples (Equação 35), considerou-se um único regressor ou preditor (x) para uma variável dependente ou variável de resposta (y).

$$E(y|x) = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon \quad (35)$$

Onde,

$E(y|x)$: estimativa de y por x ;

β_0 : coeficiente que representa a interseção da reta de estimativa;

β_1 : coeficiente que representa a inclinação da reta de estimativa;

x : variável preditora;

ϵ : erro aleatório.

3.5.3. Regressão Linear Múltipla

Modelos de regressão múltipla foram utilizados quando ocorreram mais de um regressor (Equação 36).

$$E(y|x_n) = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_nx_n + \epsilon \quad (36)$$

Onde,

- $E(y|x_n)$: estimativa de y por n variáveis;
- β_n : coeficientes dos parâmetros desconhecidos;
- x_n : variável preditora n ;
- ϵ : erro aleatório.

Esse é um modelo de regressão linear múltipla com n regressores. O termo linear é usado porque a equação é uma função linear dos parâmetros desconhecidos β . Entretanto identificadas variáveis de relação não-linear, pode-se proceder à transformação da variável em linear.

3.5.4. Resíduos e ANOVA na regressão

Montgomery (1943), relata que tanto na regressão linear simples quanto na regressão múltipla, as suposições do modelo ajustado precisam ser validadas para que os resultados sejam confiáveis. Assim, a análise dos resíduos foi necessária para investigar a adequabilidade dos modelos de regressão. Resíduo é a diferença entre o valor previsto e valor observado (Equação 37).

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (37)$$

Onde,

- e_i : resíduo;
- y_i : valor observado;
- \hat{y}_i : valor previsto pelo modelo.

A abordagem utilizada envolveu calcular os valores das estimativas previstas e os resíduos com base nos valores obtidos *in loco*, se a quantidade total de resíduos for inferior a 20% do total obtido *in loco* o modelo será apropriado. Este valor limite para os resíduos (20%) foi determinado observando-se a máxima variação natural para os valores de fluxo de saturação, determinados *in loco* em uma mesma faixa de rolamento e pico.

Outro teste realizado foi a ANOVA. De acordo com Kokoska (2013), no desenvolvimento de um teste ANOVA, faz-se necessário a determinação de três fontes de variação, expressos pelas Somas dos Quadrados (SQ): SQE, SQR e SQT.

A Soma do Quadrado do Erro (SQE), consiste na soma do quadrado da diferença entre o valor amostrado e o obtido pelo modelo, conforme Equação 38.

$$SQE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (38)$$

Onde,

SQE: Soma dos quadrados dos resíduos;

y_i : valor observado i ;

\hat{y}_i : Valor i calculado pelo modelo.

A Soma do Quadrado Regressão (SQR), é a soma do quadrado da diferença entre o valor encontrado pelo modelo e a média das amostras, como pode ser observado pela Equação 39.

$$SQR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (39)$$

Onde,

SQR: Soma dos quadrados entre o valor estimado e a média;

\bar{y} : valor médio das observações.

\hat{y}_i : Valor i calculado pelo modelo.

Já a Soma do Quadrado Total (SQT) conforme Equação 40 é a soma do quadrado da diferença entre os valores amostrados e a média da amostra.

$$SQT = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (40)$$

Onde,

SQT: Soma dos quadrados totais;

y_i : valor observado i ;
 \bar{y} : valor médio das observações.

Desta forma pode-se assumir que a variabilidade total (SQT) é igual a soma da variabilidade explicada (SQR) e a soma dos quadrados dos resíduos (SQE). Logo se tem a Equação 41.

$$SQT = SQE + SQR \quad (41)$$

Sendo assim o coeficiente de determinação de Pearson (r^2), que expressa o quanto o modelo explica a variabilidade total da resposta, pode ser definido pelas Equações 42.

$$r^2 = \frac{SQR}{SQT} \quad ; \quad r^2_{ajustado} = \left[1 - \left(\frac{n-1}{n-k+1} \right) \right] * (1 - r^2) \quad (42)$$

Onde,

r^2 : coeficiente de determinação de Pearson;
 $r^2_{ajustado}$: coeficientes de determinação de Pearson ajustado;
 SQR : Soma dos quadrados entre o valor estimado e a média;
 SQT : Soma dos quadrados totais;
 n : número de amostras;
 k : quantidade de variáveis preditoras.

Na Tabela 4 ANOVA para o modelo de regressão linear simples e múltipla é definida de acordo com o que se apresenta em seguida.

Tabela 4: Tabela da ANOVA

Fonte	Soma de quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F (calculado)
Regressão	SQR	k	$MQR = \frac{SQR}{k}$	$F = \frac{MQR}{MQE}$
Erro	SQE	$n - k - 1$	$MQE = \frac{SQE}{n - k - 1}$	
Total	SQT	$n - 1$		

Fonte: Adaptado de Kokoska (2013)

Se $F(\text{calculado}) > F(\text{adotado})$, existem evidências de diferença significativa entre pelo menos um par de médias de tratamentos, ao nível α de significância escolhido.

3.6. Validação e Aplicabilidade dos modelos existentes de FS

De posse dos valores de FS pelo método da curva acumulada de Shanteau (1988) e de todas as respectivas variáveis preditoras dos modelos, pode-se realizar algumas avaliações para ter uma ideia da eficácia e adequação dos modelos matemáticos simplificados.

Dentre as técnicas utilizadas para avaliar a eficácia dos modelos, o coeficiente de correlação foi a primeira possibilidade. Outra medida de adequação foi o coeficiente de determinação do modelo.

A filosofia utilizada nessa análise deu-se pela determinação do modelo que melhor se ajustasse aos dados e que estivesse relacionada com a estimativa dos parâmetros que tornassem os resíduos tão próximos de zero quanto possível. A calibração dos modelos existentes pode ser feita acrescentando o erro médio ao seu respectivo modelo simplificado.

3.7. Modelagem

Meyer (1983), esclarece que é muito importante distinguir o próprio fenômeno e o modelo matemático para esse fenômeno. Naturalmente, não se deve exercer influência sobre aquilo que observa. No entanto, ao escolher um modelo, pode-se lançar mão de um julgamento crítico. Nesse sentido, o presente trabalho também analisou a possibilidade de lançar um modelo que melhor representasse FS para a realidade dos dados levantados.

Para a modelagem foi necessário levantar os valores de FS e as variáveis preditoras para diversas faixas de rolamento. Em outras palavras, foi preciso quantificar tanto o FS quanto as possíveis características influenciadoras, que a princípio não se conhecia. Nesse sentido, inicialmente considerou-se como variáveis preditoras:

- largura da faixa de rolamento;
- largura total da pista no mesmo sentido de fluxo;
- largura do estacionamento lateral;
- largura dos canteiros centrais;
- raio de curva da faixa de rolamento com fluxo de conversão a direita e/ou esquerda;
- declividade da via;

- tipo de faixa (direita, central ou esquerda);
- número de faixas de rolamento que compõem o mesmo sentido de fluxo;
- tempo de verde do estágio analisado;
- porcentagem de fluxo direto;
- porcentagem de conversão a direita;
- porcentagem de conversão a esquerda;
- porcentagem de veículos pesados (caminhões pesados e ônibus);
- porcentagem de veículos de passeio;
- porcentagem de motos;
- velocidade média no período saturado;
- presença de pontos de ônibus próximo a interseção; e
- presença de buracos no pavimento próximo a interseção.

Durante o processo de regressão foi realizada a análise de significância para cada variável do modelo pelo p-valor, se este valor fosse maior que o nível de significância, a variável não era significativa e deveria ser retirada do modelo.

Também realizou-se uma avaliação da adequação do modelo por meio da análise dos resíduos gerados, disposto graficamente o erro entre o valor *in loco* e dos modelos. O modelo foi considerado apropriado quando um baixo valor de resíduos foi observado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Descrição e Caracterização das Faixas de Rolamento Analisadas

As faixas de rolamento estudadas são típicas (geometria, fluxo e programações semafóricas são similares) da região central da cidade de Toledo-PR. Foram analisados os cinco cruzamentos:

- Cruzamento da Rua Santos Dumont com as Ruas Doze de Outubro e Largo São Vicente de Paula (Figuras 9);
- Cruzamento da Rua Dom Pedro II com a Avenida Maripá (Figuras 10);
- Cruzamento da Rua Santos Dumont com a Avenida Maripá (Figuras 11);
- Cruzamento da Rua Almirante Barroso com a Avenida Maripá (Figuras 12); e
- Cruzamento da Rua Santos Dumont com a Avenida Parigot de Souza (Figuras 13);

As aproximações foram classificadas pelo sentido geográfico de origem dos veículos na interseção, ou seja, na aproximação norte os veículos chegam na interseção oriundos deste ponto cardeal. As faixas foram classificadas da direita para a esquerda por letras respectivamente A, B e C. Desta forma ao se referir a interseção da Rua Santos Dumont x Avenida Maripá aproximação sul faixa C, indica que os veículos aproximam pelo sul na terceira faixa da direita para a esquerda nesta interseção.

Devido a eficiência da programação semafórica atuante poucos ciclos apresentam saturação plena (dissipação incompleta da fila durante o direito de passagem), desta forma o grau de saturação apresentou grande variação entre os ciclo. Os usuários de maneira geral tendem por adotar uma postura mais “cautelosa” ao dirigir, ou seja, não desenvolvem grandes velocidades em um curto espaço de tempo, prezam por segurança ou mesmo conforto, mantendo um espaçamento entre veículos (*gap*) considerável, caracterizando um fluxo de baixa densidade, impactando em baixos valores de fluxo de saturação.

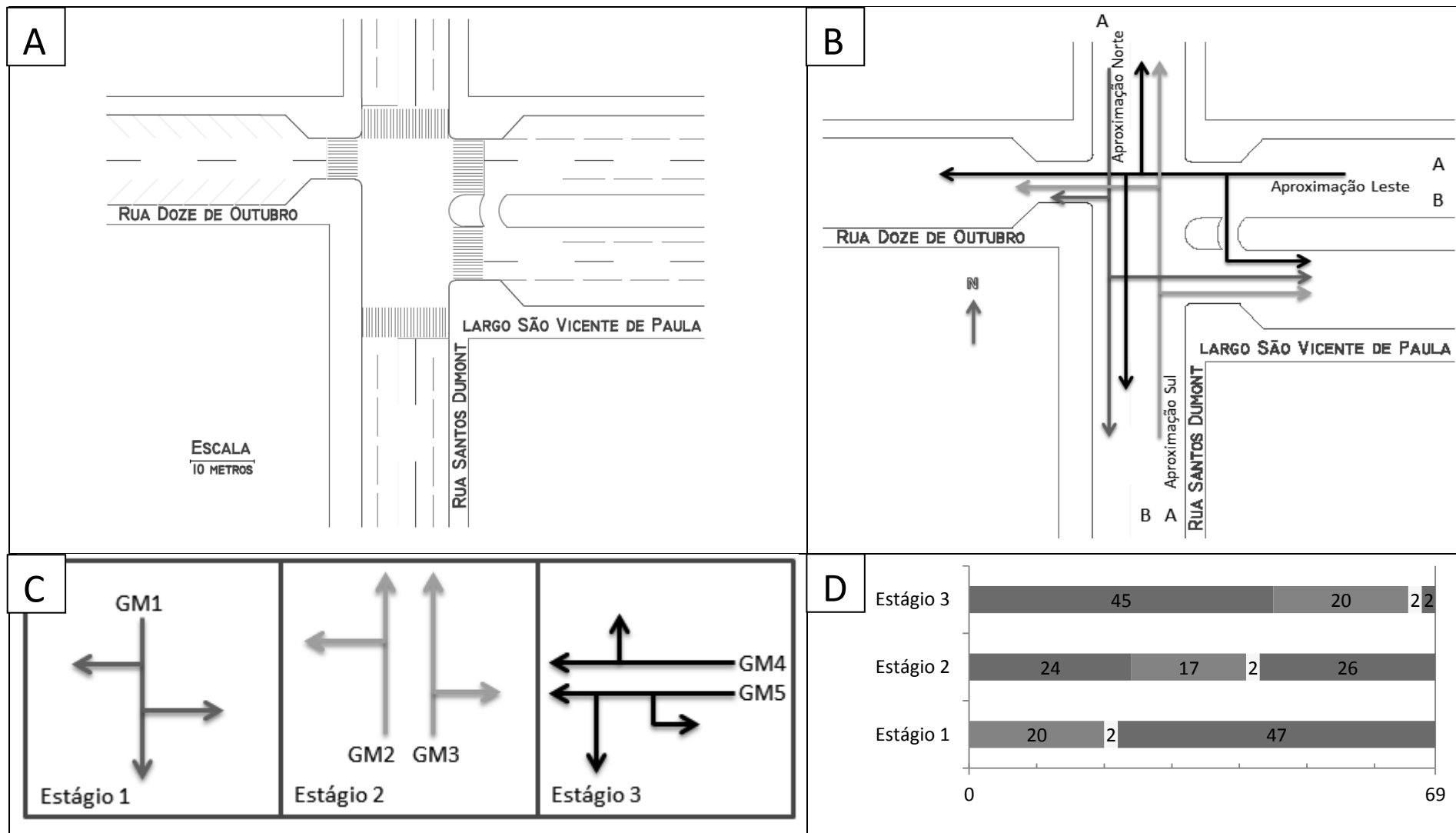


Figura 9: Caracterização do cruzamento da Rua Santos Dumont com as Ruas Doze de Outubro e Largo São Vicente de Paula. (A) Parâmetros geométricos. (B) Diagrama de movimentos com volume de tráfegos em UCP/h. (C) Diagrama de estágios. (D) Diagrama de barras da programação semafórica

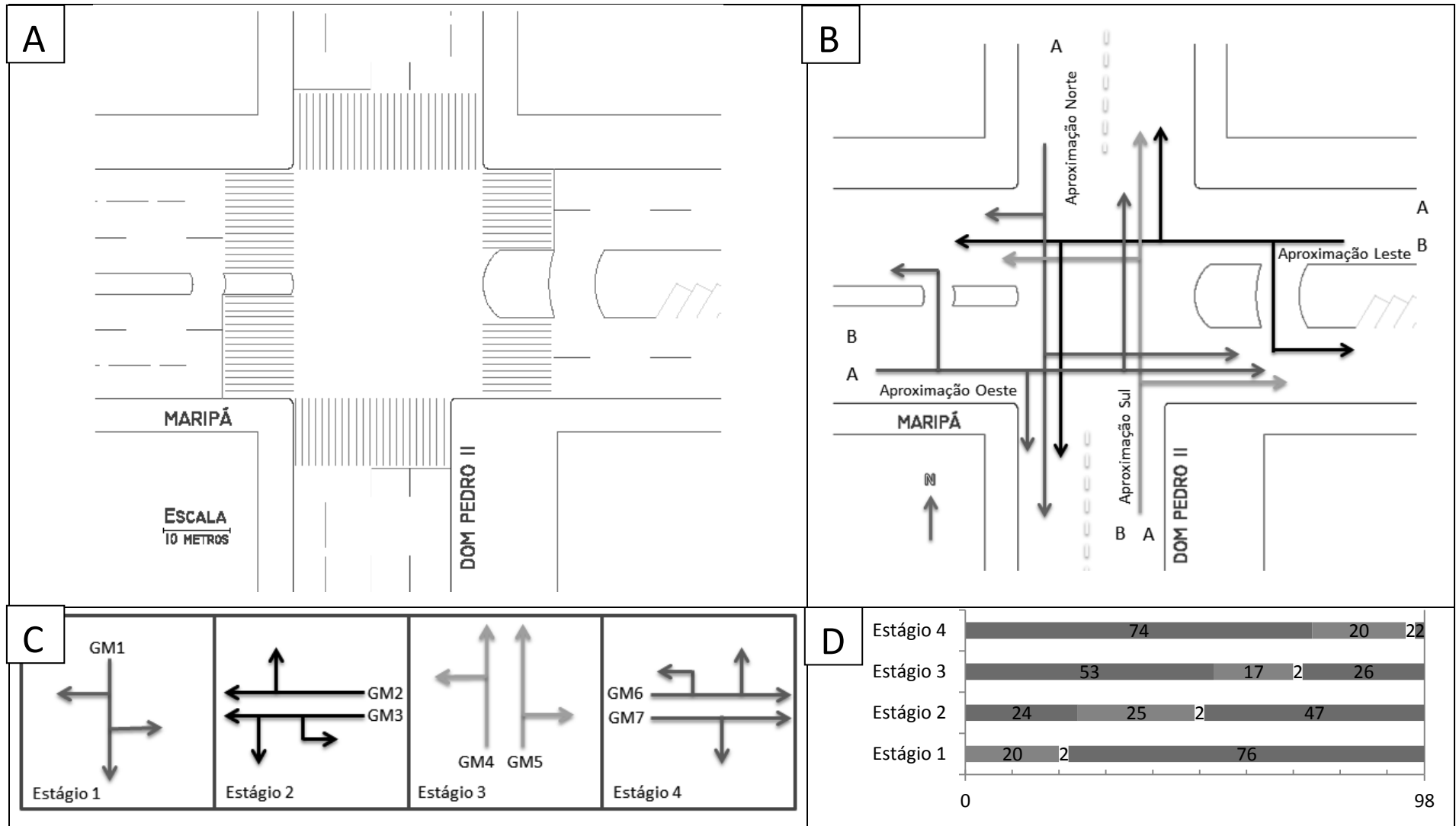


Figura 10: Caracterização do cruzamento da Rua Dom Pedro II com a Avenida Maripá. (A) Parâmetros geométricos. (B) Diagrama de movimentos com volume de tráfegos em UCP/h. (C) Diagrama de estágios. (D) Diagrama de barras da programação semafórica

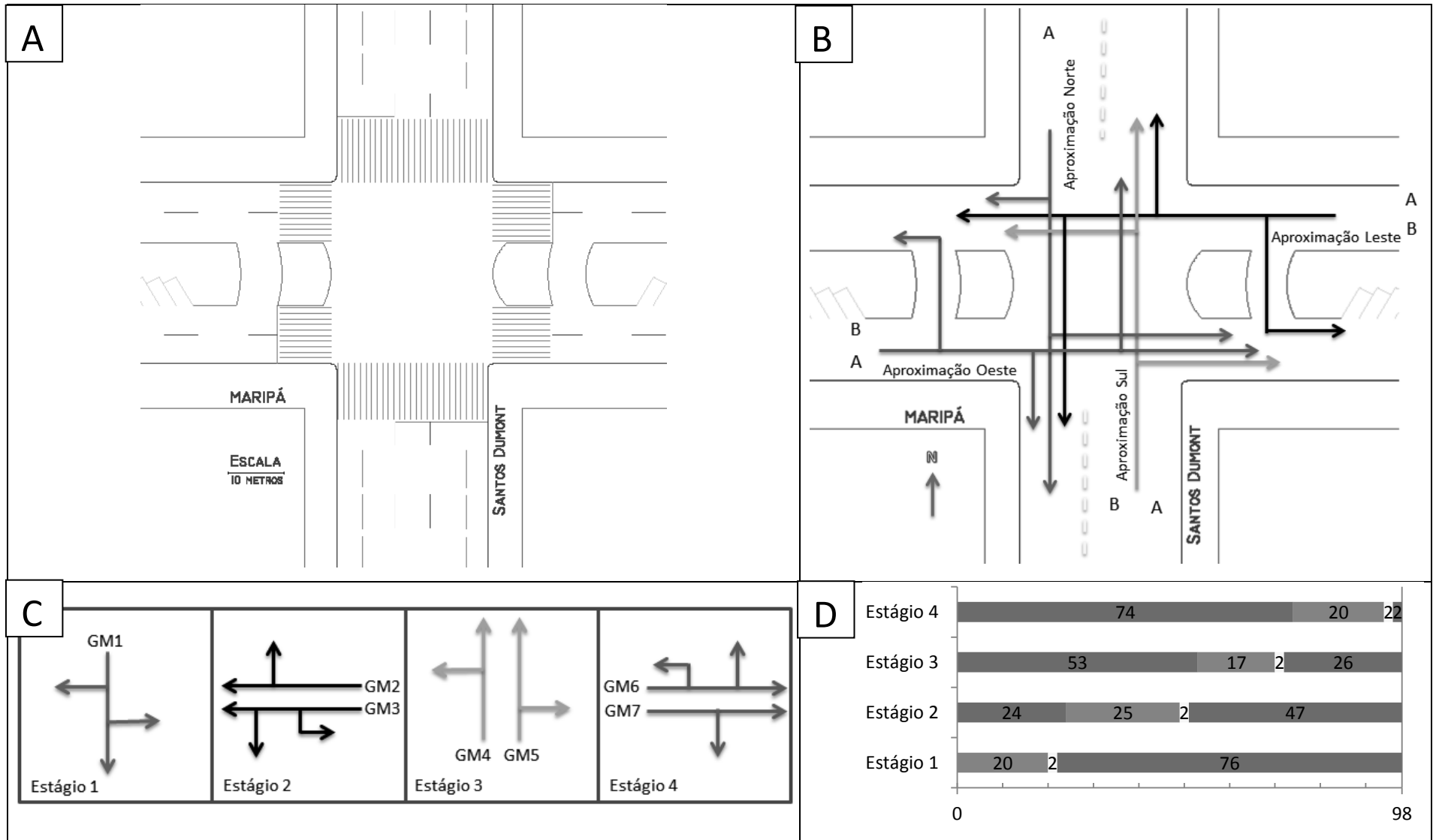


Figura 11: Caracterização do cruzamento da Rua Santos Dumont com a Avenida Maripá. (A) Parâmetros geométricos. (B) Diagrama de movimentos com volume de tráfegos em UCP/h. (C) Diagrama de estágios. (D) Diagrama de barras da programação semafórica

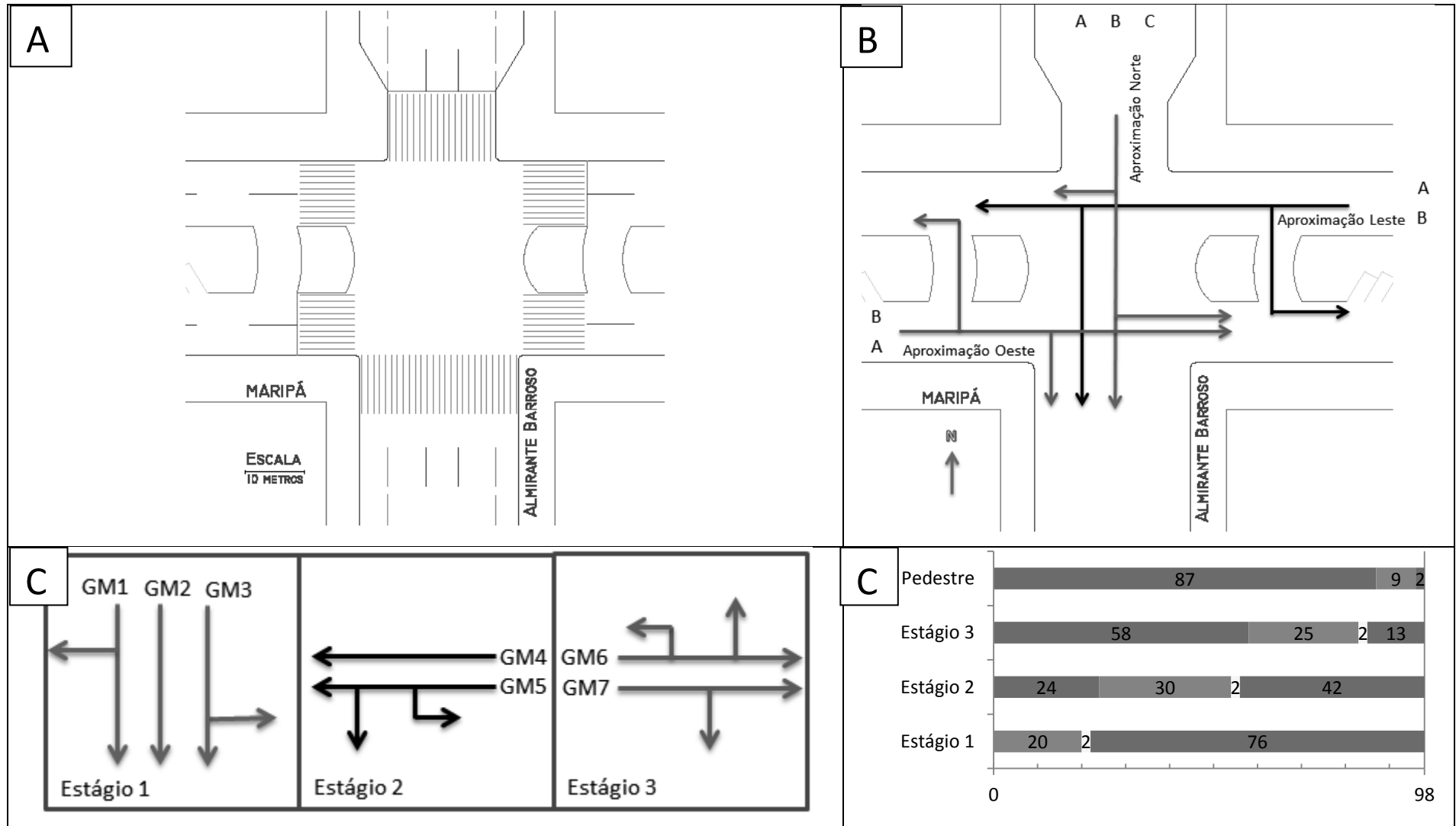


Figura 12: Caracterização do cruzamento da Rua Almirante Barroso com a Avenida Maripá. (A) Parâmetros geométricos. (B) Diagrama de movimentos com volume de tráfegos em UCP/h. (C) Diagrama de estágios. (D) Diagrama de barras da programação semafórica

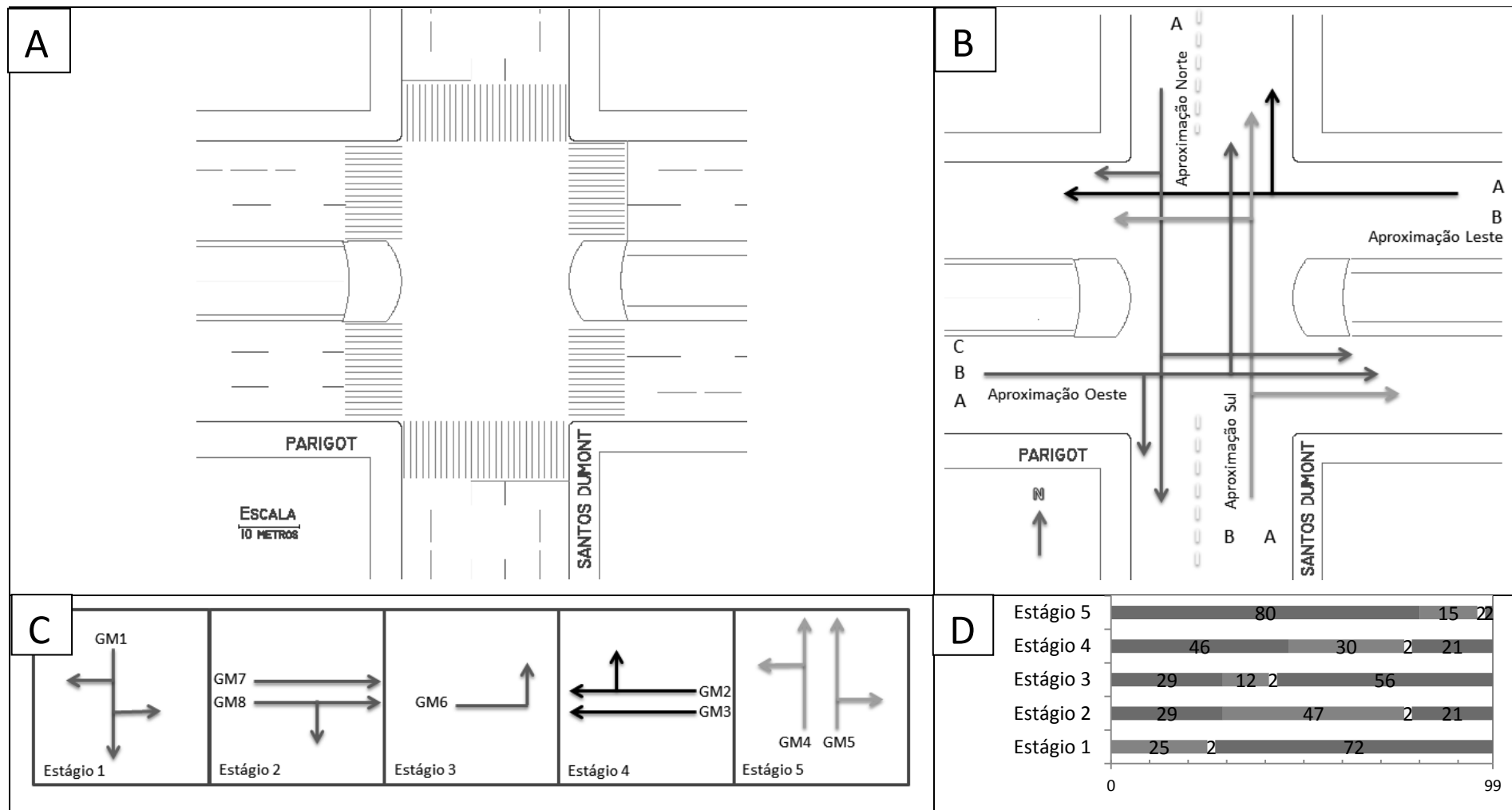


Figura 13: Caracterização do cruzamento da Rua Santos Dumont com a Avenida Parigot de Souza. (A) Parâmetros geométricos. (B) Diagrama de movimentos com volume de tráfegos em UCP/h. (C) Diagrama de estágios. (D) Diagrama de barras da programação semafórica

4.2. Quantidade Mínima de Veículos para a Determinação do Fluxo de Saturação

Durante o trabalho foram levantados 570 ciclos semaforicos, sendo em média 9 ± 2 veículos por ciclo. Utilizando o modelo de Shanteau, que considera a curva acumulada de UCP no tempo, foi possível verificar a quantidade de veículo presente em cada regime saturado. A Figura 14 esquematiza o método de levantamento de alguns parâmetros com base na análise dos ciclos, pode-se observar que para o exemplo (Figura 14) o início do período saturado ocorre com a passagem do quinto veículo e termina com a passagem do nono.

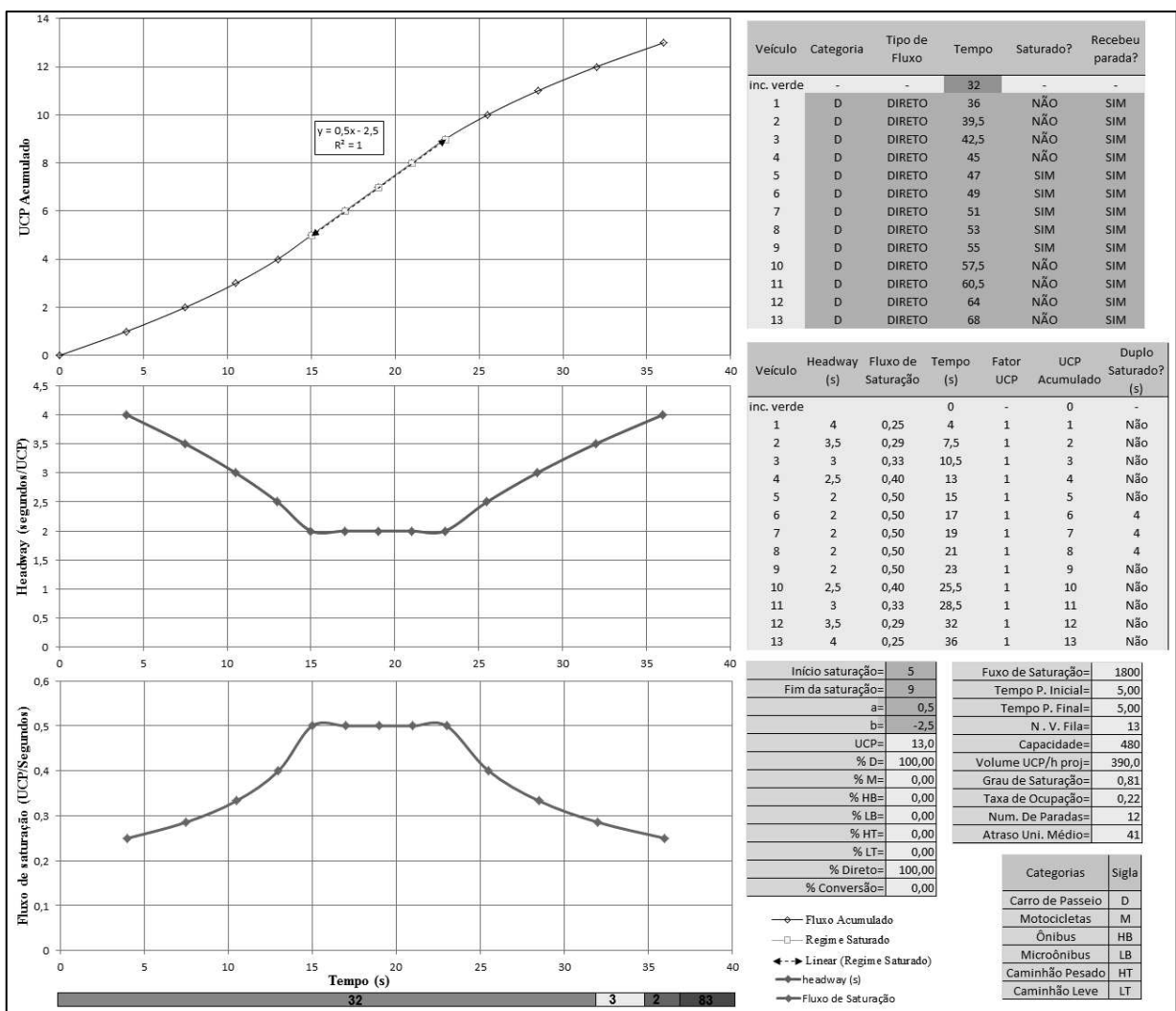


Figura 14: Esquematização da análise do fluxo de saturação

A Tabela 5 apresenta a quantidade de veículos que cruzaram a linha de retenção até o início e fim dos regimes saturados, para um nível de confiabilidade de 95% (distribuição t).

Tabela 5: Posição dos veículos em descarga na fila em Regime Saturado (intervalo fechado)

	Início	Fim
Nível de Confiança	95%	95%
Desvio Padrão	0,79	1,82
Número de amostras (ciclos)	570	570
Valor Máximo	4	8
Valor Médio	4	8
Valor Mínimo	4	7

Como pode ser observado, o regime pode ser considerado saturado com a passagem do quarto veículo da fila, ou seja, o quarto veículo faz parte do regime saturado. No entanto, o método proposto pelo HCM estipula o início da saturação a partir da passagem do quinto veículo. Quanto ao final da saturação, depende muito do tamanho do tempo de verde e da quantidade de veículos na fila. Foi observado que em ciclos com baixo número de veículos (menos que 8 veículos em fila), o regime saturado permanece até a passagem do último veículo. Nesses casos, não existe tempo perdido final, uma vez que o tempo de verde foi suficiente para atender a demanda da fila com folga.

Desta forma qual seria a quantidade mínima de veículos em um ciclo para se determinar o fluxo de saturação *in loco*?

Para as condições observadas nos cinco cruzamentos investigados, verifica-se que o fluxo de saturação pode ser estimado com uma fila mínima de quatro veículos. Os três primeiros veículos ao receberem o direito de passagem não atingem o *headway* saturado, devido ao tempo perdido no início do ciclo (tempo perdido de inércia). Com isso, a passagem do quarto veículo já forneceria o valor de fluxo de saturação, uma vez que esse já conseguiu atingir o *headway* saturado. Vale ressaltar que quanto menor a quantidade de veículos na fila mais difícil é a identificação do período saturado (trecho linear), e mais fácil é de se cometer um erro de estimativa, neste caso é aconselhável que se tenha mais do que um único veículo dentro do regime saturado, desta maneira por questão de segurança adotou-se uma fila mínima de 7 veículos.

No entanto, para determinar os tempos perdidos de início e fim de cada ciclo, deve-se utilizar ciclos completamente saturados. Essa consideração recai sobre o tempo perdido final, uma vez que é necessário que nem todos os veículos da fila consigam passar durante o direito de passagem para determiná-lo. Desta forma poderíamos com certeza afirmar que de fato exista uma redução na taxa de descarga para os últimos veículos.

4.3. Fatores de Equivalência

Por meio da análise das filmagens foi levantado os *headways* de cada veículo durante as descargas das filas. Pelo método da curva acumulada de Shanteau (1988) também foi identificado o regime saturado (trecho de comportamento linear), no qual se levantou o *headway* duplo saturado médio para as diversas categorias de veículo. Para identificar se existe variação pelo tipo de interseção foram levantados os fatores de equivalência nas cinco interseções analisadas. Os resultados podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6: Fatores de equivalência veicular (UCP) obtidos

INTERSEÇÃO	Carro de Passeio	Motocicletas	Ônibus	Micro-ônibus	Caminhão Pesado	Caminhão Leve
SANTOS DUMONT X LARGO SÃO VICENTE	1,00	0,69	*	*	*	1,14
SANTOS DUMONT X PARIGOT DE SOUZA	1,00	0,69	*	*	*	*
MARIPÁ X SANTOS DUMONT	1,00	0,76	1,68	1,38	*	1,41
MARIPÁ X DOM PEDRO II	1,00	0,70	*	*	1,78	1,21
MARIPÁ X ALMIRANTE BARROSO	1,00	0,75	*	*	1,99	*
MÉDIA GERAL (27 FAIXAS)	1,00	0,72	1,68	1,38	1,83	1,30
DESVIO PADRÃO GERAL (27 FAIXAS)	0,00	0,07	-	-	0,27	0,19
VALORES SUGERIDOS (GERAL)	1,00	0,70	1,70	1,40	1,80	1,30

* Não houve amostras dessa categoria no horário da filmagem em campo

Não foi possível a obtenção dos fatores de equivalência para todas as categorias de veículos, pois em algumas interseções não foi observado no período de gravação o *headway* duplo saturado. Os valores encontrados para a equivalência mais se aproximaram dos sugeridos por Andrade (1994), indicados para região sudeste do Brasil. De maneira geral, a maior diferença encontrada foi para a categoria motocicleta. A Tabela 7 apresenta a comparação entre os principais valores de equivalência sugeridos na bibliografia, os adotados para a análise das filmagens (era necessário estipular um valor inicial para obtenção de alguns dados) e os encontrados pelo método do *headway* duplo saturado.

Tabela 7: Comparação entre valores sugeridos de fator de equivalência veicular (UCP) e valores obtidos pelo método do *headway* duplo saturado

AUTORES	Carro de Passeio	Caminhão Leve	Caminhão Pesado	Ônibus Pesado	Motocicleta	Micro-ônibus
DENATRAN	1	1	1,75	2,25	0,33	-
ANDRADE (SE)	1	1,36	2,01	1,72	0,46	-
SETTI	1	1,4	2,2	1,8	0,4	-
CCG	1	1,5	2,5	1,75	0,5	-
HBS	1	1,5	2	2	1	-
HCM	1	2	2	2	1	-
ARRB	1	2	2	2	1	-
UTILIZADOS	1	1,5	2	2	0,5	1,5
OBTIDOS	1	1,3	1,8	1,7	0,7	1,4

4.4. Valores de Fluxo de Saturação Obtidos *In Loco*

Os valores de fluxo de saturação obtidos pela curva acumulada sugerem uma variação considerável (Tabela 8) sobre mesmas condições físicas. Esta variação pode ser observada na Figura 15 que mostra os valores de fluxo de saturação levantados em 30 ciclos consecutivos na interseção da Rua Dom Pedro II com a Avenida Maripá aproximação oeste faixa B.

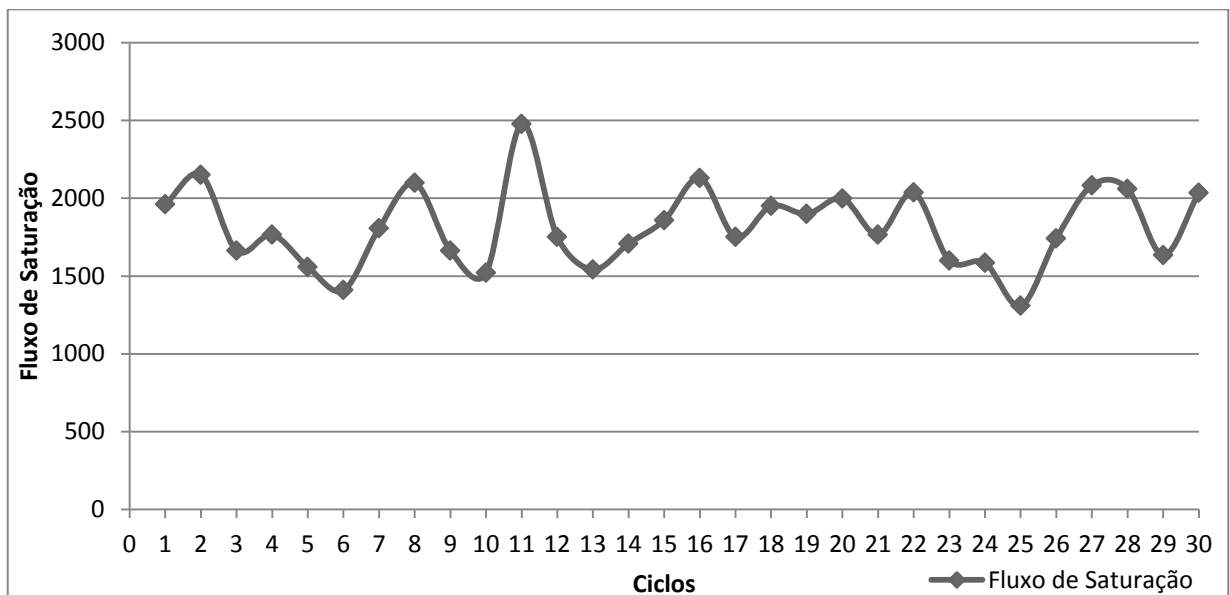


Figura 15: Variação do fluxo de saturação 30 ciclos consecutivos levantados na interseção da Rua Dom Pedro II com a Avenida Maripá aproximação oeste faixa B

Tabela 8: Variação do fluxo de saturação entre ciclos

INTERSEÇÃO	IDENTIFICAÇÃO				ESTATÍSTICA			
	DATA	HORÁRIO	APROXIMAÇÃO	FAIXA	D. P	N	F.S.M	C.V
S. DUMONT X LARGO SÃO VICENTE	03/03/2016	18:30 Às 19:30	NORTE	A	221	30	1783	12,38%
S. DUMONT X LARGO SÃO VICENTE	03/03/2016	12:30 Às 13:30	NORTE	A	207	30	1827	11,32%
S. DUMONT X LARGO SÃO VICENTE	21/01/2016	12:30 Às 13:30	SUL	A	279	11	1777	15,70%
PARIGOT X SANTOS DUMONT	07/12/2015	12:30 Às 13:30	OESTE	B	230	30	1805	12,75%
PARIGOT X SANTOS DUMONT	07/12/2015	12:30 Às 13:30	OESTE	C	199	11	2065	9,62%
MARIPÁ X SANTOS DUMONT	24/02/2016	18:30 Às 19:30	OESTE	B	273	15	1646	16,60%
MARIPÁ X SANTOS DUMONT	24/02/2016	18:30 Às 19:30	OESTE	A	340	13	1595	21,32%
MARIPÁ X SANTOS DUMONT	20/01/2016	12:30 Às 13:30	NORTE	A	275	5	1832	15,01%
MARIPÁ X SANTOS DUMONT	29/01/2016	12:30 Às 13:30	LESTE	B	223	30	1629	13,68%
MARIPÁ X SANTOS DUMONT	29/01/2016	12:30 Às 13:30	LESTE	A	209	30	1556	13,46%
MARIPÁ X SANTOS DUMONT	08/12/2015	12:30 Às 13:30	OESTE	B	318	13	1514	21,00%
MARIPÁ X SANTOS DUMONT	08/12/2015	12:30 Às 13:30	OESTE	A	196	7	1591	12,33%
MARIPÁ X DOM PEDRO II	23/02/2016	18:30 Às 19:30	NORTE	A	221	30	1807	12,24%
MARIPÁ X DOM PEDRO II	23/02/2016	12:30 Às 13:30	NORTE	A	246	30	1855	13,25%
MARIPÁ X DOM PEDRO II	27/01/2016	18:30 Às 19:30	SUL	B	323	15	1669	19,35%
MARIPÁ X DOM PEDRO II	27/01/2016	18:30 Às 19:30	SUL	A	191	4	1658	11,52%
MARIPÁ X DOM PEDRO II	24/02/2016	18:30 Às 19:30	OESTE	B	300	30	1805	16,61%
MARIPÁ X DOM PEDRO II	24/02/2016	12:30 Às 13:30	OESTE	B	256	30	1817	14,08%
MARIPÁ X DOM PEDRO II	26/02/2016	18:30 Às 19:30	OESTE	A	248	30	1723	14,38%
MARIPÁ X DOM PEDRO II	26/02/2016	12:30 Às 13:30	OESTE	A	231	30	1759	13,12%
MARIPÁ X ALMIRANTE BARROSO	02/02/2016	18:30 Às 19:30	NORTE	C	218	18	1662	13,11%
MARIPÁ X ALMIRANTE BARROSO	02/02/2016	18:30 Às 19:30	NORTE	B	197	10	1745	11,29%
MARIPÁ X ALMIRANTE BARROSO	02/02/2016	18:30 Às 19:30	NORTE	A	290	6	1631	17,80%
MARIPÁ X ALMIRANTE BARROSO	29/01/2016	18:30 Às 19:30	LESTE	B	239	30	1608	14,84%
MARIPÁ X ALMIRANTE BARROSO	29/01/2016	12:30 Às 13:30	LESTE	B	236	30	1715	13,78%
MARIPÁ X ALMIRANTE BARROSO	25/02/2016	18:30 Às 19:30	LESTE	A	205	30	1527	13,42%
MARIPÁ X ALMIRANTE BARROSO	25/02/2016	12:30 Às 13:30	LESTE	A	211	30	1628	12,94%
LEGENDA:							C. V. Mínimo	9,62%
N: número de ciclos; D.P: desvio padrão; F.S.M: fluxo de saturação médio; C.V: coeficiente de variação.							C. V. Médio	14,33%
							C. V. Máximo	21,32%

Como observado na Figura 15 e Tabela 8, ciclos consecutivos podem apresentar valores bem distintos de fluxo de saturação, sugerindo que o comportamento dos usuários exerce influencia significativa no fluxo de saturação. Uma vez que uma fila seja composta por usuários mais “agressivos” na direção, ou seja, que desenvolvam altas velocidades em um curto espaço de tempo, o fluxo de saturação tende a ser maior. Por outro lado se nesta mesma fila um único usuário preferir uma postura mais “cautelosa” ao dirigir ele exerce influencia em todos os outros veículos que o sucedem reduzindo assim o “ritmo” de descarga da fila, em outras palavras o fluxo de saturação. Fica evidente que existe uma sinergia entre os membros da fila e que ela nivela por baixo o fluxo, devido à segurança percebida individualmente pelos

usuários (não tem como passar por cima do veículo da frente), um exemplo extremo seria uma pessoa que é acostumada dirigir no interior, pegar uma fila na região metropolitana de São Paulo.

4.4.1. Fluxo de Saturação médio e intervalo de confiança

Para as 27 faixas de rolamento estudadas foram levantados vários ciclos obtendo para cada ciclo seu respectivo valor de fluxo de saturação. Desta forma, de posse de vários valores que representam uma única faixa de rolamento, deu-se início ao estudo do valor médio de fluxo de saturação, para um nível de 95% de confiança. Entretanto, para se trabalhar com intervalo de confiança é necessário conhecer a distribuição de frequência dos dados. A Figura 16 apresenta a distribuição de frequência do fluxo de saturação na interseção da Avenida Maripá com a Rua Dom Pedro II, pela aproximação oeste faixa B.

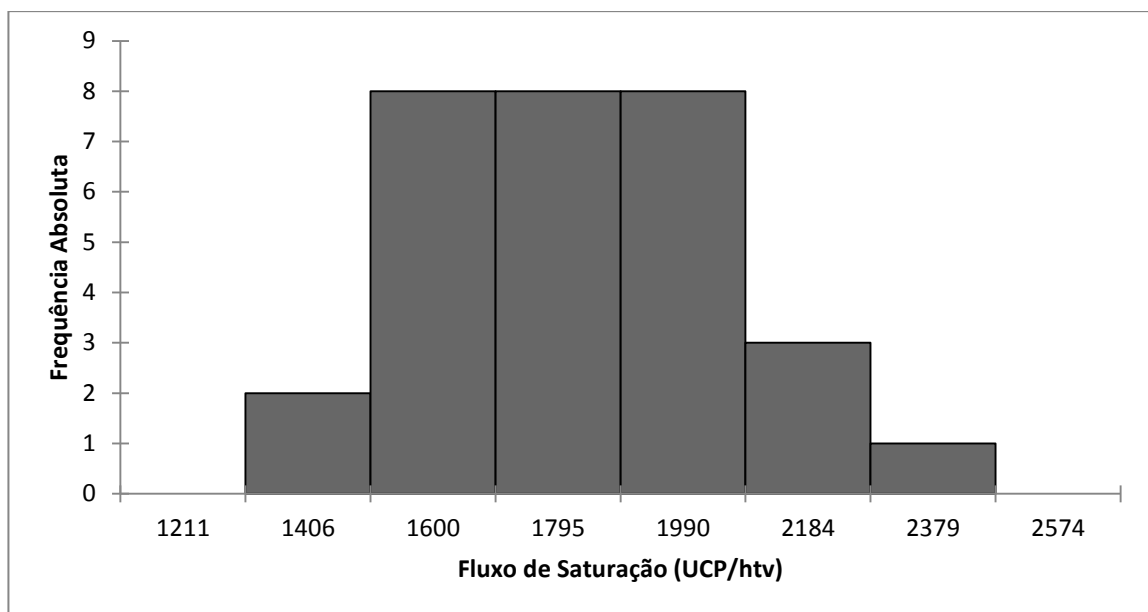


Figura 16: Histograma de frequência para o fluxo de saturação (Avenida Maripá x Rua Dom Pedro II, aproximação oeste faixa B)

As 27 faixas de rolamento apresentaram uma distribuição de frequência bem similar, aproximando-se da distribuição de *Student*. Desta forma, podemos de maneira um pouco mais segura utilizar o intervalo de confiança. Os resultados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Fluxo de saturação médio (UCP/htv) obtido *in loco*, dentro de limites de confiança de 95%, por faixa de rolamento

Interseção	Horário	Aproximação	Faixa ¹	Nº de Ciclos	Fluxo de saturação (UCP/htv)		
					Mínimo	Médio	Máximo
Maripá X Almirante Barroso	12:30 Às 13:30	Leste	B	30	1627	1715	1803
Maripá X Almirante Barroso	12:30 Às 13:30	Leste	A	30	1549	1628	1707
Maripá X Almirante Barroso	18:30 Às 19:30	Norte	C	18	1553	1662	1770
Maripá X Almirante Barroso	18:30 Às 19:30	Norte	B	10	1604	1745	1885
Maripá X Almirante Barroso	18:30 Às 19:30	Norte	A	6	1326	1631	1935
Maripá X Almirante Barroso	18:30 Às 19:30	Leste	B	30	1519	1608	1697
Maripá X Almirante Barroso	18:30 Às 19:30	Leste	A	30	1450	1527	1603
Maripá X Dom Pedro II	12:30 Às 13:30	Norte	A	30	1763	1855	1947
Maripá X Dom Pedro II	12:30 Às 13:30	Oeste	B	30	1721	1817	1912
Maripá X Dom Pedro II	12:30 Às 13:30	Oeste	A	30	1673	1759	1845
Maripá X Dom Pedro II	18:30 Às 19:30	Norte	A	30	1725	1807	1890
Maripá X Dom Pedro II	18:30 Às 19:30	Sul	B	15	1491	1669	1848
Maripá X Dom Pedro II	18:30 Às 19:30	Sul	A	4	1354	1658	1962
Maripá X Dom Pedro II	18:30 Às 19:30	Oeste	B	30	1693	1805	1917
Maripá X Dom Pedro II	18:30 Às 19:30	Oeste	A	30	1630	1723	1815
Maripá X Santos Dumont	12:30 Às 13:30	Norte	A	5	1491	1832	2174
Maripá X Santos Dumont	12:30 Às 13:30	Leste	B	30	1546	1629	1712
Maripá X Santos Dumont	12:30 Às 13:30	Leste	A	30	1478	1556	1634
Maripá X Santos Dumont	12:30 Às 13:30	Oeste	B	13	1322	1514	1706
Maripá X Santos Dumont	12:30 Às 13:30	Oeste	A	7	1410	1591	1773
Maripá X Santos Dumont	18:30 Às 19:30	Oeste	B	15	1495	1646	1797
Maripá X Santos Dumont	18:30 Às 19:30	Oeste	A	13	1390	1595	1801
Parigot X Santos Dumont	12:30 Às 13:30	Oeste	B	30	1719	1805	1891
Parigot X Santos Dumont	12:30 Às 13:30	Oeste	C	11	1932	2065	2199
Santos Dumont X Largo S. Vicente	12:30 Às 13:30	Norte	A	30	1749	1827	1904
Santos Dumont X Largo S. Vicente	12:30 Às 13:30	Sul	A	11	1590	1777	1964
Santos Dumont X Largo S. Vicente	18:30 Às 19:30	Norte	A	30	1700	1783	1865

1: Classificação das faixas da direita para esquerda do condutor (A; B; C... etc)

4.4.2. Variação do Fluxo de Saturação entre e dentro dos Picos do Dia

Os cinco cruzamentos analisados possuem no total 27 faixas de aproximação, independentemente de sua orientação. Para analisar a variação do fluxo de saturação entre os horários de picos, foi selecionado de maneira aleatória 6 faixas de rolamento, nas quais foram realizadas duas gravações no mesmo dia da semana, em horários de pico distintos: 12:30 às 13:30 e 18:30 às 19:30.

Podemos observar na Tabela 10 que existe uma variação de 11,32 a 16,61% dentro dos horários de pico, ou seja, entre os valores de fluxo de saturação obtidos nos ciclos

consecutivos. Entretanto a variação relativa entre horários de pico foi de -0,63 a -6,25%, ou seja, o pico da noite apresentou fluxo de saturação médio entre 93,75 a 99,37% do da tarde.

Tabela 10: Variação do fluxo de saturação dentro e ente os picos do dia

Identificação					12:30 às 13:30 (Tarde)		18:30 às 19:30 (Noite)		Variação média relativa do FS nos picos do dia (Tarde e Noite) com base na Tarde
Interseção	Nº de Ciclos	Data	Aproximação	Faixa	FS Médio	CV	FS Médio	CV	
Maripá X Almirante Barroso	30	25/02/2016	Leste	A	1628	12,94%	1527	13,42%	-6,22%
Maripá X Almirante Barroso	30	29/02/2016	Leste	B	1715	13,78%	1608	14,84%	-6,25%
Maripá X Dom Pedro II	30	23/02/2016	Norte	A	1855	13,25%	1807	12,24%	-2,57%
Maripá X Dom Pedro II	30	24/02/2016	Oeste	B	1817	14,08%	1805	16,61%	-0,63%
Maripá X Dom Pedro II	30	27/02/2016	Oeste	A	1759	13,12%	1723	14,38%	-2,04%
Santos Dumont X Largo São Vicente	30	03/03/2016	Norte	A	1827	11,32%	1783	12,38%	-2,40%

CV: Coeficiente de Variação; FS: Fluxo de Saturação.

Por meio da análise da Tabela 9 reforçada pela Figura 15, podemos constatar que a variação é de certa forma natural ao fluxo de saturação uma vez que depende das chegadas aleatórias dos motoristas e de seu desempenho como pelotão de veículos. Entretanto, essa variação tende a se repetir ao longo do tempo, ou seja, a variação observada no início da tarde tende a ser próxima da variação apresentada no início da noite.

4.5. Tempo Perdido Inicial e Final dos estágios semaforicos

Os tempos perdidos foram obtidos para cada ciclo por meio da análise da curva acumulativa de Shanteau. Como já foi abordado nos tópicos anteriores para o correto levantamento do tempo perdido final é imprescindível que pelo menos um veículo da fila não consiga passar ao final do direito de passagem. Como o objetivo inicial do trabalho era analisar apenas do fluxo de saturação, não houve este cuidado quanto à seleção de ciclos. Desta forma os resultados obtidos para o tempo perdido final não são representativos do fenômeno real e ideal. Explicando isso a Tabela 11 apresenta o intervalo de confiança para a média dos tempos perdidos para cada faixa de rolamento analisada, com uma confiança de 95% pela distribuição *t* de Student.

Tabela 11: Intervalo de confiança no nível de 95% para o tempo perdido inicial e final

Interseção	Período	Aproximação	Faixa	Tpi			Tpf		
				Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
Santos Dumont Com Largo São Vicente	18:30 Às 19:30	Norte	A	1,9	2,5	3,1	0,0	0,2	0,5
Santos Dumont Com Largo São Vicente	12:30 Às 13:30	Norte	A	2,3	2,9	3,6	-0,2	0,1	0,4
Santos Dumont Com Largo São Vicente	12:30 Às 13:30	Sul	A	-0,5	1,9	4,2	0,0	0,6	1,3
Parigot Com Santos Dumont	12:30 Às 13:30	Oeste	B	1,2	1,9	2,5	-0,4	0,3	0,9
Parigot Com Santos Dumont	12:30 Às 13:30	Oeste	C	1,2	2,0	2,7	-0,3	0,5	1,3
Maripá Com Santos Dumont	18:30 Às 19:30	Oeste	B	1,6	3,1	4,6	-0,5	0,5	1,6
Maripá Com Santos Dumont	18:30 Às 19:30	Oeste	A	1,6	3,2	4,8	-0,1	0,4	1,0
Maripá Com Santos Dumont	12:30 Às 13:30	Norte	A	-0,2	2,1	4,3	-0,8	0,5	1,8
Maripá Com Santos Dumont	12:30 Às 13:30	Leste	B	2,3	3,2	4,0	0,9	2,1	3,3
Maripá Com Santos Dumont	12:30 Às 13:30	Leste	A	2,5	3,4	4,2	-0,5	0,3	1,0
Maripá Com Santos Dumont	12:30 Às 13:30	Oeste	B	1,4	2,4	3,4	-2,0	-0,8	0,4
Maripá Com Santos Dumont	12:30 Às 13:30	Oeste	A	1,7	2,8	3,9	-0,3	0,2	0,8
Maripá Com Dom Pedro II	18:30 Às 19:30	Norte	A	1,9	2,4	2,9	-0,7	-0,2	0,2
Maripá Com Dom Pedro II	18:30 Às 19:30	Sul	B	0,7	1,9	3,1	-0,7	-0,2	0,3
Maripá Com Dom Pedro II	18:30 Às 19:30	Sul	A	0,6	2,3	3,9	-0,1	0,3	0,8
Maripá Com Dom Pedro II	18:30 Às 19:30	Oeste	B	1,4	2,1	2,8	-0,4	0,2	0,7
Maripá Com Dom Pedro II	18:30 Às 19:30	Oeste	A	1,3	2,0	2,8	-0,2	0,2	0,7
Maripá Com Dom Pedro II	12:30 Às 13:30	Norte	A	0,7	1,4	2,0	-0,6	-0,1	0,4
Maripá Com Dom Pedro II	12:30 Às 13:30	Oeste	B	1,8	2,5	3,3	-0,6	-0,3	0,1
Maripá Com Dom Pedro II	12:30 Às 13:30	Oeste	A	1,3	2,1	2,9	-0,4	0,2	0,8
Maripá Com Almirante Barroso	18:30 Às 19:30	Norte	C	2,4	3,0	3,6	0,4	1,3	2,2
Maripá Com Almirante Barroso	18:30 Às 19:30	Norte	B	1,4	2,6	3,7	0,2	1,5	2,7
Maripá Com Almirante Barroso	18:30 Às 19:30	Norte	A	-1,1	1,7	4,5	-1,0	1,6	4,1
Maripá Com Almirante Barroso	18:30 Às 19:30	Leste	B	1,0	1,5	2,1	1,0	1,7	2,3
Maripá Com Almirante Barroso	18:30 Às 19:30	Leste	A	1,5	2,1	2,7	0,2	1,4	2,6
Maripá Com Almirante Barroso	12:30 Às 13:30	Leste	B	1,7	2,8	4,0	0,7	1,4	2,1
Maripá Com Almirante Barroso	12:30 Às 13:30	Leste	A	1,7	2,4	3,0	1,3	2,1	3,0
Valor Médio				1,3	2,4	3,4	-0,2	0,6	1,4
Desvio Padrão				0,9	0,5	0,8	0,7	0,8	1,1
Coeficiente De Variação				65%	23%	22%	350%	128%	77%

Tpi: Tempo perdido no início do ciclo; Tpf: Tempo perdido no final do ciclo.

4.6. Validação dos Modelos Existentes

Os valores do fluxo de saturação encontrados *in loco* foram confrontados com os obtidos pelos principais modelos simplificados da bibliografia. A Tabela 12 apresenta os valores mínimo, médio e máximo encontrados para cada modelo (não é intervalo de confiança da média), e resíduos relativos ao observado *in loco*. Como pode ser observado o modelo de

Kimber e Semmens (1982), Queiroz e Jacques (2002) e Webster (1964), são os modelos que apresentaram menor resíduo, com 12,66%, 12,88% e 14,34%, respectivamente. O maior resíduo relativo foi de 55,37%, quando relacionado o modelo 3 de Turner e Harahap (1993) (Equação 22) aos valores obtidos *in loco*.

Tabela 12: Intervalo de valores de fluxo de saturação (570 ciclos) para diferentes modelos e resíduos relativos ao observado *in loco*.

Modelo	Valor Mínimo	Valor Médio	Valor Máximo	% Residual Total
Shanteua curva ac. (in loco)	1020	1716	2513	0,00%
Queiroz e Jacques (2002)	1309	1603	1859	12,88%
Andrade (1989) modelo 1	1167	1338	1509	23,08%
Andrade (1989) modelo 2	1301	1458	1619	17,50%
Ribeiro (1992)	1012	1144	1360	33,35%
Magalhães (1998)	2098	2241	2474	31,07%
Webster (1964)	1850	1857	1883	14,34%
Webster e Cobbe (1966)	864	1037	1223	39,58%
HCM (1994)	991	1393	1690	20,22%
Kimber e Semmens (1982)	1742	1783	1901	12,66%
Besters e Meyers (2007)	1813	1944	2181	17,66%
Turner e Harahap (1993) modelo 1	1847	1963	2151	17,82%
Turner e Harahap (1993) modelo 2	1529	1826	2492	18,24%
Turner e Harahap (1993) modelo 3	252	2414	4170	55,37%

O coeficiente de correlação r (Equação 43) indica a força e a direção do relacionamento linear entre o fluxo de saturação dos modelos e o obtido pela curva acumulativa Shanteu (*in loco*).

$$r(y|x) = \frac{Cov(x, y)}{S_x * S_y} \quad (43)$$

Onde,

$r(y|x)$: Coeficiente de correlação dos valores obtidos pelo modelo simplificado e os obtidos pela curva acumulativa Shanteu (*in loco*);

x : valores obtidos pelo modelo simplificado;

y : valores obtidos pela curva acumulativa Shanteu (*in loco*);

$Cov(x, y)$: Covariância entre x e y ;

S_x : Desvio padrão de x ;

S_y : Desvio padrão de y .

Como nem todos os ciclos estudados apresentaram a saturação plena foi calculado o coeficiente de correlação r para diferentes faixas de grau de saturação, Tabela 13.

Tabela 13: Coeficiente de correlação r para diferentes graus de saturação, tendo como base os valores obtidos *in loco*

Modelo	Geral	26≤Gs≤70	Gs≥70%	Gs≥80%	Gs≥90%	Gs≥100%
Queiroz e Jacques (2002)	0,25	0,31	0,29	0,32	0,34	0,43
Andrade (1989) modelo 1	0,18	0,38	0,20	0,23	0,27	0,31
Andrade (1989) modelo 2	0,18	0,38	0,22	0,24	0,29	0,32
Ribeiro (1992)	0,19	0,20	0,24	0,26	0,27	0,33
Magalhães (1998)	0,19	0,20	0,24	0,26	0,27	0,33
Webster (1964)	0,19	0,18	0,27	0,31	0,33	0,41
Webster e Cobbe (1966)	0,22	0,17	0,28	0,31	0,37	0,47
HCM (1994)	0,11	0,02	0,12	0,18	0,24	0,31
Kimber e Semmens (1982)	0,19	0,19	0,26	0,30	0,32	0,38
Besters e Meyers (2007)	-0,08	0,20	-0,17	-0,19	-0,20	-0,28
Turner e Harahap (1993) modelo 1	0,19	0,20	0,24	0,26	0,27	0,33
Turner e Harahap (1993) modelo 2	0,19	0,20	0,27	0,28	0,30	0,38
Turner e Harahap (1993) modelo 3	-0,10	-0,29	-0,06	0,00	0,00	0,06

Como pode ser observado na Tabela 13, para um grau de saturação menor que 70%, os modelos proposto por Andrade apresentaram os melhores coeficiente de correlação, enquanto que para um grau de saturação superior a 90% foi o modelo de Webster e Cobbe (1966) que se comportou melhor. Para grau de saturação maior que 70 ou 80%, foi o modelo proposto por Queiroz e Jacques (2002) , assim como na visão geral, quando não se discrimina o grau de saturação, neste sentido verifica-se que os modelos analisados apresentaram diferentes coeficientes de correlação para diferentes graus de saturação.

A Tabela 14 apresenta o coeficiente de determinação r^2 para os principais modelos simplificados em diversas faixas de saturação, o coeficiente de determinação foi obtido pelo quadrado do coeficiente de correlação.

Tabela 14: Coeficiente de determinação r^2 para diferentes graus de saturação, tendo como base os valores obtidos *in loco*

Modelo	Geral	26≤Gs≤70	Gs≥70%	Gs≥80%	Gs≥90%	Gs≥100%
Queiroz e Jacques (2002)	0,06	0,10	0,08	0,10	0,12	0,19
Andrade (1989) modelo 1	0,03	0,14	0,04	0,05	0,08	0,09
Andrade (1989) modelo 2	0,03	0,14	0,05	0,06	0,09	0,10
Ribeiro (1992)	0,04	0,04	0,06	0,07	0,07	0,11
Magalhães (1998)	0,04	0,04	0,06	0,07	0,07	0,11

Webster (1964)	0,04	0,03	0,07	0,09	0,11	0,17
Webster e Cobbe (1966)	0,05	0,03	0,08	0,10	0,14	0,22
HCM (1994)	0,01	0,00	0,01	0,03	0,06	0,10
Kimber e Semmens (1982)	0,04	0,04	0,07	0,09	0,10	0,15
Besters e Meyers (2007)	0,01	0,04	0,03	0,03	0,04	0,08
Turner e Harahap (1993) modelo 1	0,04	0,04	0,06	0,07	0,07	0,11
Turner e Harahap (1993) modelo 2	0,04	0,04	0,07	0,08	0,09	0,15
Turner e Harahap (1993) modelo 3	0,01	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00

4.7. Modelos Propostos

As faixas de rolamento analisadas apresentam características peculiares. Nesse sentido, não foi possível agrupá-las em populações de referência, ou seja, as análises foram realizadas como um conjunto único e buscou-se explicar as variações por meio das variáveis levantadas.

Por meio de regressão linear múltipla, buscou-se encontrar modelos com o maior coeficiente de correlação r possível. Iniciaram-se os modelos com 16 variáveis e por observação do p -valor procedeu-se a exclusão das variáveis que não foram significativas no modelo, uma por vez e de maneira decrescente, ou seja, aquelas que apresentaram o maior p -valor quando superior a 5%. Neste processo foi possível observar que algumas variáveis apresentavam multicolinearidade (relação linear entre uma variável explicativa e as demais), uma vez que a exclusão de uma variável não significativa provocava alteração no p -valor de algumas outras variáveis. As regressões foram realizadas sobre os seguintes intervalos de grau de saturação: todos os graus de saturação (todos os 570 ciclos), grau de saturação menor que 70% (189 ciclos) e grau de saturação maior que 70% (381 ciclos). Foram realizadas as regressões (variáveis diferentes) para todas estas faixas de saturação e selecionado a que proporcionasse o melhor r^2 . A Equação 43 foi determinada ao nível de confiança de 95%, pelos ciclos que apresentaram grau de saturação inferior a 70%.

$$FS = 85,6 * nf - 65,9 * lcc + 62,8 * rgd + 2,1 * vhf + 719 \quad (44)$$

Onde,

FS : Fluxo de saturação (UCP/htv);

nf : Número de faixas que compõem a aproximação (un);

lcc : Largura do canteiro central ao lado da faixa de rolamento que se

- deseja levantar o fluxo de saturação (quando não existir =0) (m);
- rgd*: Raio de giro a direita (somente quando a faixa permitir conversão a direita) (m);
- vhf*: Volume horário da faixa (UCP/h).

A Figura 17 mostra a aproximação dos valores de fluxo de saturação obtidos pelo modelo da Equação 43 aos observados *in loco* (curva acumulativa de Shanteau), para ciclos que apresentaram grau de saturação inferior a 70% com um r^2 de 0,37.

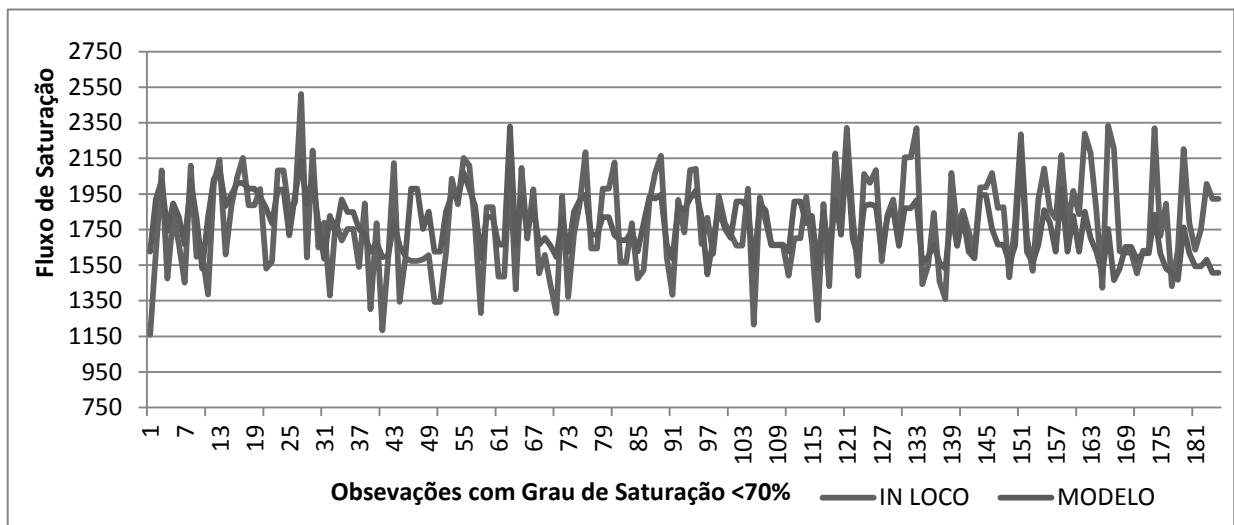


Figura 17: Comparação entre os valores obtidos in loco e encontrados pela equação 43 para ciclos com grau de saturação menor que 70%.

A Equação 44 foi determinada por meio da regressão ao nível de confiança de 95%, dos ciclos com grau de saturação superior e igual a 70%.

$$FS = 133 * F - 95 * les - 40 * lcc + 40 * rgd - 1109 * i + 1,35 * vhf + 983 \quad (45)$$

Onde,

FS: Fluxo de saturação (UCP/htv);

F: Tipo de faixa (DIREITA=0 ESQUERDA=1);

les: Largura do estacionamento ao lado da faixa (m);

- lcc : Largura do canteiro central ao lado da faixa de rolamento que se deseja levantar o fluxo de saturação (quando não existir =0) (m);
- rgd : Raio de giro a direita (somente quando a faixa permitir conversão a direita) (m);
- i : Declividade da faixa (aative+ declive-) (m/m);
- vhf : Volume horário da faixa (UCP/h).

A Figura 18 mostra a aproximação dos valores de fluxo de saturação obtidos pelo modelo da Equação 44 aos observados *in loco*, para ciclos que apresentaram grau de saturação igual ou superior a 70% com r^2 de 0,25.

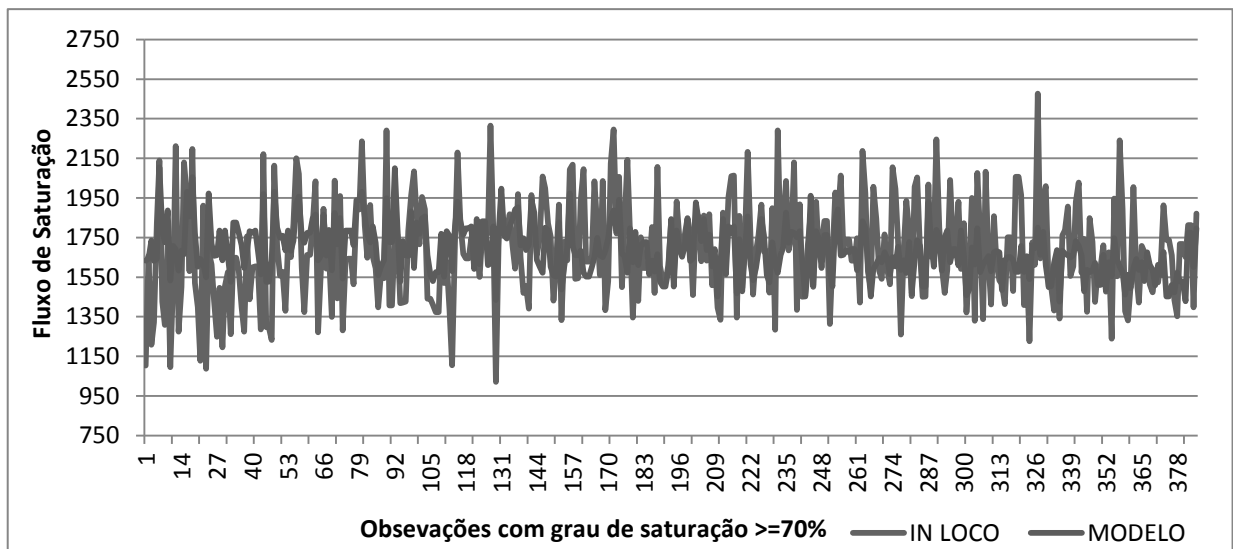


Figura 18: Comparação entre os valores obtidos in loco e encontrados pela equação 44 para ciclos com grau de saturação igual ou maior que 70%.

Na busca por um coeficiente de determinação maior para um modelo geral (todos os graus de saturação), utilizou-se de uma abordagem alternativa onde foi regredida uma equação para a taxa de ocupação, sendo esta posteriormente utilizada na Equação 1 para obter um modelo que estima o fluxo de saturação.

$$FS = \frac{2130 * vhf}{-20 * nf + 8 * lcc - 75 * \%M + 168 * i - 46 * \%Fd + vhf + 136} \quad (46)$$

Onde,

- FS : Fluxo de saturação (UCP/htv);
- nf : Número de faixas que compõem a aproximação (un);
- lcc : Largura do canteiro central ao lado da faixa de rolamento que se deseja levantar o fluxo de saturação (quando não existir =0) (m);

- $\%M$: Porcentagem de Motocicletas (taxa);
- vhf : Volume horário da faixa (UCP/h);
- i : Declividade da faixa (aative+ declive-) (m/m);
- $\%Fd$: Porcentagem de fluxo direto (taxa);

A Figura 19 mostra a aproximação dos valores de fluxo de saturação obtidos pelo modelo da Equação 45 aos observados *in loco* para todos os ciclos com um r^2 de 0,13.

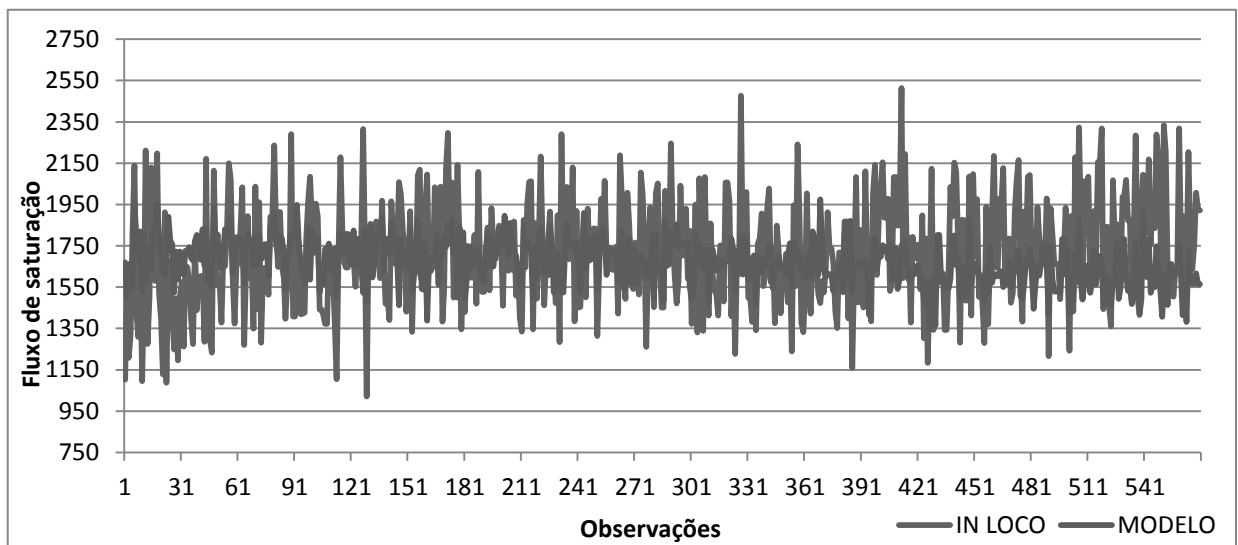


Figura 19: Comparação entre os valores obtidos in loco e encontrados pela equação 45 para todos os ciclos estudados.

A equação 46 consiste em um modelo mais simplificado (para todos os graus de saturação) que só depende do volume horário médio da faixa, este modelo pode ser usado quando não for possível o levantamento em campo das variáveis necessárias aos modelos anteriores.

$$FS = \frac{2106 * vhf + 2668}{vhf + 72} \quad (47)$$

Onde,

- FS : Fluxo de saturação (UCP/htv);
- vhf : Volume horário da faixa (UCP/h);

A Figura 20 mostra a aproximação dos valores de fluxo de saturação obtidos pelo modelo da Equação 46 aos observados *in loco* com um r^2 de 0,05.

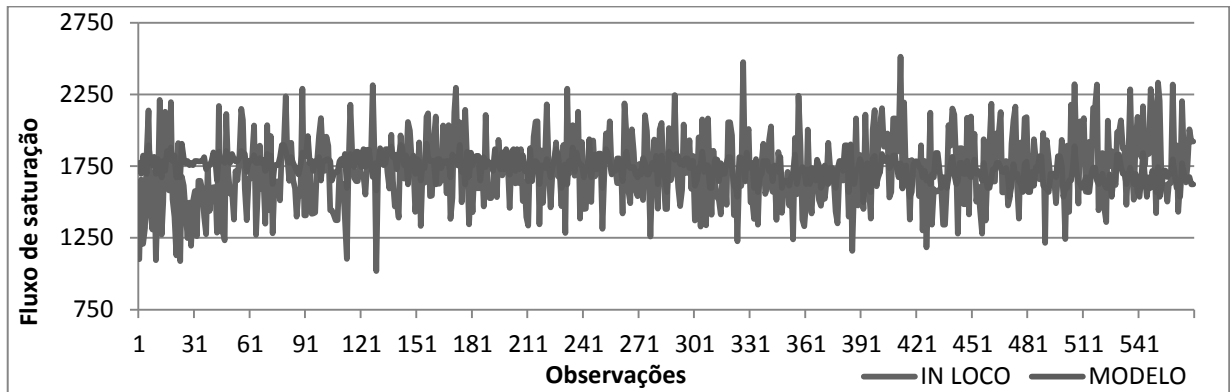


Figura 20: Comparação entre os valores obtidos in loco e encontrados pela equação 46 para todos os ciclos estudados.

Os coeficientes de determinação encontrados para os modelos regredidos estão resumidos na Tabela 15. Como nem todos os ciclos estudados apresentaram a saturação plena foi calculado o coeficiente para diversas faixas de saturação.

Tabela 15: Coeficiente de determinação r^2 para diferentes graus de saturação, tendo como base os valores obtidos *in loco*

Modelo	Geral	$26 \leq G_s \leq 70$	$G_s \geq 70\%$	$G_s \geq 80\%$	$G_s \geq 90\%$	$G_s \geq 100\%$
Equação 45	0,13	0,30	0,18	0,18	0,16	0,31
Equação 43	-	0,37	-	-	-	-
Equação 44	-	-	0,25	0,29	0,32	0,50
Equação 46	0,05	0,08	0,13	0,13	0,13	0,21
Equação 43 e 44	0,31	0,37	0,25	0,29	0,32	0,50

Partindo da análise da Tabela 14 observou-se uma tendência de crescimento da explicação do fenômeno à medida que o grau de saturação aumenta. Ao se fazer a associação das Equações 43 e 44 cada uma atuando na sua respectiva faixa de grau de saturação, houve uma significativa melhora na explicação do modelo.

A aplicabilidade das equações encontradas pode ser resumida em duas situações distintas:

- Quando se tem uma ideia do grau de saturação: para grau de saturação menor que 70% utilizar a Equação 43, caso contrário utilizar a Equação 44.
- Quando não se tem ideia do grau de saturação: se for possível a obtenção dos parâmetros da equação em campo utilizar a Equação 45, caso contrário utilizar a Equação 46.

5. CONCLUSÕES

Por meio da análise do *FS in loco* constatou-se que sobre as mesmas condições físicas existe uma grande oscilação no fluxo de saturação. Com isso, a mensuração exata do fluxo de saturação se mostrou impraticável, visto que as chegadas dos veículos nas aproximações são totalmente aleatórias e que o comportamento dos usuários é variável.

A variação do fluxo de saturação entre ciclos semaforicos consecutivos sugere que ao se adotar um único valor de fluxo de saturação a programação semaforica dificilmente atenderá com plena eficiência todos os ciclos. No entanto, verifica-se que esta oscilação se reduz à medida que o grau de saturação aumenta.

As fórmulas empíricas encontradas na bibliografia produziram resultados díspares pontualmente, com valores de coeficiente de correlação muito baixos. No entanto, os valores médios ficaram bem próximos ao valor médio obtido *in loco*. Assim, a aplicabilidade de fórmulas empíricas na obtenção do fluxo de saturação se mostrou válida para as condições atuais das principais interseções semaforizadas da cidade de Toledo-PR. O modelo proposto por Kimber e Semmens (1982) apresentou um percentual 12,66% de resíduos e um r^2 de 0,04, outro modelo que se comportou bem foi o proposto por Queiroz e Jacques (2002), este modelo apresentou um percentual de 12,88% de resíduos e um r^2 de 0,06. O modelo combinado das equações 43 e 44 apresentaram 9,31% de resíduos e um r^2 de 0,31.

Os baixos valores do coeficiente de determinação se observados de maneira isolada indicam que os modelos não conseguem explicar toda a variação do fluxo de saturação, entretanto ao longo de vários ciclos produzem bons resultados médios, ou seja, pontualmente pode haver variação, mas ao longo de vários ciclos a média do fluxo de saturação se aproxima do valor médio do modelos.

O método que apresentou maior quantidade de resíduos foi a Equação 21, um dos o modelo 3 proposto por Turner e Harahap (1993). Seu erro chegou a 55,37% do valor obtido *in loco*, o grau de ajuste (geral) de seu modelo (r^2) para os valores obtidos pela curva acumulativa de Shanteau foi de 0,01. Pode ser observado que o tempo de verde é o parâmetro de maior relevância neste modelo (mais sensível), entretanto ao regredir um modelo utilizando estas mesmas variáveis predecessoras (regressão dos valores obtidos *in loco* de fluxo de saturação pelas variáveis independentes que foram utilizadas no modelo 3 de Turner e Harahap) o tempo de verde mostrou-se não significativa para o modelo testado.

A Tabela 16 apresenta a classificação quanto a aplicabilidade dos principais modelos encontrados na bibliografia e os modelos gerais regredidos (para todos os graus de saturação), a classificação foi feita limitando o resíduo total gerado pelos modelos em 20%, que é a variação máxima natural observada entre os valores de *FS* obtidos em campo.

Tabela 16: Aplicabilidade de Modelos a Toledo-PR

Modelo	Valor Mínimo	Valor Médio	Valor Máximo	% Residual Total	Classificação
Shanteua Curva Ac. (<i>In Loco</i>)	1020	1716	2513	0,00%	Ideal
Queiroz e Jacques (2002)	1309	1603	1859	12,88%	Aplicável
Andrade (1989) Modelo 1	1167	1338	1509	23,08%	-
Andrade (1989) Modelo 2	1301	1458	1619	17,50%	Aplicável
Ribeiro (1992)	1012	1144	1360	33,35%	-
Magalhães (1998)	2098	2241	2474	31,07%	-
Webster (1964)	1850	1857	1883	14,34%	Aplicável
Webster E Cobbe (1966)	864	1037	1223	39,58%	-
HCM (1994)	991	1393	1690	20,22%	-
Kimber e Semmens (1982)	1742	1783	1901	12,66%	Aplicável
Besters e Meyers (2007)	1813	1944	2181	17,66%	Aplicável
Turner e Harahap (1993) Modelo 1	1847	1963	2151	17,82%	Aplicável
Turner e Harahap (1993) Modelo 2	1529	1826	2492	18,24%	Aplicável
Turner e Harahap (1993) Modelo 3	252	2414	4170	55,37%	-
Equação 45 (Autor)	1343	1675	1975	11,40%	Aplicável
Equação 46 (Autor)	1498	1737	1960	12,11%	Aplicável
Equação 43 e 44 (Autor)	1427	1714	2329	9,96%	Aplicável

Quanto à praticidade de aplicação dos modelos, a Tabela 17 mostra a relação de variáveis empregadas em cada modelo. O modelo proposto por Kimber e Semmens se destacou pela facilidade de aplicação (somente a largura da faixa de tráfego) e pelos bons resultados que forneceu (12,66% de resíduo e r^2 de 4%). Recomenda-se, também, o uso da Equação 46 desenvolvida nesse trabalho, pois utiliza apenas o valor do volume horário de tráfego da aproximação (12,11% de resíduo e r^2 de 5%).

Sobre os valores dos fatores de equivalência das diferentes classes de veículos, os que mais se aproximaram do obtido *in loco* são os sugeridos por Andrade (1994) para região sudeste do Brasil. De maneira geral a maior diferença encontrada foi para a categoria motocicleta. Sendo assim, para a cidade de Toledo sugere-se os valores da Tabela 18.

Tabela 17: Variáveis utilizadas nos modelos

Modelo	Quantidade de variáveis	Variáveis
Queiroz e Jacques (2002)	9	Declividade; <i>dummy</i> greide; largura da faixa; <i>dummy</i> posição; <i>dummy</i> localização; <i>dummy</i> fluidez; % conversão à direita; % conversão à esquerda; raio de conversão.
Andrade (1989) Modelo 1	5	Declividade; <i>dummy</i> localização; largura da faixa; % de conversão; raio de conversão.
Andrade (1989) Modelo 2	5	Declividade; <i>dummy</i> localização; largura da faixa; % de conversão; raio de conversão.
Ribeiro (1992)	1	Largura da aproximação.
Magalhães (1998)	1	Largura útil da aproximação.
Webster (1964)	1	Largura da aproximação.
Webster E Cobbe (1966)	1	Raio de giro.
HCM (1994)	13	Fluxo de saturação básico; número de faixas; fator largura da faixa; fator veículo pesado; fator greide; fator de bloqueio estacionamento; fator parada de ônibus; fator de área; fator fluxo desigual; fator conversão à esquerda; fator conversão à direita; fator pedestres e bicicletas a esquerda; fator pedestres e bicicletas a direita.
Kimber e Semmens (1982)	1	Largura da faixa de tráfego.
Besters e Meyers (2007)	3	Número de faixas; velocidade limite da via; Declividade.
Turner e Harahap (1993) Modelo 1	1	Largura da aproximação.
Turner e Harahap (1993) Modelo 2	5	Largura da aproximação; % de caminhões; largura da faixa de fluxo contínuo; % motocicletas; % ônibus.
Turner e Harahap (1993) Modelo 3	3	Tempo de verde; largura da aproximação; largura da faixa de fluxo contínuo.
Equação 43 (Autor)	4	Número de faixas; Largura do canteiro central; Raio de giro a direita; Volume horário da faixa.
Equação 44 (Autor)	6	<i>Dummy</i> tipo de faixa; Largura do estacionamento; Declividade; Largura do canteiro central; Raio de giro a direita; Volume horário da faixa.
Equação 43 e 44 (Autor)	7	Número de faixas; Largura do canteiro central; <i>Dummy</i> tipo de faixa; Largura do estacionamento; Raio de giro a direita; Declividade; Volume horário da faixa.
Equação 45 (Autor)	6	Número de faixas; Largura do canteiro central; % Motocicletas; Volume horário da faixa; Declividade; Porcentagem de fluxo direto.
Equação 46 (Autor)	1	Volume horário da faixa.

Tabela 18: Fatores de equivalência veicular sugeridos para Toledo-PR

	Carro de Passeio	Motocicletas	Ônibus	Micro-ônibus	Caminhão Pesado	Caminhão Leve
VALORES SUGERIDOS	1,00	0,70	1,70	1,40	1,80	1,30

Quanto aos tempos perdidos, não foi possível obter valores significativos para o tempo perdido final, uma vez que nem todos os ciclos foram completamente saturados. Os valores recomendados para o tempo perdido inicial é de $2,5 \pm 1$ segundo.

Em uma análise ampla observa-se que todos os modelos, incluindo os obtidos nesse trabalho, obtiveram valores de r^2 muito baixos. A esse fato, verifica que o FS é muito sensível ao comportamento do motorista, pois em uma mesma aproximação, em um mesmo horário de pico, esse parâmetro possui alta flutuação. Como o estudo abordou diferentes aproximações, com diferentes condições ambientais e geométricas, acredita-se ser essa a razão dos baixos valores de r^2 . No entanto, quanto mais restritivo um modelo, menos aplicável ele será.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento desta pesquisa foi preciso manter o foco e não aprofundar em questões que fugiriam da proposta inicial do estudo. Desta forma, o desejo por respostas e o amor pela ciência me fez escrever mais este capítulo.

Como uma continuação do presente trabalho recomenda-se:

- Estudo da variação do fluxo de saturação no mesmo local e período (mesma faixa, aproximação e horário de pico), durante os dias da semana;
- Determinação de modelos simplificados por meio de regressão linear para uma estimativa dos tempos perdidos inicial e final nas principais interseções semaforizadas da cidade de Toledo-PR;
- Analisar o efeito da multicolinearidade nos modelos de regressão encontrados na pesquisa;
- Elaborar um modelo de classificação do grau de agressividade dos condutores de veículos da cidade (Escala ou *Score*), caracterizando o comportamento típico dos condutores que poderia ser utilizado como variável independente em modelos futuros mais elaborados de estimativa do fluxo de saturação;
- Comparação entre os principais métodos de determinação do fluxo de saturação *in loco* nas interseções semaforizadas, para as mesmas características operacionais e geométricas;
- Caracterização do início e final do regime saturado nas filas dos semáforos, para diferentes graus de saturação; e
- Variação do fluxo de saturação medido *in loco* para diferentes graus de saturação (identificar diferença quando não está completamente saturado).

REFERÊNCIAS

- AKÇELIK, R. 1993. **Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis**. Research Report ARR 123. Australian Road Research Board : 5a Reimpressão, 1993.
- ANDRADE, J. P. 1994. **Unidades de Carro de Passeio**. VII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. ANPET, 1994, Vol. I.
- AZEREDO, Luiz Ernesto. 2014. **Seis Fatores Essenciais Para o Sincronismo Entre Semáforos**. Sinal de Transito. [Online] Maio de 2014. [Citado em: 06 de Maio de 2016.] http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/seis_fatores.pdf.
- BARBETTA, P. A., REIS, M. M. e BORNIA, A. C. 2010. **Estatística Para Cursos de Engenharia e Informática**. SÃO PAULO : ATLAS, 2010.
- BESTER, C. J. e MEYERS, W. L. 2007. **Saturation Flow Rates**. Southern African Transport Conference (SATC 2007). 2007, 26, pp. 560-568.
- BRASIL. 2008. **Código de Trânsito Brasileiro: instituído pela lei nº 9.503**. Brasília : DENATRAN, 2008.
- COSTA, BRENO CARVALHO. 2012. **Programação Semafórica de Tempo Fixo em Microrregiões Utilizando Otimização Multiobjetivo e Simulação Microscópica**. Belo Horizonte, MG : UFMG, 2012. p. 147.
- CTB. 1997. **Código De Trânsito Brasileiro**. Lei N.º 9.503, de 23 de setembro de 1997. 1997.
- DENATRAN. 2007. **Departamento Nacional de Trânsito: Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito**. Versão Preliminar. Brasília : DENATRAN, 2007. p. 299. Vols. V - Sinalização Semafórica.
- . 1984. **Departamento Nacional de Trânsito: Manual de Semáforos**. 2.^a ed. Brasília : DENATRAN, 1984. p. 172.
- DEVORE, J. L. 2006. **Probabilidade e Estatística: Para Engenharia e Ciências**. s.l. : Pioneira Thomson Learning, 2006.
- DNIT. 2006. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. **Manual de Estudos de Tráfego**. Rio de Janeiro : IPR. Publ., 2006. p. 384.
- FARIA, F. A. R. 2013. **Roteamento Ecológico de Veículos Orientado a Ondas Verdes**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro : UFRJ/COPPE, 2013.
- IMEP. 2000. **Curso de Programação Semafórica**. Instituto de Mobilidade e Educação Plano, São Paulo, SP : IMEP, 2000. p. 65.

- JACQUES, M. A. P. 1995. **Avaliação do Impacto do Tamanho da Amostra em Medições do Fluxo de Saturação: Um Estudo de Caso**. Transportes. no 2, 1995, Vol. 3, pp. 96-107.
- KIMBER, R. M. e SEMMENS, M. C. 1982. **An Experiment to Investigate Saturation Flow at a Traffic Signal Junction**. Traffic, Engineering and Control. no 3, 1982, Vol. 23, pp. 110-117.
- KOKOSKA, S. 2013. **Introdução à Estatística: Uma Abordagem por Resolução de Problemas**. Rio de Janeiro : LTC, 2013.
- LUNA, M. S. 2003. **Sobre o Fluxo de Saturação: Conceituação, Aplicação, Determinação e Variação**. Dissertação de Mestrado, programa de mestrado em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará : Fortaleza, CE, 2003. p. 132.
- MAY, A. D. 1990. **Traffic Flow Fundamentals**. Prentice hall. New Jersey, EUA : s.n., 1990.
- MEYER, P. L. 1983. **Probabilidade Aplicações à Estatística**. Rio de Janeiro : JC, 1983.
- MISSIO, F. e JACOBI, L. F. 2007. **Variáveis Dummy: Especificações de Modelos com Parâmetros Variáveis**. Ciência e Natura . 29, 2007.
- MONTGOMERY, D. C. e RUNGER, G. C. 1943. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. Rio de Janeiro : LTC, 1943.
- NETO, J. C. 2001. **O Controle Semafórico Centralizado e a Operação de Campo**. 2001.
- OLIVEIRA NETO, F. M., LUNA, M. S. e LOUREIRO, C. F. G. 2002. **Variação do Fluxo de Saturação por Tipo de Faixa e Período de Pico em Interseções SemafORIZADAS de Fortaleza**. XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. ANPET – Associação Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes. 2002, Vol. 1, pp. 379-390.
- QUEIROZ, I. N. F. e JACQUES, M. A. P. 2002. **Modelo para Estimativa do Fluxo de Saturação Desenvolvido a Partir das Condições do Tráfego de Brasília**. TRANSPORTES. 2002, Vol. 10, n. 1.
- SANTOS, C. L. 2007. **Fluxo de Saturação de Interseções Complexas Controladas por Semáforos**. Dissertação. Rio de Janeiro : COPPE / UFRJ, 2007.
- SETTI, J. R. A. 1986. **Métodos alternativos de Medição do Fluxo de Saturação**. Transportes. no 1, 1986, Vol. 4, pp. 137-140.
- SHANTEAU, R. M. 1988. **Using Cumulative Curves To Measure Saturation Flow and Lost Time**. ITE Journal. 1988, Vol. 58, 10, pp. 27-31.
- SOARES, L. R. 1975. **Engenharia de Tráfego**. Rio de Janeiro : Almeida Neves, 1975.
- STOKES, R. W. 1988. **Comparison of Saturation Flow Rates at Signalized Intersection**. ITE Journal. November/1988. 1988. pp. 15-20.

- TARKO, A. P. e TRACZ, M. 2000. **Uncertainty in Saturation Flow Predictions**. Proceedings of 4th International Symposium on Highway Capacity. 2000.
- TAYLOR, M. A. P., YOUNG, W. e BONSALL, P. W. 1996. **Understanding Traffic Systems: Data, Analysis and Presentation**. Avebury Technical. Inglaterra : s.n., 1996.
- TOLEDO, G. L. 1985. **Estatística Básica**. São paulo : Atlas, 1985. 77-1221.
- TRB. 2000. **Highway Capacity Manual**. Washington, D.C. Transportation Research Board : s.n., 2000.
- TURNER, J. e HARAHAP, G. 1993. **Simplified Saturation Flow Data Collection Methods**. Transport Research Laboratory. Crowthorne : s.n., 1993.
- WEBSTER, F. V. 1964. **Traffic Signals**. In: Davies, E. (ed) Traffic Engineering Practice. E. & F.N. LTD. Londres : s.n., 1964.