

Universidade Federal do Ceará
Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes

Dissertação de Mestrado

**SOBRE O
FLUXO DE SATURAÇÃO:
CONCEITUAÇÃO, APLICAÇÃO,
DETERMINAÇÃO E VARIAÇÃO**

Marcelo dos Santos de Luna

2003

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

**SOBRE O FLUXO DE SATURAÇÃO:
CONCEITUAÇÃO, APLICAÇÃO,
DETERMINAÇÃO E VARIAÇÃO**

Marcelo dos Santos de Luna

**Dissertação submetida ao Programa de
Mestrado em Engenharia de Transportes
da Universidade Federal do Ceará, como
parte dos requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em
Engenharia de Transportes**

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Felipe Grangeiro Loureiro

**Fortaleza
2003**

FICHA CATALOGRÁFICA

LUNA, MARCELO DOS SANTOS DE

Sobre o Fluxo de Saturação: Conceituação, Aplicação, Determinação e Variação. Fortaleza, 2003.

XIII, 132 fl., Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

1. Transportes - Dissertação

2. Engenharia de Tráfego

3. Interseções Semaforizadas

4. Fluxo de Saturação

CDD 388

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

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, 132 fl.

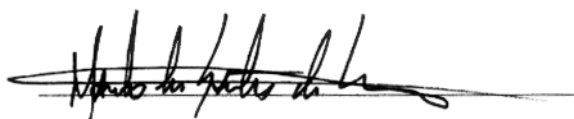
CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Marcelo dos Santos de Luna

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Sobre o Fluxo de Saturação: Conceituação, Aplicação, Determinação e Variação.

Mestre / 2003

É concedida à Universidade Federal do Ceará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



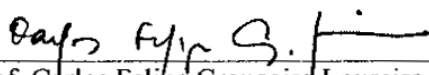
Marcelo dos Santos de Luna

SOBRE O FLUXO DE SATURAÇÃO:
CONCEITUAÇÃO, APLICAÇÃO, DETERMINAÇÃO E VARIAÇÃO

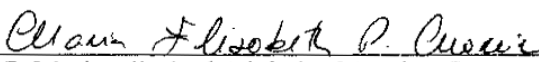
Marcelo dos Santos de Luna

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

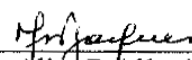
Aprovada por:



Prof. Carlos Felipe Grangeiro Loureiro, Ph. D.
(Orientador)



Profª. Maria Elisabeth Pinheiro Moreira, D. Sc.
(Examinadora Interna)



Profª. Maria Alice Prudêncio Jacques, Ph. D.
(Examinadora Externa)

FORTALEZA, CE – BRASIL

SETEMBRO DE 2003

*“Qualquer um que, na discussão, se baseia na autoridade,
não usa o entendimento, mas a memória”.*

Leonardo da Vinci

*“As histórias mais errôneas são aquelas que achamos que
conhecemos melhor – e portanto nunca as esmiuçamos ou
questionamos”.*

Stephen Jay Gould

*“Dêem a ele uma moeda, pois ele precisa ganhar dinheiro
com o que aprende”.*

Euclides

AGRADECIMENTOS

Este trabalho se fez num misto de participações e incentivos, pessoais e profissionais, por vezes positivos, por vezes negativos, mas que moldaram a forma como foi desenvolvido o estudo.

Contribuíram para conclusão deste trabalho:

Fátima Albuquerque, Chefe da Divisão de Engenharia da ETTUSA, e Fernando Bezerra, Diretor da Diretoria de Trânsito da ETTUSA, permitindo-me concluir as disciplinas do curso em horário de trabalho.

A chefia da AMC e gerência do CTAFOR, nas pessoas de Regis Rafael da Silva e Carlos Henrique Leandro, com a disponibilização dos equipamentos para pesquisa de campo.

Prof^a. Maria Elisabeth Moreira na arregimentação de pesquisadores.

Os operadores de tráfego Alexandre, Osvaldo, Maurílio, e demais da sala de operação do CTAFOR, no auxílio à operação dos equipamentos de gravação em vídeo.

Os estagiários Felipe e Tiago na digitação de dados.

O corpo técnico do CTAFOR, Miguel Ary e Francisco Moraes, no fornecimento de dados.

Prof. Felipe Loureiro na função de orientador.

Resumo da Dissertação submetida ao PETRAN/UFC como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Engenharia de Transportes

SOBRE O FLUXO DE SATURAÇÃO:
CONCEITUAÇÃO, APLICAÇÃO, DETERMINAÇÃO E VARIAÇÃO

Marcelo dos Santos de Luna
Setembro/2003

Orientador: Carlos Felipe Grangeiro Loureiro

O fluxo de saturação é o principal parâmetro para avaliação operacional de interseções semaforizadas; seu uso prático, principalmente na temporização de semáforos, parece ser mal empregado: seja por utilizar-se de métodos importados, seja por sua conceituação e aplicação inadequadas. Pretendeu-se neste trabalho: explicitar o conceito do parâmetro, testar a adequação dos métodos mais modernos e aceitos de medição e expor algumas falhas de sua concepção e uso. Analisando o comportamento de aproximações semaforizadas de duas faixas, de vias caracterizadas como principais e típicas de Fortaleza, foi possível mostrar que os métodos de medição do HCM e ARRB não são equivalentes entre si. Mostrou-se que o processo usado pelo HCM não é compatível com o conceito de uma taxa de atendimento de um sistema de filas e que os métodos do HCM e ARRB apresentam recursos de simplificação de medição que acabam por superestimar os valores da descarga de veículos. Na correção dos problemas identificados, foi desenvolvido um procedimento para o que se considerou medição apropriada do fluxo de saturação nas aproximações de estudo, bem como foi apresentado um método para estabelecer a posição de início do regime saturado e do tamanho mínimo de filas adotado nesse procedimento. O processo de determinação dessas referências deve servir de método no estabelecimento de um procedimento mais geral, capaz de lidar com aproximações de características diversas. A detecção de considerável variação do valor de fluxo de saturação, sob condições físicas e operacionais similares, suscita dúvidas sobre a aplicabilidade de fórmulas empíricas de estimativa do fluxo de saturação, bem como o procedimento de uma única calibração do sistema SCOOT. Os resultados encontrados mostram a necessidade de elaboração de um procedimento de medição do fluxo de saturação adaptado às condições locais, e relegam o emprego de fórmulas empíricas a problemas de planejamento, uma vez que não são capazes de capturar características específicas das situações operacionais.

Abstract of Thesis submitted to PETRAN/UFC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.) in Transportation Engineering

ON THE SATURATION FLOW:
DEFINITION, USES, MEASUREMENT AND VARIATION

Marcelo dos Santos de Luna
Setember/2003

Advisor: Carlos Felipe Grangeiro Loureiro

The saturation flow is the main parameter for operational evaluation of signalized intersections. However, it seems it is often misused in signal timing, either due to the application of foreign measurement methods, or because inadequate understanding and application. The objective of this work was: to explain and define saturation flow, to test the suitability of the traditional and most modern procedures of measurement, and to expose some misconceptions and misuses of it. Analyzing the behavior of a group of two-lane signalized approaches, assumed as typical main streets of Fortaleza, it was possible to show that the methods of measurement proposed by HCM and ARRB are not equivalent. It was found that the HCM procedure does not follow a queue system's discharge rate concept, and that the HCM and ARRB procedures employ measurement simplifications that overestimate vehicular flow values. As part of the effort to address the problems found, a procedure was developed for what was considered an appropriate measurement of the saturation flow at the studied approaches, as well as a method for establishing the beginning position of the saturated flow regime and the minimum queue size to be used in this procedure. The determination process of these thresholds may be used for the establishment of a more general procedure to deal with approaches of diverse characteristics. The observed variation in saturation flow values, under similar physical and operational conditions, raises doubts on the applicability of empirical formulae for saturation flow estimation, as well as on the "one-calibration-only" procedure utilized by the SCOOT system. The results show the need for the elaboration of a saturation flow measurement procedure capable of capturing local characteristics and relegate the empirical formulae methods to planning applications, since they are not capable of capturing specific operational characteristics.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. TEMA.....	1
1.2. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	2
1.3. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E HIPÓTESE DE PESQUISA	3
1.4. OBJETIVOS	3
1.4.1. <i>Objetivo Geral</i>	3
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i>	4
1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
1.5.1. <i>Capítulo 1 – Introdução</i>	4
1.5.2. <i>Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica</i>	4
1.5.3. <i>Capítulo 3 – Coleta de Dados</i>	5
1.5.4. <i>Capítulo 4 – Análise dos Métodos de Medição</i>	5
1.5.5. <i>Capítulo 5 – Método de Medição Proposto</i>	5
1.5.6. <i>Capítulo 6 – Variação do Fluxo de Saturação</i>	6
1.5.7. <i>Capítulo 7 – Conclusões e Recomendações</i>	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. CONTROLE SEMAFÓRICO	7
2.2. MODELAGEM DE TRÁFEGO	10
2.2.1. <i>Temporização de Interseções Isoladas</i>	12
2.2.2. <i>Redes de Semáforos</i>	17
2.3. FLUXO DE SATURAÇÃO	22
2.3.1. <i>Fórmulas Empíricas</i>	26
2.3.2. <i>Medições Diretas do Fluxo de Saturação</i>	27
2.3.3. <i>Método DENATRAN</i>	28
2.3.4. <i>Método ARRB</i>	30
2.3.5. <i>Método HCM</i>	31
2.3.6. <i>Método de Shanteau</i>	32
2.3.7. <i>Calibração do Modelo SCOOT</i>	32
2.3.8. <i>Outros Métodos de Medição Direta</i>	34
2.3.9. <i>Considerações sobre a Medição Direta do Fluxo de Saturação...</i>	34

2.3.10. Equivalência Veicular – Unidades de Carros de Passeio.....	40
2.3.11. Variabilidade do Fluxo de Saturação.....	46
2.3.12. Abordagem do SCOOT da Variabilidade do Fluxo de Saturação.....	54
2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
3. COLETA DE DADOS.....	59
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	59
3.2. AMOSTRA COLETADA	59
3.2.1. Locais e Períodos Pesquisados	60
3.2.2. Procedimento de Coleta	63
3.2.3. Tratamento de Dados	65
4. ANÁLISE DOS MÉTODOS DE MEDIÇÃO.....	68
4.1. MÉTODOS TRADICIONAIS DE MEDIÇÃO	68
4.1.1. O Critério dos Dez Segundos	70
4.1.2. Fluxo de Saturação: Taxa Média (ARRB) ou Média das Taxas (HCM)?.....	72
4.2. MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA COMPARAÇÃO	73
4.3. ANÁLISE DOS MÉTODOS.....	74
4.3.1. Descrição Estatística dos Dados	75
4.3.2. Testes de Hipóteses.....	77
4.3.3. Considerações Adicionais sobre os Métodos de Medição	79
5. MÉTODO DE MEDIÇÃO PROPOSTO.....	83
5.1. PROPOSTA PARA CÁLCULO DE FLUXO DE SATURAÇÃO....	83
5.1.1. Definição do Veículo Inicial.....	83
5.1.2. Definição do Tamanho Mínimo de Fila.....	89
5.1.3. O Procedimento Proposto	92
5.2. VARIABILIDADE AFETANDO O MÉTODO DE CÁLCULO	93
6. VARIAÇÃO DO FLUXO DE SATURAÇÃO	98
6.1. EQUIVALÊNCIA VEICULAR.....	98
6.2. CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO OBSERVADO	103
6.3. VARIAÇÃO DO FLUXO DE SATURAÇÃO – FLUXO DIRETO	115

6.3.1.	<i>Verificação da Independência entre Faixas</i>	115
6.3.2.	<i>Variação do Valor do Fluxo de Saturação</i>	116
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	123
7.1.	CONCLUSÕES	123
7.1.1.	<i>Fluxo de saturação: conceito e uso</i>	123
7.1.2.	<i>Processo de Coleta de Dados</i>	124
7.1.3.	<i>Métodos de Medição de Fluxo de Saturação</i>	124
7.1.4.	<i>Método Proposto para Medição do Fluxo de Saturação</i>	125
7.1.5.	<i>Variação do Fluxo de Saturação</i>	126
7.2.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	126
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Comportamento do tráfego assumido por Webster	13
Figura 2.2: Modelo simplificado adotado por Webster	14
Figura 2.3: Conceito de fluxo de saturação e tempo perdido por headways	24
Figura 2.4: Fluxo de saturação por curva cumulativa	25
Figura 2.5: Histograma de fluxo do método do DENATRAN	29
Figura 2.6: Influência da técnica de medição no comportamento da descarga (TEPLY e JONES, 1991)	36
Figura 2.7: Valores de UCP para caminhões- <i>trailer</i> , segundo BENEKOHAL e ZHAO (1996)	44
Figura 2.8: Influência de veículos pesados da descarga da fila (TARKO e TRACZ, 2000)	44
Figura 2.9: Discrepâncias do modelo original de Webster de fluxo de saturação	48
Figura 2.10: Dispersão dos valores de <i>headways</i> (MAY, 1990)	51
Figura 2.11: Variação temporal do SATOCC (TRL, 2000c)	55
Figura 3.1: Localização das aproximações pesquisadas	62
Figura 3.2: Perfil agregado de volume de tráfego diário em Fortaleza, obtido do sistema SCOOT	63
Figura 4.1: Características dos ciclos utilizados nas amostras de fluxo de saturação	76
Figura 4.2: <i>Boxplots</i> dos valores de fluxo de saturação obtidos pelos métodos analisados	76
Figura 4.3: Distribuições de frequência dos fluxos de saturação calculados por cada método	77
Figura 4.4: <i>Boxplots</i> das diferenças de valores obtidas entre métodos	79
Figura 4.5: Avaliação do uso do critério dos dez segundos	80
Figura 4.6: Efeitos do critério dos dez segundos e da média aritmética	81
Figura 5.1: Caracterização das amostras de <i>headways</i> por posição através de <i>boxplots</i>	85
Figura 5.2: Amostras das medianas de <i>headways</i>	87
Figura 5.3: Percentual de filas por tamanho e aproximação	90
Figura 5.4: Percentual de tamanho de fila mínimo por aproximação	91
Figura 5.5: Distribuição do coeficiente de variação das taxas de descarga por ciclo	94
Figura 5.6: Relação entre os métodos aritmético e harmônico	94

Figura 5.7: Influência da variação da taxa de descarga entre ciclos nos métodos	95
Figura 5.8: Diferenças entre os modelos de descarga e a descarga observada.....	96
Figura 6.1: Emprego do fator de composição veicular no procedimento do HCM 1994	101
Figura 6.2: Discrepância entre valor medido e estimativa do fluxo de saturação pelo HCM 1994	102
Figura 6.3: Demanda estimada por aproximação	106
Figura 6.4: Percentual de veículos pesados nas observações por aproximação nos ciclos utilizados.....	107
Figura 6.5: Percentual de veículos pesados nas observações das faixas esquerdas nos ciclos utilizados	108
Figura 6.6: Percentual de veículos pesados nas observações das faixas direitas nos ciclos utilizados.....	109
Figura 6.7: Percentual de conversões por aproximação nos ciclos utilizados.....	110
Figura 6.8: Percentual de conversões nas faixas direitas dos ciclos utilizados	111
Figura 6.9: Fluxo de saturação por aproximação	112
Figura 6.10: Fluxo de saturação das faixas esquerdas.....	113
Figura 6.11: Fluxo de saturação das faixas direitas.....	114
Figura 6.12: Relação entre o fluxo de saturação da faixa esquerda e o número de conversões da faixa direita.	116
Figura 6.13: Distribuição do fluxo de saturação nas faixas esquerdas.....	117
Figura 6.14: Distribuição de veículos pesados nas faixas esquerda.....	117
Figura 6.15: Variação do fluxo de saturação por proporção de veículos pesados (001L)	118
Figura 6.16: Variação do fluxo de saturação por proporção de veículos pesados (057L)	119
Figura 6.17: Variação do fluxo de saturação por proporção de veículos pesados (Aprox. de 7m).....	120
Figura 6.18: Variação do fluxo de saturação por proporção de veículos pesados nas aproximações de sete metros em apresentação desagregada.....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Definição do início do período saturado em diferentes métodos.	35
Tabela 2.2: Valores de fluxo de saturação observados em interseções.	39
Tabela 2.3: Valores de médios de fluxo de saturação observados no Brasil.	39
Tabela 2.4: Características de peso e potência de tipos de veículos.	40
Tabela 2.5: Variação de Fatores de Equivalência.	41
Tabela 2.6: Fatores de Equivalência Veicular.	45
Tabela 2.7: Principais fatores que afetam o fluxo de saturação.	47
Tabela 2.8: Fluxo de saturação (ucp/h) em diferentes períodos do dia e condições de clima.	50
Tabela 3.1: Listagem e caracterização dos locais de pesquisa.	61
Tabela 4.1: Estatística descritiva das amostras de valores de fluxo de saturação por método.	75
Tabela 4.2: Resultados dos testes de hipóteses para médias de fluxos de saturação.	78
Tabela 5.1: Estatística descritiva de <i>headways</i> por posição.	84
Tabela 5.2: Valores das medianas dos <i>headways</i> por posição de veículos em fila nas aproximações e períodos estudados.	88
Tabela 5.3: Posições de início do regime de descarga saturado.	89
Tabela 6.1: Descrição estatística das variáveis por amostra.	117
Tabela 6.2: Variação do fluxo de saturação por proporção de veículos pesados (001L)	118
Tabela 6.3: Variação do fluxo de saturação por proporção de veículos pesados (057L)	119
Tabela 6.4: Variação do fluxo de saturação por proporção de veículos pesados (Aprox. 7m).	121

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. TEMA

Este trabalho é um estudo sobre o fluxo de saturação, parâmetro fundamental na análise de interseções semaforizadas, concentrando-se em compreender seu uso, os métodos de medição e adequação desses às condições locais e esclarecer algumas questões conceituais. Deve-se entender a pesquisa como uma análise exploratória do tema, uma vez que apesar de ter sido iniciada com um objetivo específico e bem definido, descobriu-se no decorrer do trabalho que algumas das técnicas usuais de tratar o objeto de estudo não eram adequadas, o que requereu justificar o descarte das tradicionais e voltar esforços em desenvolver novas técnicas.

A bibliografia de Engenharia de Tráfego está repleta de estudos sobre esse parâmetro e novos trabalhos continuam a aparecer. Desenvolver uma dissertação de mestrado, ou qualquer outro trabalho, sobre um parâmetro de conceituação extremamente simples e concebido há cerca de 40 anos pode parecer despropositado. No entanto, observando a bibliografia existente, notamos que os trabalhos não abordam o assunto de forma completa. Uma vez que se trata de um parâmetro intermediário em métodos para a obtenção de resultados práticos, como temporização de semáforos ou capacidade de interseções, a abordagem acaba por não ser detalhada o suficiente, gerando a necessidade de trabalhos adicionais a esses métodos de forma a complementá-los e melhorá-los.

A diversidade de métodos que usam o parâmetro fluxo de saturação também contribui na produção de textos técnicos sobre o assunto, pois as técnicas empregadas para a sua obtenção são das mais variadas e a comparação entre essas técnicas, visando verificar sua intercambialidade, praticidade e precisão, é assunto bastante abordado.

Um terceiro fator contribuinte no estudo contínuo do fluxo de saturação é que se trata de um parâmetro cujo valor é função das características do meio e trânsito local e do comportamento dos usuários. Dessa forma, exige-se, devido à mutabilidade do meio urbano e das tecnologias usadas em Engenharia de Transportes, que esse parâmetro seja revisado e ajustado às características locais e atuais.

O trabalho desenvolvido não pretende ser uma unificação dos conceitos e técnicas apresentados nos diversos métodos que lidam com fluxo de saturação em interseções semaforizadas. Serão abordados neste trabalho, o emprego de métodos importados na medição do fluxo de saturação, a prática de uso de fórmulas empíricas na sua estimativa, o uso de fatores de equivalência veicular e a variação “não explicada” do fluxo de saturação.

1.2. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Para relacionar a justificativa deste trabalho com os motivos de estudos sobre fluxo de saturação mencionados na seção anterior, podemos citar o avanço tecnológico e a investigação do comportamento do parâmetro para condições locais.

O avanço tecnológico trata-se da implementação, em cerca de 35% das interseções semaforizadas de Fortaleza, do sistema SCOOT de controle semafórico centralizado e adaptativo em tempo real. Esse sistema opera coletando informações sobre a demanda de tráfego em cada aproximação semafórica e modelando matematicamente o comportamento do tráfego a partir do ponto de coleta. Na modelagem do tráfego, o sistema assume um valor fixo para o fluxo de saturação e daí surge a dúvida se esse procedimento é satisfatório.

Havendo uma variação significativa do fluxo de saturação em relação àquele fornecido ao sistema SCOOT, o sistema operará estimando medidas de desempenho incompatíveis com àquelas observáveis em campo, o que resultará em tempos semafóricos mal ajustados e em dados, a serem usados em análise de desempenho do trânsito, pouco confiáveis. Porém, o propósito de investigar a variação do fluxo de saturação não se restringe à aplicação no SCOOT, mas é extensível à prática de programação semafórica em geral, pois implica em uma faceta não contemplada pelos métodos empíricos de estimativa, bem como mostra que a medição direta em campo requer maior esforço de coleta de dados e compreensão do comportamento local do que se supõe.

É preciso deixar claro que as flutuações do fluxo de saturação tratadas no texto não se referem àquelas relacionadas com as variáveis explicativas normalmente usadas nas fórmulas de estimativa, mas flutuações naturais decorrentes de variações que só podem ser atribuídas a mudanças comportamentais.

A questão de haver flutuação diária ou semanal no valor do fluxo de saturação de uma aproximação é controversa, uma vez que a bibliografia não é consistente. Vários métodos e autores assumem que as variações temporais do fluxo de saturação não são consideráveis, enquanto outros autores identificaram variações significativas. O manual do sistema SCOOT exacerba essa controvérsia quando em seu capítulo de calibração do modelo de tráfego afirma que as variações não afetam o desempenho do sistema, enquanto consta, no mesmo manual, um procedimento para se fazer a determinação do fluxo de saturação em tempo real, mostrando gráficos de um estudo de caso em que a flutuação do valor do parâmetro é considerável tanto na amplitude de variação como na frequência.

Devido ao emprego desse sistema em Fortaleza e à inconsistência da bibliografia técnica sobre o assunto, supõe-se ser justificável efetuar estudos que melhor esclareçam o papel desse parâmetro na prática da programação semafórica e que possam identificar a ocorrência de variações, e a grandeza dessas, no valor desse parâmetro de algumas aproximações semaforizadas.

1.3. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E HIPÓTESE DE PESQUISA

O problema identificado para estudo é a adoção de um valor fixo de fluxo de saturação pelo sistema SCOOT quando há indícios de que esse valor é variável e desconsiderar essa variação afeta a qualidade do controle semafórico. Será testada a hipótese de que há variações significativas ao longo do dia e dos dias da semana no valor do fluxo de saturação.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo Geral

Pretendeu-se identificar flutuações no valor do fluxo de saturação de aproximações semaforizadas de Fortaleza, caracterizadas por apresentarem duas faixas de tráfego e diferenças em sua composição de veículos e percentual de conversões. As flutuações foram analisadas ao longo de um dia útil da semana e no sábado, pois se desejava verificar se fatores comportamentais dos motoristas afetavam a taxa em que os veículos fluíam através da interseção.

1.4.2. Objetivos Específicos

No desenvolvimento do trabalho, alguns resultados intermediários precisaram ser obtidos antes de se chegar a uma conclusão sobre a hipótese levantada:

- a) Comparação e verificação de consistência entre diferentes métodos de determinação de fluxo de saturação;
- b) Estabelecimento de critérios para escolha do método mais apropriado de determinação do fluxo de saturação;
- c) Identificação das tendências de variação do parâmetro estudado ao longo do tempo, bem como sua relação com a variação diária de volume e outras variáveis de tráfego.

1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O texto desta dissertação de mestrado, visando um ordenamento lógico, segue a estrutura seguinte.

1.5.1. Capítulo 1 – Introdução

Seção que constitui o presente capítulo. Situa o problema da pesquisa e aborda, de forma genérica, a razão para a escolha do tema. Estabelece a hipótese que sustenta o desenvolvimento do trabalho e resume os itens que serão abordados na prática.

1.5.2. Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

O segundo capítulo serve não só como uma justificativa para os argumentos apresentados no primeiro capítulo, como também forneceu o embasamento para a elaboração e execução da coleta e análise de dados, permitindo cobrir os objetivos iniciais listados.

A abordagem da revisão pretendeu ser ampla, uma vez que o tema escolhido permeia uma grande diversidade de técnicas utilizadas na Engenharia de Tráfego, optando-se por deixar registrado como o fluxo de saturação está inserido na concepção dos métodos mais tradicionais de programação de tempo fixo até ao que se pode chamar de estado da arte de controle semaforico com os sistemas responsivos ou adaptativos em tempo real.

Aborda-se de início os diferentes sistemas de controle semafórico mostrando que todos partem de um mesmo princípio de estabilidade de condições de tráfego, e utilizam os conceitos da teoria das filas para escolha do conjunto de tempos que melhor satisfaz critérios de eficiência previamente estabelecidos. Em seguida, são descritas diversas formas de obtenção do valor do fluxo de saturação, comentando-se sobre o emprego do conceito de equivalência veicular. Em relação à variação no fluxo de saturação, expõem-se algumas razões para que esse comportamento seja esperado e alguns resultados encontrados na literatura especializada. A filosofia do SCOOT sobre o tema é também registrada.

1.5.3. Capítulo 3 – Coleta de Dados

Apresenta-se a técnica utilizada na coleta dos dados sobre os quais foram feitas as análises pertinentes. Além das técnicas e recursos empregados, bem como justificativas de seus usos, apresentam-se os locais de pesquisa e motivos de escolha dos mesmos.

1.5.4. Capítulo 4 – Análise dos Métodos de Medição

O capítulo teve por fim investigar os resultados obtidos por meio dos métodos de medição direta usados no HCM e ARRB, por esses serem métodos assemelhados, sendo as metodologias do HCM de grande aceitação no meio técnico e acadêmico. Métodos alternativos foram elaborados com a finalidade de confrontá-los com os tradicionais e revelar algumas características na formulação destes. Os resultados mostraram que nenhum dos métodos tradicionais analisados é apropriado para medição do fluxo de saturação, sejam porque apresentam simplificações, sejam porque não refletem o conceito básico do mesmo. As justificativas para estas afirmações são apresentadas na forma de hipóteses seguidas de testes estatísticos confirmatórios.

1.5.5. Capítulo 5 – Método de Medição Proposto

Em virtude dos resultados encontrados do Capítulo 4, foi necessária a definição de um procedimento que se julgou correto na medição do fluxo de saturação. Define-se nesse capítulo, a posição do veículo em fila que marca o início do fluxo sob regime de saturação e o tamanho mínimo de fila necessário para obtenção de um resultado característico do período e local de estudo. Apresenta-se, aos moldes dos métodos tradicionais, o método proposto. Utilizando os critérios definidos para o veículo inicial e

tamanho de fila do procedimento proposto, apresenta-se, também, uma avaliação dos efeitos da variabilidade das descargas de veículos na forma de obter o valor médio dessas, que acaba por justificar a escolha do modelo proposto.

1.5.6. Capítulo 6 – Variação do Fluxo de Saturação

Neste capítulo, procurou-se mostrar que situações similares de tráfego apresentam consideráveis diferenças nos valores de fluxo de saturação e, portanto, o uso de fórmulas de estimação pode resultar em avaliações errôneas no desempenho operacional de aproximações semaforizadas, bem como a prática de calibração única do SCOOT pode não ser recomendável.

1.5.7. Capítulo 7 – Conclusões e Recomendações

Esse capítulo final resume o que se considerou de maior relevância nos achados da pesquisa.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONTROLE SEMAFÓRICO

Onde fluxos de tráfego conflitam entre si, é necessário o emprego de um controle de tráfego adequado para reduzir atrasos e acidentes (WEBSTER, 1964). Essa é a filosofia básica por trás do controle semafórico: estabelecer o direito de passagem de fluxos de tráfego conflitantes, reduzindo os atrasos e garantindo a segurança.

Definir a operação de um semáforo, ou fazer sua programação, significa definir a ordem em que se dão os direitos de passagem (estágios) e por quanto tempo esse direito é dado para cada fluxo (tempo de verde). Enquanto que os estágios podem ser facilmente definidos pela simples determinação dos conflitos dos fluxos, o tempo de verde alocado deve passar por critérios mais rigorosos, uma vez que tempos mal ajustados implicam em atrasos compulsórios, senão em congestionamentos evitáveis. A principal dificuldade na programação semafórica está na variação do fluxo de tráfego ao longo do tempo, requerendo que a alocação dos tempos de verde também varie para se adequar a essa demanda variável.

O Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN, 1984) destaca três variáveis que devem ser ajustadas ao longo do tempo para uma boa operação semafórica: percentual de verdes de cada fase, tempo de ciclo e defasagem. Considerando a forma pela qual os valores dessas variáveis são definidos e alterados ao longo do tempo, podemos classificar o controle semafórico em tempo fixo, atuado e adaptativo.

Em **sistemas de tempo fixo**, os planos semafóricos são pré-calculados, baseados em dados históricos de fluxo de tráfego, e são programados para entrarem em operação numa determinada hora de um dia da semana específico. Essa técnica exige que se faça uma previsão de médio prazo do comportamento do tráfego com os ajustes dos tempos sendo definidos para condições próximas das piores situações esperadas dentro do período de operação de cada plano.

Os **sistemas atuados** respondem a variações de curto prazo do tráfego, identificadas por meio de detectores. O controle atuado é uma evolução do tempo fixo,

porém seus planos continuam sendo pré-calculados e implementados em função do horário e do dia da semana. Esses planos têm como diferencial o pré-estabelecimento de valores mínimos e máximos de tempos de verde permitindo que o tempo de cada estágio varie dentro desse intervalo fornecido. Os tempos de cada estágio partem do valor mínimo, sendo dado um pequeno acréscimo em cima desse tempo básico a cada nova detecção veicular. WILSHIRE (1992) aponta, ainda, como vantagem no controle atuado, o fato de que estágios em que não há demanda poderem ser suprimidos automaticamente.

Os **sistemas adaptativos** surgiram em auxílio à dificuldade de se determinar uma programação semafórica que acompanhe a variação do tráfego em todos os seus níveis. A densidade semafórica urbana e a complexidade das estratégias de controle tornam a implementação e a manutenção de planos semafóricos dispendiosas em tempo e em recursos humanos e financeiros, mesmo quando usadas ferramentas informatizadas *off-line* para programação de redes de semáforos.

Um sistema adaptativo não tem uma definição simples devido à quantidade muito diversificada de tecnologias e técnicas utilizadas, variando também quanto a responsividade do sistema, automatização e autonomia em implementação de estratégias de controle. Nessa gradação é possível dividir os sistemas adaptativos em “gerações”, na medida que passaram por processo evolutivo progressivo de maior autonomia e automatização. Aqui nos interessa os sistemas de terceira geração e consideraremos um sistema adaptativo aquele que não necessita ter planos semafóricos previamente calculados. Um sistema adaptativo deve variar os tempos dos semáforos a partir de medições diretas de variáveis de tráfego ou por estimação dessas variáveis de desempenho por coleta de dados empregando detectores de tráfego.

Citamos os sistemas SCATS e SCOOT como os sistemas adaptativos mais usados, sendo este último o mais bem sucedido comercialmente com cerca de 170 sistemas instalados no mundo, e o primeiro com cerca de 70. Os procedimentos computacionais usados por cada um são bastante diferenciados a ponto de KAGOLANU (1994) criar classificações distintas para eles: o SCATS - um sistema responsivo de atuação veicular e o SCOOT - um sistema responsivo de projeção futura de tráfego.

Em comum, ambos operam com grupos de interseções semaforizadas, chamadas sub-áreas, que trabalham sob mesmo tempo de ciclo visando manter uma defasagem consistente entre os semáforos. Esse tempo de ciclo comum é aquele adotado para a interseção crítica da sub-área, ou seja, aquela que normalmente exige o maior tempo de ciclo para operar satisfatoriamente. Para cada sub-área, busca-se determinar a melhor repartição de verdes, tempo de ciclo e defasagem que atendam um determinado critério, seja ele um grau de saturação específico ou a minimização de atrasos, de números de paradas ou de tamanho fila.

O sistema australiano SCATS (*Sydney Co-Ordinated Adaptive Traffic System*) pode ser considerado um exemplo de uma tecnologia híbrida, pois cada controlador funciona como um controlador atuado, rodando planos gerados por um computador central. No SCATS, os tempos de ciclo são otimizados a cada ciclo, os estágios sofrem ajustes, ou são omitidos, em tempo de execução e a defasagem pode variar a cada três ciclos (WOOD, 1993). Diferente do SCOOT, a formação de sub-áreas no SCATS é dinâmica, o próprio sistema pode fundir ou separar sub-áreas para melhor operação do sistema.

O britânico SCOOT (*Split Cycle Offset Optimisation Technique*) é, como o SCATS, um sistema baseado em interseções críticas, ou seja, interseções semaforizadas próximas integram-se em uma sub-área e o tempo de ciclo de suas interseções é o maior dos ciclos mínimos, ou ótimos, calculados para cada um dos semáforos. Nesse quesito, a vantagem do SCOOT sobre o SCATS é que a interseção crítica é definida dinamicamente pelo sistema. Outros sistemas usam estratégias diferentes e não adotam a restrição de formação de grupos semaforicos rodando sob mesmo tempo de ciclo: o francês PROLYN (nome proveniente da técnica de programação dinâmica que usa) e o americano OPAC (*Optimized Policies for Adaptive Control*), são exemplos desses sistemas (WOOD, 1993). Esses dois últimos sistemas são considerados de terceira geração, e chamados acíclicos, pois uma vez definidos os estágios, o sistema passa a calcular os instantes adequados das mudanças desses, tendo como único objetivo a minimização do atraso total de todos os veículos.

WOOD (1993) sumariza o SCOOT como um sistema que mede o fluxo de tráfego passando pelos detectores a montante da retenção, e faz uma estimativa da formação de filas assumindo que os veículos trafegam a uma velocidade constante do

laço-detector até a faixa de retenção. Enquanto o sinal está vermelho, o sistema modela o crescimento da fila; ao ficar verde, o sistema simula os veículos em fila sendo descarregados a uma taxa constante.

Sistemas adaptativos são capazes de fornecer melhorias ao tráfego mesmo sobre planos fixos recém-ajustados. WOOD (1993) pondera que mesmo considerando variações de performance sob diferentes situações de tráfego, o sistema SCOOT deve gerar reduções da ordem de 12% nos atrasos médios experimentados sob uma boa e atual programação de tempo fixo. Mesmo assim, o sistema não é capaz de atingir um ótimo em operação; KAGOLANU (1994) compila alguns dos pontos de ineficiência em relação a esse sistema.

A despeito dos propagados benefícios dos sistemas SCOOT e SCATS, sistemas adaptativos não são largamente encontrados nos centros urbanos do “primeiro mundo”. PEARCE (2001) resgata uma pesquisa americana da *Federal Highway Administration* (FHWA) mostrando que apenas 14 cidades americanas usam sistemas de controle semafórico adaptativo em tempo real, totalizando 1.917 interseções controladas. Dessas, 1.170 (61%) estão em Los Angeles e operam sob o sistema ATCS; o SCATS é encontrado em 4 cidades e responde por 23,47% da totalização de interseções sob controle adaptativo, enquanto que o SCOOT é encontrado em 5 cidades, controlando 9,18% da referida totalização. A explicação americana para o baixo índice de adoção de sistemas adaptativos nos Estados Unidos inclui os elevados custos de instalação, a necessidade de um sistema de telecomunicações confiável para o intenso fluxo de dados do sistema e a dificuldade de se encontrar pessoal qualificado para a sua operação e manutenção (PEARCE, 2001).

2.2. MODELAGEM DE TRÁFEGO

Conforme discutido na seção 2.1, a programação de semáforos engloba dois problemas: definição de tempos adequados para uma dada demanda e ajuste de tempos para uma demanda variável. As técnicas de programação, de uma maneira geral, somente abordam o problema considerando condições estáveis de tráfego, ou seja, fica a critério do analista a escolha de períodos de tempo ao longo do dia em que o cruzamento semaforizado, ou sub-área, mantém um comportamento de tráfego com características homogêneas. Para cada um desses períodos, o analista estabelece

a combinação adequada de repartição de verde, ciclo e defasagem, definindo um plano semafórico.

Os processos normalmente usados na definição de um plano partem de um modelo matemático, ou computacional, do comportamento do tráfego. Esse modelo fornece ao analista um conjunto de medidas de desempenho cujos valores são dependentes dos tempos semafóricos adotados. O analista, então, decide por implementar os tempos que resultem em medidas de desempenho que satisfaçam critérios por ele estabelecidos.

Na avaliação da performance de uma interseção sob um plano semafórico, podem ser considerados atrasos, número de paradas, comprimento de filas, atraso para pedestres, consumo de combustíveis, emissão de poluentes e fila residual ao fim do verde (TAYLOR *et al.*, 1996). Alguns procedimentos podem usar uma combinação dessas variáveis resultando em um índice de performance como o adotado pelo TRANSYT (BINNING e CRABTREE, 1999). Em comum, os métodos para escolha de um plano semafórico têm, em seu nível mais básico de concepção, a modelagem de formação e descarga de filas.

Desenvolvida no início do século XX, a teoria das filas é um ramo da matemática fortemente vinculado com a teoria das probabilidades e busca responder questões do tipo: quanto um usuário vai esperar ou qual é o número de unidades esperando em uma fila (GERLOUGH e HUBER, 1975). Essa orientação se adequa bem ao comportamento de tráfego observado em interseções semaforizadas e ao tipo de análise feita para a escolha do melhor plano semafórico para um determinado período do dia.

A equação fundamental de um sistema de filas é apresentada por TAYLOR *et al.* (1996) como:

$$I(t) = \frac{dN}{dt} + O(t) \quad (2.1)$$

A fórmula (2.1) exibida é uma equação de continuidade da qual se infere que num dado instante t , o número de elementos que chegaram no sistema até então, $I(t)$, é a soma dos que deixaram, $O(t)$, com o comprimento da fila existente, $N(t)$.

Assim, um modelo de filas e, por conseguinte, a modelagem de uma interseção semaforizada, requer que sejam definidos um padrão de chegadas de elementos no sistema de filas (sua taxa média e distribuição dos tempos entre chegadas), as características do atendimento (tempo médio para o atendimento de cada elemento, sua distribuição estatística, bem como o número de elementos simultâneos que podem ser atendidos) e a disciplina da fila (o critério de atendimento dos elementos) (GERLOUGH e HUBER, 1975).

Diversos modelos de filas aplicados a interseções semaforizadas podem ser encontrados na bibliografia de teoria das filas, mas interessa-nos como eles são aplicados à prática da Engenharia de Tráfego e, desse ponto de vista, nos limitaremos a analisar o método de Webster, o programa TRANSYT para redes de semáforos e o sistema de controle semafórico adaptativo em tempo real SCOOT.

2.2.1. Temporização de Interseções Isoladas

O método de Webster foi desenvolvido no Reino Unido durante a década de 1950. Apesar de ser bastante antigo, o método fornece a base de todos os métodos de cálculo de tempos para semáforos (TAYLOR *et al.*, 1996), o que justifica ter sido adotado pelo DENATRAN (1984) na determinação dos tempos fixos de semáforos isolados.

WEBSTER (1964) estabeleceu um método para temporização de semáforos isolados partindo da estimativa dos atrasos experimentados por veículos nas interseções. Uma vez que um método de observação direta do atraso foi considerado impraticável devido ao grande número de observações que seriam necessárias, WEBSTER (1964) desenvolveu um modelo de tráfego e fez simulações em computador de uma aproximação de uma interseção controlada por semáforo de tempo fixo, operando sob combinações de tempos de verde, tempo de ciclo, fluxo de tráfego e fluxo de saturação que cobriam praticamente todas as situações possíveis (WEBSTER, 1964). No seu método, Webster adotou uma interpretação clássica do comportamento de desmanche de fila de veículos quando da abertura do verde, que pode ser reproduzida pela Figura 2.1:

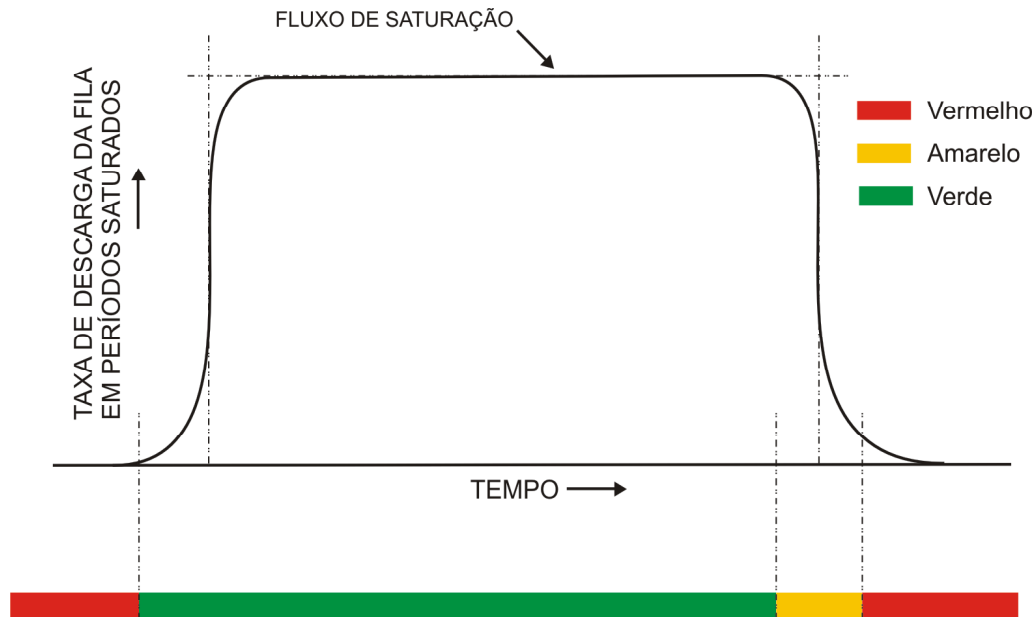


Figura 2.1: Comportamento do tráfego assumido por Webster

A curva no diagrama de Webster mostra que, apesar de considerar que no início e no fim do verde, a fila de veículos apresenta um fluxo de tráfego variável, o platô observado indica que foi adotada uma simplificação de que, ao longo da maior parte do período de verde, a frequência de passagem de veículos pela retenção é fixa, ou seja, supõe-se um *headway* único para todos os veículos. Segundo suas próprias palavras, WEBSTER (1964) diz que quando o período de verde se inicia, os veículos levam algum tempo para começar seu deslocamento e acelerar até sua velocidade normal de viagem, mas depois de alguns segundos, a fila de veículos descarrega a uma taxa mais ou menos constante chamada de fluxo de saturação.

WEBSTER (1964) simplifica a curva do diagrama transformando-a em um retângulo. Considerando que o diagrama mostra uma curva de fluxo contra tempo, a área sob a curva indica o número de veículos que passaram pela retenção durante o verde. Se o período de verde é consideravelmente maior que o trecho inicial e final da curva (trecho fora do platô), então a forma real da curva não é importante, podendo ser substituída por um retângulo de área equivalente e com altura igual ao fluxo de saturação médio. Nessa forma de construção, as discrepâncias de fluxo entre o fenômeno real e o modelo adotado são ajustadas pelo parâmetro *tempo perdido*, ou seja, o modelo sugere que a fila é descarregada imediatamente na mesma taxa do fluxo de

saturação, sem período de aceleração. No entanto o modelo compensa a falta desse período iniciando a descarga da fila mais tarde do que o escoamento real.

O processo de compatibilização é semelhante no fim do tempo de verde, quando o modelo adota a interrupção abrupta da descarga da fila. No entanto, compatibiliza com o comportamento real estendendo o período de fluxo de saturação para além do período observável do fenômeno. A Figura 2.2 detalha os ajustes:

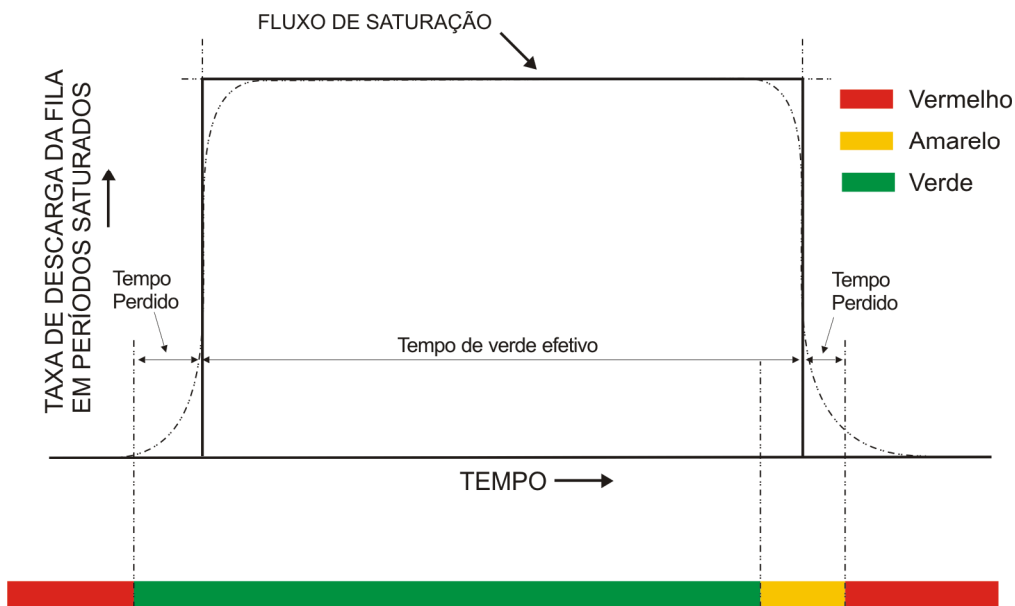


Figura 2.2: Modelo simplificado adotado por Webster

Dos resultados das simulações, WEBSTER (1964) chegou a uma fórmula que fornecia o atraso médio total por veículo para uma aproximação:

$$d = \frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65 \cdot \left(\frac{c}{q^2} \right)^{1/3} x^{(2+5\lambda)} \quad (2.2)$$

onde,

d : atraso médio por veículo na aproximação;

c : tempo de ciclo;

q : fluxo de tráfego;

λ : proporção do ciclo que é efetivamente verde;

x : grau de saturação definido como $\frac{q}{\lambda \cdot s}$, sendo s o fluxo de saturação.

GERLOUGH e HUBER (1975) mostram que cada termo da Equação (2.2) representa uma parcela de atraso: o primeiro termo é o atraso gerado por veículos chegando a uma taxa constante em fluxo contínuo; o segundo termo adiciona os efeitos das irregularidades do fluxo; e o último termo trata-se de um fator de correção obtido empiricamente das simulações por Webster. MAY (1990) avaliou o terceiro termo da expressão de atraso, mostrando que ele varia de zero ao valor do segundo termo.

Diferenciando a equação para o atraso total de uma interseção em relação ao tempo de ciclo, Webster obteve uma fórmula para o tempo de ciclo que minimizasse o atraso total na interseção, chamando o tempo obtido de tempo de ciclo ótimo:

$$C_o = \frac{1,5 \cdot Tp + 5}{1 - y_1 - y_2 - \dots - y_k} \quad (2.3)$$

onde,

C_o : tempo de ciclo ótimo [s];

Tp : tempo perdido total por ciclo [s];

y_k : para o estágio k , maior valor da razão $\frac{q}{s}$ dos movimentos do estágio.

A partir do tempo de ciclo, a repartição de verdes é feita proporcionalmente em relação às maiores taxas de ocupação de cada estágio.

O método de Webster apresenta muitas restrições que métodos subsequentes tentaram contornar. TAYLOR *et al.* (1996) consideram o método ineficiente no tratamento de faixas compartilhadas de tráfego e situações em que há estacionamento próximo da interseção. Mas mesmo WEBSTER (1964) reconheceu muitas das limitações de seu método, entre elas, a suposição de um fluxo de saturação constante: “se o fluxo de saturação cai ao longo do verde (por exemplo, devido ao forte movimento de conversão à esquerda), essa fórmula não é apropriada e um método mais complexo é necessário para se obter um tempo de ciclo adequado”.

Apesar das restrições, outras propostas de modelos não vieram a contribuir significativamente com uma melhor estimativa do atraso em interseções. GERLOUGH e HUBER (1975) e ALLSOP (1981) dizem, embasados em trabalhos de comparação publicados, que a escolha entre os modelos mais conhecidos para atraso deve levar em

conta mais a facilidade de uso do que a precisão dos resultados que se pode obter, pois estes são muito similares.

A curva fluxo contra tempo, usada por Webster, é bastante adotada para explicar o comportamento do fluxo de tráfego junto a semáforos. AKÇELIK (1993), desenvolvendo uma metodologia para temporização e capacidade de interseções semaforizadas para o *Australian Road Research Bureau* (ARRB), usa o mesmo modelo com diferenças mínimas nas definições dos parâmetros. O método da ARRB traz, como inovação, uma fórmula para definição do ciclo ótimo com um parâmetro de penalidade para o número de paradas, o que permite que se estabeleça o ciclo adequado para minimizar o consumo de combustíveis, custos totais, atrasos ou filas, dependendo do valor adotado para o referido parâmetro.

Outro exemplo de adaptação do modelo proposto por Webster é o programa de computador SIGSET desenvolvido por ALLSOP (1981). Allsop adota a mesma equação de atraso proposta por Webster, portanto o mesmo modelo de tráfego. Diferencia-se, no entanto, por estabelecer o plano semafórico usando o atraso total da interseção considerando todos os movimentos e não apenas aqueles determinados como críticos. Na verdade, o programa possibilita uma flexibilidade adicional ao analista quando permite que se adotem pesos nos atrasos experimentados de qualquer dos movimentos ou aproximações do cruzamento, dessa forma, incluindo uma tendência de majoração do tempo de ciclo e controlando a repartição de verde segundo seus próprios critérios de importância.

Por questão de complementaridade dos modelos de tráfego, vale citar a metodologia do *Highway Capacity Manual* ou HCM (TRB, 2000), uma vez tratar-se de uma referência bastante difundida no meio técnico apesar de não ter o fim explícito de temporização semafórica. Quando aborda as interseções semaforizadas, o HCM qualifica seus desempenhos em função do atraso experimentado por veículo e, para tanto, utiliza uma fórmula de atraso que nos remete ao modelo de tráfego usado por Webster, com paradas e acelerações instantâneas e correções com emprego de tempo perdido. A fórmula para atraso do HCM usa o primeiro termo da expressão; os demais termos diferem, no entanto, da fórmula original, pois a metodologia considera fatores adicionais, como a influência da formação de pelotões de veículos nas interseções a montante.

Esses métodos e ferramentas são ideais para tratamento de interseções isoladas, ou seja, idealmente devem ser aplicadas quando o padrão de chegadas de veículos nas aproximações segue um comportamento aleatório. Quando nos deparamos com uma malha viária densamente semaforizada, o comportamento do tráfego muda, necessitando de uma avaliação mais refinada para obtenção de um melhor desempenho nas interseções. O principal fator que diferencia o tratamento de redes de semáforos isolados é a formação de pelotões de veículos que deixam a linha de retenção em direção à próxima interseção a jusante. Nesse caso, prover um plano semafórico que reduza atrasos significa determinar qual a ordem de abertura dos semáforos entre cruzamentos vizinhos, permitindo que o pelotão de veículos seja capaz de percorrer uma distância significativa antes de sofrer uma interrupção por um sinal vermelho.

2.2.2. Redes de Semáforos

AKÇELIK (1993) diferencia o controle semafórico em redes do controle isolado pela necessidade de coordenação entre semáforos, o que evita paradas frequentes e atrasos desnecessários aos pelotões de veículos formados nos semáforos a montante. A coordenação semafórica é obtida fazendo com que os semáforos operem sob um tempo de ciclo único e definindo os instantes de abertura dos verdes em uma ordem temporal compatível com a velocidade dos pelotões, obtendo-se uma progressão de verde ao longo da via.

A preparação de um plano de coordenação semafórica envolve a definição do grupo de semáforos a se coordenar, o cálculo do tempo de ciclo comum, os tempos de verdes de cada interseção e as defasagens entre eles. O cálculo desses planos não é uma tarefa trivial, principalmente considerando os casos de redes fechadas. Por esse motivo, vários métodos computacionais foram desenvolvidos, destacando-se, pelo seu amplo uso, o programa de computador TRANSYT (BINNING e CRABTREE, 1999).

A grande vantagem do software TRANSYT, em relação aos demais programas, é que ele está disponível já há bastante tempo. A primeira versão foi criada em 1967, e desde então foram lançadas mais dez versões que incluíram melhorias na modelagem de tráfego, bem como na diversificação das situações que podiam ser tratadas. Além da série britânica original, seu código foi comercializado para os Estados Unidos gerando uma segunda linhagem chamada TRANSYT/7F.

O principal requisito adotado pelo TRANSYT, que virou um paradigma no tratamento de redes de semáforos, é que o grupo de semáforos sendo otimizado deve operar sob um mesmo tempo de ciclo. Entretanto, não existe um procedimento formalizado para escolha do ciclo ótimo de uma sub-área, ou mesmo para a definição do perímetro dessa sub-área, o que leva BINNING e CRABTREE (1999) a sugerirem ao engenheiro de tráfego que experimente algumas combinações de sub-áreas, tempos de ciclo, ciclos-duplos, verdes repetidos e ordem de estágios na busca da melhor estratégia a ser usada.

Assim, dada uma sub-área e um tempo de ciclo, o TRANSYT busca minimizar o atraso total e o número de paradas por veículo, em toda a sub-área, ajustando a repartição de verdes e defasagens. A grande diferença do método de Webster, é que não existe uma fórmula simples e direta que dê os resultados esperados, requerendo um processo de simulação para se obter os tempos adequados à rede. Além disso, para considerar o efeito da progressão dos pelotões, é preciso que se considere o comportamento dos mesmos ao longo do percurso entre duas interseções semaforizadas. Ambas as situações são tratadas pelo TRANSYT através dos *perfis cíclicos de fluxo* (PCFs).

Os perfis cíclicos de fluxo são gráficos de fluxo contra tempo, nos quais o intervalo de tempo corresponde a um ciclo semafórico. Portanto, os PCFs, quando medidos na retenção de uma aproximação, são a representação do fenômeno que a curva do modelo de Webster quer reproduzir. Recomendado a ser medido logo a montante da interseção, junto à retenção, um PCF é construído a partir de uma média do número de veículos que passam pela seção de controle a cada 0,1 minutos. Considerando o intervalo de tempo de amostragem, o número de veículos é convertido em fluxo equivalente com o qual pode-se construir um gráfico de barras, ou histograma de fluxo. A forma, a altura de picos e vales e a localização ao longo do eixo de tempo do ciclo de um PCF são capazes de fornecer valiosas informações ao engenheiro de tráfego: fluxos médios de tráfego, adequação de coordenação, fluxos de saturação, verdes ociosos, velocidades e dispersões de pelotões, entre outros (ROBERTSON, 1974).

O TRANSYT faz o inverso: a partir de uma parcela dessas informações fornecidas pelo usuário, o programa constrói um PCF para cada um dos fluxos modelados. Todos os cálculos são feitos manipulando-se os PCFs, ou seja, nenhuma

representação de veículos individuais é feita (BINNING e CRABTREE, 1999). Os PCFs são montados junto à retenção de uma aproximação e o TRANSYT altera sua forma ao longo do período de ciclo em função dos PCFs das aproximações a montante, que são suavizados de acordo com a distância da interseção a jusante, e da velocidade média de tráfego, além de serem também alterados por uma taxa fixa de descarga de fila.

Essa manipulação dos PCFs considera que cada perfil é formado por três tipos de componentes, chamados de perfis IN, OUT e GO. O perfil IN é o padrão de tráfego não interrompido pelo semáforo, o perfil OUT é o padrão de tráfego que cruza a faixa de retenção e o perfil GO é padrão de tráfego saturado (BINNING e CRABTREE, 1999). O TRANSYT usa os componentes de perfil OUT dos PCFs das aproximações a montante para construir os PCFs das aproximações a jusante, mas também, usando de aritmética simples com os componentes IN e OUT, estima o número de veículos que chegam, estão parados ou atravessam a retenção de uma aproximação a cada intervalo do ciclo, daí calculando comprimento de filas, tempos de atrasos e números de paradas equivalentes.

O padrão de chegadas numa aproximação, definido pelos perfis OUT das aproximações anteriores, provê uma taxa variável de chegadas de veículos, mas o padrão usado para o desmanche das filas permanece sendo o mesmo sugerido por Webster: taxa constante (fluxo de saturação fixo), aceleração instantânea e interrupção abrupta do fluxo. Devido ao padrão de chegadas, a fórmula para o atraso de Webster não é válida e a medida de desempenho que é minimizada pelo TRANSYT é a soma de atrasos e número de paradas em todas as aproximações da sub-área, o *performance index* (PI).

A inexistência de uma fórmula, à semelhança daquela de ciclo ótimo proposta por Webster, para determinar os tempos que resultam em um valor mínimo do PI faz com que o TRANSYT não calcule os planos semaforicos, mas teste uma combinação de defasagens e repartição de verdes apresentando aquela combinação que retornou o menor PI como solução. Cada combinação testada gera PCFs distintos e, como os atrasos e paradas são calculados pelas diferenças entre os perfis OUT e IN, os PIs de cada combinação também são distintos. Assim, os planos de semáforos de tempo fixo em rede continuam sendo calculados não só em cima da equação básica da teoria das

filas, como também diretamente dos parâmetros usados por Webster na década de 1950: fluxo de saturação e tempo perdido.

Um passo seguinte na evolução dos métodos de cálculo de tempos semafóricos foi a automatização da alimentação de dados, da determinação e da implementação dos planos em campo, sendo o sistema SCOOT o melhor exemplo dessa tecnologia. MARTIN e HOCKADAY (1995) definem o sistema como um TRANSYT em tempo real, um sistema da terceira geração de controle de tráfego. ROBERTSON (1986), seu criador, concebeu seu funcionamento em cima de três idéias fundamentais: medição dos PCFs, modelagem de tráfego em tempo real e otimização incremental.

Como o TRANSYT, o SCOOT escolhe o plano mais adequado para a rede, estimando valores para filas, atrasos e paradas através dos PCFs. No caso do SCOOT, os PCFs são montados a partir de informações de laços indutivos, instalados no pavimento das vias. Esses detectores são instalados logo após a interseção a montante, requerendo que o SCOOT modele o tráfego até a retenção a jusante, aplicando uma suavização do perfil em função da velocidade do tráfego e distância percorrida.

Como os laços podem abranger mais de uma faixa da via, detectando mais de um fluxo de tráfego simultaneamente, não são capazes de detectar veículos individuais, por isso os PCFs utilizam como unidade básica a *unidade de perfil de link* (LPU). Cada detector é amostrado quatro vezes por segundo, verificando-se sua ocupação. O primeiro $\frac{1}{4}$ de segundo em que se detecta uma ocupação equivale a sete LPUs, o segundo $\frac{1}{4}$ consecutivo de segundo a seis, o terceiro a cinco e assim por diante até que, a partir do oitavo, cada intervalo em que há ocupação equivale a uma LPU (MING, 1997). Nesse processo, os histogramas de fluxo dos PCFs são montados com o tempo de ciclo discretizado em intervalos de quatro segundos. Apesar de funcional e econômico no uso de equipamentos, a adoção das LPUs acaba por criar uma dificuldade na avaliação do fluxo, pois são função, além do próprio fluxo, da velocidade e do comprimento dos veículos e da própria disposição física do laço, impossibilitando a existência de uma equivalência matemática fixa entre o número de veículos e o número de LPUs (MING, 1997).

Uma vez obtidos os PCFs, o modelo de tráfego do SCOOT faz uma previsão do estado da fila de veículos junto à retenção. Como é o próprio sistema que controla a

abertura e fechamento dos semáforos, o fluxo detectado durante a fase vermelha é acumulado na retenção, enquanto que na fase verde, a fila vai sendo desmanchada a uma taxa constante (TRL, 2000a). Essa taxa, chamada de *saturation occupancy* (SATOCC) não é medida pelo sistema, mas lhe é fornecida como um parâmetro fixo. Como no TRANSYT, operações de aritmética simples são usadas para calcular o estado das filas na retenção: soma-se à fila atual, a estimativa de LPU que chegaram e subtrai-se o número estimado de LPUs que atravessaram a retenção, ou seja, quatro vezes o valor do SATOCC em LPUs por segundo (MING, 1997). Usando esse modelo de filas, o SCOOT estima medidas de desempenho para planos de tráfego alternativos ao corrente, implementando as alterações que beneficiem a fluidez. A escolha das alternativas de planos é feita pelos três otimizadores do SCOOT, de repartição de verdes, tempo de ciclo e defasagens, que provocam pequenas, mas freqüentes mudanças nos planos correntes.

Cinco segundos antes da mudança de estágio de uma interseção, o SCOOT testa se o prolongamento ou o encurtamento desse estágio provocaria uma redução no grau de saturação do *link* mais saturado da interseção. O teste é feito em cima do modelo de filas, calculando-se o valor do quadrado do grau de saturação de cada link para o estágio corrente, para um estágio quatro segundos mais curto e para um estágio quatro segundos mais longo. O SCOOT acrescenta ao estágio corrente, o delta de tempo da alternativa que apresentar o menor valor dos máximos graus de saturação encontrados, acumulando para o teste no ciclo seguinte uma parcela dessa alteração.

O teste de alteração de defasagens ocorre uma vez por ciclo, e as alterações são implementadas no ciclo seguinte (MING, 1997). Como no otimizador de repartição de verdes, o de defasagens testa alterações de quatro segundos, para mais ou para menos do valor corrente. As interseções são testadas individualmente considerando apenas os fluxos, ou *links*, que as alimenta diretamente e os que são diretamente alimentados por ela. O teste é feito calculando-se um índice de performance definido pela soma ponderada dos atrasos, do número de paradas e de um índice de congestionamento. Para cada alternativa, calcula-se a soma do índice de performance de cada link e implementa-se a alternativa que resultar na menor soma. O SCOOT pressupõe que se cada interseção individual é otimizada para o menor índice de performance (menores atrasos) então a sub-área como um todo também o é (TRL, 2000a).

O otimizador de ciclo atua a cada cinco minutos, ou a cada dois minutos e meio no caso de ter executado uma alteração na última otimização. Esse otimizador procura deixar o *link* mais saturado de cada interseção com 90% de saturação, aumentando ou diminuindo o tempo de ciclo corrente em 4, 8 ou 16 segundos, conforme a grandeza desse tempo. Todas as interseções de uma sub-área são testadas individualmente na otimização, adotando-se para todas elas, o maior tempo de ciclo que for encontrado, dentro dos limites especificados.

Todos os otimizadores do sistema SCOOT podem sofrer alterações de ação por meio de valores de parâmetros fornecidos pelo usuário. De uma forma geral, essas alterações geram tendenciosidades nas medidas de desempenho calculadas pelo sistema e restringem as extensões de modificações de programação implementadas. A experiência diz que os melhores resultados operacionais são obtidos aplicando-se alterações paramétricas para condições específicas de tráfego, opinião corroborada pelos artigos de FOSTER (1988) e MARTIN e HOCKADAY (1995). Essa conclusão é um indício de que o sistema é limitado quanto à sua autonomia em lidar com variações de comportamento de tráfego, assim como de que a calibração do modelo de tráfego não é condição suficiente para uma operação a contento.

2.3. FLUXO DE SATURAÇÃO

Pela seção anterior fica claro que qualquer que seja a técnica ou ferramenta usada na abordagem de interseções semaforizadas, os resultados são influenciados pelo valor adotado para a taxa de descarga da fila de veículos acumulados na retenção, pois as medidas de desempenho utilizadas na avaliação dos planos semafóricos são obtidas em função dela. Essa taxa de descarga recebe a denominação técnica de *fluxo de saturação*.

TEPLY e JONES (1991) afirmam que o fluxo de saturação desempenha um papel crucial na determinação de medidas de mérito usadas na prática da Engenharia de Tráfego, incluindo a avaliação do desempenho ou capacidade de interseções, pois quase que a totalidade dos programas de computador para projeto e análise de interseções individuais, progressão semafórica ou operação em redes usa o fluxo de saturação como um dos principais parâmetros de entrada. A precisão desses programas é sensível à estimativa adotada do fluxo de saturação; uma pequena variação no valor desse

parâmetro pode resultar em grandes variações no tempo de ciclo e na alocação de tempos de verde, especialmente nas situações de operação próximas à capacidade da interseção (TEPLY e JONES, 1991).

Erros de estimativas do valor do fluxo de saturação são provenientes das mais diversas fontes. SHANTEAU (1988) cita erros conceituais, TEPLY e JONES (1991) comentam sobre erros na aplicação dos métodos de determinação do parâmetro e TARKO e TRACZ (2000) fazem considerações sobre a inadequabilidade dos modelos e métodos tradicionais usados para representar o fenômeno da descarga de fila. Diante desse contexto, é interessante avaliar a origem e os métodos de definição do fluxo de saturação e de seus parâmetros complementares.

Como WEBSTER (1964) lidava com interseções isoladas, o comportamento da fila sendo descarregada não tinha importância desde que se adotasse uma taxa de descarga igual ou superior àquela obtida pela razão entre o número de veículos descarregados e o tempo de verde observados no fenômeno real. Caso a taxa adotada fosse superior à necessária, era suficiente corrigir o modelo adicionando-se um tempo morto ao início e ao fim do verde durante o qual não ocorria descarga de veículos. Nesse cenário, define-se o fluxo de saturação como a taxa de descarga, o verde efetivo como período de tempo em que ocorre a descarga e o tempo perdido como o tempo morto para ajuste entre modelo e fenômeno.

WEBSTER (1964) optou por escolher um valor de taxa de descarga proveniente de um comportamento observável e mensurável no fenômeno real de desmanche de filas em semáforos, que é aquela quando ocorre a estabilização do fluxo de veículos após alguns segundos de verde. A vantagem na adoção dessa taxa é que ela é supostamente independente da extensão de verde, e o tempo necessário para atingir esse fluxo estável, também o é. Em outras palavras, para uma dada aproximação, o fluxo de saturação e o tempo perdido não têm relação com o tempo de verde alocado, por isso WEBSTER (1964) pôde afirmar que a capacidade da aproximação podia ser estimada para qualquer tempo de verde desejado, devido à proporcionalidade existente entre verde efetivo e capacidade, uma característica bastante conveniente para a Engenharia de Tráfego em avaliações de alternativas de temporização.

Apesar de representar adequadamente o fenômeno de estabilização de fluxo, a curva fluxo *versus* tempo não é tão clara para a inferência dos parâmetros necessários a aplicação dos métodos de temporização de semáforos: definição da duração do verde efetivo e tempos perdidos. McSHANE e ROESS (1990) facilitam quando adotam a abordagem de *headways* apresentada no *Highway Capacity Manual* (TRB, 2000). O *headway* é definido como sendo o intervalo de tempo entre a passagem de dois veículos sucessivos, considerando o primeiro *headway* como o tempo entre a abertura do verde e a passagem do primeiro veículo. Em uma aproximação semaforizada, quando se analisam os *headways* médios dos veículos, considerando suas posições na fila, observa-se que eles tendem a decrescer a partir do primeiro até um valor mais ou menos constante, conforme se pode ver na Figura 2.3.

Esse valor estável de *headway* é chamado de *headway de saturação*, uma vez que é observado durante um período de verde saturado, e normalmente se aceita ser atingido após cerca de um mínimo de quatro veículos descarregados. O *headway* de saturação implica em veículos passando com uma frequência constante pela retenção, ou seja, uma taxa constante de descarga que vem a ser o fluxo de saturação; seu valor numérico pode ser obtido como a taxa horária equivalente ao inverso do *headway* de saturação. A análise pelos *headways* também permite inferir o valor do tempo perdido no início do verde, computando-o pela soma das diferenças dos *headways* iniciais em relação ao *headway* de saturação.

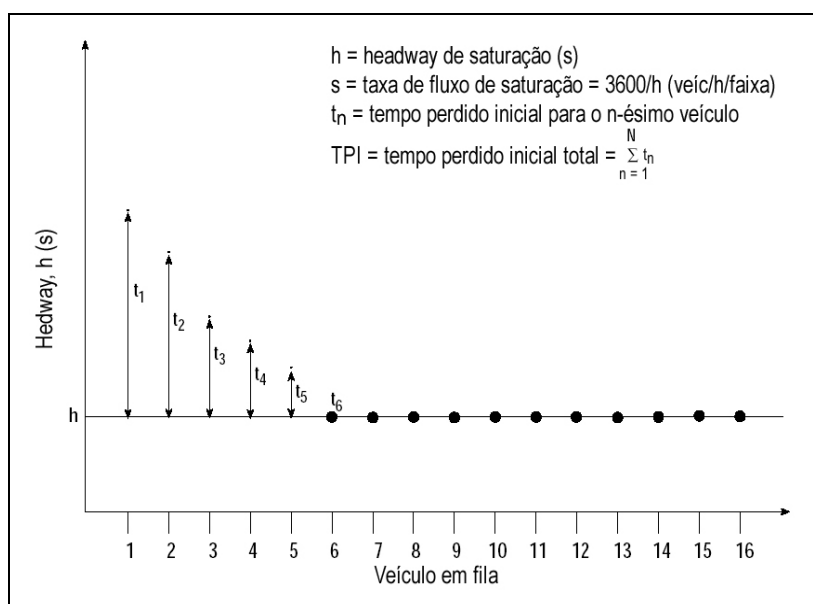


Figura 2.3: Conceito de fluxo de saturação e tempo perdido por headways

Usando de uma representação gráfica comum em teoria das filas, a determinação de fluxo de saturação, verde efetivo e tempo perdido no início e fim do verde fica bastante simplificada pelo uso de curvas cumulativas propostas por SHANTEAU (1988). No caso, em vez de se calcular o valor médio do *headway* para cada posição de veículo na fila, traçando-se um gráfico *headway versus* ordem do veículo, SHANTEAU (1988) sugere calcular o número médio de veículos que passam ao longo do tempo de verde, e então traçar um gráfico número de veículos *versus* tempo. No período em que o fluxo passa a apresentar *headways* constantes, o gráfico passa a apresentar um comportamento linear cujo coeficiente angular representa a taxa de descarga da fila e que por sua vez, se convertido para uma taxa horária, representa o fluxo de saturação. Com a equação linear do trecho retilíneo do gráfico, obtém-se o valor do tempo perdido no início do verde como sendo o valor da variável independente (tempo) que zera o resultado da equação. Todos os parâmetros, bem como o comportamento do desmanche da fila, ficam bastante claros pela representação gráfica da Figura 2.4.

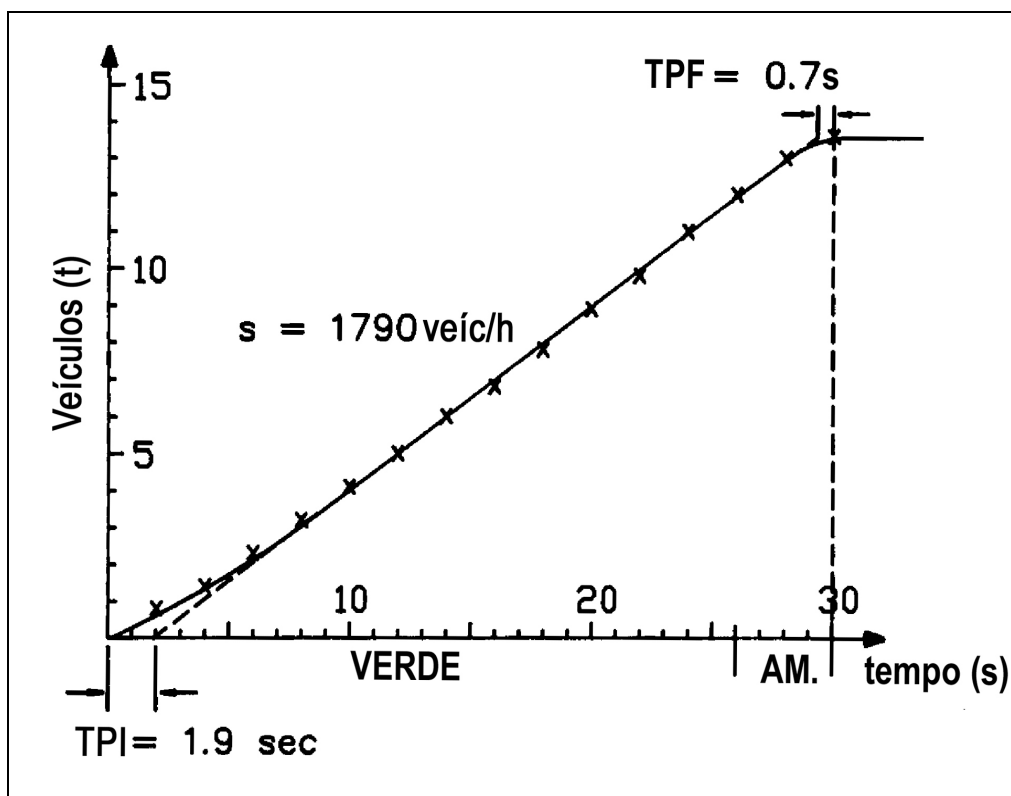


Figura 2.4: Fluxo de saturação por curva cumulativa

Os três gráficos (Figura 2.1, Figura 2.3 e Figura 2.4) apresentados são a melhor forma de estabelecer o conceito de fluxo de saturação e tempo perdido. Listar as definições desses parâmetros, como são apresentadas nos diversos métodos de cálculo de tempos de semáforos e capacidade de interseções, pode levar a conclusões errôneas devido ao uso de expressões como *fluxo que poderia ser comportado pela faixa de tráfego no caso de que fosse dado verde contínuo* (WEBSTER, 1964; TRB, 2000; DENATRAN, 1984), *“taxa máxima de descarga que pode ser alcançada enquanto há fila”* (AKÇELIK, 1993), ou ainda *“a taxa máxima possível de fluxo para um elemento viário como uma faixa de tráfego”* (TAYLOR *et al.*, 1996). Esse tipo de simplificação pode levar a uma falsa conclusão de que o fluxo de saturação é um valor teórico ou ideal, enquanto que na verdade o fator teórico reside apenas em buscar-se um valor médio ou representativo do comportamento do período de descarga da fila de veículos que, quando usados num modelo de tráfego, resultem em medidas de desempenho coerentes com aquelas observáveis na prática.

Parte dessa falha conceitual pode ser atribuída à ênfase no emprego de fórmulas empíricas para determinação do valor do fluxo de saturação. Em métodos como os propostos por WEBSTER (1964), pelo ARRB (AKÇELIK, 1993) e pelo HCM (TRB, 2000), apesar de recomendarem a determinação do fluxo de saturação e tempos perdidos em campo, o corpo dos textos detêm-se em explicar o emprego das fórmulas experimentais e seus fatores de correção, enquanto que o procedimento de coleta de dados em campo fica relegado a um texto em apêndice. Esses métodos partem de um valor de fluxo de saturação máximo ideal que vai sendo percentualmente reduzido conforme se aplicam fatores que representam características locais, geradoras de atrito, que interferem na descarga da fila de veículos. Além disso, os procedimentos, e mesmo os métodos de medição direta como no caso do HCM (TRB, 2000), não dão relevância ao emprego correto do valor do tempo perdido, o que leva a erros conceituais como os apontados por SHANTEAU (1988).

2.3.1. Fórmulas Empíricas

As fórmulas empíricas para estimativa do valor do fluxo de saturação não serão detalhadas por se entender que são imprecisas e embutem erros de estimativas, e seu uso alteraria os dados e resultados que se deseja analisar. Essa imprecisão é inerente aos métodos, já que partem de um valor básico médio ou têm esse valor calculado a partir

de uma equação obtida por regressão linear, o mesmo acontecendo com os fatores que reduzem o valor básico ao valor estimado. Um exemplo dessa imprecisão é dado por AKÇELIK (1993) ao citar que MILLER (1968) obteve desvios padrões de cerca de 200 tcu/h¹ entre os sítios estudados e que cerca de 10% dos valores de fluxo de saturação diferiam em mais de 300 tcu/h dos valores estimados. AKÇELIK (1993) recomenda a medição do fluxo de saturação em campo, sempre que possível, por considerar o grau de variação anotado por MILLER (1968) significativa na prática. Quanto a essas discrepâncias, TAYLOR *et al.* (1996) afirmam que, com frequência, fatores peculiares de uma interseção afetam consideravelmente o fluxo de saturação, citando até mesmo a ocorrência de casos de interseções que operam satisfatoriamente, quando isso seria impossível caso o fluxo de saturação fosse o sugerido pelos métodos empíricos tradicionais.

O esforço no desenvolvimento de tais fórmulas não deve, no entanto, ser desmerecido. A prática da Engenharia de Tráfego nem sempre permite que sejam aplicados métodos acurados, precisando valer-se de métodos simplificados que forneçam estimativas com precisão apenas aproximada. Mais louvável é o esforço despendido à adequação desses métodos de estimativa para as condições brasileiras locais como as fórmulas propostas por RIBEIRO (1992a) e MAGALHÃES *et al.* (1998). No caso deste trabalho, os métodos indiretos de obtenção do fluxo de saturação serão desconsiderados simplesmente porque o emprego dessas fórmulas não parece ser adequado ao propósito desejado.

2.3.2. Medições Diretas do Fluxo de Saturação

TAYLOR *et al.* (1996) classificam os métodos de medição direta de fluxo de saturação em métodos de taxa de *headways* e métodos de regressão, porém a diferença entre eles é mais no processo de análise ao qual os dados são submetidos do que no de coleta. Em qualquer caso, o processo de coleta é normalmente bastante trabalhoso, requerendo observação detalhada do fluxo de tráfego, dos *headways* entre veículos, identificação dos seus tipos e da manobra executada.

¹ Unidades de veículos equivalentes em tráfego direto. Esse conceito é detalhado na seção 2.3.10, página 40.

Os métodos de taxa de *headways* são mais usados e baseiam-se na medição dos *headways* de veículos sucessivos numa corrente de tráfego sob condições saturadas, ou seja, cronometra-se o tempo entre a passagem da roda traseira de um veículo sobre a linha de retenção até a passagem da roda traseira do veículo seguinte. De uma forma geral, os métodos ignoram os primeiros veículos da fila, devido ao processo de aceleração. Alguns métodos referem-se aos quatro ou cinco primeiros veículos, enquanto outros métodos desprezam os dez primeiros segundos da descarga. Dessa medição, obtém-se o valor médio dos *headways* e o fluxo de saturação é calculado como sendo seu inverso. Normalmente requer-se uma precisão não inferior a 0,1s nessas medições.

Devido à dificuldade das medições, que exige bastante atenção dos pesquisadores, o processo é bastante suscetível a erros quando feito manualmente, por isso o uso atualmente de equipamentos, como gravadores, câmeras de vídeo e computadores portáteis, vem sendo disseminado no registro dos dados para determinação direta do valor do fluxo de saturação (TAYLOR *et al.*, 1996; RIBEIRO, 1992a; LOUREIRO e LUNA, 1997).

2.3.3. Método DENATRAN

O DENATRAN, em seu Manual de Semáforos (DENATRAN, 1984), propõe identificar o fluxo de saturação usando histogramas de tráfego. O histograma de tráfego tem por fim reproduzir o gráfico *fluxo x tempo* adotado por Webster e pode ser aplicado tanto a faixas individuais como a aproximações completas.

O método pede a existência de fila durante o período de verde e de amarelo do semáforo como requisito, ou seja, operação saturada da aproximação. Dessa forma, durante a coleta de dados, o fluxo de veículos será contínuo e ininterrupto, havendo, no fim do verde, um número suficiente de veículos para “*ocupar toda a largura da aproximação*”. Garante-se, assim, ser possível obter além do fluxo de saturação, os tempos perdidos.

Ao longo de vários ciclos, no mínimo cinco, é contado o número de veículos que cruzam a linha de retenção a cada cinco segundos, até o término do fluxo de veículos. A contagem do tempo inicia-se no fim do verde do estágio anterior, prosseguindo até o término da descarga de veículos. Para cada período de cinco segundos, calcula-se a

razão do somatório de veículos observados em cada período de cinco segundos pelo número de ciclos usados nessas observações. Assim, para cada período de cinco segundos, obtém-se o fluxo de veículos respectivo, que pode ser representado graficamente em um histograma, como se segue.

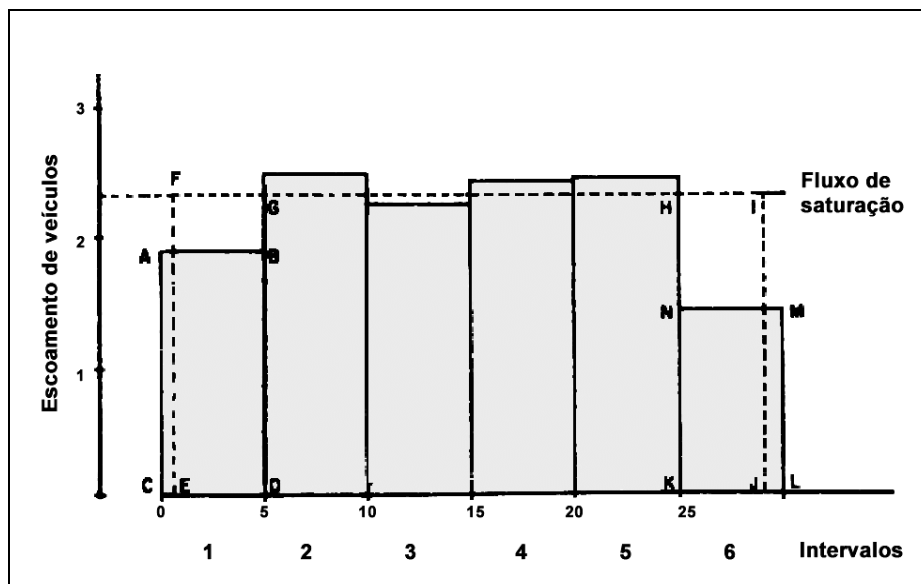


Figura 2.5: Histograma de fluxo do método do DENATRAN

Desprezando-se o primeiro e último período, o fluxo de saturação é calculado pelo valor médio dos fluxos de veículos dos períodos de cinco segundos restantes, que matematicamente representa substituir a área total das barras verticais do histograma por um retângulo de área equivalente. O valor da média obtida representa o fluxo médio de veículos para um intervalo de cinco segundos. Multiplicando esse valor por 720 obtém-se o valor do fluxo de saturação em veículos por hora (veíc/h). O primeiro e último intervalo são usados para o cálculo do tempo perdido inicial (TPI) e tempo perdido do fim de estágio (TPF), respectivamente, usando o procedimento de equivalência de áreas. Nesses casos, no entanto, a altura do retângulo já está determinada, que é o valor do fluxo de saturação calculado, e, portanto determina-se a largura da base. Os tempos perdidos são então obtidos pela subtração dos valores das bases encontradas de cinco segundos.

O método sugere que uma contagem adicional deve ser feita, nesse caso uma contagem classificatória veicular, de modo a se obter a composição do fluxo de tráfego. Usando a proporção das classes veiculares associadas com os valores de equivalência

veicular, pode-se converter o valor do fluxo de saturação de veíc/h em unidades de carro de passeio por hora (ucp/h). A importância e o propósito dessa conversão são discutidos em uma seção posterior.

Sobre esse método, vale comentar a orientação de começar a cronometrar o tempo no fim do verde do estágio anterior. Considerando que o tempo de amarelo é da ordem de três a cinco segundos (ITE, 1992), que o intervalo de contagem sugerido é de cinco segundos, e que o próprio método admite que nos casos de saturação veículos cruzam a retenção no amarelo e até mesmo no vermelho, pode-se supor que na prática o primeiro intervalo de contagem resultará em contagens extremamente baixas, senão nulas. Pode-se ainda questionar se no segundo intervalo de contagem o efeito decorrente da aceleração inicial dos veículos já foi dissipado, ressaltando que métodos diversos consideram que o fluxo de saturação inicia-se depois de dez segundos de verde ou após o quarto veículo ter atravessado a faixa de retenção. Baseado nessas informações, é de se supor que a orientação dada pelo DENATRAN (1984) para a aplicação do método é falha e o primeiro intervalo de contagem deveria começar no início do verde do estágio em análise, conforme é adotado por outros métodos.

2.3.4. Método ARRB

O procedimento australiano (AKÇELIK, 1993) requer que seja contado o número de veículos que atravessam a retenção em três períodos específicos: os dez primeiros segundos de verde, o período restante de verde enquanto saturado e, por fim, o tempo após o término do verde, enquanto passarem veículos. O período saturado é definido como sendo a duração de tempo em que passam veículos que saíram do repouso, estando parados quando abriu o sinal verde ou que tiveram que parar no fim da fila que ainda se encontrava em repouso. Desprezam-se as observações em que o período saturado é inferior a dez segundos. Adicionalmente, o método requer que sejam registrados a duração do período saturado e o tempo de verde.

O fluxo de saturação é obtido como sendo o valor da taxa média de descarga de veículos durante o período intermediário medido, ou seja, o período saturado após os dez segundos iniciais de verde. O cálculo é feito pela razão entre o número total de veículos observados no período intermediário pelo tempo total de observação (o somatório dos tempos desses períodos em cada observação). O tempo perdido total é calculado usando os dados do primeiro e do último período: a partir da soma do número

médio de veículos que passaram nesses períodos, calcula-se o tempo necessário para que esse número médio de veículos passe pela retenção na mesma taxa do fluxo de saturação obtido previamente. O valor do tempo encontrado é subtraído da soma do tempo de entre-verdes com os dez segundos iniciais que não foram considerados no cálculo do fluxo de saturação, obtendo-se como resultado final o valor do tempo perdido total.

O método australiano é mais simples na coleta de dados e mais versátil que o método do DENATRAN, uma vez que admite tempos de verde variáveis, sendo adequado para semáforos atuados e sistemas de controle em tempo real. A conversão para um fluxo de veículos equivalentes é feita posteriormente com o conhecimento da composição do tráfego. A obtenção de um valor médio estatisticamente significativo é sugerida, porém não é estabelecido o processo, o exemplo e a folha padrão de coleta sugerem uma amostra mínima de 30 observações.

2.3.5. Método HCM

O método proposto pelo HCM (TRB, 2000), o manual de capacidade viária americano, apresenta-se com algumas diferenças daquele proposto pelo ARRB (AKÇELIK, 1993). O processo define o início do regime saturado com a passagem do quarto veículo parado em fila pela retenção e seu fim se dá no instante da passagem do último veículo que sofreu parada total. O fluxo de saturação é obtido pela razão entre o número de veículos descarregados sob regime saturado e o tempo total, contado a partir do verde, para a descarga do último veículo desse período de saturação subtraído do tempo de passagem do quarto veículo. O fluxo de saturação representativo do local e período é obtido pela média dos fluxos de saturação dos ciclos individuais. O método especifica um mínimo de 15 ciclos amostrados, com no mínimo nove veículos na fila inicial. Ressalta-se nesse método que os tempos perdidos não são obtidos com os dados coletados, mas estimados pelo tempo de entre-verdes.

Esse procedimento é o mesmo que vinha sendo adotado nas edições anteriores do HCM, incluindo as edições de 1994 (TRB, 1994) e de 1985. A edição de 2000 (TRB, 2000) difere das anteriores por mudar o ponto de referência nos veículos que marca suas passagens pela retenção, ou define seus *headways*. Nas edições mais antigas era adotado o eixo traseiro e, na nova, passou a ser o eixo dianteiro dos veículos.

2.3.6. Método de Shanteau

O processo usado por SHANTEAU (1988), na determinação do valor do fluxo de saturação, difere dos demais por ser essencialmente gráfico. SHANTEAU (1988) propõe traçar um gráfico acumulado ao longo do tempo de verde do número médio de veículos a cruzar a faixa de retenção. Para tanto, requer que sejam registrados os instantes em que cada veículo cruzou a retenção ao longo de vários ciclos. Para cada dois segundos de verde, calcula-se o número médio acumulado de veículos registrados. O gráfico resultante, no caso de períodos saturados, tem um padrão em forma de “S” correspondendo a três trechos da descarga de veículos: aceleração inicial da fila, estabilização dos *headways* e uso do entre-verdes. O trecho de estabilização dos *headways* tende a ter um comportamento linear e determina o fluxo de saturação pelo coeficiente angular da reta que melhor se ajustar a esse trecho, convertido para uma taxa horária. O TPI é obtido pelo valor do intercepto dessa reta com o eixo das abscissas, enquanto que o TPF é obtido pela diferença dos tempos entre o início do vermelho e a coordenada temporal da interseção entre a reta ajustada e a reta horizontal que passa pelo último ponto do gráfico (o número médio de veículos observados no estágio).

SHANTEAU (1988) sugere o emprego mínimo de cinco a dez ciclos saturados para uma boa estimativa, deixando claro que o procedimento é adequado para sistemas de tempo fixo e ciclos saturados. Porém, para o fluxo de saturação e o TPI, essas últimas restrições podem ser desprezadas, tanto que uma variação desse método foi empregada com sucesso por LOUREIRO e LUNA (1997), usando gravadores para o registro da descarga dos veículos e um programa de computador especialmente desenvolvido para traçar os gráficos acumulados, obter o fluxo de saturação por regressão linear e calcular os valores dos fatores de equivalência veiculares (LUNA e LOUREIRO, 1997).

2.3.7. Calibração do Modelo SCOOT

O sistema SCOOT não possui um procedimento para medição direta do valor do parâmetro SATOCC – equivalente ao fluxo de saturação – devido ao emprego de LPUs como unidade básica de medida (TRL, 2000b). Como já foi explicada, na seção 2.2.2 de modelagem de tráfego, a LPU é uma medida de tráfego que não tem uma equivalência direta com o volume, sendo dependente da composição e fluxo, bem como da própria instalação dos laços de detecção. A solução para encontrar o valor adequado de cada

link é, no entanto, simples, requerendo apenas o conhecimento dos tempos de desmanche da fila real e da modelada e a aplicação de uma fórmula iterativa de convergência.

O processo de calibração do parâmetro SATOCC parte de uma estimativa inicial de 8 LPU/s/faixa inserida no sistema, e requer que os parâmetros de tempo de viagem (*journey time*) e tempo de descarga de fila máxima (*maximum queue clear time*) já tenham sido calibrados e inseridos. Esses últimos parâmetros são calibrados por observação direta e não oferecem nenhuma dificuldade de determinação, sendo ambos referentes ao trecho de via entre o laço de detecção e a faixa de retenção. Simultaneamente, devem ser anotados os tempos de desmanche de fila medido em campo e o tempo de desmanche da fila modelada pelo sistema. Iterativamente, o valor do SATOCC é corrigido pelo produto do seu valor atual pela razão entre a soma dos tempos de desmanche das filas modeladas pelo sistema e a soma dos tempos de desmanche das filas observadas em campo. Dez pares de medições são recomendadas para se fazer uma correção do valor atual estimado do SATOCC, sendo que cerca de duas ou três amostras são suficientes para a obtenção do valor final adequado (TRL, 2000b). Ainda que o procedimento seja racional, esteja bem documentado e seja de aplicação bastante simples, a prática da calibração do sistema, conforme se deu em Fortaleza, não segue estritamente as recomendações: em cima do valor estimado inicial do SATOCC, altera-se o valor por tentativa e erro até que os tempos de desmanche das filas, reais e modeladas, aconteçam aproximadamente ao mesmo tempo.

Quanto aos tempos perdidos, o manual de calibração do SCOOT (TRL, 2000b) não apresenta um procedimento para determiná-los; mesmo a definição do que sejam esses tempos perdidos é imprecisa. O tempo perdido no início do verde (*start lag*) é definido como sendo o tempo entre o aparecimento da indicação verde no semáforo até o instante em que a fila de veículos efetivamente começa a se mover (TRL, 2000b). O instante em que o primeiro veículo da fila cruzava a retenção foi usado pela empresa que calibrou o sistema de Fortaleza como sendo esse instante em que a fila efetivamente se move. No caso do tempo perdido no final do verde, o sistema o substitui pelo tempo ganho, ou seja, o seu complemento que é o tempo entre o surgimento da indicação amarela do semáforo e o instante do fim efetivo do movimento do tráfego (TRL, 2000b).

É interessante ressaltar que o SCOOT, por adotar LPUs, trabalha com unidades de veículos equivalentes, ficando implícito que se assume que a relação de desempenho entre veículos em movimento, detectados pelos laços SCOOT, é mantida na descarga dos veículos que saem do repouso e cruzam a faixa de retenção. Se essa hipótese não for sustentada, a calibração do parâmetro SATOCC só seria válida para composições de fluxo de veículos equivalentes àquela observada no período de calibração do parâmetro. É questionável o pressuposto de que se ocorrem modificações no comportamento de descarga, que este seja também repassado à demanda.

2.3.8. Outros Métodos de Medição Direta

Outros métodos de medição direta do fluxo de saturação recaem em processos semelhantes àqueles adotados pelo ARRB (AKÇELIK, 1993) e HCM (TRB, 2000). TEPLY e JONES (1991) e JACQUES *et al.* (1994) descrevem o método adotado pelo *Canadian Capacity Guide* (CCG): requer a contagem de veículos a cada dez segundos de verde, não despreza os segundos iniciais de descarga, sugere cerca de 20 a 30 ciclos para obtenção do valor médio representativo das condições locais, e não obtém o valor dos tempos perdidos. Descrever outros métodos se torna redundante, uma vez que fatalmente se encaixam em uma das duas categorias descritas por TEPLY e JONES (1991), ou em um misto de ambas: medição de tempos sucessivos (não necessariamente o *headway* entre veículos individuais) da descarga de veículos através de uma seção da via e contagem do número de veículos que atravessam a seção de referência durante curtos períodos de tempo de verde. Essa classificação simplificadamente distingue os métodos que medem uma taxa média de descarga diretamente, daqueles que medem o *headway* médio. Pode-se citar, além dos métodos tradicionais, aquele proposto por JACQUES (1995a) que alterou o método do HCM, implementando a possibilidade de medição do tempo perdido.

2.3.9. Considerações sobre a Medição Direta do Fluxo de Saturação

Conforme TEPLY e JONES (1991), o fluxo de saturação reflete a taxa de atendimento uniforme usada na maioria das aplicações de teoria das filas nos problemas de capacidade de uma interseção (NEWELL, 1982; NOVAES, 1975). O questionamento que deve ser feito é se os diferentes métodos de medição direta do fluxo de saturação estão coletando essa taxa em coerência com seu conceito. Em princípio, as diferenças entre os métodos deixam implícito que não, que cada método mede taxas de

descarga distintas devido à definição de diferentes períodos em que se observa o desmanche da fila, notadamente decorrente das diferentes definições de início do período saturado (**ver** Tabela 2.1). O método proposto por SHANTEAU (1988) apresenta ainda maior diferenciação, uma vez que o início do período saturado é definido especificamente para cada amostra.

Tabela 2.1: Definição do início do período saturado em diferentes métodos.

Método	Início do Período Saturado
DENATRAN	<i>Cinco segundos após o entre-verdes.</i>
HCM 1994/2000	<i>Após a passagem do quarto veículo pela retenção.</i>
ARRB	<i>Após dez segundos de verde.</i>
CCG	<i>Início do verde.</i>
SHANTEAU	<i>Variável, definido pelo comportamento observado em cada amostra.</i>

Os métodos diferenciam-se ainda na estimativa dos tempos perdidos. Apesar de não afetarem o valor do fluxo de saturação, uma vez que devem ser calculados em função dele, deve-se registrar que o emprego de valores adequados de TPI e TPF é fundamental para correta modelagem do tráfego e, conseqüentemente, para obtenção de resultados confiáveis dos métodos de temporização e capacidade.

Outra questão pertinente quanto às diferenças de aplicação dos métodos diretos é relativo à definição de *headway*, mais especificamente nos diferentes critérios usados para definir a passagem de um veículo por uma seção. Genericamente, o *headway* é definido como sendo o tempo entre a passagem de dois veículos consecutivos, e em teoria pode ser medido cronometrando-se o tempo entre a passagem de quaisquer pontos homólogos dos dois veículos pela seção de controle (MAY, 1990). Mas no caso da descarga de veículos em um semáforo, as escolhas da seção e do ponto de medida dos veículos influenciam os resultados da medição da descarga dos primeiros veículos da fila (**ver** Figura 2.6).

Os métodos de medição direta consideram a faixa de retenção como a seção da via ideal para medição da descarga veicular, mas o consenso quanto aos pontos de referência dos veículos não acontece. O método do DENATRAN (1984) e de SHANTEAU (1988) não são explícitos no evento a ser registrado; o do antigo HCM (TRB, 1994) e do ARRB (AKÇELIK, 1993) indicam considerar a passagem da roda traseira do veículo pela retenção, o método da nova edição do HCM (TRB, 2000) indica o eixo dianteiro das rodas, enquanto o método canadense do CCG indica a passagem do

pára-choque dianteiro do veículo sobre a retenção. Se resgatarmos o conceito do fluxo de saturação como aquela descarga uniforme usada em teoria das filas, fica claro que o melhor indicador da passagem do veículo é adotado pelo antigo HCM e ARRB, ou como definem TAYLOR *et al.* (1996): o *headway* é o tempo entre a passagem das rodas traseiras sobre a faixa de retenção do veículo anterior até a passagem das rodas traseiras do veículo de interesse sobre a faixa de retenção.

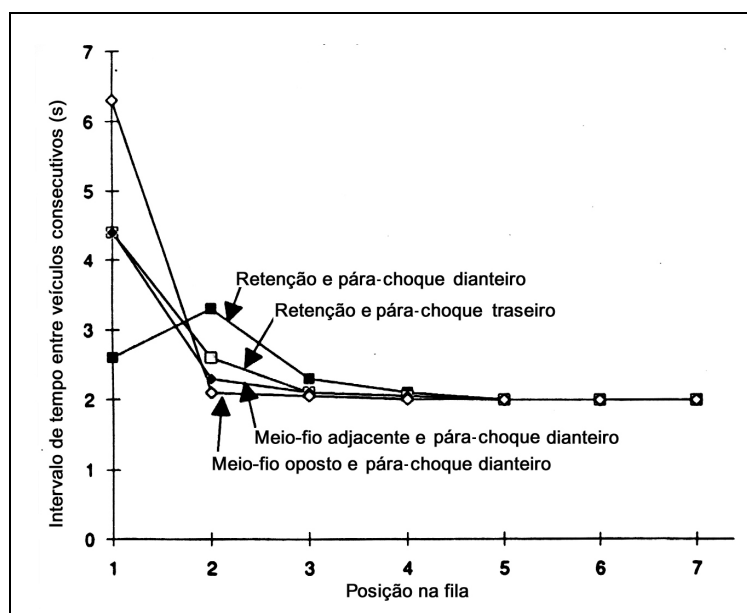


Figura 2.6: Influência da técnica de medição no comportamento da descarga (TEPLY e JONES, 1991)

A analogia com os sistemas usados em teoria das filas é feita em relação ao tempo de atendimento de um elemento em um canal. No caso da faixa de tráfego, podemos afirmar que o canal fica livre para ser usado por outro cliente (veículo) somente quando o veículo da frente desocupa completamente a retenção permitindo o veículo de interesse ocupar seu lugar. Assim, numa faixa de tráfego é razoável considerar o tempo de atendimento como sendo o tempo total desde a liberação da faixa de retenção, incluindo o deslocamento do veículo até ela, adicionado da sua efetiva passagem sobre a mesma. Por consequência ficam definidos o *headway* do veículo e o ponto de referência a ser usado, no caso, o extremo traseiro ou seu pára-choque traseiro. Por questão de praticidade, a adoção da roda traseira é a melhor aproximação de modo a não contar com efeitos de paralaxe durante a observação.

Outra forma de visualizar a questão é pensar no tempo de verde alocado para cada veículo individual na fila. É razoável pensar que o tempo de verde necessário para o desmanche de uma fila de veículos possa ser discretizado em parcelas de tempos de verde alocadas para cada um dos veículos individuais que a formam; assim, pode-se associar essas parcelas de tempo de verde com os *headways* dos respectivos veículos. Para o veículo na primeira posição da fila, o tempo de verde alocado deve ser da indicação verde até a completa passagem do veículo pela retenção; para o segundo, acrescenta-se o tempo necessário para que este também passe completamente pela retenção; e assim sucessivamente para os demais veículos na fila. Essa idéia é concordante com a definição do *headway* do primeiro veículo da fila (TRB, 2000), com a concepção de que o *headway* de um veículo é composto pelo intervalo de tempo correspondente ao espaçamento entre veículos somado ao intervalo de tempo da passagem física do veículo (MAY, 1990) e, finalmente, com as idéias básicas de atendimento de clientes em um sistema filas. Dessas considerações ficam estabelecidos em definitivo o conceito de *headway*, a seção de controle na via e o ponto de observação nos veículos.

Em virtude das diferenças daquilo que é medido em campo, é de se esperar que os resultados obtidos entre métodos diversos apresentem-se distintos. Essa investigação foi feita por TEPLY e JONES (1991), aplicando os métodos do HCM², ARRB e CCG a uma mesma amostra gravada em vídeo e comparando os resultados obtidos. Apesar de não apresentarem uma investigação estatística dos resultados, concluíram que parece não existir nenhuma relação consistente entre quaisquer fatores e a magnitude das diferenças encontradas entre os métodos. Em outras palavras, não encontraram uma forma de converter os valores de um método em valores de outro.

JACQUES *et al.* (1994) fizeram uma análise de variância em cima dos resultados dos métodos do HCM, ARRB, CCG e o do *Transport Research Laboratory* (TRL), aplicando os métodos simultaneamente na mesma amostra, através da gravação em vídeo da operação de seis faixas de tráfego. Similarmente, JACQUES (1995a) faz uma avaliação por análise de variância dos métodos do HCM, do ARRB e do TRL e

² O método do HCM usado por TEPLY e JONES (1991), JACQUES *et al.* (1994) e JACQUES (1995a) refere-se àquele descrito na edição de 1985 do HCM, sendo compatível com o método descrito na versão de 1994 (TRB, 1994), comentada previamente neste trabalho.

ainda da metodologia do HCM adaptada ao levantamento de tempos perdidos, considerando quatro faixas de tráfego. Em ambos os casos, concluiu-se que os métodos HCM, ARRB e TRL são equivalentes entre si no que se refere à precisão e magnitude, ou seja, os valores obtidos são intercambiáveis entre os métodos. O método do CCG, por considerar o período saturado desde o início do verde, incluindo o período de tempo perdido inicial, apresentou valores inferiores aos dos outros métodos.

O trabalho de comparação entre os métodos diretos feito por TEPLY e JONES (1991) usou equivalência veicular no fluxo de saturação observado, ou seja, o valor do fluxo de saturação foi corrigido para eliminar as diferenças de desempenho entre tipos de veículos. O procedimento adotado parece ser, senão irrelevante, capaz de alterar as relações entre os diferentes métodos, pois os fatores de equivalência não só são diferentes, como as classificações veiculares também o são. Uma vez que estava sendo usada a mesma amostra para os diferentes métodos testados, mantendo-se, portanto idêntica composição veicular quando da aplicação de cada método, não parece haver razão ou necessidade para que a conversão de *veíc/htv* para *ucp/htv* fosse feita. Entende-se daí que a conversão de unidades foi prejudicial à análise, não sendo possível avaliar qual a magnitude da influência do emprego de equivalência veicular na discrepância encontrada nos resultados. O efeito dessa influência pode ser sentido uma vez que os trabalhos de JACQUES *et al.* (1994) e JACQUES (1995a) não identificaram discrepância sensível entre os métodos. A diferença de conclusão entre o trabalho canadense e os brasileiros pode ainda ter sofrido a influência do processo de análise, já que o primeiro avaliou apenas as diferenças percentuais e os últimos aplicaram um teste estatístico.

No que se refere aos tempos perdidos, podemos dizer que os resultados encontrados por medição direta por SHANTEAU (1988) e JACQUES *et al.* (1994) indicam que o procedimento simplificado e largamente difundido de se adotar como tempo perdido total o valor do tempo de amarelo é bastante conservador, pois os trabalhos raramente detectaram valores superiores a três segundos. JACQUES (1995a), comparando os métodos da ARRB e do TRL por meio de análise de variância, não pode identificar diferenças estatisticamente significativas nos resultados obtidos.

Para efeito de se ter a noção da dimensão dos valores encontrados para os parâmetros de fluxo de saturação e de tempo perdido, reproduz-se a Tabela 2.2 seguinte:

Tabela 2.2: Valores de fluxo de saturação observados em interseções.

Ano	Cidade ou Estado	Tamanho da Amostra	Tempo Perdido no Início do Verde (s)	Fluxo de Saturação (ucp/h/faixa)	Headway de Saturação (s)
1967	Los Angeles, Santa Monica, California	6 Int.	2,05	1.470	2,45
1971	Ames, Iowa	4 Int.	0,75	1.572	2,29
1976	Nationwide	-	-	1.682	2,14
1983	Lexington, Kentucky	-	1,40	1.651	2,18
1986	Lawrence, Kansas	-	3,04	1.827	1,97
1986	Austin, Dallas, Houston	8 h 3 Int.	-	2.000	1,8
1986	Chicago, Houston, Los Angeles	7 Int.	1,31	1.875	1,92
1987	Houston (pico)	30 h 2 Int.	-	1.896	1,9
1987	Houston (fora de pico)	30 h 2 Int.	-	1.832	1,97
1987	Los Angeles (pico)	34 h 2 Int.	-	1.936	1,86
1987	Los Angeles (fora de pico)	34 h 2 Int.	-	1.785	2,02
1988	Chicago	6,25 h 10 Int.	-	2.000	1,8
1988	California, New York, Texas (faixa única)	5 Int.	-	1.791	2,01
1988	California, Illinois, New York, Texas (faixas múltiplas)	7 Int.	-	1.937	1,86
1989	College Station, Texas	30 h 2 Int.	1,31	1.905	1,89
1991	Dallas	25 h 4 Int.	-	1.910	1,88
1992	Florida	16 Int.	-	1.840	1,96

FONTE: TRB (2000)

Não levando em consideração as diferenças temporais e espaciais, bem como dos métodos de medição utilizados, valores de fluxo de saturação observados no Brasil parecem ser ligeiramente menores que aqueles apresentados na Tabela 2.2:

Tabela 2.3: Valores de médios de fluxo de saturação observados no Brasil.

Cidade/Estado	Fluxo de Saturação (ucp/h/faixa)	Coeficiente de Variação
Rio de Janeiro/RJ ¹	1.399	0,102
São Paulo/SP ¹	1.451	0,165
São Carlos/SP ¹	1.450	-
Fortaleza/CE ²	1.848	0,11

FONTE: ¹SETTI e BARBUTO (1994); ²OLIVEIRA NETO *et al.* (2002)

2.3.10. Equivalência Veicular – Unidades de Carros de Passeio

Um procedimento comum é o de converter os valores da taxa horária do fluxo de saturação de unidades de veículos para unidades de veículos padrão. Essas unidades são chamadas de unidades de carro de passeio (*ucp*), pois o automóvel é normalmente adotado como a referência padrão. O procedimento é rotineiro, mas a prática nem sempre é clara quanto à sua finalidade e aplicação.

A mistura de tipos de veículos em uma fila de semáforo perturba a descarga da fila devido às características individuais desses veículos, como suas dimensões, relação peso/potência e capacidade de manobra. WEST e THURGOOD (1995) comentam que carros de passeio são capazes de acelerar mais que duas vezes mais rápido do que caminhões pesados em greide de 0% (**ver** Tabela 2.4). A tendência é de que veículos maiores sejam mais lentos, com sua capacidade de manobra sendo restringida pelas características do ambiente urbano voltado a pequenos e médios veículos.

Tabela 2.4: Características de peso e potência de tipos de veículos

Veículo	Peso sem carga (kg)	Potência nominal (kW)	Peso/Potência (kg/kW)
Carro de passeio	1.540	78	19,74
Caminhonete	1.905	130	14,65
Caminhão de 2 eixos/6 pneus	4.535	130	34,88
Caminhão semi-trailer	11.340	242	46,86

FONTE: modificado de TRB (2000)

Converter unidades de veículos em unidades de carros de passeio significa que o fluxo de saturação assim obtido não mais depende da composição do tráfego (HEYDECKER, 1982). Esse recurso se torna valioso quando desejamos fazer análises comparativas, além de permitir a reutilização de medições. Como os efeitos da composição são eliminados, quando se comparam fluxos de saturação de diferentes aproximações, as diferenças observadas podem ser atribuídas a fatores de atrito externos como as características físicas do local ou condições do tempo. Tratando-se de uma única aproximação, a vantagem de se trabalhar em unidades de carro de passeio é que, levando em consideração que o único fator alterado é a composição de tráfego, revertendo-se a conversão, pode-se obter o valor em unidades de veículos do fluxo de saturação a partir de um levantamento feito sob uma composição veicular qualquer no local.

Alguns procedimentos também incluem uma equivalência quanto às manobras sendo executadas, dessa forma elimina-se do fluxo de saturação a influência das

conversões dos veículos, que passa a ser expresso em *ucd* ou unidades de carros diretos (*through car units, tcu*). A analogia com a *ucp* é estimar o número de carros de passeio em tráfego direto que passaria pela faixa de retenção no mesmo intervalo de tempo que o tráfego misto (quanto à classe veicular e distribuição de movimentos). As vantagens são as mesmas da conversão para *ucp*: análise comparativa e possibilidade de reutilização de um levantamento de fluxo de saturação quando as únicas condições variantes são a composição e, nesse caso, a distribuição de movimentos.

Fazer a equiparação de um fluxo de saturação em veículos para unidades de carro de passeio é estabelecer o número de carros de passeio que cruzariam a faixa de retenção no mesmo período de tempo que o fluxo misto o fez. É prática comum tentar avaliar a contribuição de cada tipo individual de veículo no tempo de descarga da fila; assim os diversos métodos classificam os veículos quanto ao seu porte, podendo variar desde duas classes, como o método do ARRB (AKÇELIK, 1993), até mesmo oito, como o método do DENATRAN (1982).

Os métodos de capacidade e programação semafórica trazem consigo valores estimados para a equivalência entre veículos, portanto, valores médios obtidos por pesquisas nos locais de procedência dos métodos. Esses valores são aplicados a qualquer situação, mesmo sabendo-se que fatores de atrito, de características locais, podem afetar de forma específica diferentes classes de veículos na descarga da fila, mudando a relação de equivalência entre classes. TARKO e TRACZ (2000) apresentaram como resultado de seus estudos a Tabela 2.5, da qual se infere alguma interferência de características locais nos fatores de equivalência:

Tabela 2.5: Variação de Fatores de Equivalência

Categoria Veicular	Fator de Equivalência	Desvio Padrão entre Sítios	Coefficiente de Variação
<i>Carros de passeio e vans</i>	<i>1</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
<i>Caminhões monobloco e ônibus</i>	<i>1,6</i>	<i>0,1</i>	<i>0,06</i>
<i>Caminhões-trailler e ônibus articulados</i>	<i>2,3</i>	<i>0,2</i>	<i>0,09</i>
<i>Todos os veículos pesados</i>	<i>1,7</i>	<i>0,2</i>	<i>0,12</i>

FONTE: Adaptado de TARKO e TRACZ (2000).

Sendo os fatores de equivalência característicos de cada local, um método para determiná-los é necessário, mas procedimentos de determinação direta de fluxo de saturação não têm um método de equivalência veicular associado. Por isso, métodos

independentes e diversificados foram desenvolvidos. ANDRADE (1994) lista três processos: método do espaçamento, de Webster e de regressão linear.

O método do espaçamento, ou da proporção de *headways*, é o método mais empregado (BENEKOHAL e ZHAO, 1996), por consequência de sua simplicidade e facilidade de compreensão. O método consiste em se determinar o *headway* médio para cada classe de veículo, com o fator de equivalência sendo obtido pela razão entre o *headway* médio de uma classe veicular e o *headway* médio do carro de passeio. Segundo BENEKOHAL e ZHAO (1996), foi o procedimento adotado pelo HCM em suas edições de 1985 e de 1994 que sugerem, respectivamente, os valores de 1,5 e 2,0 *ucp* para veículos pesados. Os autores citados criticam o método do espaçamento por não considerar o atraso total que os veículos pesados causam nas interseções.

O método de Webster, segundo ANDRADE (1994), faz a proporção entre valores medidos de fluxo de saturação. O fator de equivalência é obtido pela razão entre o fluxo de saturação em que havia a presença de veículos da classe de interesse e o fluxo de saturação em que só havia carros de passeio.

Os métodos de regressão utilizam regressão linear múltipla e incluem em um só modelo, as relações entre fluxo de saturação, tempos perdidos e fatores de equivalência (ANDRADE, 1994). Uma equação típica dessa relação é apresentada por ANDRADE (1994) como:

$$S \cdot i = S \cdot d \cdot ti + S \cdot d \cdot tf + \sum_1^n a_k \cdot N_k \quad (2.4)$$

onde,

S : fluxo de saturação em *ucp/h*;

i : intervalo de tempo considerado (s);

ti : tempo perdido no início da fase (s);

tf : tempo perdido no fim da fase (s);

d : variável que assume valor um nos primeiros e últimos segundos da fase e zero nos demais intervalos;

N_k : número de veículos da classe k observados no intervalo;

a_k : coeficiente da regressão e fator de equivalência obtido.

A bibliografia de Engenharia de Tráfego contém também outros métodos alternativos. MOLINA (1987) propôs um método baseando-se no atraso adicional causado por um veículo pesado na fila de carros de passeio, pois o autor acredita que o método de proporção de *headways* não considera o atraso infligido pela presença de um veículo pesado aos veículos em fila atrás do mesmo. Simplificadamente, o autor calcula o fator de equivalência como a razão entre o tempo de viagem do último automóvel atrasado por um veículo pesado e o tempo de viagem por um automóvel na mesma posição de uma fila formada só por carros de passeio. Os resultados encontrados foram um fator de equivalência de 1,6 para caminhões leves (dois eixos), 2,0 para caminhões de três eixos e um valor variável para caminhões-trailler de cinco eixos dependendo de sua posição na fila (valor médio de 3,7). WEST e THURGOOD (1995) ampliaram o processo para contemplar vários tipos de veículos pesados, efetuando manobras de conversão e em várias posições na fila.

BENEKOHAL e ZHAO (1996) aplicaram um refinamento ao processo de MOLINA (1987), trabalhando com estimativas de atraso veicular em um modelo calibrado de simulação no TRAF-NETSIM. Os autores obtiveram os valores dos fatores de equivalência observando quantos carros de passeio seriam necessários para substituir um veículo pesado gerando o mesmo valor de atraso que este último causa à fila. Os resultados mostraram haver uma correlação do valor do fator de equivalência com o volume de tráfego e o percentual de veículos pesados, dessa forma a *ucp* é função dessas últimas variáveis (ver Figura 2.7).

TARKO e TRACZ (2000) analisaram o efeito adicional causado por veículos pesados sobre veículos de pequeno porte, encontrando uma relação linear entre o percentual de veículos pesados e o *headway* médio de carros de passeio, o que comprova que a presença de veículos pesados afeta o *headway* dos demais veículos presentes na descarga da fila, ratificando a tese apresentada por MOLINA (1987). Esses resultados indicam que a aplicação do método de proporção de *headways* não eliminaria por completo os efeitos da composição veicular, uma vez que a medição dos *headways* estaria influenciada pelos efeitos dos veículos pesados (ver Figura 2.8) que vão além do que o simples tempo que estes levam para cruzar a faixa de retenção. Além disso, estabelece que os fatores de equivalência devem ser função da composição do tráfego.

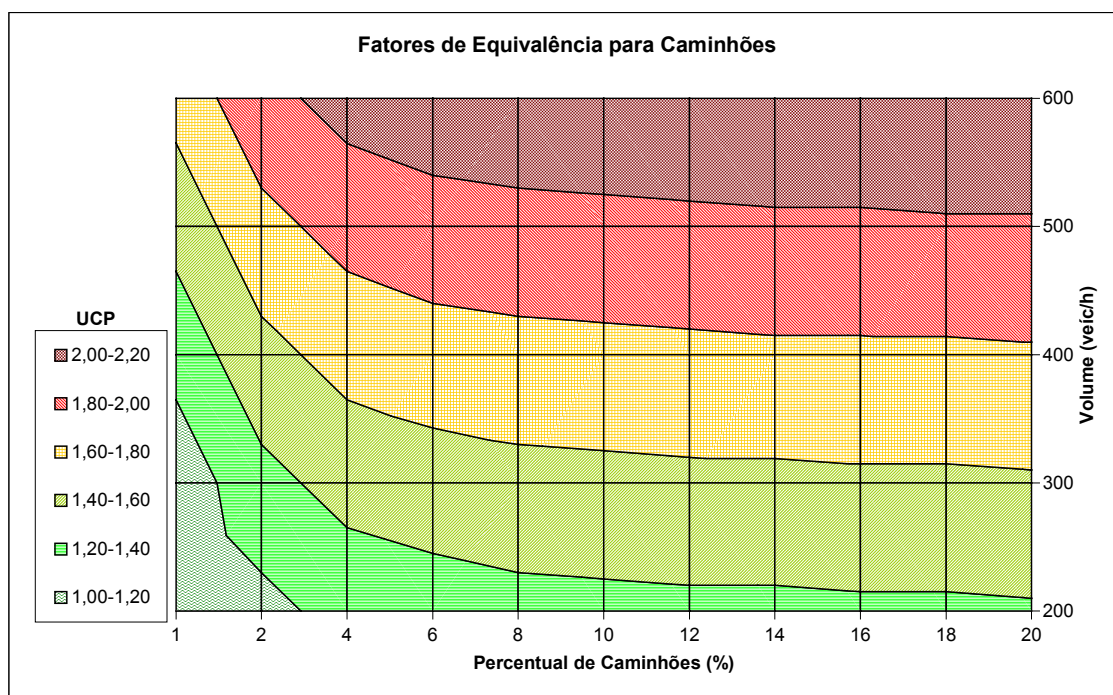


Figura 2.7: Valores de UCP para caminhões-trailer, segundo BENEKOHAL e ZHAO (1996)

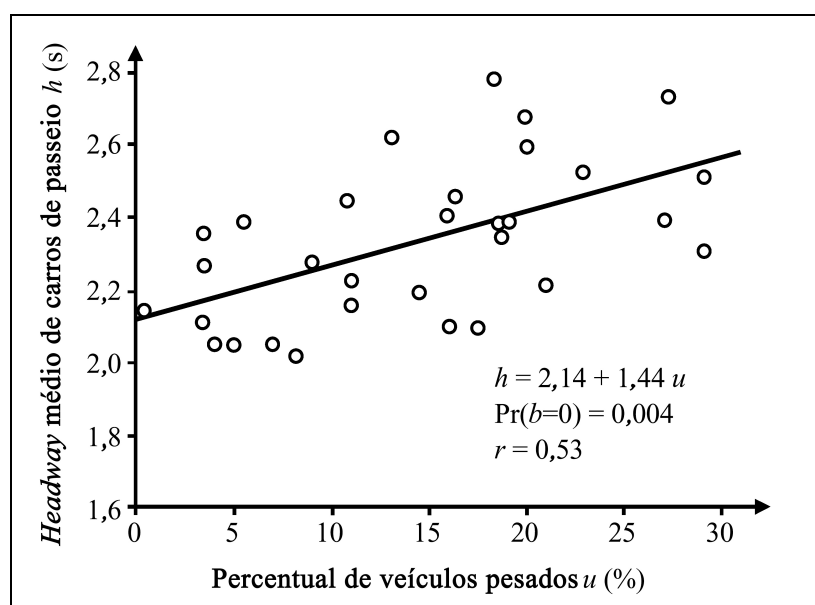


Figura 2.8: Influência de veículos pesados da descarga da fila (TARKO e TRACZ, 2000)

No Brasil, MACHADO NETO e SETTI (1993) usaram um processo de minimização das diferenças da composição do tráfego de cada ciclo e a composição média observada durante o período de coleta de dados. Os autores obtiveram um

sistema de equações simétrico de m equações e m incógnitas cuja solução era o conjunto de fatores de equivalência veicular procurado.

Considerando a variação espacial da equivalência veicular, ANDRADE (1994) fez uma análise de fatores de equivalência obtidos por medições diretas em seis cidades brasileiras, e encontrou valores estatisticamente diferentes para o fator de equivalência de ônibus entre as cidades do nordeste e do sudeste. Apesar de que para as demais classes de veículos não foram encontradas diferenças significativas, os valores se mostraram diferentes daqueles sugeridos pelo DENATRAN (1984).

Deve-se atentar que a diversidade de métodos gera também uma diversidade de fatores de equivalência (ver Tabela 2.6). Isso quer dizer que valores de fluxo de saturação em ucp/h , nem sempre podem ser comparados entre si, pois métodos diferentes de correção dos valores em unidades de veículos podem ter sido aplicados. Além disso, para efeito de estudos comparativos de desempenho operacional de interseções, fica claro que é preciso o uso de fatores de equivalência específicos para cada local, uma vez que só assim se pode garantir a contemplação correta e completa dos efeitos externos na descarga veicular em semáforos.

Tabela 2.6: Fatores de Equivalência Veicular

Classe Veicular	DENATRAN ¹	CCG ²	HCM ²	ARRB ²	ANDRADE ³	S. Carlos ⁴
Carro de Passeio	1	1	1	1	1	1
Caminhão Leve	1	1,5	2	2	1,36	1,4
Caminhão Pesado	1,75	2,5	2	2	2,01	2,2
Ônibus	2,25	1,75	2	2	NE: 1,46 SE: 1,72	1,8
Motocicleta	0,33	0,5	1	1	0,46	0,4

FONTE: ¹DENATRAN (1984); ²TEPLY e JONES (1991); ³ANDRADE (1994); ⁴SETTI e BARBUTO (1994).

Como o conceito de fluxo de saturação, o conceito de equivalência veicular é confuso quando o consideramos isoladamente de sua aplicação. Os fatores de equivalência podem ser aplicados para converter uma medição direta do fluxo de saturação ou para mensurar os efeitos da composição, e assim obter um fator de correção para o valor básico do fluxo de saturação usado nas fórmulas empíricas.

Uma nota deve ser feita quanto ao uso dos fatores de equivalência. AKÇELIK (1993) alerta enfaticamente que as unidades de carros de passeio estão relacionadas à descarga de fila de veículos e não devem ser usadas para nenhum outro propósito que não seja em fluxo de saturação. Ele comenta a prática comum de se converter a

demanda veicular para veículos equivalentes, quando o correto seria mantê-la em veículos e converter o fluxo de saturação também para *veíc./h*. Essa prática de usar a demanda em veículos equivalentes gera erros de resultados nos métodos que a utilizam, por exemplo, a avaliação do tamanho de filas fica comprometida, pois a equivalência empregada está relacionada a uma proporção de *headways* (tempo) e não de ocupação física da via (espaço). Além disso, outras medidas de desempenho ficam sem sentido, como o consumo de combustível por *ucp* ou a disponibilidade de *gaps* em conversões desprotegidas. Também fica difícil de se avaliar o número de paradas e o atraso médio por pessoa, uma vez que a taxa de ocupação por veículo não pode ser aplicada à demanda em *ucp/h*.

HEYDECKER (1982) conseguiu mostrar quanto do atraso médio é subestimado pela fórmula de Webster quando se emprega a demanda em veículos equivalentes, o que deixa claro que, se uma variedade de métodos de cálculo de tempos de semáforo se baseiam nessa fórmula, os tempos obtidos resultam insuficientes para atendimento da demanda, bem como a capacidade da via ficaria superestimada em métodos como do HCM, que também a usa na estimativa do atraso médio veicular.

2.3.11. Variabilidade do Fluxo de Saturação

O conceito de fluxo de saturação é baseado nas premissas de estabilidade e constância, mesmo que elas não sejam explícitas, mas sim adotadas. A variabilidade do fluxo de saturação é difundida em sua característica espacial, mas não temporal. Como os métodos tendem a privilegiar a estimativa do fluxo de saturação por meio de fórmulas que partem de um valor básico a ser corrigido, e em alguns deles a fórmula primária tem como único parâmetro a largura da aproximação ou faixa, surge a imagem de que a taxa de descarga veicular é um valor bastante estável ao longo do tempo. A premissa pode ser válida para o valor básico obtido para condições ideais padrões de faixas de 3,6m de largura e fluxo homogêneo de carros de passeio em tráfego direto, sem influência de greide, estacionamento e conversões. Em situações cotidianas, essas condições, ou mesmo a constância de qualquer condição de tráfego, não podem ser esperadas.

Uma característica que passa despercebida é que os valores de *headways* saturados que geram a curva *fluxo x tempo* do modelo adotado por WEBSTER (1964) são valores médios e, portanto fica implícita a existência de uma dispersão dos valores

desses parâmetros. STOKES (1989) lista uma série de elementos que afetam o fluxo de saturação em interseções semaforizadas; aqueles que apresentam variações temporais podem ser responsabilizados pela dispersão nos valores de fluxo de saturação. Observa-se pela Tabela 2.7 que os fatores podem atuar em curto prazo, de ciclo para ciclo, como no caso das características do tráfego, em médio prazo com tendências definidas ao longo do dia, como no caso das condições operacionais, e mesmo de forma aleatória, como as condições climáticas.

Tabela 2.7: Principais fatores que afetam o fluxo de saturação

Condições operacionais	<i>Programação semafórica</i> <i>Características de pico</i> <i>Atividades de estacionamento</i> <i>Operação de parada de ônibus</i>
Características do tráfego	<i>Composição de tráfego</i> <i>Movimentos de conversão</i> <i>Atividade de pedestres</i>
Fatores ambientais e outros	<i>Clima</i> <i>Comportamento do motorista</i> <i>Condições da superfície da pista</i> <i>Uso do solo lindeiro</i>

FONTE: modificado de STOKES (1989)

JACQUES (1995b) investigou a dispersão de medições do fluxo de saturação de forma a poder estimar o tamanho da amostra necessária para se obter uma medida dentro de um valor de erro especificado. Entre seis locais de estudo em Brasília, a autora registrou coeficientes de variação no intervalo de 0,091 a 0,539, considerando três métodos de medição. Para esses locais, o tamanho de amostra requerido, em um nível significância de 5%, para um erro de 10%, variava de 5 a 120 observações. A autora cita ainda um trabalho em que foram encontrados coeficientes de variação da ordem de 30% em suas pesquisas. Além desses, OLIVEIRA NETO *et al.* (2002) registram que a análise dos fluxos de saturação em Fortaleza, obtidos ciclo a ciclo por faixa de tráfego, apresentou um intervalo de coeficiente de variação de 5% a 35%. Tendo como princípio que só faria sentido calcular fluxo de saturação para condições estáveis de tráfego, esses estudos comprovam a variabilidade do fluxo de saturação, o que sugere que esses parâmetros sejam analisados estatisticamente como variáveis aleatórias, buscando-se identificar a melhor estimativa para ser usada em um modelo de tráfego, bem como os efeitos dos fatores que os afetam.

Quando adotamos o modelo tradicional de descarga usada por WEBSTER (1964) (ver Figura 2.1), o fluxo de saturação é independente da temporização semafórica, porém há algumas indicações que o modelo tradicional não traduz o comportamento de descarga adequadamente, e a independência do tempo de verde não é sustentável. TARKO e TRACZ (2000) estudaram cerca de 1.100 ciclos semafóricos de 21 faixas de tráfego constatando que o fluxo de descarga de veículos cresce acentuadamente até os seis primeiros segundos de verde, passando a crescer mais suavemente por mais 20 segundos quando então estabiliza. TEPLY e JONES (1991) complementam o trabalho anterior afirmando que a experiência canadense indica que a descarga veicular começa a decair entre 30 a 50 segundos de verde, em situações saturadas (ver Figura 2.9).

A influência do tempo de verde é constatada por LI e PREVEDOUROS (2002) de forma indireta no Havaí, concluindo que longas filas de veículos não descarregam tão eficientemente quanto filas curtas, e que o valor ideal de 1.900 ucp/h/faixa adotado pelo HCM 2000 (TRB, 2000) está superestimando situações de tempo de verde superior a 40 segundos. JACQUES (1995b), no outro extremo, observou que o fluxo de saturação apresentava uma grande variabilidade para tempos de verde muito curtos, da ordem de 15 segundos, requerendo um número alto de observações para se determinar o valor médio estatisticamente adequado. Baseando-se nesses resultados, pode-se deduzir que a adoção de valores fixos de fluxo de saturação em sistemas adaptativos, como preconizada pelo sistema SCOOT, implica na introdução de uma parcela de ineficiência em lidar com filas de tamanhos variáveis de veículos, requerendo-se que se estabeleçam valores que sigam as tendências dos comprimentos de filas e duração de verde ao longo do tempo.

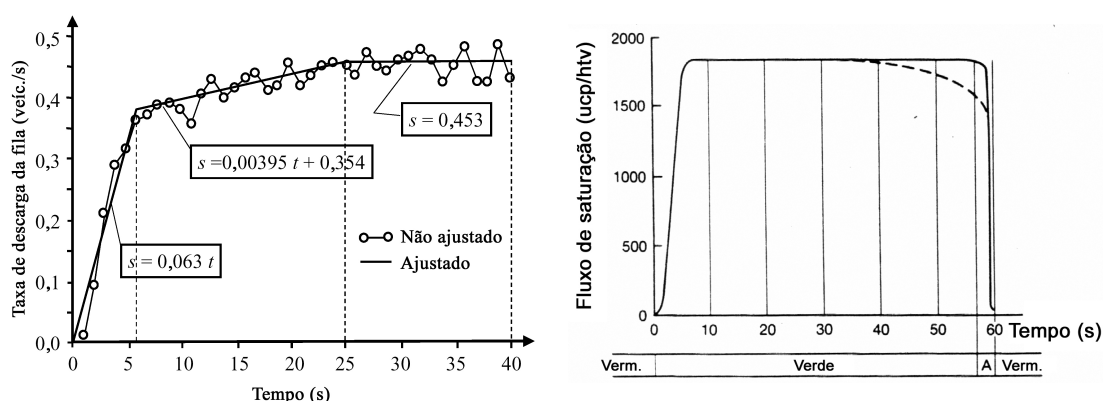


Figura 2.9: Discrepâncias do modelo original de Webster de fluxo de saturação

Mais óbvia é a influência de interrupções físicas de operações de parada de ônibus e estacionamento de veículos nas proximidades de um cruzamento, uma vez que esses eventos criam um estrangulamento na via gerando, senão obstrução, uma aproximação lateral maior entre veículos e, por conseguinte, um maior atrito e uma redução na taxa de descarga. Apesar de ser um fator normalmente aceito como redutor do fluxo de saturação e até mesmo previsível, o processo adotado de calibração única do SCOOT não é capaz de incluir a variação da descarga decorrente de variações dessas operações, permitindo embutir apenas os efeitos detectados no período em que se deu a calibração.

Condições climáticas foram identificadas por NIITYMÄKI e PURSULA (1997), na Finlândia, como responsáveis por consideráveis variações nos valores de fluxo de saturação. Os autores detectaram que sob chuva, o fluxo de saturação é reduzido em 12% e a simples condição de pista molhada o reduz em 5%. O efeito de redução de 5% também foi observado em períodos noturnos em comparação com os valores detectados em períodos de luz do dia. Essas diferenças de valores observadas por condições climáticas e condições de iluminação natural foram também detectadas por BRANSTON (1979), cujos resultados são reproduzidos por STOKES (1988; 1989) (ver Tabela 2.8).

STOKES (1988; 1989) cita ainda o trabalho de BRANSTON (1979) no que se refere a diferenças observadas entre períodos de pico e entre-pico, sendo o fluxo de saturação 9% maior para horários de pico. Referendando a informação, STOKES (1989) resgata resultado do próprio Webster que observou valores 6% menores em horários fora do pico. NIITYMÄKI e PURSULA (1997) acharam valores 10% superiores de fluxo de saturação em períodos de pico em vias arteriais fora do *CBD*³. TEPLY e JONES (1991) registraram em suas pesquisas um valor médio de 1.820 ucp/h no pico da manhã contra 1.690 ucp/h no pico da tarde. As diferenças observadas por período do dia são também extensíveis ao tempo perdido no início do verde, com LI e

³ *Central Business District*: centro comercial de uma cidade onde se concentram serviços, comércio e atividades financeiras.

PREVEDOUROS (2002) detectando maiores tempos perdidos para condições fora de pico.

Tabela 2.8: Fluxo de saturação (ucp/h) em diferentes períodos do dia e condições de clima

Local	Período de Pico*		Fora de Pico*	
	Luz do Dia	Noite	Seco	Chuvoso
1	1771	-	1653	-
2	1757	1658	1558	-
3	1767	1661	1629	-
4	2007	1917	1828	1691
5	2092	1897	1881	-

FONTE: modificado de STOKES (1989)

*As diferenças observadas são significativas ao nível de 5%

As diferenças observadas entre períodos do dia e entre condições climáticas podem ser explicadas por fatores relacionados ao comportamento humano. O estado de alerta e a motivação de motoristas individuais interferem na descarga veicular quando influenciam no tempo de reação ao sinal verde, escolha da velocidade de tráfego e espaçamento em relação ao veículo da frente. Há uma expectativa, conforme mostram TORBIC e ELEFTERIADOU (2000), de que motoristas em deslocamentos com origem ou destino a trabalho dirijam de modo mais agressivo que aqueles sem compromissos com horário determinado. Além disso, motoristas em deslocamentos por motivo de trabalho tendem a seguir uma rota particular todos os dias, tornando-se familiarizados com as características operacionais daquela rota e, portanto, mais aptos a usar a via de forma mais eficiente que correntes de tráfego formadas por motoristas em deslocamentos recreacionais.

É interessante notar que a diferenciação comportamental de classes de motoristas é adotada no HCM (TRB, 2000) nos capítulos que tratam de *freeways* e rampas de acessos, sendo a capacidade de condução da via reduzida por um fator que é função do percentual de veículos que trafegam com outros fins que não seja deslocamento para trabalho. No entanto esse efeito não é considerado em seu método de capacidade de interseções semaforizadas. TORBIC e ELEFTERIADOU (2000) citam trabalhos sobre o impacto de classes de motoristas na capacidade de diversas facilidades de transportes, incluindo um estudo na Flórida que detectou, que conforme a proporção de motoristas não-locais crescia de 0% a 100%, o fluxo de saturação se reduzia a 81% daquele proposto pelo método do HCM. Surpreendentemente, TORBIC e ELEFTERIADOU (2000) ao analisarem as aproximações de uma única interseção, não foram capazes de identificar diferenças nos valores de fluxo de saturação entre os picos

da manhã e da tarde ao longo do dia, nem mesmo entre os picos de dias úteis da semana, detectando apenas uma variação na distribuição amostral dos *headways* em um dia específico da semana.

O fator comportamental parece gerar variabilidade e propiciar a existência de tendências nos valores do fluxo de saturação conforme o grau de homogeneidade de classes de motoristas compondo filas sucessivas em semáforos, traduzindo-se nas variações observadas de ciclo a ciclo, entre períodos do dia e entre dias da semana, possivelmente. Da mesma forma, variações no grau de homogeneidade da composição veicular e distribuição de movimentos resultam em variações ou tendências de que o valor do fluxo de saturação oscile nas proximidades de um determinado patamar.

As diferenças comportamentais individuais dos motoristas associadas ao desempenho mecânico de seus veículos contribuem diretamente com a variabilidade observada no fluxo de saturação e distribuição de *headways*. A Figura 2.10 apresenta a dispersão de valores de *headway*, reproduzida em outros estudos como em LI e PREVEDOUROS (2002), mostra que para uma dada observação existe um grande número de possibilidades de comportamento de descarga de veículos individuais, cada uma delas resultando em um valor médio tomado como o *headway* de saturação e, por conseguinte, o fluxo de saturação.

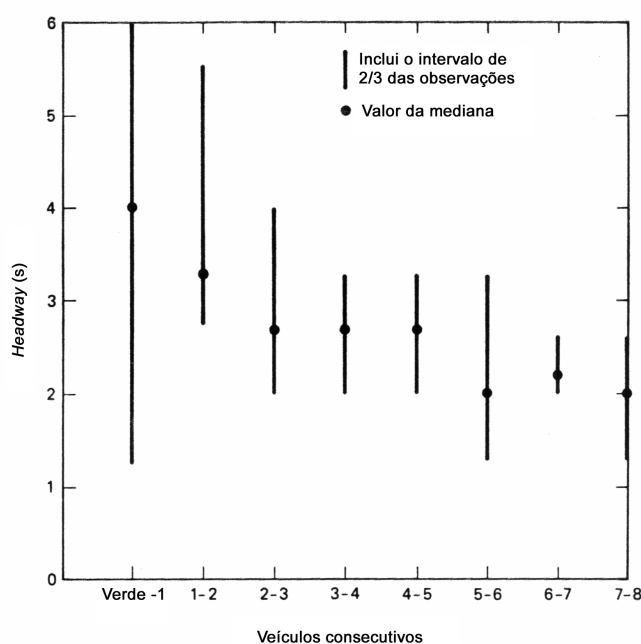


Figura 2.10: Dispersão dos valores de *headways* (MAY, 1990)

A influência da presença de veículos pesados foi identificada por MOLINA (1987), por TARKO e TRACZ (2000) e ROBERTSON e ABU-LEBDEH (2002), comprovando que essa classe de veículos afeta o *headway* de descarga dos demais veículos, a ponto de McMAHON *et al.* (1997) observarem uma redução de 8% a 11% no fluxo de saturação na presença de um único veículo pesado na fila. Tendências diárias de flutuação do fluxo de saturação podem ser sugeridas considerando que, no ambiente urbano, a demanda por classe de veículos é afetada pelas atividades comerciais. É possível observar horários do dia em que a presença de veículos pesados é mais intenso, como o horário de abastecimento de comércio e horários de entrada e saída de trabalho, quando a demanda por ônibus cresce e o número desses veículos nas ruas é alterado para acompanhar essa demanda.

Outro fator que pode gerar tendências diárias é a alternância direcional de fluxos de tráfego ao longo do dia, conforme se dão os deslocamentos com destino ou origem no trabalho. As conseqüências são a alternância das aproximações semaforicas mais demandadas e alteração de tempos de semáforos que, em conjunto, como foi comentado previamente, afetam nos valores observados do fluxo de saturação.

Associada à variação direcional de fluxo, tem-se também a variação na distribuição de movimentos na interseção, uma vez que a alternância de desejos de destinos de viagens pode gerar predominâncias de fluxos de conversão em determinados horários do dia. Veículos em movimentos de conversão afetam a descarga veicular por serem mais lentos do que veículos em movimento direto, portanto gerando um fator reducional no fluxo de saturação reconhecido desde WEBSTER (1964) e corroborado pelo ARRB (AKÇELIK, 1993) e HCM (TRB, 2000), por exemplo. Apesar de documentado, esse efeito não pode ser incorporado com o processo de calibração única do SCOOT na operação desse sistema.

Outro fator redutor que se pode supor semelhante à variação diária de percentual de conversões é aquele investigado por McCOY e HEIMANN (1990) de uma parcela do fluxo de tráfego sendo desviado para e de proximidades da fila em descarga, resultados que podem se especular extensíveis a quadras curtas ou em ocorrências de longas filas que ultrapassem os limites da quadra.

STOKES (1989) registra as três equações que BRANSTON (1979) sugere para a estimativa de fluxo de saturação em função da largura da via, uma para cada período específico do dia: pico diurno, pico noturno e fora de pico. Mas procedimentos analíticos para estimativa do fluxo de saturação normalmente utilizam uma única fórmula, confiando-se que essas variações serão então consideradas pelos fatores associados à composição e à distribuição do tráfego, deixando outros fatores de lado como os comportamentais, de grandeza da demanda e de clima.

Os trabalhos de AL-GHAMDI (1999) e OLIVEIRA NETO *et al.* (2002), que não identificaram diferenças na descarga veicular entre períodos do dia, podem ter seus resultados justificados pelas metodologias empregadas. A crítica ao trabalho de AL-GHAMDI (1999) vem da crítica de TORBIC e ELEFTERIADOU (2000) ao trabalho no qual AL-GHAMDI (1999) se espelha. TORBIC E ELEFTERIADOU (2000) consideram que comparar os *headways* para cada posição de veículo para dois picos não permite detectar uma diferença estatística significativa nas taxas de fluxo de saturação entre esses picos. Por sua vez, OLIVEIRA NETO *et al.* (2002) compararam os fluxos de saturação entre três picos de diversas faixas de tráfego de aproximações com características geométricas semelhantes, classificando-as apenas pelo período em que foi coletada a amostra, sendo que as amostras coletadas nos diferentes picos eram provenientes de diferentes faixas de tráfego. Pode-se especular que a desconsideração de outros fatores intervenientes no valor de fluxo de saturação, característicos daquele período do dia em cada faixa individual, tenha gerado uma dispersão nos valores observados, enfraquecendo o poder de detecção de diferenças num teste estatístico de análise de variância devido ao alargamento provocado no intervalo de confiança em torno da média. Em outras palavras, o resultado de OLIVEIRA NETO *et al.* (2002) mostra que o valor médio do fluxo de saturação, considerado espacialmente no meio urbano, não varia ao longo do dia, mas o método empregado não analisou se as variações positivas experimentadas em um grupo de faixas de tráfego foram anuladas por variações negativas no grupo complementar no mesmo período considerado. Dessa crítica pode-se dizer que variações temporais do fluxo de saturação só podem ser efetivamente constatadas se a análise se der comparando-se amostras provenientes de uma mesma faixa de tráfego em diferentes períodos do dia.

2.3.12. Abordagem do SCOOT da Variabilidade do Fluxo de Saturação

A orientação geral sobre o fluxo de saturação, *saturation occupancy* ou SATOCC, usado no modelo de tráfego do SCOOT, é que esse parâmetro é invariável em curto prazo. O manual de calibração (TRL, 2000b) diz que o SATOCC apresenta uma redução em períodos fora do pico, porém a adoção de um valor único ao longo do dia não degradaria o padrão operacional do sistema; similar à postura de WEBSTER (1964) que considerava que a variação diária não afetava a estimativa de atraso pela fórmula proposta por ele. Essa filosofia de invariabilidade foi adotada na calibração efetuada em Fortaleza que contemplou apenas um único período do dia de um dia útil de semana.

O manual de calibração do modelo de tráfego do SCOOT, no que se refere ao parâmetro SATOCC, lista um conjunto de sete situações em que o valor adotado deveria ser reavaliado. Dessas situações, as proporções de movimentos e de composição veicular podem ser consideradas como variáveis ao longo do dia, enquanto as demais envolvem modificações físicas das instalações de equipamentos e do local, bem como mudanças de regulamentação de tráfego. É interessante notar que, em princípio, o SCOOT não é capaz de detectar flutuações no parâmetro SATOCC, uma vez que não tem equipamentos de medição de descarga de filas. Portanto, a calibração deve definir a taxa de descarga mais apropriada para o comportamento local. Porém, além de estabelecer a taxa de descarga, como as unidades básicas usadas são LPU, a calibração está também definindo a relação entre a demanda em LPU detectadas no laço, a cerca de 100m de distância do ponto onde se determina o valor da taxa de descarga, e a taxa de atendimento em LPU na retenção. Essa peculiaridade adiciona um fator a ser considerado que é se a relação de LPU entre demanda e descarga permanece temporalmente fixa, ou se os fatores considerados na variação do fluxo de saturação afetam diferentemente o comportamento do tráfego junto ao laço e em desmanche de fila junto ao semáforo.

A partir da versão 2.4 do sistema SCOOT, foi disponibilizado um recurso para medição do SATOCC em tempo real. O recurso chamado de SOFT (*Saturation Occupancy / Flow Techniques*) utiliza os laços de detecção das interseções adjacentes, a jusante da aproximação considerada, para estimar valores do SATOCC. Apesar de que a versão corrente do sistema seja a 4.2, o emprego do recurso não é difundido segundo

informações da equipe técnica do fornecedor do sistema, provavelmente devido à série de condições que devem ser atendidas para que o recurso opere corretamente, por exemplo: o tempo de percurso entre a retenção e o laço a jusante deve ser inferior a dez segundos; não devem ocorrer congestionamentos a jusante da retenção a ponto de interferir com a descarga da fila; não devem ocorrer operações de transporte público, atividades de estacionamento, de travessia de pedestres ou qualquer outro fenômeno que afete o tempo de viagem entre a retenção e o laço detector, para citar os mais usuais.

Segundo o manual de implementação das SOFT (TRL, 2000c), a importância da correção nos valores de SATOCC é de que a eficiência do sistema SCOOT depende da acurácia do valor desse parâmetro. Mas a importância atribuída a uma boa calibração dos parâmetros é variável na documentação do sistema. No manual de calibração (TRL, 2000b) já foi dito que variações diárias do SATOCC entre períodos do dia não afetariam a operação do sistema e o manual de ajustes de calibração (TRL, 2000d) diz que o algoritmo do sistema é capaz de tolerar variações das condições normais de tráfego, tratando-se do SATOCC, até mesmo considerando condições adversas de clima. Diante dessas afirmações, surpreende, mais do que a experiência prática não validá-las, a orientação no mesmo documento (TRL, 2000d) que durante o processo de calibração devam ser incluídos os fenômenos transitórios recorrentes do local como a presença de veículos pesados em fila e operações de estacionamento de veículos.

Não havendo resultados quantitativos dos benefícios do emprego de um SATOCC variável ao longo do dia, a decisão de adotá-lo recai sobre quem gerencia o sistema. Pode-se, entretanto sentir o grau de variabilidade do parâmetro observando a Figura 2.11.

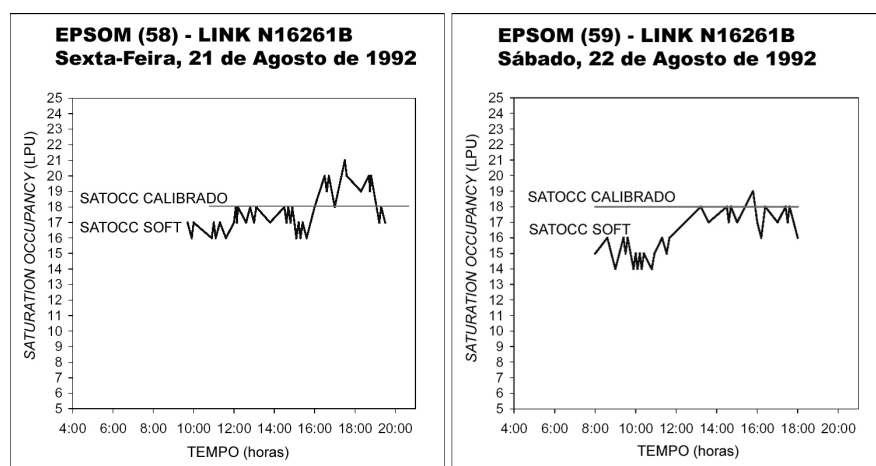


Figura 2.11: Variação temporal do SATOCC (TRL, 2000c)

A única referência sobre a variabilidade do parâmetro SATOCC e eficiência do recurso SOFT está registrada pela Figura 2.11. Dessa figura, apreende-se que o SATOCC, e supostamente o fluxo de saturação, apresenta padrões de variação distintos entre dias da semana e tendências definidas, ou patamares de valor médio, em períodos específicos do dia, intercalados por um trecho de transição. A variação percentual observada na sexta-feira atingiu 31,25%, enquanto que no sábado a variação foi de 35,71%. O valor calibrado para sexta-feira parece representar o valor médio observado ao longo do dia; no entanto, apresenta-se superior ao valor observado entre 10:00 e 16:00 e bem inferior ao valor observado entre 16:00 e 19:00, o que sugere que a adoção de pelo menos dois valores fixos médios para períodos específicos do dia seria mais adequada. Considerando o sábado, o valor calibrado do SATOCC não parece adequado às condições observadas de tráfego se o tomarmos como valor único médio representativo das condições ao longo do dia, aparentando estar superestimado em função das condições de tráfego observadas em dia útil. O valor calibrado parece ser adequado para o período de 13:00 às 18:00 de sábado, mas o período anterior a esse, requeriria uma estimativa mais baixa do SATOCC. As conseqüências das discrepâncias entre valor calibrado e valor observado de SATOCC são que, quando este é inferior a aquele, os tempos de verde são subdimensionados e as medidas de desempenho viário superestimadas, invertendo-se a situação quando se inverte a relação entre valor estimado e observado do SATOCC.

É claro que a simples detecção de variação, ou mesmo a constatação de uma considerável amplitude de variação, não implica em uma inadequabilidade dos valores adotados, uma vez que se deve avaliar se os métodos em que os parâmetros são empregados são sensíveis a essas variações e amplitudes. A revisão bibliográfica realizada mostra diversos indícios que a variação e a ocorrência de tendências de valores para a taxa de descarga de veículos é um fato e vale ser estudado. Em última instância, este trabalho pretende identificar essas variações, principalmente sua grandeza cotidiana.

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão bibliográfica apresentada posiciona o emprego do fluxo de saturação nas técnicas de programação semafórica e de análise de capacidade de interseções semaforizadas, atestando que o conceito primordial do parâmetro está presente na mais simples técnica de programação de tempo fixo até mesmo nas técnicas mais modernas de controle semafórico centralizado em tempo real. Apesar dos 50 anos de evolução tecnológica, as técnicas modernas tendem a ser a automatização de coleta e implementação de planos fixos aplicados a curtos períodos de tempo. Assim, a forma de utilização do parâmetro nas diferentes técnicas e tecnologias não se alterou desde as primeiras aplicações com fórmulas matemáticas de tempo fixo.

A tendência de uso de tecnologias de controle adaptativo consolida a necessidade de manutenção de uma programação semafórica atualizada que se adapte às condições observadas de tráfego. Os benefícios alardeados de redução de atraso, com conseqüente redução de consumo de combustíveis e de poluição do ar, requerem que os modelos de tráfego usados nesses sistemas estejam bem calibrados e reflitam as condições experimentadas em campo.

O fluxo de saturação espelha a taxa de atendimento de um sistema de filas. Um modelo matemático ou computacional de filas é utilizado para avaliação da operação de interseções semaforizadas em todos os tipos de técnicas abordadas neste trabalho, desde a fórmula de Webster, passando pelo HCM, até o sistema SCOOT. As técnicas utilizam modelos de tráfego sujeitos a uma programação semafórica proposta, para estimar medidas de desempenho sobre as quais define-se a adequabilidade do plano utilizado. É importante, portanto, que os valores usados sejam capazes de caracterizar o comportamento de escoamento do tráfego no período de atuação da programação, fazendo necessário investigar qual a melhor técnica de medição, sua correção e adequação aos conceitos e aplicações. Uma vez que se supõe a existência de variações decorrentes não só de características físicas, a verificação de adequação e possíveis ajustes é essencial quando é lugar comum adotarmos métodos importados.

As medidas de desempenho, como em qualquer sistema de filas, são calculadas em função da proporção do número de chegadas e do número de elementos atendidos: a demanda e o fluxo de saturação. Usualmente, os horários de atuação dos planos semaforicos são definidos a partir das flutuações e tendências detectadas na demanda,

fenômenos fartamente registrados na bibliografia de Engenharia de Tráfego. A outra face do problema, a taxa de descarga da fila, normalmente não é levada em consideração, e adota-se um valor médio assumido constante quando as características da demanda não se alteram. Nessa abordagem, o sistema SCOOT, confiando na sua medição em tempo real da demanda nas mesmas unidades da taxa de descarga, assume que o valor do fluxo de saturação para as condições de pico é adequado para quaisquer situações experimentadas.

Alguns estudos confrontam com a abordagem adotada pelo sistema SCOOT e mesmo com o modelo de Webster, detectando variações significantes no valor de fluxo de saturação mesmo quando fatores do tipo composição do tráfego e manobras de conversão são eliminados. A própria concepção do gráfico de platô de fluxo contra tempo (Figura 2.1) não condiz com medições práticas, ocorrendo variações bem definidas da taxa de descarga de veículos durante o verde semafórico (Figura 2.9), o que se traduz como o fluxo de saturação sendo dependente da extensão de verde e comprimento de fila de veículos. Fatores diversos que vão de características do tráfego e de uso de solo lindeiro, até características psicológicas ou comportamentais dos motoristas, tendem a gerar um padrão, passível de detecção, da variação do valor de fluxo de saturação ao longo do tempo, mesmo no curto espaço de tempo de um dia, acentuadamente entre picos. Mesmo dentro de um período que se suporia requerer um único plano semafórico, a variação do fluxo de saturação, conforme apresentado pelo exemplo do recurso SOFT do SCOOT, sugere uma alta frequência de oscilação de valores, de ciclo para ciclo. Resultado corroborado por alguns estudos que apresentaram coeficientes de variação elevados nas medições de fluxo de saturação.

Detectar essas variações requer uma técnica para medição do fluxo de saturação e comparação entre valores. A medição do fluxo de saturação apresenta técnicas bastante similares entre si, com diferenças nos resultados numéricos, a princípio, não significantes. Devido, no entanto, à heterogeneidade de condições operacionais do tráfego, a comparação de resultados apresenta alguma dificuldade, requerendo-se estabelecer a unidade padrão de medida e quais fatores de atrito deverão ser considerados.

Os questionamentos sobre o emprego do fluxo de saturação e seu comportamento, resumidos nesta seção, são abordados do ponto de vista prático a partir de dados coletados e analisados por técnicas adequadas nas seções seguintes.

CAPÍTULO 3

3. COLETA DE DADOS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A definição de um método de mensuração, ou cálculo, de fluxo de saturação passa por uma definição de como delimitar o período saturado do desmanche de uma fila e pela definição do fluxo de saturação característico para um período de vigência de um plano semafórico.

Para essas definições, uma análise do comportamento real do desmanche de filas em semáforos é essencial, de forma que a coleta de dados não poderia se resumir às informações estritamente necessárias à obtenção dos resultados a que se propunha este trabalho, mas seria necessário recuperar todo o processo de desmanche de filas em laboratório, para só então se discernir como extrair as informações adequadas à análise.

Um questionamento relevante no planejamento da coleta de dados foi quanto à abrangência do estudo pretendido no âmbito espacial e temporal. Podiam-se selecionar poucas aproximações e estudá-las por longo período ou muitas aproximações e estudá-las por curto período. No primeiro caso, corria-se o risco de por uma característica peculiar das aproximações, não serem possíveis de detectar variações no fluxo de saturação. No segundo caso, corria-se o risco de não haver, para uma mesma aproximação, quantidade de dados suficientes para uma avaliação comparativa entre valores de fluxo de saturação ao longo do dia. Escolheu-se por uma opção ponderada em que se tentou detectar valores característicos de fluxo de saturação para situações de pico e entre-pico de dois períodos do dia de cada aproximação, bem como avaliar um número reduzido de aproximações em dois dias diferentes, de forma a se investigar a recorrência de comportamentos.

3.2. AMOSTRA COLETADA

O meio vislumbrado de se fazer uma pré-análise das descargas de veículos para uma definição posterior de que dados definitivamente seriam necessários para a pesquisa, foi o registro dos *headways* individuais de cada veículo que era descarregado, em cada ciclo semafórico, nas duas faixas de tráfego que compunham as aproximações

de estudo. Dessa forma, seria possível reconstituir o comportamento do desmanche das filas em laboratório para melhor juízo de suas propriedades.

Informações adicionais que seriam valiosas para entender os elementos intervenientes na descarga das filas, bem como seus efeitos sobre o fluxo de saturação, também deveriam ser possíveis de serem resgatadas. Nesse sentido, entendeu-se necessário saber qual tipo de veículo associado ao *headway* registrado, bem como se houve movimento de conversão. Por ciclo, optou-se por registrar o número de manobras de estacionamento e de operações de embarque e desembarque de passageiros por ônibus que ocorriam durante o desmanche das filas.

3.2.1. Locais e Períodos Pesquisados

A grande quantidade de dados a serem coletados e a pouca disponibilidade de recursos foram os elementos norteadores de como a coleta de dados deveria ser efetuada. Para redução de pessoal empregado no processo, optou-se por fazer a coleta de dados em duas etapas: um registro em vídeo em campo e um pós-processamento a partir da exibição das imagens gravadas. O processo de levantamento com vídeo vem sendo largamente empregado como atestam os trabalhos de RIBEIRO (1992), WEST e THURGOOD (1995), LI e PREVEDOUROS (2002) e SILVA (2002), entre outros.

Dessa forma, das mais de 450 interseções semaforizadas de Fortaleza, o universo de opções foi reduzido à cerca de 30 interseções que haviam sido contempladas com uma câmera do sistema de circuito fechado de TV do controle centralizado de tráfego da cidade. Reduziu-se o conjunto de interseções candidatas, para aquelas que permitiam resgatar informações adicionais, para pré e pós-avaliação operacional das aproximações, através do banco de dados do sistema SCOOT de controle semafórico. As disponibilidades de sítios de pesquisas foram ainda mais reduzidas por se estabelecer, como interesse de estudo, aproximações características de vias principais da cidade.

Essas aproximações qualificavam-se por serem pertencentes a avenidas que conduziam os principais deslocamentos urbanos, caracterizadas por serem vias de mão-dupla, com sentidos separados por canteiro central e possuidoras de duas faixas. Além dessas características, com objetivo de aumentar a probabilidade de se ter o registro de uma quantidade suficiente de dados para serem submetidos a uma análise estatística, as aproximações a serem escolhidas deveriam apresentar fluxo desimpedido a jusante da

linha de retenção, de forma que o desmanche das filas não fosse interrompido. Todas as aproximações permitiam a conversão à direita na faixa junto ao meio-fio, enquanto que a faixa junto ao canteiro era dedicada ao tráfego direto.

Com as características mencionadas, oito aproximações foram selecionadas e correspondem à lista da Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Listagem e caracterização dos locais de pesquisa

Cód.	Interseção	Aprox. ¹	Larg. ² (m)	Est. ³	Ônibus ⁴	Data e dia da semana
001L	Av. Heráclito Graça x Av. Dom Manuel	Leste	8,1	N	N	26/11/2002, terça-feira 30/11/2002, sábado 04/12/2002, quarta-feira
001O	Av. Heráclito Graça x Av. Dom Manuel	Oeste	7,3	S	S	27/11/2002, quarta-feira
001N	Av. Heráclito Graça x Av. Dom Manuel	Norte	6,9	S	N	28/11/2002, quinta-feira
001S	Av. Heráclito Graça x Av. Dom Manuel	Sul	7,0	S	N	29/11/2002, sexta-feira 03/12/2002, terça-feira
084N	Av. Sen. Virgílio Távora x Av. Santos Dumont	Norte	7,1	S	N	29/11/2002, sexta-feira
084S	Av. Sen. Virgílio Távora x Av. Santos Dumont	Sul	7,1	N	N	28/11/2002, quinta-feira
096L	Av. Pontes Vieira x Av. Br. de Studart	Leste	7,4	S	S	26/11/2002, terça-feira 30/11/2002, sábado 04/12/2002, quarta-feira
057L	Av. Hist. Raimundo Girão x Av. Br. de Studart	Leste	5,8	N	N	27/11/2002, quarta-feira 03/12/2002, terça-feira

¹Aproximação. ² Largura da via. ³Estacionamento na zona de descarga. ⁴Ponto de ônibus na zona de descarga.

É importante dizer que o grupo foi determinado de forma a apresentar alguma diversidade de características quanto à composição veicular e manobras de conversão, bem como possíveis desejos de viagens dos motoristas. A inclusão de todas as aproximações de uma única interseção reflete esse interesse, uma vez que os fluxos ortogonais devem apresentar diferentes desejos de deslocamentos num dado período. Além disso, os demais cruzamentos se apresentam distribuídos espacialmente sobre a área de controle centralizado de semáforos com o mesmo intuito de capturar diversidade de comportamento (ver Figura 3.1).



Figura 3.1: Localização das aproximações pesquisadas

Considerando o período de pesquisa, entende-se que Fortaleza tem pelo menos dois picos bem definidos, um sendo no período da manhã, referente aos deslocamentos para escolas e trabalho, e outro ao fim da tarde, referente ao retorno para casa proveniente do trabalho (ver Figura 3.2). Partindo do princípio que seria mais relevante para fins práticos detectar diferenças operacionais entre essas duas situações, optou-se por definir dois períodos de pesquisa diários que incluíssem esses períodos de pico, além de parte do período de entre-pico relacionado. Assim, todas as aproximações passaram por uma coleta de dados contínua de 7:00 às 11:00 e de 15:30 às 19:30. Os dias de levantamento compreenderam os dias de terça a sexta e o período matinal de sábado de uma semana considerada típica, com algumas repetições na terça e quarta da semana seguinte para verificação de recorrência das características operacionais.

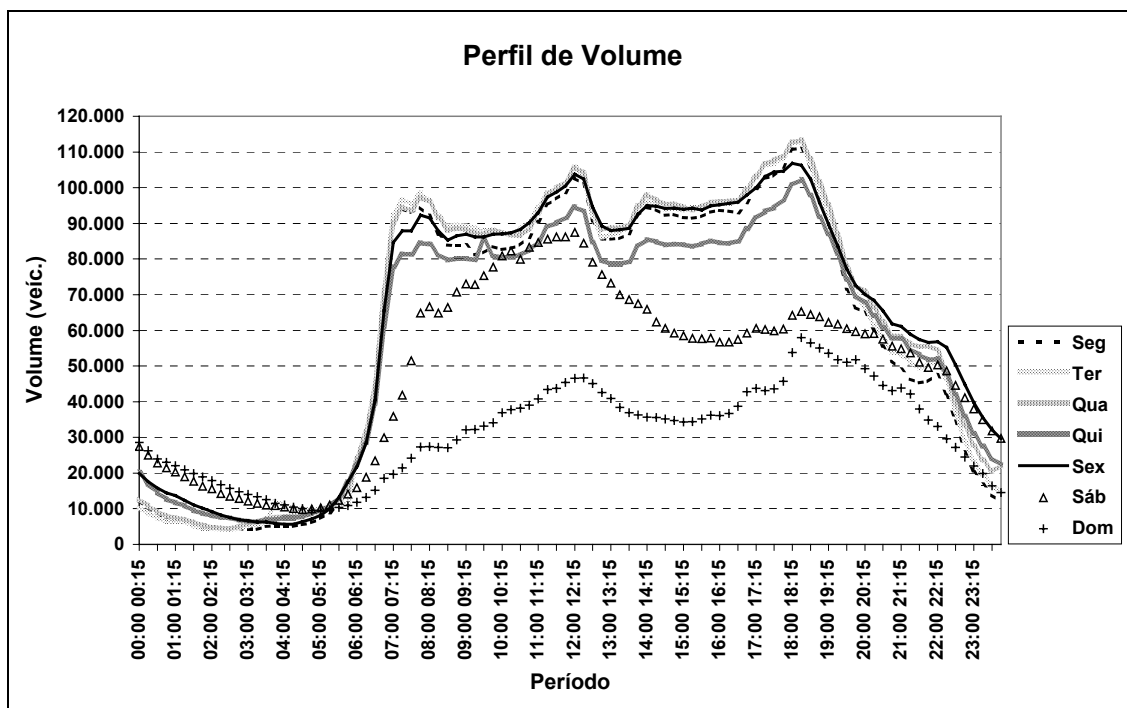


Figura 3.2: Perfil agregado de volume de tráfego diário em Fortaleza, obtido do sistema SCOOT

3.2.2. Procedimento de Coleta

Quatro pesquisadores foram mobilizados para registro de dados em campo. Trabalhando em dupla, duas aproximações podiam ser levantadas simultaneamente. O processo de coleta iniciava-se com a preparação do sistema de gravação de vídeo e sincronismo de dois relógios de bolso com o relógio do sistema de gravação. Esses relógios foram fornecidos aos pesquisadores de forma a se referenciar biunivocamente cada ciclo observado em campo com aqueles gravados em vídeo. Entendeu-se que as equipes de campo eram estritamente necessárias uma vez que o ângulo de visão das câmeras não era capaz de abranger de uma só vez o foco semaforico, a faixa de retenção e o fim das filas formadas, que são os três pontos de referência básicos para um estudo de fluxo de saturação. Surpreendentemente, o único trabalho da bibliografia que aborda o processo de contornar o problema de posicionamento e ângulo de visão de câmeras para obter os três componentes é o trabalho de WEST e THURGOOD (1995).

As câmeras de vídeo ficavam no alto de postes de 15 metros de altura, situados em uma das esquinas das interseções contempladas pelo estudo. O direcionamento delas era feito de forma que a imagem mostrada no vídeo abrangesse a faixa de retenção, parte da fila em espera para descarregar e uma área a jusante do fluxo que permitisse

identificar os movimentos de conversão dos veículos. Dados adicionais necessários eram obtidos pelos pesquisadores em campo.

Uma vez que o foco semafórico não era visível nas imagens, um dos pesquisadores da dupla era responsável por sinalizar em direção à câmera o instante em que a indicação de verde era mostrada. Essa indicação era feita através de um sinalizador de duas cores durante o período diurno e de uma lanterna no noturno. Além dessa atribuição, esse pesquisador deveria anotar o instante de abertura do semáforo em horas, minutos e segundos, como indicado no relógio de bolso sincronizado com o sistema de gravação de vídeo. Além disso, era responsável por acompanhar a descarga da fila de forma a identificar qualquer distúrbio que perturbasse a descarga livre dos veículos.

O segundo pesquisador da dupla ficava responsável pelas anotações das folhas de campo, consistindo de um número sequencial dos ciclos observados, o instante de abertura de cada ciclo (obtido do outro pesquisador), o tamanho da fila de veículos no instante de início do verde, adicionado do número de veículos que sofriam parada total durante o verde ao fim da fila. Esse pesquisador era também responsável por anotar o número de manobras de estacionamento que ocorressem dentro da fila em descarga e o número de paradas de ônibus para embarque e desembarque, bem como qualquer evento anômalo que pudesse interferir com a descarga das filas.

Apesar de ser possível a inserção de veículos em movimento na descarga de filas em regime de fluxo de saturação, entendeu-se que avaliar tal situação em campo não era satisfatório sem um prévio conhecimento do comportamento do tráfego e distribuição de *headways* característicos de cada aproximação. Assim, toda a análise de descarga de filas se processou considerando apenas veículos que sofreram parada total ao fim da fila existente dentro de cada ciclo analisado.

A coleta de dados gerou um total de 26 planilhas de campo e 100 horas de registro de vídeo. Quatro horas, do total inicial previsto de 104 horas, não foram possíveis de serem registradas por falhas de coordenação do pessoal técnico da central de controle, além de alguns ciclos, dentro dessas 100 horas gravadas, que foram perdidos em virtude da prioridade de operação das câmeras de vídeo para as atividades de monitoração de incidentes de trânsito.

3.2.3. Tratamento de Dados

O tratamento de dados corresponde à fase seguinte à coleta de campo, na qual os dados anotados e gravados são convertidos em arquivos de banco de dados digitais para sua posterior análise. Para tanto, foi elaborado um processo de entrada de dados, por meio de um programa de computador criado para esse fim, que passava por três etapas.

A etapa inicial consistia na simples digitação das planilhas de campo no programa desenvolvido. O programa rodava sob plataforma *PC/Windows 95* e gerava um arquivo de banco de dados padrão *Microsoft Access* para cada planilha de campo.

A etapa intermediária exigia que o operador do programa assistisse a fita de vídeo referente ao arquivo de dados ativo. Uma vez que a hora do sistema de gravação ficava registrada, superimposta às imagens gravadas, era possível identificar qual trecho de gravação era correspondente a cada um dos ciclos semafóricos anotados na planilha e registrados no arquivo ativo de dados. Para cada um desses ciclos, um operador do programa adicionava a informação do tipo de veículo e da manobra efetuada por faixa de tráfego. Os veículos eram registrados por faixa na ordem em que eram descarregados, seu tipo e movimento eram indicados pelo pressionamento com o *mouse* de botões do programa de entrada de dados. Cada faixa de tráfego gerava uma planilha de dados digital com uma listagem de cada veículo, seu tipo e movimento, assim como o número de ordem do ciclo associado e sua posição na fila. Os veículos classificados se referem exclusivamente àquele número de veículos que foi anotado nas planilhas de campo, evitando a inclusão de veículos que não sofreram paradas em fila.

Os veículos em fila foram divididos em quatro classes: carro de passeio, ônibus, caminhão leve e caminhão pesado. As motocicletas não foram consideradas por pouco afetarem o fluxo de saturação, como atesta o trabalho de BRANSTON (1979), *apud* STOKES (1989). Mesmo quando em cada ciclo seu número é significativo, ocorre uma concentração junto à faixa de retenção, entre faixas e junto às laterais das faixas, que não permitiriam a correta determinação de seus *headways*. Motocicletas inseridas na descarga, quando não trafegam pelo eixo viário, normalmente compartilham as faixas com outro veículo, e têm grande mobilidade em mudanças de faixas, sendo difícil de determinar seu impacto nos *headways* dos veículos da fila. Acreditando não ter grandes efeitos, as motocicletas foram excluídas das filas coletadas.

Foram considerados como carros de passeio, os veículos com fins de transporte de pessoas com baixa capacidade. Foram incluídos nessa classe, veículos utilitários esportivos, veículos de carga do tipo pick-up ou “baú” baseados em chassis de carros de passeio, bem como os veículos de transportes de passageiros do tipo *van*, devido às suas características de tamanho e desempenho.

A categoria “ônibus” incluiu qualquer ônibus de grande porte, chassi de 10m em diante, indiferente de seu uso para fins particulares ou públicos. Como caminhões leves foram considerados os veículos de transporte de carga com dois eixos, ficando mais bem definidos pela exclusão dos veículos integrantes das outras classes. Devido às características de tamanho e desempenho, os microônibus foram inseridos nessa categoria. A classe de caminhões pesados incluiu os veículos de transporte de carga com mais de dois eixos.

Como último passo, a fita de vídeo referente ao arquivo ativo era assistida novamente; desta vez com o objetivo de obter os *headways* de cada veículo previamente classificado. Para tanto, o operador do programa usava três teclas do teclado do computador, a tecla de espaço, a tecla “enter” e a tecla “0”. Uma vez escolhido o ciclo para obtenção dos *headways*, o operador do programa precisava observar as imagens referentes a esse ciclo. Com o videocassete exibindo a descarga em tempo real, o operador deveria pressionar a tecla de “espaço” quando observasse a indicação do pesquisador de campo, no vídeo, da abertura do semáforo. Quando o operador observava a passagem de cada veículo pela faixa de retenção, ele deveria pressionar a tecla “enter” no caso de ter sido na faixa direita ou “0”, na faixa esquerda. O pressionamento dessas teclas fazia com que o programa calculasse quanto tempo havia se passado desde o pressionamento da tecla de espaço e gravasse esse tempo no registro correspondente ao veículo, previamente identificado na fase de classificação. O programa desabilitava as teclas de entrada de dados correspondentes a cada faixa quando o número de veículos registrado previamente era alcançado.

O *headway* veicular foi definido com sendo o intervalo de tempo que se encerra com a passagem da extremidade traseira do veículo de interesse pela faixa de retenção, tendo seu início demarcado pelo instante que esse mesmo ponto de referência do veículo à frente cruzou a retenção. A adoção dessa definição é embasada na discussão já apresentada no Capítulo 2, bem como que a visão superior, obtida pelas imagens das

câmeras, favorecia esse ponto de referência em relação ao eixo traseiro, ponto que é usualmente adotado. Outro fator que desfavorece o uso do eixo como referência é o balanço traseiro de veículos de grande porte como ônibus e caminhões. Esse balanço é da ordem de três metros de comprimento em ônibus (Mercedes-Benz, 1987), que é, comparado às dimensões de um carro de passeio (quatro metros), considerável e não desprezível.

Os arquivos obtidos por esse processo foram convertidos para o formato de planilha eletrônica *Excel* da *Microsoft*, de forma que os dados pudessem ser manipulados com maior facilidade e disponibilidade de recursos de análise por meio de programas desenvolvidos em *Visual Basic for Applications*.

Uma inspeção das planilhas eletrônicas permitiu que fossem eliminados, a partir das anotações de campo, aqueles ciclos que apresentaram problemas referentes a interrupções anômalas na descarga. Essas planilhas serviram como base de dados brutos para as diversas análises que são descritas nos capítulos seguintes.

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISE DOS MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Apesar da diversidade de métodos para medição direta do fluxo de saturação, como apresentados no Capítulo 2, optou-se por analisar aqueles que aplicavam simples fórmulas matemáticas em seus cálculos, que são os métodos do HCM (TRB, 1994; TRB, 2000) e do ARRB. Esses métodos são os mais modernos e os procedimentos do HCM têm grande aceitação nos meios técnicos e acadêmicos no Brasil. O método do ARRB, apesar de mais limitado quanto à aceitação, possui características, na forma como obtém o valor médio do fluxo de saturação para um conjunto de ciclos semafóricos e de determinação do início do período saturado, que o torna interessante em ser comparado com o método do HCM.

A intenção neste capítulo foi testar diferentes processos de obtenção do valor de fluxo de saturação de forma que se pudesse estabelecer um procedimento que se considerasse adequado e com o qual as análises posteriores fossem feitas.

4.1. MÉTODOS TRADICIONAIS DE MEDIÇÃO

Antes de se fazer qualquer juízo quanto à variação observável do fluxo de saturação, decorrente de quaisquer fatores que seja, é necessário que se estabeleça um procedimento válido para medição dessa variável de tráfego.

Da revisão bibliográfica, sabe-se que o fluxo de saturação é uma taxa de descarga de veículos em fila de semáforo, correspondente ao período específico no qual os *headways* dos veículos se tornam homogêneos. A metodologia original do HCM (TRB, 1994), incluída nas edições de 1985 e de 1994, que chamaremos de HCM94, sugeria que o quarto veículo da fila era o veículo demarcador de início de fluxo de saturação, assim, quando seu eixo traseiro cruzava a faixa de retenção, a medição do fluxo de saturação se iniciava. O método da nova edição do HCM (TRB, 2000) modifica apenas o ponto de referência de medição, usando o eixo dianteiro do quarto veículo como critério demarcador de início do regime saturado. Visto que a discussão sobre o ponto de referência já foi feita e foi estabelecido o que se considera adequado (ver seção 2.3.9, p. 34), optou-se por não avaliar, ou usar, o procedimento da nova edição do HCM (TRB, 2000) e adotar o da edição anterior (TRB, 1994), chamada aqui

de HCM94, por ser mais condizente com as conclusões sobre o ponto de referência a ser usado.

O método do ARRB (AKÇELIK, 1993), propõe um critério diferente de delimitação do período saturado, baseado no tempo decorrido a partir da indicação verde do semáforo; nesse caso, a medição do fluxo de saturação se inicia aos dez segundos de verde. A concepção de cada um dos métodos abordados apresenta diferenças sutis que podem ser observadas quando as suas fórmulas são postas lado a lado nas Equações (4.1):

$$(a) \quad FS_{ARRB} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{\sum_{i=1}^n t_i - 10n} \quad (b) \quad FS_{HCM94} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{v_i - 4}{t_i - t_{4i}}}{n} \quad (4.1)$$

onde,

- FS_{ARRB} : fluxo de saturação pelo método ARRB [veíc/h];
- FS_{HCM94} : fluxo de saturação pelo método HCM94 [veíc/h];
- n : número de ciclos válidos observados;
- ω_i : número de veículos em fila⁴ descarregados após os dez segundos iniciais no ciclo i [veíc];
- v_i : número de veículos em fila descarregados no ciclo i [veíc];
- t_i : tempo da passagem do último veículo em fila descarregado no ciclo i [h];
- t_{4i} : tempo da passagem do quarto veículo em fila do ciclo i [h].

Uma diferença notável entre o método HCM94 e do ARRB é que aquele requer que o tempo de passagem pela retenção do quarto veículo, de cada uma das filas, incluídas no cálculo, seja medido. A adoção do critério dos dez segundos libera o

⁴ Considera-se que um veículo pertence à fila sendo descarregada, se ele estava parado no início do verde ou sofreu parada total ao se juntar ao fim da fila já existente. Definição de acordo com os veículos a serem usados nos cálculos dos métodos do ARRB (AKÇELIK, 1993) e HCM (TRB, 1994 e 2000).

pesquisador de campo de coletar essa informação; por isso, assume-se que o método ARRB o adotou apenas como um recurso simplificador de coleta de dados.

A segunda diferença mais notável entre o procedimento ARRB e o HCM94 é que enquanto este calcula um fluxo de saturação característico a partir de uma média aritmética de fluxos de saturação de ciclos semafóricos individuais, o do ARRB agrega o número total de veículos descarregados sob regime saturado e seus tempos de descarga para obter um valor médio de fluxo de saturação para o período de interesse.

Com os dados dos *headways* dos veículos obtidos em campo, preparou-se uma análise comparativa entre os valores de fluxo de saturação calculados pelos dois métodos citados, de forma que se pudesse avaliar como as diferenças nas suas formulações afetariam os resultados obtidos e qual deles melhor representaria o fenômeno físico da descarga de veículos em interseções semaforizadas. Para todas as planilhas de dados, obtidas a partir do levantamento de campo, calculou-se os valores de fluxo de saturação por cada um dos métodos. Além desses, três outros procedimentos foram elaborados mesclando características dos métodos tradicionais de forma que se pudesse testar como as diferenças entre eles afetam o resultado final obtido do fluxo de saturação, em particular, o critério dos dez segundos e uso de médias aritméticas.

4.1.1. O Critério dos Dez Segundos

A adoção de um instante de tempo no lugar de uma posição de veículo levantou suspeita de que esse procedimento pudesse majorar o valor obtido para o fluxo de saturação. Para a explanação de como o critério dos dez segundos gera erros de medição, vale recordar os conceitos de fluxo de saturação e de *headway* estabelecidos na discussão da revisão bibliográfica. O fluxo de saturação indica uma taxa de veículos cruzando a retenção numa dada unidade de tempo e cada veículo consome um tempo de verde ao efetuar essa ação. Esse tempo requerido por cada veículo é seu *headway*, que se apresenta como um atributo de cada veículo individual, assim pode-se associar uma taxa de descarga, ou fluxo, a cada um dos veículos individuais, obtida como o inverso de seus *headways*.

Estando a taxa de descarga veicular relacionada ao inverso dos *headways* dos veículos, o fluxo de saturação está relacionado ao inverso dos *headways* de saturação dos veículos na descarga da fila. Observando as Equações (4.1), pode-se deduzir a

relação entre fluxo de saturação calculado pelo método HCM94 e os *headways* de saturação. Essa relação é que, para cada um dos ciclos incluídos no cálculo, o fluxo de saturação associado é a média harmônica dos inversos dos *headways* de saturação.

Para um único ciclo, o HCM94 calcula o fluxo de saturação como sendo a razão entre o número de veículos em fila descarregados após o quarto veículo e o tempo total de descarga, descontado o tempo de escoamento dos quatro primeiros veículos. O numerador dessa razão é o número de veículos que foram considerados participando do escoamento sob fluxo de saturação, enquanto que o denominador é o somatório dos *headways* desses veículos que foram incluídos nos cálculos. Dessa feita, para um único ciclo semafórico, obtém-se a Equação (4.2):

$$FS_{HCM94} = \frac{v-4}{t-t_4} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (4.2)$$

onde,

- FS_{HCM94} : fluxo de saturação pelo método HCM94 [veíc/h];
- v : número de veículos escoados [veíc];
- t : tempo da passagem do último veículo em fila [h];
- t_4 : tempo da passagem do quarto veículo em fila [h];
- n : número de veículos descarregados sob fluxo de saturação [veíc];
- h_i : *headway* do veículo i incluído no total n [h].

Sendo a média harmônica de uma variável x , $H(x) = \frac{n}{\sum \frac{1}{x}}$ (SPIEGEL, 1993), a média harmônica dos inversos dos *headways* de saturação é:

$$H\left(\frac{1}{h}\right) = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n h_i} \therefore H\left(\frac{1}{h}\right) = FS_{HCM94} \quad (4.3)$$

onde h representa os *headways* saturados dos veículos no ciclo em questão.

O método do ARRB, em que o fluxo de saturação é obtido pela razão entre o número de veículos em fila descarregados após os dez segundos iniciais pelo tempo

total dessa descarga com os dez segundos iniciais subtraídos, não garante que o headway completo do veículo seguinte aos dez segundos de verde tenha sido incluído no cálculo. Dessa forma, se consideramos os *headways* atributos de cada veículo, o ARRB permite a dissociação do primeiro veículo usado nos cálculos de seu *headway*, empregando no cálculo um valor para este que pode ser tão pequeno quanto à precisão empregada na medição dos *headways*. Como o fluxo de saturação é função inversa aos *headways*, fazer o *headway* de um veículo tão pequeno quanto se possa, é tender sua taxa de descarga individual ao infinito. Daí, espera-se que métodos que usem esse recurso gerem resultados com valores superiores àqueles que seriam adequados na representação da descarga de veículos observada.

4.1.2. Fluxo de Saturação: Taxa Média (ARRB) ou Média das Taxas (HCM)?

A comparação entre as fórmulas do ARRB (4.1 *a*) e do HCM (4.1 *b*) deixa claro que o recurso usado para encontrar um valor representativo de fluxo de saturação para um período de tempo, como, por exemplo, o tempo de vigência de um plano semafórico, tem duas alternativas: um valor que representa a taxa média de descarga nos ciclos usados nos cálculos (ARRB) e uma média das taxas de descargas em cada ciclo incluído nos cálculos (HCM94).

Desconsiderando o critério dos dez segundos, supondo que o ARRB incluísse os *headways* saturados completos em seus cálculos, teríamos que esse procedimento retorna a média harmônica dos inversos dos *headways* de todos os veículos nos ciclos que foram usados na estimativa do fluxo de saturação. A inclusão do critério dos dez segundos apenas resulta no emprego parcial do *headway* do primeiro veículo considerado de cada ciclo e, para todos os efeitos, a afirmação quanto à média harmônica permanece válida.

No caso do método do HCM, ele considera que cada ciclo apresenta um fluxo de saturação característico, e o valor representativo do fluxo de saturação para um período de tempo é calculado como a média aritmética das médias harmônicas dos inversos dos *headways* saturados de cada ciclo. Também é possível demonstrar que, enquanto o método do HCM é uma média aritmética de fluxos de saturação de ciclos individuais, o método do ARRB pode ser tomado como uma média harmônica ponderada de fluxos de saturação de ciclos individuais que usa o número de veículos de cada ciclo como pesos.

Há uma relação bem definida entre a média aritmética e a média harmônica de uma variável que diz que a média aritmética é sempre maior ou igual à média harmônica (SPIEGEL, 1993). Assim, é de se esperar que a relação existente entre médias aritméticas e harmônicas também se apresente na forma de que os resultados obtidos pelo método HCM sejam majorados em relação um método que considerasse a descarga de veículos de forma agregada entre ciclos, como o ARRB.

Na prática, o método ARRB (desconsiderando a majoração esperada pelo critério dos dez segundos) tenta calcular uma taxa de descarga capaz de escoar todos os veículos incluídos no cálculo exatamente no total dos tempos que foram observados no escoamento de cada um deles. A adoção pelo HCM, inclusive no método da nova edição (TRB, 2000), de uma média aritmética das taxas de descarga de cada ciclo, não garante que a taxa resultante obtida será capaz de atender a todos os veículos considerados, por não totalizar o tempo necessário para suas descargas individuais. Nessa situação, usar uma taxa de descarga, ou fluxo de saturação, superior àquela referente ao fenômeno observado significa que estamos superestimando a eficiência do desmanche de filas, o que nos levaria a incorrer em erros como a alocação de tempo de verde insuficiente ou estimar um número de veículos escoados num dado tempo superior ao real, o que significa majoração da capacidade viária e subestimação dos atrasos veiculares.

4.2. MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA COMPARAÇÃO

Partindo da conclusão que os métodos abordados apresentam algum tipo de viés matemático que distorce o valor calculado do fluxo de saturação em relação ao fenômeno real observado na descarga de veículos, propôs-se um procedimento alternativo que mesclasse as qualidades desses métodos ao mesmo tempo em que se expurgavam as suas deficiências.

Dessas premissas, o método Harmônico/Posicional (H/P) proposto estabelece que o valor referente ao fluxo de saturação de um dado período de tempo é obtido a partir de dados provenientes de no mínimo 15 ciclos semafóricos desse período, em que havia um número superior a oito veículos nas filas descarregadas. O cálculo é feito como a razão entre o número total de veículos contados a partir da quarta posição (exclusive) de cada ciclo e o somatório de seus respectivos *headways*. O objetivo desse

procedimento é contrapô-lo ao método HCM94 para verificar a hipótese levantada de majoração de resultados, e de não-conformidade entre valor calculado e fenômeno observado, devido ao uso de médias aritméticas.

Similarmente ao método H/P, estabeleceu-se também o método A/T (de aritmético e temporal) em que o cálculo do fluxo de saturação foi feito seguindo o processo de médias aritméticas, porém usando o critério dos dez segundos como início do período saturado. Os resultados obtidos com esse procedimento, quando comparados com aqueles obtidos pelo método ARRB, também mostram os efeitos do uso de uma média aritmética de fluxos de saturação de ciclos individuais. Salienta-se que esse procedimento A/T foi aventado como método a ser utilizado na edição de 2000 do HCM, sendo válido analisar seus resultados para entender a razão da manutenção da metodologia das edições anteriores.

Um terceiro método alternativo, com fins de avaliar o efeito do critério dos dez segundos, foi criado. Nele, o fluxo de saturação foi obtido como uma média aritmética das taxas de descargas dos veículos escoados sob regime saturado após os dez segundos iniciais de verde, considerando somente *headways* completos, ou seja, eliminou-se o veículo imediatamente após os dez segundos iniciais da descarga no processo do cálculo do fluxo de saturação. Para efeito de referência, foi chamado de HC/10.

4.3. ANÁLISE DOS MÉTODOS

Foi considerado, inicialmente, que o procedimento adequado de comparação e identificação de discrepâncias entre os métodos de medição de fluxo de saturação é uma avaliação estatística dos mesmos. Para tanto, faz-se necessário que os cálculos efetuados pelos diversos métodos empreguem os mesmos dados, no caso, os mesmos ciclos. Esse expediente permite que se faça o emprego de testes de hipóteses para médias com observações emparelhadas, que fortalece a análise estatística desenvolvida conforme afirma COSTA NETO (1977, p. 109): “... *sempre que possível e justificável, devemos promover o emparelhamento de dados, pois teremos uma informação a mais que nos levará a resultados estatisticamente mais fortes*”.

Utilizando-se das planilhas de dados coletados, foram calculados, por todos os métodos citados neste capítulo, valores de fluxo de saturação para períodos de uma hora inteira. Os ciclos utilizados nos cálculos foram aqueles que possuíam um tamanho de

fila inicial superior a oito veículos, conforme recomendação do método HCM94. Além disso, para que o método HC/10 funcionasse, era preciso que os ciclos utilizados tivessem pelo menos dois veículos sendo descarregados após os dez segundos iniciais. E finalmente, somente períodos horários que tivessem no mínimo 15 ciclos atendendo essas restrições foram considerados, de forma a estar em concordância com o método do HCM (TRB, 1994).

De posse dos valores horários de fluxo de saturação, foi feita uma caracterização estatística das amostras obtidas. As análises foram feitas através da comparação duas a duas das amostras através de testes estatísticos de hipóteses para médias. Adicionalmente, resultados relativos à grandeza da diferença entre métodos foram obtidos por testes semelhantes aos já mencionados, mas usando-se amostras geradas pela diferença de valores entre dois métodos. Um teste específico para avaliação de influência do tamanho das filas de veículos nos cálculos foi feito usando-se uma amostra das médias dos tamanhos das filas dos ciclos usados em cada observação. A análise dos dados e os resultados dos testes foram obtidos com o uso dos *softwares* estatísticos Minitab 13.20 (MINITAB, s.d.) e SPSS 11 (SPSS, 2001).

4.3.1. Descrição Estatística dos Dados

O processamento das planilhas resultou em um conjunto de 93 observações de fluxo de saturação de cada um dos métodos empregados, cada uma representando um período de uma hora de tráfego, o que abrange um total de 1.928 ciclos semafóricos que incluem períodos de pico e entre-pico. A caracterização estatística de cada uma das amostras é apresentada na Tabela 4.1. As médias amostrais ratificam a ordem de grandeza relativa esperada entre os valores de fluxo de saturação de cada método, conforme a discussão sobre o processo de cálculo de cada um.

Tabela 4.1: Estatística descritiva das amostras de valores de fluxo de saturação por método

	ARRB	A/T	HCM94	HC/10	H/P
Média (veíc/h)	1564,3	1613,3	1551,0	1548,3	1503,8
Erro padrão (veíc/h)	17,70	15,45	14,85	14,90	16,92
Mediana (veíc/h)	1591,4	1625,8	1558,4	1537,6	1524,7
Desvio padrão (veíc/h)	170,72	149,01	143,22	143,74	163,19
Coef. de Variação	10,9%	9,2%	9,2%	9,3%	10,9%
Intervalo (veíc/h)	789,4	761,1	746,0	737,2	779,0
Mínimo (veíc/h)	1123,4	1162,2	1088,7	1104,0	1035,9
Máximo (veíc/h)	1912,8	1923,3	1834,7	1841,2	1814,9
Contagem	93	93	93	93	93

A Figura 4.1 mostra como as restrições de aplicação dos métodos foram atendidas nas amostras, a Figura 4.2 mostra uma comparação entre os valores obtidos, enquanto que os histogramas da Figura 4.3 apresentam as distribuições amostrais dos valores de fluxo de saturação calculados por cada um dos métodos, bem como a curva normal correspondente e o respectivo valor-p para um teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov. Com valores-p superiores a 0,15, no nível de significância de 5%, não se pode rejeitar a hipótese de que todos os métodos retornam amostras provenientes de populações normais, o que preenche o requisito primário para execução de testes estatísticos de hipóteses entre médias.

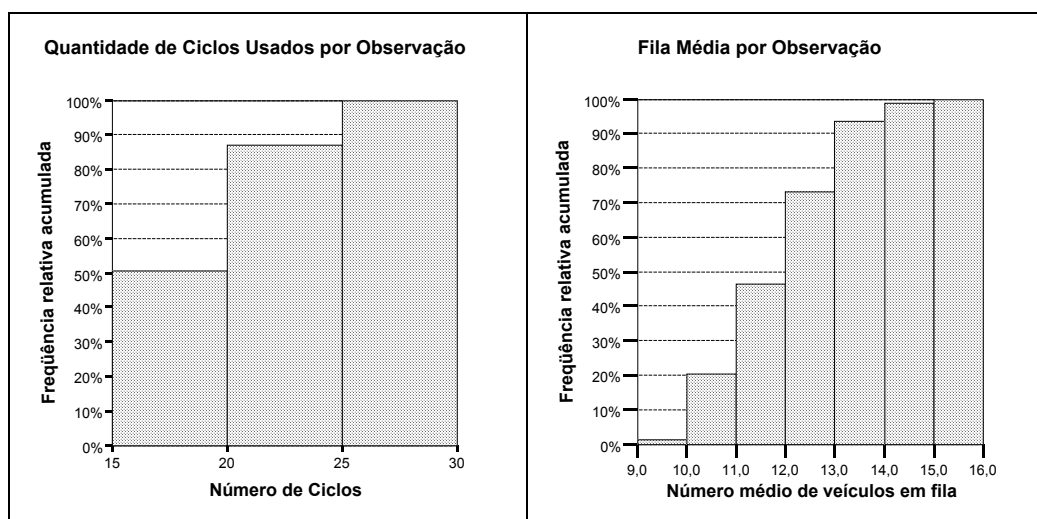


Figura 4.1: Características dos ciclos utilizados nas amostras de fluxo de saturação

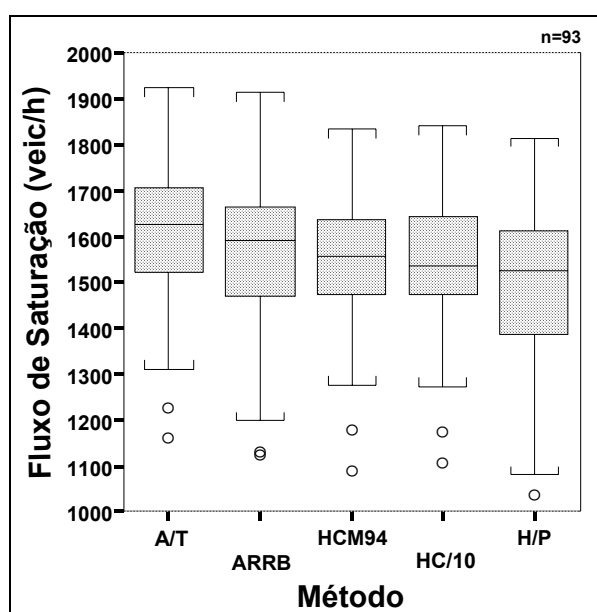


Figura 4.2: Boxplots dos valores de fluxo de saturação obtidos pelos métodos analisados

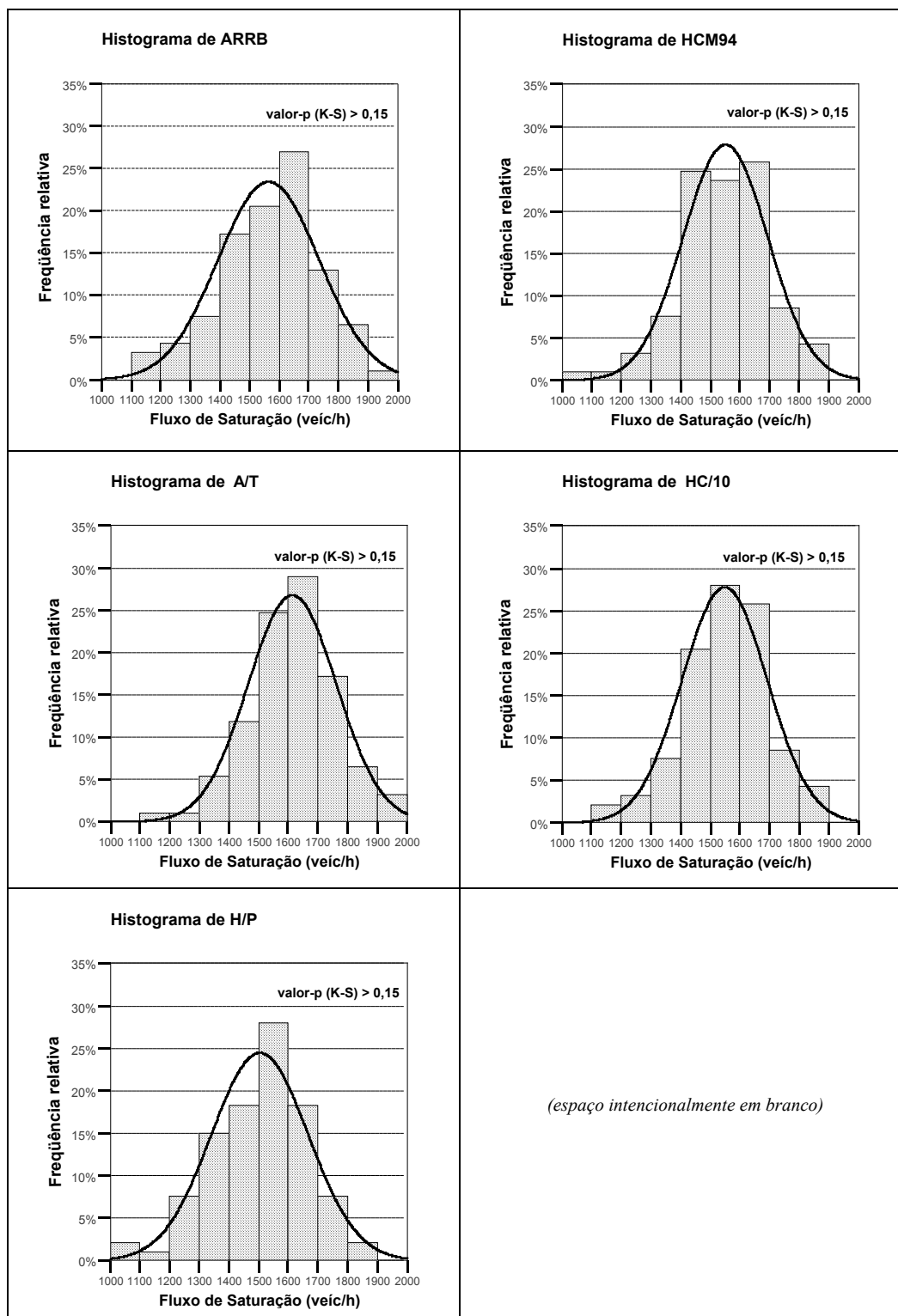


Figura 4.3: Distribuições de frequência dos fluxos de saturação calculados por cada método

4.3.2. Testes de Hipóteses

Para comparação dos resultados obtidos a partir dos cinco métodos, foram realizados testes de hipóteses para médias de duas amostras com dados emparelhados,

comparando-se os métodos dois a dois. A Tabela 4.2 apresenta os resultados dos testes de hipóteses: é mostrado o valor-p obtido, seguido da hipótese que foi aceita no nível de significância de 5%.

Tabela 4.2: Resultados dos testes de hipóteses para médias de fluxos de saturação

	ARRB	HCM94	A/T	HC/10
HCM94	<i>Valor-p: 0,007</i> <i>Ha: ARRB > HCM94</i>	-	-	-
A/T	<i>Valor-p: 0,000</i> <i>Ha: A/T > ARRB</i>	<i>Valor-p: 0,000</i> <i>Ha: A/T > HCM94</i>	-	-
HC/10	<i>Valor-p: 0,002</i> <i>Ha: ARRB > HC/10</i>	<i>Valor-p: 0,151</i> <i>Ho: HC/10 = HCM94</i>	<i>Valor-p: 0,000</i> <i>Ha: A/T > HC/10</i>	-
H/P	<i>Valor-p: 0,000</i> <i>Ha: ARRB > H/P</i>	<i>Valor-p: 0,000</i> <i>Ha: HCM94 > H/P</i>	<i>Valor-p: 0,000</i> <i>Ha: A/T > H/P</i>	<i>Valor-p: 0,000</i> <i>Ha: HC/10 > H/P</i>

Baseando-se na discussão anteriormente elaborada quanto ao emprego do critério dos dez segundos e taxas médias, os testes de hipótese feitos foram em sua maioria testes unilaterais, comparando-se se um método gerava resultados superiores a um outro.

Os testes realizados com os métodos que utilizam o critério dos dez segundos (ARRB e A/T) tiveram suas hipóteses nulas rejeitadas, indicando que seus resultados são significativamente superiores aos resultados obtidos por métodos que consideram somente valores inteiros de *headways* saturados. O teste entre os métodos A/T e HC/10 é de especial interesse, uma vez que são virtualmente os mesmos procedimentos, a não ser que o primeiro usa o critério dos dez segundos. O resultado obtido no teste de hipótese confirma as suspeitas que a inclusão de *headways* saturados parciais nos cálculos majoram o valor do fluxo de saturação por uma questão meramente aritmética.

Os métodos que trabalham com médias aritméticas de fluxos de saturação e *headways* saturados inteiros (HCM94 e HC/10) apresentaram resultados significativamente superiores aos resultados daquele que agrega todos os ciclos do período para obtenção de um fluxo de saturação médio (H/P). Em especial, o teste entre os métodos HCM94 e H/P, que diferem apenas na forma como calculam o fluxo de saturação médio, mas usam exatamente os mesmos dados nos cálculos, demonstra que o emprego de médias aritméticas de fluxos individuais resulta em valores maiores que o procedimento que se utiliza exclusivamente de médias harmônicas dos inversos dos *headways* saturados. Resultado corroborado pelo teste envolvendo os métodos ARRB e A/T que, apesar de ambos usarem o critério dos dez segundos, confirmou que o que

utiliza média aritmética (A/T) retorna valores significativamente superiores ao que trabalha com comportamento agregado dos escoamentos (ARRB).

Por fim, deixa-se registrado nos *boxplots* da Figura 4.4, a grandeza das diferenças entre os métodos analisados.

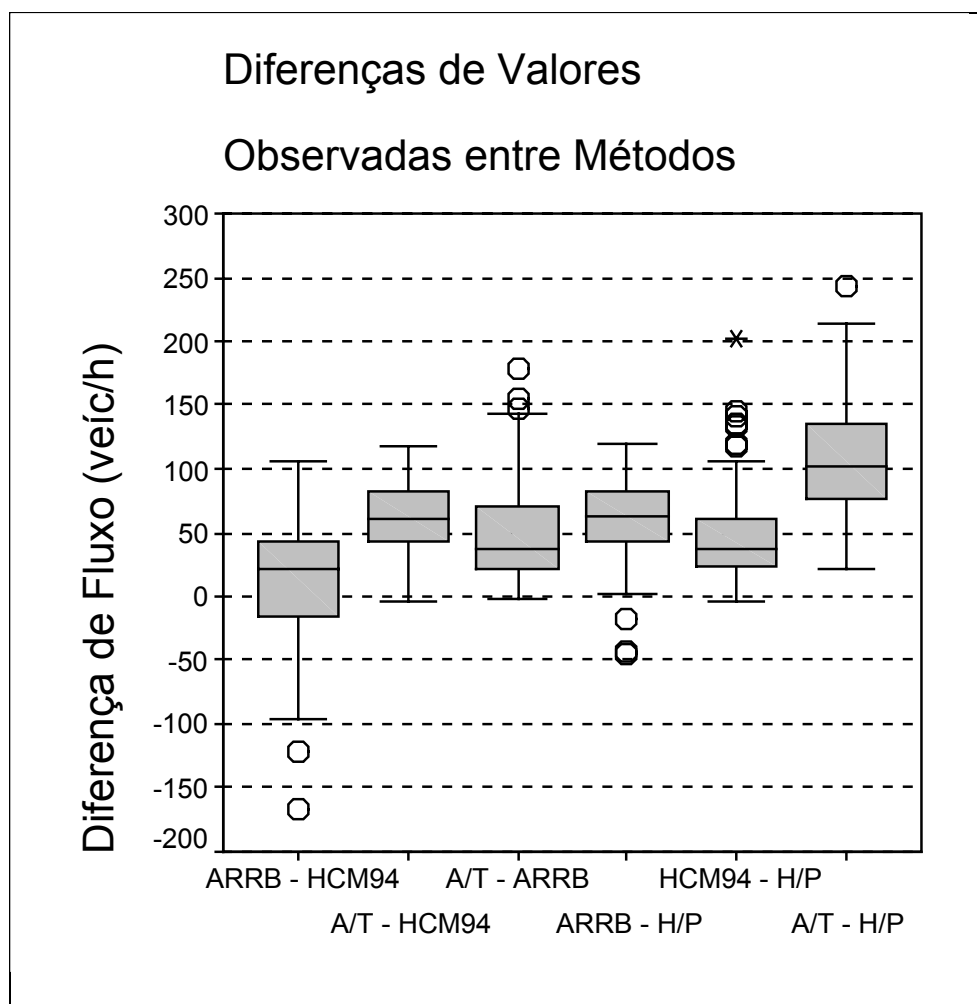


Figura 4.4: *Boxplots* das diferenças de valores obtidas entre métodos

4.3.3. Considerações Adicionais sobre os Métodos de Medição

A influência do critério dos dez segundos pode ser abordada de outra forma. A única diferença entre o método HCM94 e o A/T é o critério definidor do início do escoamento de veículos sob fluxo de saturação. Dessa feita, podemos analisar se os dois critérios são equivalentes, comparando a posição do primeiro veículo da fila utilizado nos cálculos do método A/T, lembrando que a quinta posição é a utilizada no método HCM94.

O gráfico de barras da Figura 4.5 mostra a posição na fila do primeiro veículo usado nos cálculos do A/T. Observa-se que a posição mais provável do veículo que cruza a faixa de retenção após ter decorrido dez segundos de verde é a quarta posição, seguida da terceira, ocorrendo em cerca de 50% e 27% das observações, respectivamente. A quinta posição da fila só é observada, ou seja, só ocorre equivalência de posição dos primeiros veículos no método A/T em relação ao HCM, em cerca de 17% dos ciclos levantados. Daí, conclui-se que os critérios demarcadores do início do regime saturado não podem ser tomados como equivalentes. Assim, o critério dos dez segundos, usado pelo ARRB, não representa um instante equivalente ao cruzamento do quarto veículo em fila pela retenção, como usado nos métodos do HCM (TRB, 1994 e 2000).

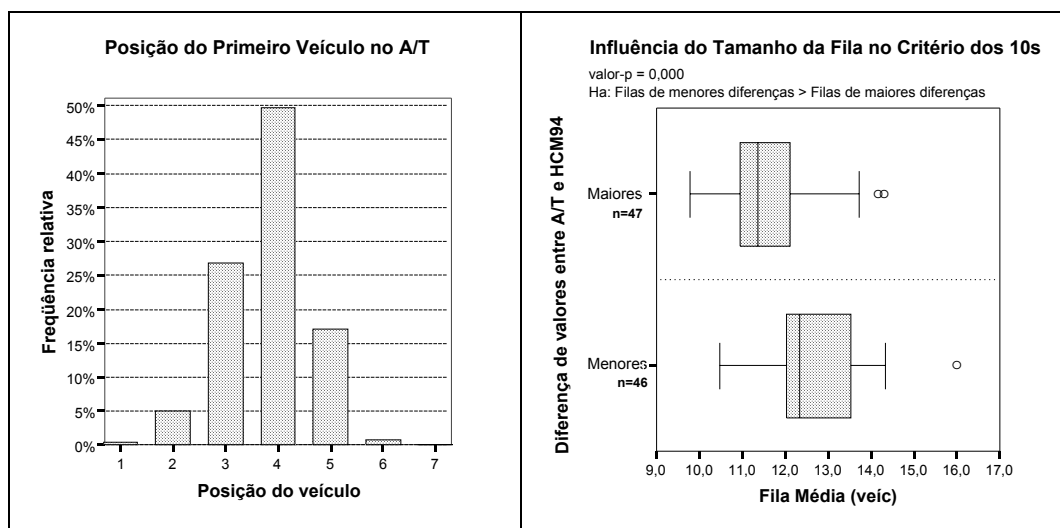


Figura 4.5: Avaliação do uso do critério dos dez segundos

O gráfico *boxplot* da Figura 4.5 apresenta o resultado da influência do tamanho da fila inicial na majoração do valor do fluxo de saturação pelo critério dos dez segundos. Essa análise foi feita dividindo-se a amostra referente ao tamanho médio das filas das observações em duas partes, usando como critério de corte a mediana da amostra das diferenças entre os valores encontrados pelo A/T e HCM94. Dessa forma obteve-se duas amostras: uma referente às filas com menores diferenças e outra, às filas com maiores diferenças.

Aplicando um teste-t unilateral de hipótese para médias com observações independentes, o valor-p retornado inferior a 0,1% rejeita a hipótese de igualdade

entre as médias das duas amostras, indicando que quanto menores as filas usadas no método A/T, maiores diferenças são observadas em relação ao método HCM94.

Uma comparação entre os métodos ARRB e HCM94 em relação ao H/P mostra que o efeito de incluir *headway* saturados parciais nos cálculos de fluxo de saturação é mais prejudicial à correção do valor resultante do fluxo de saturação do que obtê-lo a partir de uma média aritmética de fluxos de ciclos individuais. Essa afirmação pode ser inferida pelos histogramas da Figura 4.6 que mostram que as diferenças observadas entre o método ARRB e o H/P tendem a ser maiores que as diferenças entre o método HCM94 e o H/P. A inferência é corroborada pelo valor-p inferior a 0,1% de um teste de hipótese para médias com dados emparelhados efetuado com as amostras das diferenças entre os métodos citados.

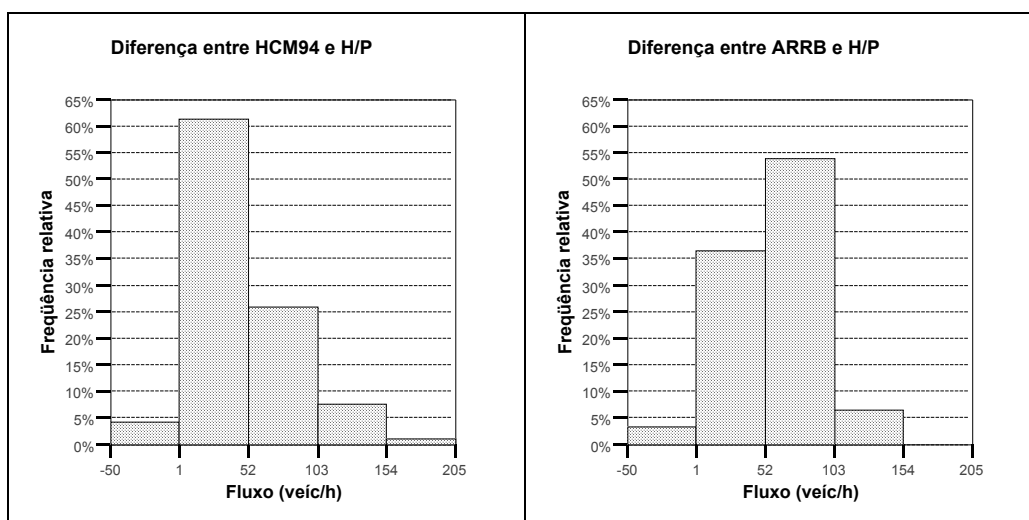


Figura 4.6: Efeitos do critério dos dez segundos e da média aritmética

Vale registrar que uma vez que o método A/T utiliza os dois recursos de medição e cálculo que se comprovaram serem fatores de majoração na obtenção de valores para o fluxo de saturação, pode-se entender a razão de que ele não tenha sido adotado na edição publicada de 2000 do HCM (TRB, 2000), voltando a recomendação de uso da metodologia das edições anteriores com única variação do ponto de referência de medição nos veículos.

De toda a discussão aqui feita, conclui-se que, dadas as condições operacionais observadas, os métodos de medição direta de fluxo de saturação adotados pelo ARRB (AKÇELIK, 1993) e HCM (TRB, 1994) não se equivalem entre si. Foi, também, possível identificar que alguns recursos simplificadores,

utilizados nesses métodos e incluída na metodologia da nova edição do HCM (TRB, 2000), acabam por gerar uma distorção dos valores calculados em relação ao fenômeno que pretendem representar. Não se pode afirmar, no entanto, que a grandeza das diferenças encontradas entre os métodos, ainda que estatisticamente significantes, tenha efeitos práticos consideráveis em procedimentos de temporização de semáforos, estimativa de atrasos e capacidade viária. No caso de que esses efeitos sejam relevantes, um procedimento melhor de medição e cálculo de fluxo de saturação deve ser proposto aos moldes do método H/P, que teve por fim servir de referência para as hipóteses em teste. Uma avaliação mais criteriosa de qual posição de veículo na fila inicial demarca o início do fluxo de saturação deve ser feita, bem como os demais critérios de uso de ciclos com filas maiores que oito veículos e um mínimo de 15 ciclos para obtenção de um a valor médio do fluxo de saturação.

CAPÍTULO 5

5. MÉTODO DE MEDIÇÃO PROPOSTO

5.1. PROPOSTA PARA CÁLCULO DE FLUXO DE SATURAÇÃO

À luz da discussão do capítulo anterior, entende-se que qualquer um dos métodos modernos que usam formulação matemática para calcular o valor do fluxo de saturação apresenta alguma distorção na medição. Seria inconseqüente que se adotasse qualquer um deles nas análises subseqüentes deste trabalho, portanto exige-se que um aprofundamento do conhecimento do comportamento de descarga veicular seja feito para o refinamento do modelo H/P anteriormente apresentado, adequando-o às condições observadas. Os critérios que ficaram em aberto para um método completo de cálculo de fluxo de saturação seriam o critério definidor do início do regime estável de escoamento de veículos e o tamanho de fila mínimo.

Deixa-se claro que o que se pretende é desenvolver um procedimento prático na forma dos métodos HCM (TRB, 2000) e ARRB (AKÇELIK, 1993), que são procedimentos genéricos aplicáveis às mais diversas condições de tráfego e conformações viárias, de modo que se procurará um procedimento que atenda simultaneamente todas as condições observadas em campo durante a pesquisa, a despeito de suas peculiaridades individuais, por se entender que é essa a necessidade da Engenharia de Tráfego prática.

5.1.1. Definição do Veículo Inicial

O primeiro ajuste ao método H/P é definir qual o primeiro veículo em fila a entrar em regime de saturação. Esse procedimento nos remete ao conceito básico do fluxo de saturação que reflete o período da descarga no qual os *headways* veiculares se homogeneízam. Dessa forma, o método para definição do veículo inicial deverá se processar através da comparação de valores de *headways* de veículos.

A Tabela 5.1 tem por fim apresentar as características gerais dos *headways* veiculares por posição referentes às oito aproximações em todos os períodos pesquisados nas duas faixas de tráfego. A grande quantidade de dados torna pouco informativa a listagem das características desagregadas, seja por aproximação ou por algum outro fator.

Tabela 5.1: Estatística descritiva de *headways* por posição

Pos. na fila	Média	Mediana	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Curtose	Assimetria	Intervalo	Observações
Pos 1	3,8	3,5	1,96	0,51	52,34	4,03	40,8	5.668
Pos 2	3,2	2,8	1,47	0,47	35,41	4,00	26,6	5.619
Pos 3	2,8	2,5	1,52	0,53	106,75	6,73	37,7	5.481
Pos 4	2,7	2,3	1,50	0,56	37,47	4,69	24,3	5.230
Pos 5	2,6	2,2	1,44	0,56	55,23	5,33	27,1	4.875
Pos 6	2,5	2,1	1,56	0,62	73,47	6,33	30,8	4.400
Pos 7	2,5	2,1	1,42	0,57	53,51	5,25	27,8	3.877
Pos 8	2,5	2,1	1,63	0,66	76,39	6,75	29,0	3.322
Pos 9	2,4	2,0	1,58	0,65	72,52	6,39	29,2	2.736
Pos 10	2,5	2,1	1,58	0,65	47,85	5,41	23,7	2.156
Pos 11	2,4	2,1	1,72	0,70	44,49	5,50	21,6	1.625
Pos 12	2,5	2,0	1,78	0,72	40,82	5,42	20,6	1.207
Pos 13	2,5	2,1	2,12	0,83	74,57	7,28	31,7	860
Pos 14	2,4	2,0	1,80	0,74	69,31	6,86	24,0	604
Pos 15	2,5	2,0	1,75	0,70	25,45	4,24	16,0	397
Pos 16	2,7	2,1	2,11	0,79	20,98	4,12	17,0	257
Pos 17	2,6	2,0	1,96	0,77	31,18	4,98	15,5	157
Pos 18	2,4	2,1	1,29	0,54	4,84	1,96	7,0	98
Pos 19	2,7	2,3	1,38	0,51	2,08	1,53	6,1	61
Pos 20	2,7	2,1	1,65	0,61	5,07	2,11	7,9	36
Pos 21	2,8	2,4	1,37	0,50	3,77	1,77	6,0	25
Pos 22	2,4	2,2	1,07	0,45	5,82	1,88	5,2	19
Pos 23	2,6	2,2	1,30	0,50	5,44	2,30	4,6	12
Pos 24	3,0	2,5	1,91	0,64	-1,09	0,89	4,0	4

A análise da descrição estatística dos *headways* por posição mostra que a analogia com os tempos de atendimentos de um sistema de filas é válida. Os índices de curtose indicam que as distribuições de *headways* por posição apresentam picos acentuados e o coeficiente de assimetria mostra que as distribuições têm assimetria definida para a direita. O intervalo de valores mostra que a ocorrência de *outliers* é uma constante e, portanto, uma medida de tendência central mais adequada à caracterização de cada posição seria a mediana. Observando os valores das medianas, constata-se um abatimento logo após as primeiras posições, quando os *headways* assumem um valor próximo a 2,0 segundos, apresentando alguma dispersão em posições elevadas. A Figura 5.1 é uma representação gráfica das características citadas.

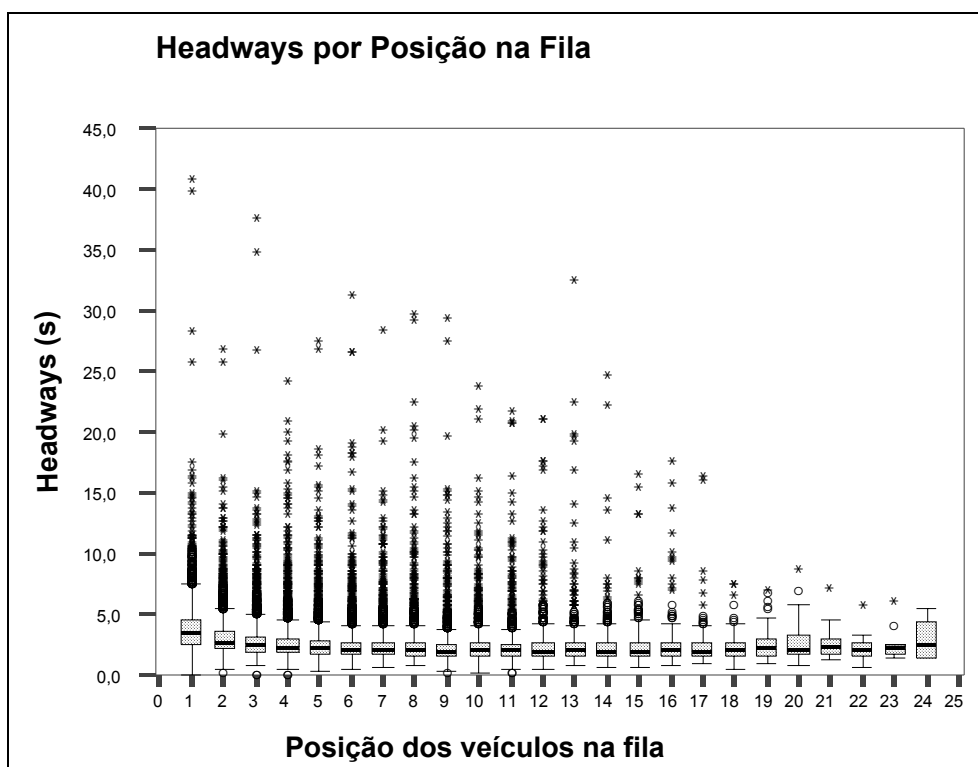


Figura 5.1: Caracterização das amostras de *headways* por posição através de *boxplots*

Um procedimento comum na análise de *headways* é tentar ajustes de curvas de características assintóticas. Usando tal técnica, poder-se-ia, então, determinar a posição de estabilização como sendo aquela a partir da qual a variação estimada pela curva passasse a ser menor do que a precisão adotada na medição dos *headways*. No entanto, a aplicação desse procedimento suscita grande dúvida quanto à adequação das curvas aos dados, uma vez que é possível encontrar várias que se ajustam com R^2 de mesma grandeza variando apenas em casas decimais. Esse conjunto de curvas, como era de se esperar, atinge o comportamento assintótico em posições diferentes da fila. Partindo do princípio que os dados usados são apenas uma amostra e que é possível obter alguma variação na extração de outras amostras, fica difícil de dizer que uma determinada curva é a curva ideal para obtenção do resultado desejado.

A forma visionada para se estabelecer o início do regime saturado foi a de utilizar testes estatísticos de comparação de várias amostras simultâneas e dessa forma verificar se os *headways* de um intervalo de posições poderiam ser assumidos como iguais, a despeito de sua variação natural. A análise de variância seria o procedimento imediato de ser adotado, porém as características das amostras de *headways* por posição

indicam que as distribuições amostrais violam os pré-requisitos de aplicação desse teste. A recomendação da bibliografia consultada e *softwares* estatísticos é o emprego de um teste independente da distribuição amostral, ou não-paramétrico. No caso em questão, o teste não-paramétrico equivalente à análise de variância é o teste de Kruskal-Wallis para n amostras independentes (MILTON e ARNOLD, 1995). Esse é um teste de postos que verifica a hipótese de que cada uma das amostras foi retirada de populações idênticas, e sendo bastante sensível a diferenças locais, a hipótese nula é estabelecida em termos de igualdade de medianas.

Considerando que há uma grande variação no número de observações obtidas de cada aproximação, foi feita uma redução de dados de forma que se obtivessem amostras de mesmo tamanho para cada uma das aproximações. Contribuiu para essa decisão, o fato das amostras apresentarem uma distribuição com uma longa cauda à direita, constituindo observações não representativas do comportamento médio da descarga. Devido à forma acentuadamente assimétrica da distribuição das amostras, a medida de tendência central que pareceu adequada para representar o valor de *headway* de cada posição foi a mediana. Novas amostras de valores de *headways* para cada posição de veículo de cada aproximação foram geradas a partir das medianas das amostras originais.

Para se obter um número maior de observações para o teste, dividiu-se as amostras de cada aproximação em duas, representando, cada uma, um período de pesquisa ininterrupta. As novas amostras obtidas foram constituídas de 16 observações para cada uma das posições de veículos em fila, cada observação referente a uma aproximação e a um período de pesquisa, sendo os valores de *headways* provenientes das duas faixas de tráfego. A Figura 5.2 é a representação gráfica dessas amostras.

O gráfico das amostras deixa visível a característica de redução e homogeneização dos *headways* após a descarga dos primeiros veículos. Porém, deixa também visível que em posições elevadas não há uma coerência de valores de *headways*, provavelmente causado pela falta de urgência dos veículos em fim de filas longas, uma vez que cruzar a retenção no ciclo corrente não é um evento certo, além de que esses veículos estão sujeitos a todos os pequenos distúrbios de escoamento de veículos a sua frente.

LI e PREVEDOUROS (2002) comentam que os últimos veículos de uma fila, após o décimo segundo veículo, costumam apresentar *headways* alongados ou comprimidos. Os *headways* alongados são provenientes da distância de segurança entre veículos que é aumentada devido à velocidade de descarga da fila que atinge seu máximo nas posições finais de uma fila longa; essas filas também estão mais propensas a apresentarem veículos que fazem mudanças de faixas durante o escoamento, provocando distúrbios nos *headways* veiculares. A compressão de *headways* é observada quando os veículos tendem a querer aproveitar o tempo de entre-verdes. No estudo de LI e PREVEDOUROS (2002), a faixa de movimento direto apresentou alongamento, enquanto que a faixa de conversão protegida, compressão.

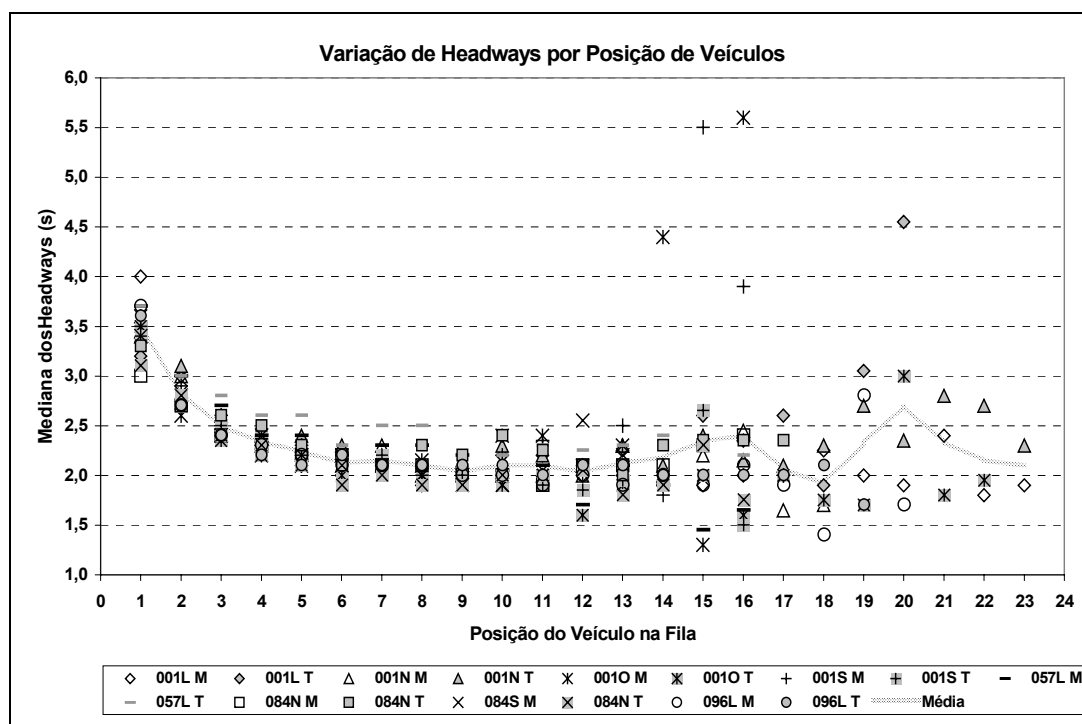


Figura 5.2: Amostras das medianas de *headways*

Em virtude da variação dos tamanhos médios de filas observados em cada aproximação, somente observações até a posição 13 foram possíveis de serem obtidas simultaneamente para os 16 casos de estudo, conforme mostra a Tabela 5.2. Assim, para que a análise abrangesse todos os casos, somente foram consideradas as amostras de posições menores ou iguais à posição 13.

Tabela 5.2: Valores das medianas dos *headways* por posição de veículos em fila nas aproximações e períodos estudados.

Local*	Headways em segundos por posição dos veículos na fila																						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23
001L M	4,0	2,9	2,4	2,3	2,1	2,0	2,1	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	2,0	2,0	2,3	2,0	1,9	2,4	1,8	1,9
001L T	3,2	3,0	2,5	2,3	2,2	2,0	2,1	2,1	2,0	2,2	2,2	2,1	2,3	2,0	2,6	2,4	2,6	1,9	3,1	4,6			
001N M	3,5	3,0	2,6	2,4	2,3	2,1	2,3	2,0	2,1	2,0	2,0	2,0	2,3	2,0	2,2	2,5	1,7	1,7					
001N T	3,4	3,1	2,5	2,3	2,4	2,3	2,2	2,1	2,2	2,3	2,2	2,1	2,3	2,1	2,4	2,2	2,1	2,3	2,7	2,4	2,8	2,7	2,3
001O M	3,6	2,6	2,4	2,2	2,1	2,2	2,1	2,2	2,0	2,4	2,4	2,1	2,3	4,4	1,3	5,6							
001O T	3,5	2,7	2,4	2,2	2,2	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	2,0	1,6	1,9	1,9	2,0	1,6	2,0	1,8	1,7	3,0	1,8	2,0	
001S M	3,5	2,9	2,6	2,3	2,3	2,2	2,1	2,0	2,0	2,2	2,4	2,0	2,5	1,8	5,5	3,9	2,0						
001S T	3,4	2,7	2,5	2,4	2,2	2,1	2,2	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9	2,0	2,0	2,7	1,5							
057L M	3,7	3,0	2,7	2,4	2,4	2,2	2,3	2,3	2,2	2,1	2,1	1,7	2,1	1,9	1,5	1,7							
057L T	3,7	3,0	2,8	2,6	2,6	2,3	2,5	2,5	2,1	2,2	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,2							
084N M	3,0	2,7	2,4	2,3	2,2	2,2	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9	2,1	2,1	2,1	2,3	2,4							
084N T	3,3	2,8	2,6	2,5	2,3	2,1	2,1	2,3	2,2	2,4	2,3	2,1	2,0	2,3	2,4	2,4	2,4						
084S M	3,4	2,8	2,4	2,4	2,2	2,1	2,1	2,0	1,9	1,9	2,1	2,6	2,2										
084S T	3,1	2,8	2,4	2,3	2,1	1,9	2,0	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	1,8	1,9	2,3	1,8							
096L M	3,7	2,7	2,4	2,3	2,2	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9	2,0	1,9	2,0	1,9	2,1	1,9	1,4	2,8	1,7			
096L T	3,6	2,7	2,4	2,2	2,1	2,2	2,1	2,1	2,1	2,1	2,0	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1	1,7				

* M representa as pesquisas no período matinal e T no período vespertino.

O procedimento para identificação da primeira posição de veículo em que o regime saturado era observado foi feito com a aplicação repetitiva do teste Kruskal-Wallis às amostras de *headways*, iniciando com um intervalo que abrangia a posição um até a posição 13 e sucessivamente deslocando a posição inicial do intervalo para uma posição superior até que o resultado do teste deixasse de ser significativo. O intervalo no qual não foi possível rejeitar a hipótese nula, no nível de significância de 5%, compreendeu o intervalo de posições com extremos *seis* e *treze*. O valor-p obtido no teste com essas variáveis foi de 0,35, assim, o conjunto de valores *headways* das posições incluídas nesse intervalo de teste não podem ser distinguidos entre si, assumindo-se que o regime saturado do escoamento de veículos se inicia nos veículos que ocupam a sexta posição na fila (inclusive). A Figura 5.1 e a Figura 5.2 já seriam um boa referência na definição da posição inicial do regime de escoamento de saturação, porém a adoção de uma posição baseando-se exclusivamente nos gráficos acabaria sendo uma decisão arbitrária. Portanto, o teste estatístico mostra-se como um procedimento mais adequado por ser mais isento de subjetividade, sendo sua adequação corroborada pelos gráficos apresentados.

Dos dados coletados e resultados obtidos em sua análise, estabelece-se que, nas condições de tráfego observadas nas vias principais de Fortaleza, apesar de cada uma apresentar características próprias, há um comportamento comum entre elas de que o

escoamento de veículos em aproximações semaforizadas está em regime de fluxo de saturação a partir do instante em que o quinto veículo em fila cruza a retenção. Vale notar que a posição delimitadora do início do fluxo de saturação encontrada é uma posição superior àquela estabelecida pelo procedimento do HCM em suas edições de 1994 e 2000 (TRB, 1994 e 2000), demonstrando parte da inadequação do método importado às condições locais.

É válido citar que essa inadequação não é surpresa de ser encontrada. LI e PREVEDOUROS (2002), avaliando o escoamento de filas longas em Honolulu, detectaram que os *headways* dos veículos atingiam valores mínimos somente entre o nono e décimo segundo veículo da fila. A Tabela 5.3, compilada por SILVA (2002), mostra outras variações encontradas para o início da descarga em regime saturado.

Tabela 5.3: Posições de início do regime de descarga saturado

Estudo	Posição
Porto Jr. e Londero (1990)	8 ^a .
Greenshields, Schapiro e Ericksen (1947)	6 ^a .
Carstens (1971)	4 ^a .
Lu (1984)	5 ^a .
Bonneson (1993)	8 ^a .
Niittymäki (1998)	5 ^a .
Adonis, Bartel, Gibson e Coyemans (1996-1997)	5 ^a .

Fonte: Adaptado de SILVA (2002)

5.1.2. Definição do Tamanho Mínimo de Fila

Estabelecido que o *headway* do sexto veículo em fila deve ser o primeiro a ser incluído no cálculo do fluxo de saturação, é preciso saber quais *headways* de posições adicionais devem ser acrescidos nos cálculos para obtenção do valor representativo do fluxo de saturação. Esse questionamento é proveniente dos procedimentos de cálculo dos métodos do *Highway Capacity Manual* (TRB, 1994 e 2000), que especifica que as filas que devem compor o cálculo devem ter tamanhos maiores que oito veículos, quando o *headway* inicial a ser usado é o do quinto veículo. Na especificação de um método é preciso avaliar a razão dessa necessidade de o fluxo de saturação ser obtido a

partir de um mínimo de cinco valores de *headways* por ciclo, questionamento bastante relevante por limitar os locais e os períodos em que esse método pode ser aplicado.

A Figura 5.3 e a Figura 5.4 mostram que há dois tipos bem definidos de aproximações nos casos estudados, um que tem um percentual elevado de filas entre seis e oito veículos e outro em que essa concentração se dá entre oito e dez. No caso em que a concentração de filas curtas é da ordem de 50%, não parece ser razoável excluir essas filas do cálculo da taxa de descarga de veículos que deve caracterizar a aproximação. No outro extremo, onde o percentual de filas curtas é reduzido, essas não devem ser capazes de alterar o resultado do fluxo de saturação a ponto que seja requerido suas exclusões no cômputo desse parâmetro.

A avaliação dessas conjecturas foi feita por um processo estatístico de comparação entre os valores de fluxos de saturação calculados para períodos horários para cada aproximação, variando o tamanho mínimo de fila. Nesse processo de comparação, o fluxo de saturação foi obtido para períodos horários em que foram possíveis obter um número não inferior a 15 filas com o tamanho mínimo especificado.

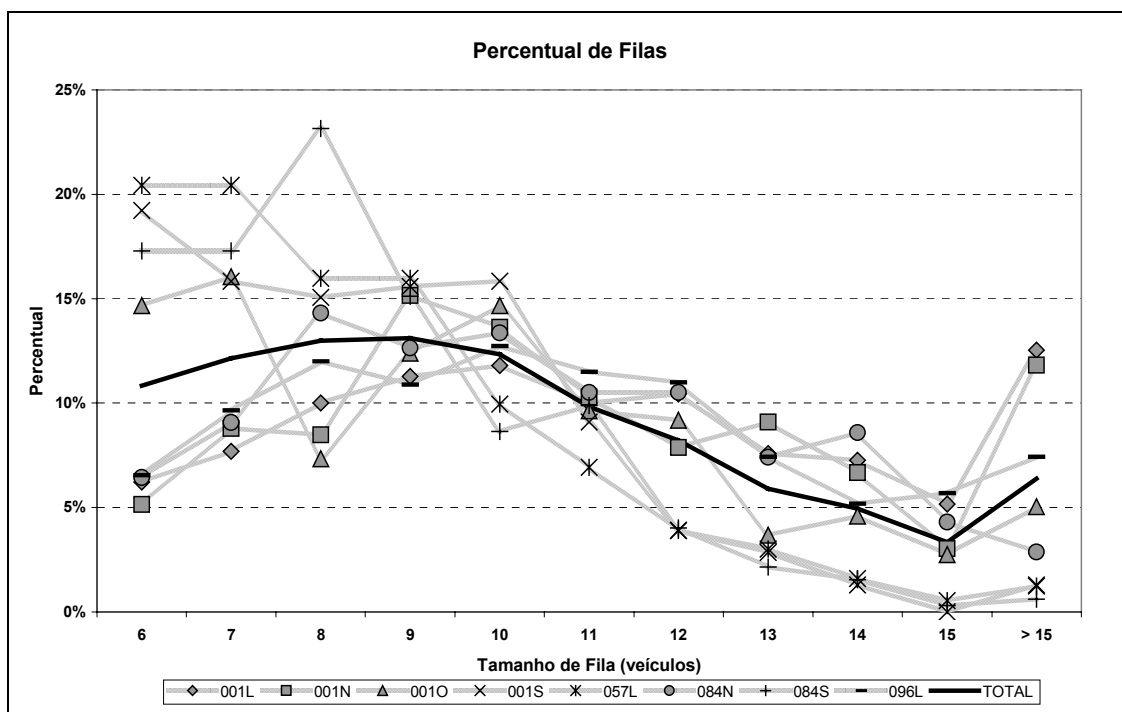


Figura 5.3: Percentual de filas por tamanho e aproximação

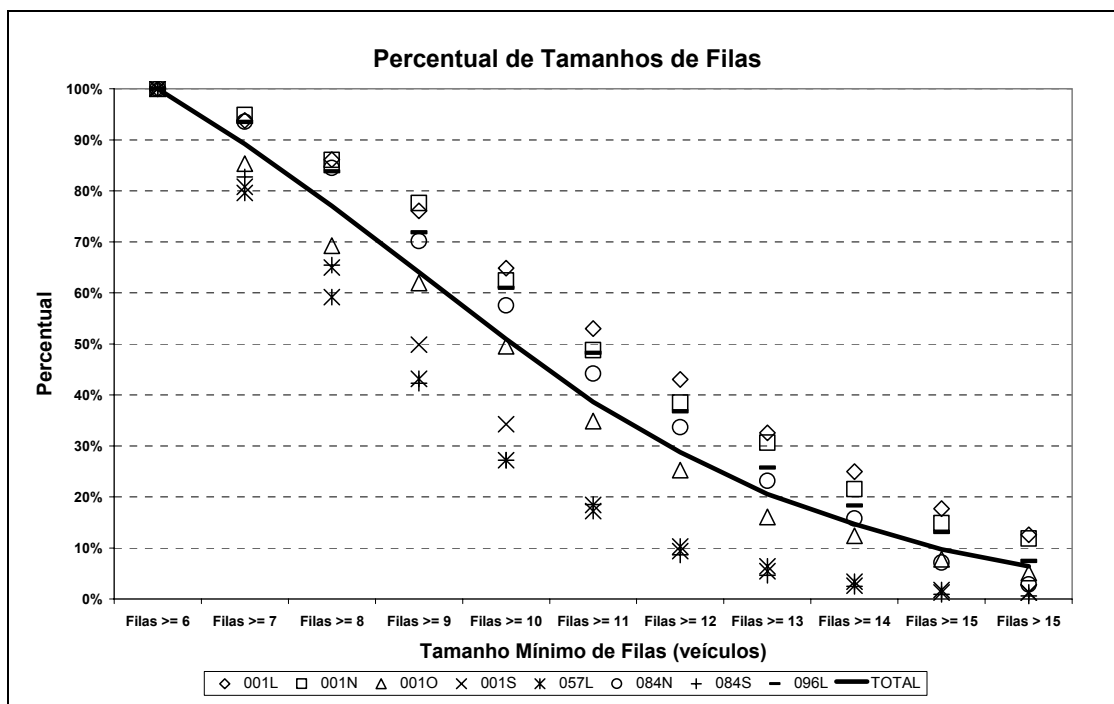


Figura 5.4: Percentual de tamanho de fila mínimo por aproximação

O teste aplicado foi novamente o teste de Kruskal-Wallis para comparação de amostras independentes. Esse teste, como já exposto, é o equivalente não-paramétrico do teste de análise de variância. Separou-se a amostra original de fluxo de saturação em duas, baseando-se no gráfico da Figura 5.3: uma amostra para as aproximações com filas curtas, composta das aproximações que se apresentaram acima da curva média para tamanho de fila igual a seis, e uma para aproximações de filas longas que se apresentaram abaixo da curva média.

A aplicação do teste resultou em um valor-p igual a 0,1 para as amostras de filas curtas, indicando que não há evidências que comprovem que os fluxos de saturação calculados com filas mínimas de seis, sete, oito ou nove veículos difiram entre si. No caso das amostras para filas longas, o resultado do teste foi não-significativo para fluxos de saturação calculados com filas mínimas variando de seis a doze veículos, com valor-p resultante de 0,2.

O resultado do teste Kruskal-Wallis confirma as conjecturas levantadas quanto à influência de inclusão de filas curtas no cálculo do fluxo de saturação e, portanto, recomenda-se que tais filas não sejam desprezadas, seja por serem filas de tamanho

característico da aproximação, seja por não afetarem o resultado do cálculo de forma significativa.

5.1.3. O Procedimento Proposto

O cálculo do fluxo de saturação, num dado período de tempo, para uma aproximação semaforizada é obtido a partir da medição do número de veículos e dos tempos de escoamento dos mesmos de um mínimo de 15 ciclos conforme, a Equação (5.1) seguinte:

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - 5)}{\sum_{i=1}^n (t_i - t_{i5})}, \text{ para } n \geq 15 \text{ e } v_i \geq 6 \quad (5.1)$$

em que,

- FS : fluxo de saturação [veíc/h];
- n : número de ciclos incluídos no cálculo;
- v_i : número de veículos em fila descarregados no ciclo i [veíc];
- t_i : tempo de passagem pela retenção do último veículo em fila do ciclo i [h];
- t_{i5} : tempo de passagem pela retenção do quinto veículo em fila do ciclo i [h];

Para todos os efeitos, o método representado pela Equação (5.1) será referenciado como método H/P neste texto, deste ponto em diante; tratando-se de um refinamento e melhoria daquele que já foi assim chamado e será substituído por este nas análises subseqüentes.

O estabelecimento do número mínimo de ciclos em 15 é um aproveitamento dos métodos propostos no HCM (TRB, 1994 e 2000); outros procedimentos indicam outros valores, até mesmo menores. O número de ciclos mínimo no cálculo de um valor representativo do fluxo de saturação é função da variabilidade dessa taxa de descarga entre os ciclos considerados, questão abordada por JACQUES (1995b). A princípio, dentro da unidade de tempo escolhida para estudo, esse valor corresponde à cerca de metade dos ciclos observados, o que se considera representativo do comportamento dos períodos de estudo.

5.2. VARIABILIDADE AFETANDO O MÉTODO DE CÁLCULO

É importante notar que, por uma série de motivos discutidos neste capítulo, acabamos por rejeitar um procedimento que trata o fluxo de saturação como uma média de taxas de descarga de veículos por ciclo em prol de um método que considera a taxa de descarga como um evento único e contínuo ao longo do período de ocorrência desse escoamento. A vantagem desse procedimento é que o torna insensível a eventos anômalos ocorridos em algumas das descargas incluídas no cálculo do fluxo de saturação. Em outras palavras, pode-se dizer que quanto maior a variação das taxas de descarga entre ciclos, maior a diferença observável entre o método proposto e um equivalente que utiliza média aritmética.

Uma vez que o método supostamente adequado foi estabelecido, recalculou-se os valores de fluxo de saturação usando a Equação (5.1). Ou seja, recalculou-se os fluxos de saturação por faixa para períodos de uma hora, incluindo no regime saturado de descarga o sexto veículo em diante da fila, sendo os valores obtidos de ciclos com filas mínimas de seis veículos e de um total não inferior a 15 ciclos. Optando-se por trabalhar com o atendimento dessas restrições nas duas faixas de tráfego simultaneamente, a amostra obtida resultou em 73 observações para cada faixa. Juntamente com o fluxo de saturação calculado pelo método proposto, obteve-se as taxas de descarga de cada ciclo utilizado e calculou-se a média e desvio padrão para cada um dos períodos horários. Para simplificação, os valores obtidos pelo método proposto serão tratados como provenientes do “método harmônico” enquanto que os resultados obtidos pela média aritmética das taxas de cada ciclo como do “método aritmético”.

Os valores de média e desvio padrão do método aritmético foram combinados no índice coeficiente de variação, obtido pela razão entre o desvio e a média; dessa forma a dispersão de valores encontrados se torna independente da grandeza da média e assim podemos comparar as variações observadas em aproximações e faixas distintas. A aplicação de um teste não-paramétrico Wilcoxon-Mann-Whitney (MILTON e ARNOLD, 1995) não é capaz de rejeitar a hipótese de que os coeficientes de variação (CV) entre as duas faixas provenham de mesma população (valor-p resultante de 0,37). A distribuição conjunta dos CVs pode ser observada na Figura 5.5.

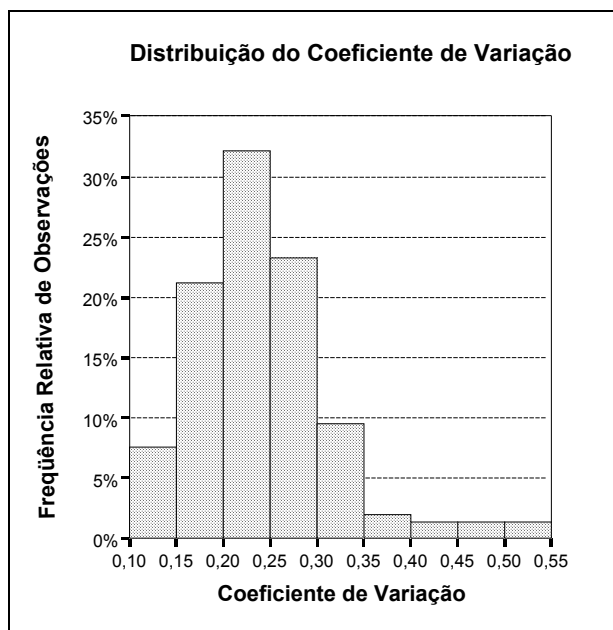


Figura 5.5: Distribuição do coeficiente de variação das taxas de descarga por ciclo

A relação entre os dois procedimentos pode ser observada na Figura 5.6, reiterando a tendência de que o método aritmético retorna valores superiores ao método harmônico. Pretende-se, no entanto, mostrar que os pontos que representam as maiores diferenças entre os métodos são aqueles que possuem maiores variações internas nas taxas de descarga, ou seja, maiores CVs.

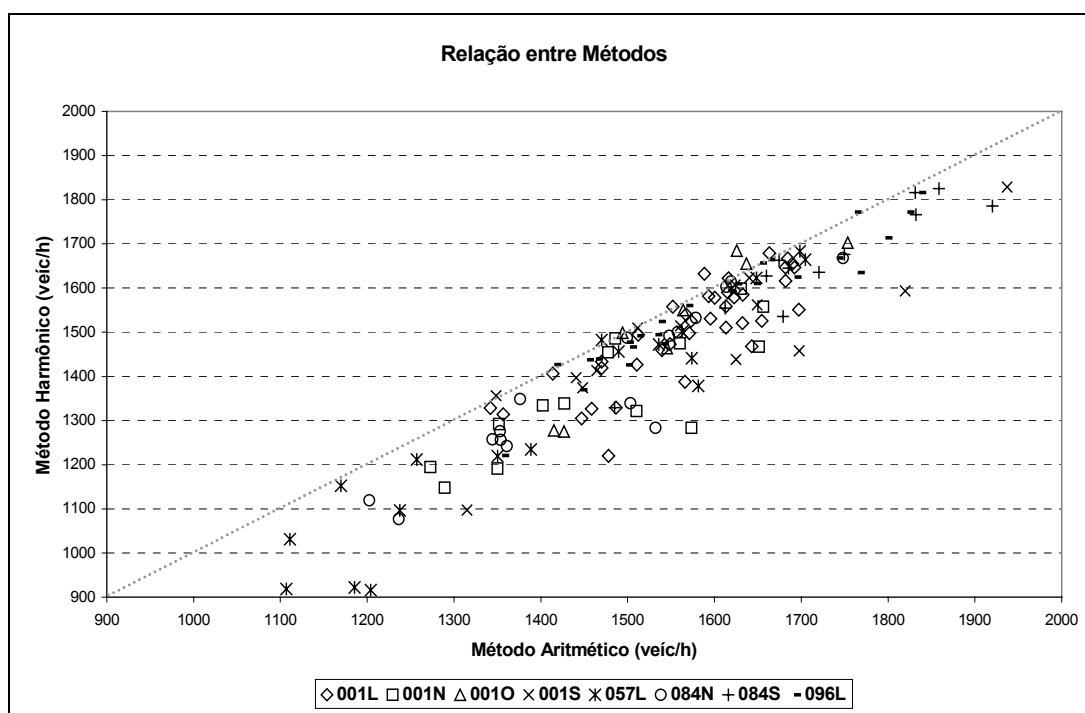


Figura 5.6: Relação entre os métodos aritmético e harmônico

A verificação desse fenômeno foi feita criando-se uma amostra cujas observações eram a diferença entre os valores de fluxo de saturação obtidos pelos métodos aritmético e harmônico. Essa amostra foi dividida em duas, baseadas nos valores de CV, resultando em uma amostra de 73 observações que possuíam os valores mais baixos de CV e uma outra, com o mesmo número, de observações com os valores mais altos. O critério de corte usado foi a mediana dos coeficientes de variação, de valor 23,7%.

As duas amostras foram então testadas através do teste Wilcoxon-Mann-Whitney (MILTON e ARNOLD, 1995) unilateral, resultando num valor-p inferior a 0,1%. O resultado nos permite dizer que a amostra com maiores CVs possui as maiores diferenças entre os métodos aritmético e harmônico. O teste não-paramétrico foi aplicado devido aos resultados do teste de normalidade das amostras envolvidas que rejeitou a hipótese nula de proveniência de população normal. No entanto, devido ao tamanho das amostras, poder-se-ia aplicar um teste-t para amostras independentes. Este, no entanto, reproduz o resultado do teste não-paramétrico equivalente. A Figura 5.7 mostra a diferença entre as amostras.

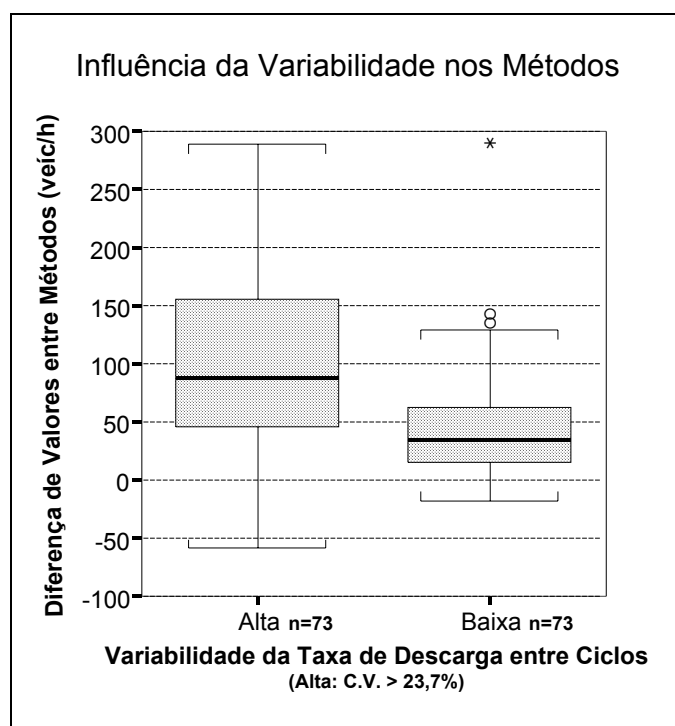


Figura 5.7: Influência da variação da taxa de descarga entre ciclos nos métodos

A constatação de que uma variação do comportamento do escoamento de veículos entre os ciclos resulta em maiores diferenças do método aritmético para o harmônico, não significa necessariamente inadequabilidade do método aritmético, uma vez que se pode argumentar que isso seja reflexo de uma maior responsividade do método às variações observadas em campo. Observemos, então, na Figura 5.8, um caso em que o método aritmético retorna um valor da ordem de 100 veíc/h maior que o método harmônico.

O gráfico foi montado a partir da sequência dos ciclos usados nos cálculos, tratando acumuladamente o número de veículos e tempo de descarga de um ciclo para outro, gerando um gráfico normalmente empregado em teoria das filas.

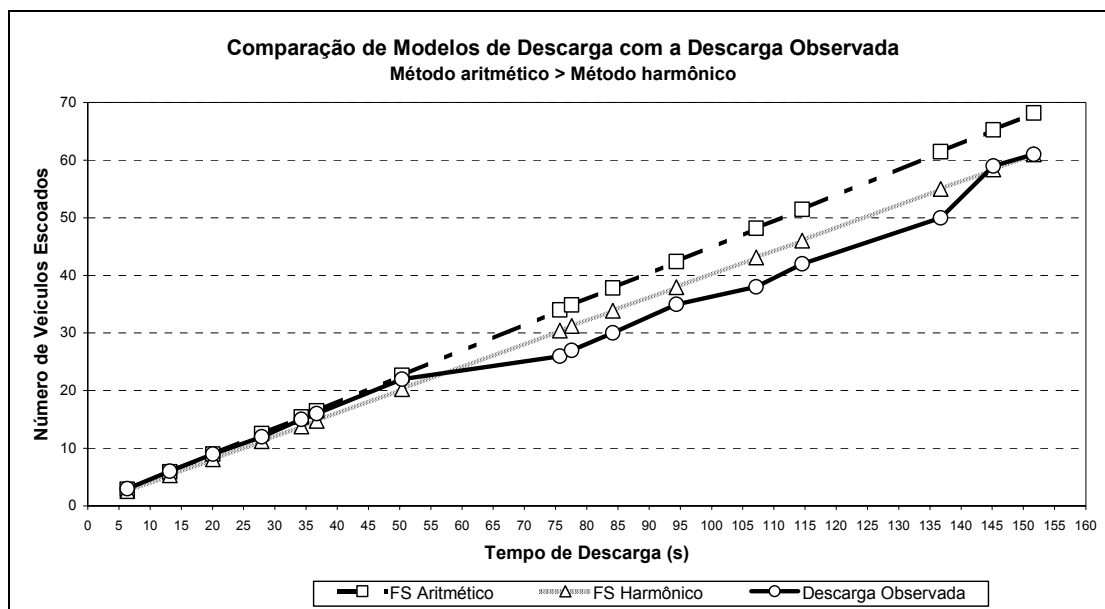


Figura 5.8: Diferenças entre os modelos de descarga e a descarga observada

A Figura 5.8 mostra um exemplo em que os resultados obtidos pelo método aritmético é superior aos do método harmônico. Ao interpretar o gráfico, devemos analisar as diferenças entre os métodos do ponto de vista do uso de cada um deles: como um modelo de desmanche de filas a ser usado principalmente na estimativa do atraso e alocação de tempo para a descarga. Quando a linha de um modelo está abaixo da linha das observações, significa que estamos subestimando a capacidade da faixa de tráfego ou aproximação, permitindo que um tempo maior que o necessário seja alocado e,

nesses termos, funcionamento abaixo da saturação. No caso em que a linha do modelo está acima da linha das observações, superestima-se a capacidade de escoamento do tráfego; dessa forma, alocando-se tempo insuficiente para descarga dos veículos, fazendo com que estes se acumulem de um ciclo para outro, numa operação saturada da faixa ou aproximação. Concluindo-se daí que uma linha de modelo abaixo da linha das observações é preferível, ao mesmo tempo em que, estando acima ou abaixo, é preferível que a linha do modelo esteja o mais próximo possível da linha de observações, de forma que estando a estimativa próxima do valor real, o tempo ocioso alocado seja mínimo, assim como o tempo deficitário. Notadamente, essas situações preferenciais são preenchidas pelo método harmônico no caso apresentado.

Vale observar, no caso apresentado, a principal característica do modelo harmônico em relação ao aritmético que é o uso do tempo estritamente necessário e suficiente para a descarga dos veículos usados nos cálculos; essa característica é marcada pela sobreposição dos pontos finais das linhas de observação e do modelo harmônico. Por outro lado, o método aritmético, estima que passaram cerca de dez veículos a mais do que aquele número realmente observado na descarga ou, para o número observado de veículos, alocaria cerca de 20 segundos menos do que o necessário para sua descarga.

Desse exemplo e da discussão anterior, não parece restar grande espaço para a adoção de métodos de medição de fluxo de saturação baseados na média aritmética de fluxos de ciclos individuais.

CAPÍTULO 6

6. VARIAÇÃO DO FLUXO DE SATURAÇÃO

Parece sem sentido discutir a variação do fluxo de saturação, uma vez que vários fatores afetam o seu valor, como comprova a lista de fatores de correção para condições operacionais de qualquer método empírico. Pretendeu-se tratar da variação observável em condições operacionais estáveis, pois esses métodos representam situações médias e devem embutir um certo grau de variabilidade desconhecido, o qual se pretendeu detectar. Essas variações afetam diretamente a prática de que se conhecendo o fluxo de saturação equivalente de um local a partir de uma medida, se possa obter valores em unidades de veículos por hora para qualquer outro horário, corrigindo o valor equivalente pela composição da demanda e proporção de manobras de conversões e outras interferências conhecidas.

O processo de detecção dessa variação pode seguir dois caminhos: obter o valor do fluxo de saturação em veículos equivalentes sob qualquer condição de tráfego de uma faixa ou aproximação e comparar esses valores, ou medir seu valor diretamente em veículos e comparar o valor encontrado entre situações operacionais semelhantes de uma mesma faixa ou aproximação. A primeira opção seria a melhor, uma vez que se poderia aproveitar todas as observações obtidas para a análise. Sua aplicação requer, no entanto, considerações a respeito do papel da equivalência veicular no processo.

6.1. EQUIVALÊNCIA VEICULAR

Os métodos de medição direta de fluxo de saturação obtêm os valores como uma taxa de veículos por unidade de tempo, porém também possuem um método alternativo (empírico) de estimação de fluxo de saturação em função das características físicas da aproximação e operacionais do tráfego local. Associados a esses processos de estimativas, existe uma diversidade de fatores que têm por fim reduzir o valor de um fluxo de saturação padrão, teórico e ideal, assumido como máximo observável, para uma estimativa do valor que se esperaria medir na aproximação ou faixa de interesse. Um desses fatores responde pela correção dos desempenhos entre tipos diferentes de veículos, por isso é chamado de fator de composição veicular sendo função da composição e dos fatores de equivalência. Normalmente, nas fórmulas empíricas, o valor padrão de fluxo de saturação é

referente ao fluxo de veículos de passeio em tráfego direto. Portanto quando o tráfego observado possui outros tipos de veículos de desempenho inferior ao carro de passeio, o fluxo observado deve ser inferior ao teórico ideal, de forma que este deve ser reduzido por um fator que faz a equivalência entre os tipos de veículos.

O HCM 2000 (TRB, 2000), por exemplo, assume que o valor de referência do fluxo de saturação é de 1.900 carros de passeio por hora de tempo de verde por faixa de tráfego. Uma série de fatores de atrito é considerada de forma que esse valor seja reduzido ao valor esperado de fluxo de saturação, sendo eles: largura da faixa, percentual de veículos pesados, inclinação de terreno, operações de estacionamento, operações de embarque e desembarque de ônibus, manobras de conversão, conflitos com pedestres, entre outros. Não há dúvidas sobre o papel dos fatores de equivalência veicular na aplicação de fórmulas empíricas, estando claro que eles têm a função de converter um fluxo idealizado, estabelecido em unidades de carros de passeio (*ucp*) por unidade de tempo, em um fluxo estimado na unidade de veículos por unidade de tempo, que será utilizado no cálculo de tempos de semáforos e estimativas de atrasos. Neste trabalho, deve-se considerar que a análise de variação de fluxo de saturação foi feita associada às aproximações de onde se obtiveram os valores, de forma que a influência das características físicas em qualquer variação observada ficou embutida nos resultados e, por consequência, não houve necessidade de aplicação de fatores correlacionados a elas, restando apenas a influência dos fatores operacionais.

O processo motivador deste estudo foi o procedimento adotado na calibração do SCOOT, no qual um valor de fluxo de saturação em unidades equivalentes é obtido e utilizado ao longo de todo o dia e em todos os dias de operação. Apesar de a equivalência no SCOOT ser uma variável complexa, pode-se fazer uma analogia com o processo usual de determinação de fluxo de saturação da seguinte forma: um técnico mede o valor de fluxo de saturação numa aproximação por um método convencional, em um determinado período do dia, e o converte para um valor equivalente em *ucp*. Com o objetivo de reduzir tempo e custos de pesquisa, esse técnico utiliza o valor encontrado em *ucp* para os demais períodos nos quais precisará de um valor de fluxo de saturação, corrigindo esse valor encontrado a partir das características da composição da demanda veicular.

Esse procedimento é passível de questionamento, uma vez que ele supõe que a relação de desempenho entre veículos permanece constante ao longo do dia e entre dias da semana, além de não contemplar variações na proporção de veículos em conversão e nas manobras de embarque/desembarque e estacionamento, além de outras interferências como o caso de conflitos com pedestres. Esse procedimento é claramente falho quando não contempla os fatores de interferência citados, mas há indícios que não só esses fatores interferem na taxa de descarga, como também outros fatores que não são mensuráveis diretamente, como o caso de variações comportamentais dos motoristas. Esses problemas citados são extensíveis ao processo de estimativa de fluxo de saturação por fórmulas empíricas cujos fatores de equivalência são usualmente tomados como constantes ao longo do tempo, variando apenas pela proporção da variável que pretende corrigir, porém não contemplando variações decorrentes de fatores externos.

Exemplos que essas suposições de invariabilidade dos fatores de equivalência não se sustentam foram mostrados na revisão bibliográfica, como o trabalho de BENEKOHAL e ZHAO (1996) que deduziram fatores de equivalência veicular para caminhões em função da sua proporção e do volume de tráfego de veículos, mostrando que o desempenho de caminhões, numa dada proporção, decai na medida que o volume de tráfego aumenta, ou seja, seu fator de equivalência aumenta na proporção que o volume aumenta. Além desse, STOKES (1989) mostra dados de diferenças de valores de fluxo de saturação entre períodos de pico. Uma vez que os valores de STOKES (1989) estão em unidades equivalentes, a expectativa seria que os valores obtidos fossem iguais, uma vez que o uso de equivalência veicular deveria remover a interferência causada pelas diferentes composições de tráfego observadas ao longo do dia.

Os trabalhos citados no parágrafo anterior geram uma conclusão significativa quanto à aplicação dos fatores de equivalência veicular na investigação da variação do fluxo de saturação. Se os fatores de equivalência não são constantes, então os processos usuais de calculá-los e aplicá-los não são adequados; por isso as controvérsias sobre qual o procedimento correto para sua obtenção de forma a se eliminar os efeitos da composição, conforme se mostrou no Capítulo 2 deste trabalho.

A Figura 6.1 mostra a conversão dos valores de fluxo de saturação da faixa de fluxo direto da aproximação 001L em fluxo equivalente, utilizando-se do procedimento do HCM (TRB, 1994). Essa figura tem por fim esclarecer a já referida prática de usar o fator de composição de tráfego como numa função bijetora, no sentido que, se multiplicamos o fator de composição pelo fluxo ideal para obtenção de um fluxo estimado em unidades de veículos, poderíamos tomar um fluxo medido em veículos e dividi-lo pelo fator de composição para obtenção do fluxo ideal em unidades de carro de passeio.

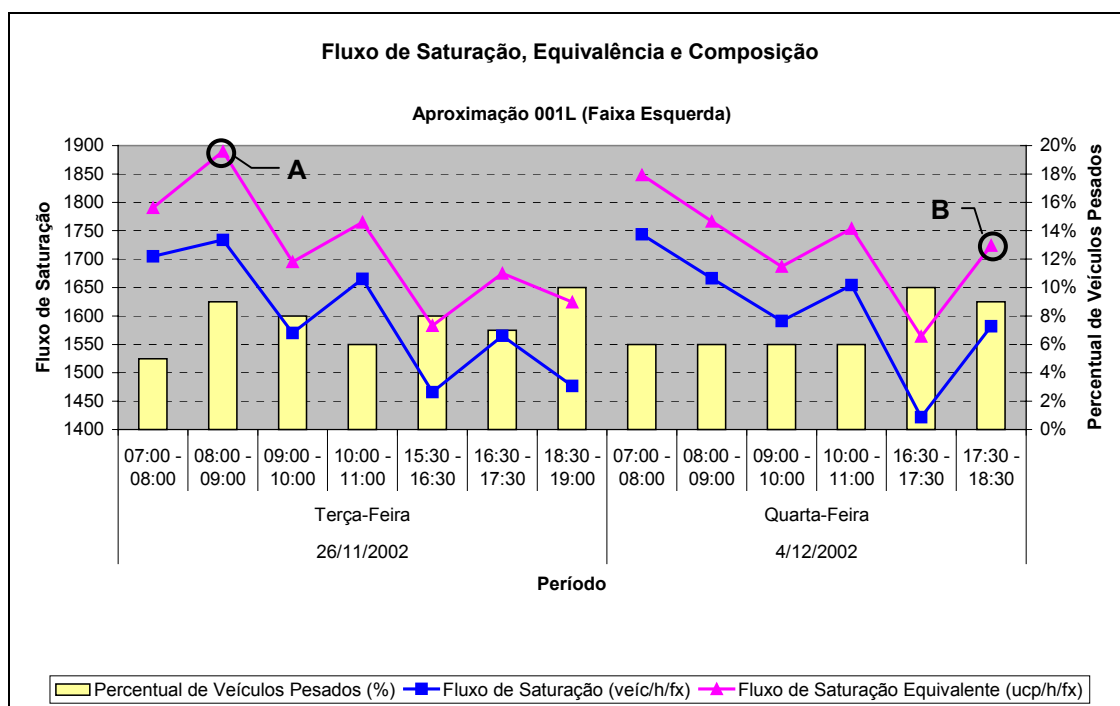


Figura 6.1: Emprego do fator de composição veicular no procedimento do HCM 1994

Digamos, por exemplo, que se tome a medida do fluxo de saturação no horário de pico matinal da faixa esquerda da aproximação e o converta para unidades equivalentes, resultando no ponto “A” da Figura 6.1. Segundo os conceitos de equivalência veicular, dado que estamos tratando de uma única faixa de tráfego e, portanto todas as características físicas permanecem inalteradas em qualquer medição subsequente, e que essas medições não sofrem influência de manobras de conversões, de estacionamento ou operações de embarque de ônibus, seria de se esperar que o ponto “A”, fosse o valor do fluxo de saturação ideal para aquela faixa de tráfego: a maior taxa de descarga possível de ser atingida naquele local. Esperar-se-ia, também, que o fator de composição fosse capaz de eliminar qualquer influência da composição

do tráfego local (no caso em questão, a composição é o único fator de atrito mutável). Então, a aplicação da função do fator de composição em qualquer ponto medido deveria resultar no mesmo valor indicado no ponto “A” do gráfico; no entanto, percorrendo a linha magenta do gráfico, nota-se que não é isso que acontece, por exemplo, no ponto “B”. A interpretação desse resultado indica que o fator de composição do tráfego não está cumprindo o seu papel ou que há mais componentes significativos de interferência da descarga de veículos, do que aqueles listados na metodologia do HCM. Observa-se que no período de 08:00 até 10:00 da quarta-feira, o percentual de veículos pesados se mantém constante enquanto o fluxo de saturação cai continuamente, indicando a existência de fatores estranhos ao método usado.

Uma outra forma de visualização seria obter o fluxo ideal e aplicar os fatores de correção. Supondo que o ponto “A” da Figura 6.1 corresponda ao valor máximo teórico da descarga de veículos padrões naquela aproximação, calculou-se os valores do fluxo de saturação estimados pela aplicação do fator de correção da composição do tráfego em cima desse valor. A Figura 6.2 mostra o resultado que se obteria se por acaso fosse tomada apenas uma medida do fluxo de saturação no pico da manhã e se quisesse estimar o valor para os demais períodos do dia em função do conhecimento da composição do tráfego local. Percebe-se que são poucas as observações em que se encontraria uma superestimativa inferior a 100 veíc/h.

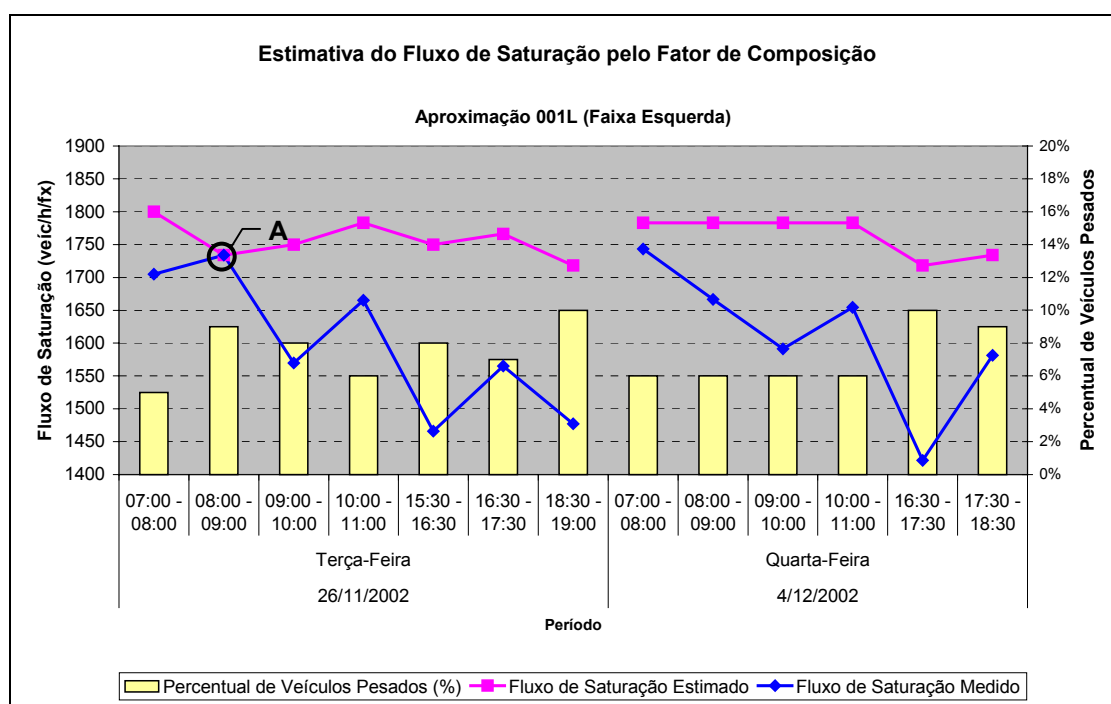


Figura 6.2: Discrepância entre valor medido e estimativa do fluxo de saturação pelo HCM 1994

Do que foi exposto, a aplicação de um procedimento que contemplasse o uso de equivalência veicular exigiria, portanto, uma avaliação detalhada da forma de como obter os fatores apropriados capazes de anular os efeitos das características a que se referem. Esse processo é uma avaliação que, apesar de relevante, seria mais bem abordada em um trabalho elaborado para esse fim; portanto, nesta pesquisa, considerou-se o uso de equivalência veicular inadequado.

6.2. CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO OBSERVADO

Assumindo a inadequabilidade do uso de equivalência veicular, restou avaliar o escoamento de veículos num determinado local sob condições semelhantes de tráfego, de forma que fosse possível a comparação dos valores de fluxo de saturação. Esse processo, entretanto, não previsto na coleta de dados, assim como a necessidade de usar um método próprio de medição, tendeu a enfraquecer a qualidade e capacidade de análise da variação, uma vez que somente após o processamento dos dados foi possível identificar as observações adequadas para a avaliação.

A única forma disponível para se detectar uma variação no fluxo de saturação por motivos comportamentais, seria a eliminação das diferenças operacionais e físicas nos dados. As diferenças físicas se apresentam exclusivamente como a variação na largura da via; as operacionais abrangem a composição, a proporção de manobras de conversão, de estacionamento e de operações de embarque e desembarque de ônibus. Uma vez que os efeitos de cada um desses fatores não foram mensurados, trabalhar com eles em conjunto se torna impraticável por não ser possível isolar os efeitos individuais. Daí, optou-se por reduzir o número de variáveis no conjunto de dados obtidos.

A princípio, os valores de fluxo de saturação foram recalculados pelo método H/P, proposto no Capítulo 5, considerando apenas ciclos em que não ocorreram manobras de estacionamento ou operações de ônibus, eliminando-se essas interferências dos valores obtidos. Trabalhando-se com faixas individuais e analisando a faixa esquerda de tráfego direto, foi possível eliminar o efeito da conversão na variação da descarga, isolando-se apenas o fator da composição. Numa forma de obtenção de uma maior quantidade de dados, entendeu-se que o grupo de

aproximações com largura aproximada de sete metros (001O, 001N, 001S, 084N, 084S, 096L) poderia ser avaliado como uma só amostra, de uma mesma população.

Com a finalidade de mostrar sob que condições os dados da análise foram obtidos, apresentam-se os gráficos das variáveis que caracterizam o tráfego observado (Figura 6.3 a Figura 6.11, p. 106 a 114). O interesse neles é observar a grandeza das variáveis, sua variação e recorrência.

Os dados da Figura 6.3 foram obtidos a partir do banco de dados do sistema SCOOT, correspondendo a um valor estimado de volume horário, convertido de unidades LPU em veículos. Vale notar que as observações obtidas correspondem a períodos diversos, abrangendo picos e entre-picos. 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.

A Figura 6.4, a Figura 6.5 e a Figura 6.6 mostram a proporção de veículos pesados nos ciclos que foram usados nos cálculos. O percentual de veículos pesados tende a se repetir em dias distintos, o padrão parece ser de diferenças da ordem de 5% ou inferior. Abordando as duas faixas simultaneamente, e somente em dias úteis, a variação não passa de 3%. Observa-se ainda a tendência de uma maior concentração de veículos pesados na faixa direita, já esperada por ser essa por onde trafegam os ônibus e veículos lentos. Os valores percentuais foram arredondados para o inteiro mais próximo.

Vale esclarecer que veículos pesados foram considerados como qualquer veículo que não tivesse sido caracterizado como “carro de passeio” conforme descrito no Capítulo 3. Ressalta-se que essa divisão em duas classes é relativamente comum, sendo usada pelo HCM (TRB, 2000) e ARRB (AKÇELIK, 1993). No caso de ambas as referências citadas, veículos pesados são qualquer veículo com mais de quatro rodas tocando o solo, o que é basicamente as características incluídas na classificação aqui usada, com exceção que esta deve incluir caminhões leves que usam apenas quatro pneus. A questão da classificação veicular para refinar a modelagem de tráfego será sempre controversa, mesmo quando se usa um número como cinco classes de veículos na expectativa que se minimize a variação de comportamentos. Mesmo com

uma classificação dessa, dentro de cada classe ainda há grande heterogeneidade de comportamentos, como mostra o trabalho de KOCKELMAN e SHABIH (2000) que avalia a equivalência de veículos leves de carga, subclassificando-os em quatro tipos. O ideal seria uma classificação cruzada de relação peso/potência do veículo com seu tamanho físico. O número de tipos que se obteria nesse processo exigiria, entretanto, grande esforço de coleta de dados para obtenção de uma amostra capaz de ser tratada por uma análise subsequente.

A Figura 6.7 e a Figura 6.8 referem-se às manobras de conversão. Como na proporção de veículos pesados, os valores percentuais são arredondados para o inteiro mais próximo. É possível identificar alguma recorrência de comportamento, com o perfil se repetindo em dias diferentes. Considerando a faixa direita e dias úteis apenas, a diferença entre dias na proporção de conversões é inferior a 10%, na maioria dos casos até menor que 5%. A aproximação 001N destaca-se das demais por apresentar entre 20% a 30% do tráfego efetuando conversões à direita. O aparente equilíbrio de volume entre as faixas mostra que a grandeza relativa de valores pouco se altera quando se trata a aproximação como um todo ou somente a faixa direita.

O comportamento do fluxo de saturação ao longo dos dias da semana parece seguir as mesmas tendências, apesar de alguma diferenciação entre valores pontuais, conforme se vê na Figura 6.9, na Figura 6.10 e na Figura 6.11. O comportamento da aproximação 001L parece se repetir nos dois dias úteis pesquisados, apresentando uma divergência nos dois períodos finais da ordem de 400 veíc/h. Nas aproximações 057L e 001S, diferenças dessa grandeza também são observadas. Observa-se na aproximação 001N uma queda acentuada no escoamento de veículos, mesmo quando os percentuais de veículos pesados e conversões mantêm-se estáveis. Na 084S, observa-se o fenômeno contrário: a elevação do fluxo de saturação. A variação total observada nas aproximações em um dia, atingiu valores tão altos quanto 780 veíc/h na 084S, sendo observadas variações de 700 veíc/h nas aproximações 001L e 001N.

Uma melhor avaliação do relacionamento entre variáveis será feita a seguir, utilizando representações gráficas mais apropriadas. Os gráficos da Figura 6.9, da Figura 6.10 e da Figura 6.11 cumprem seus papéis em mostrar uma amplitude de variação diária possível de ser observada na taxa de descarga dos veículos em regime de saturação, bem como a diversidade de tendências.

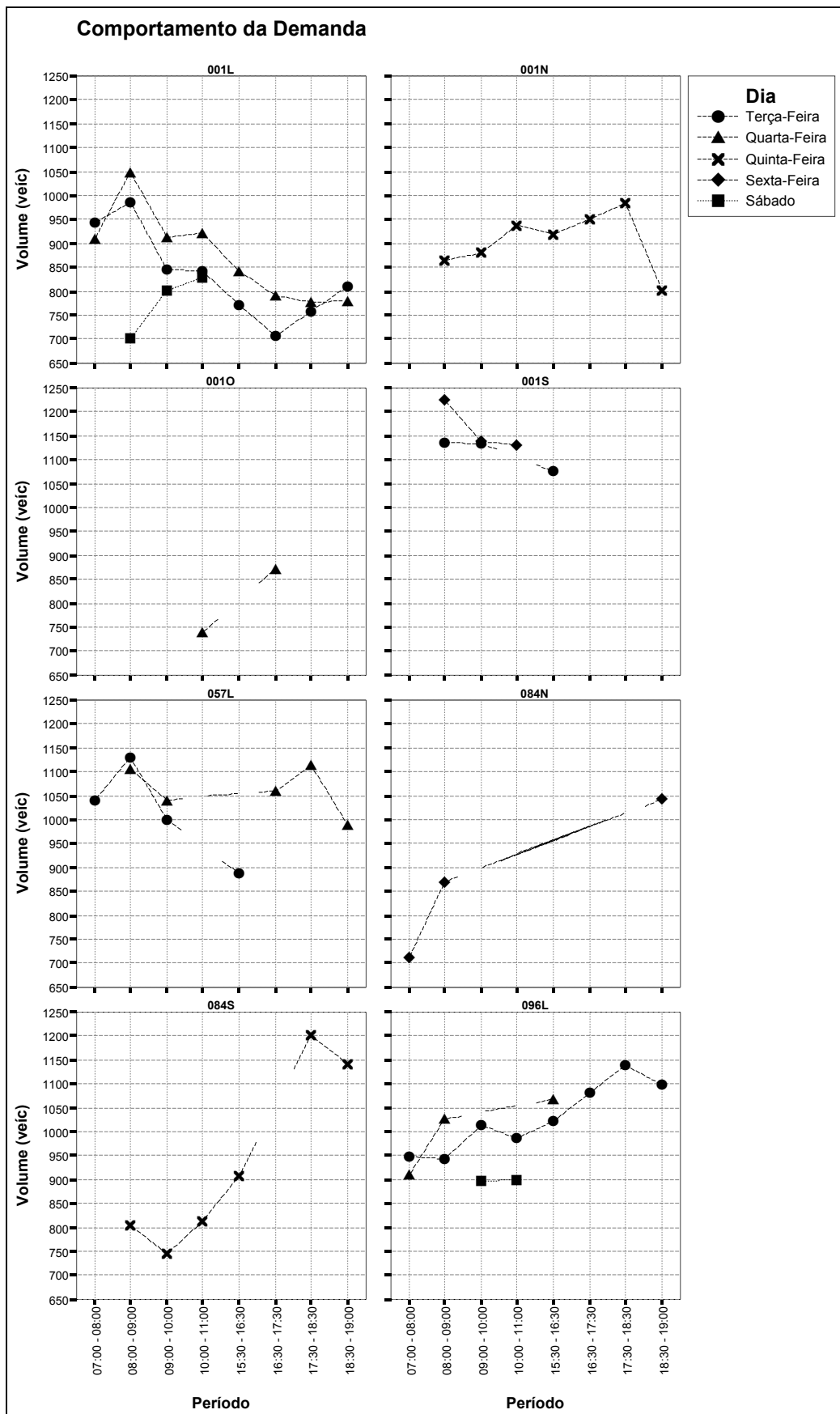


Figura 6.3: Demanda estimada por aproximação

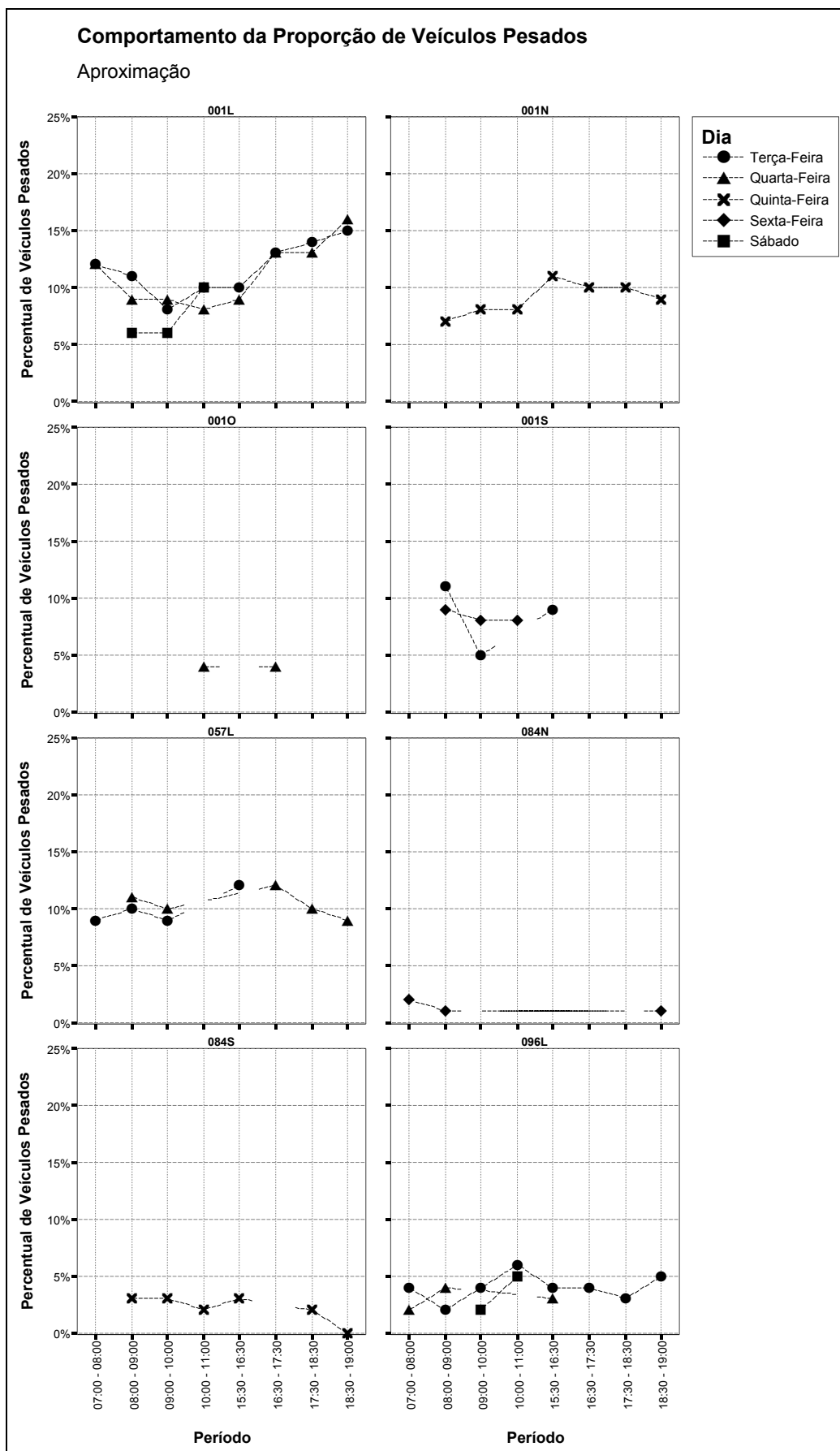


Figura 6.4: Percentual de veículos pesados nas observações por aproximação nos ciclos utilizados

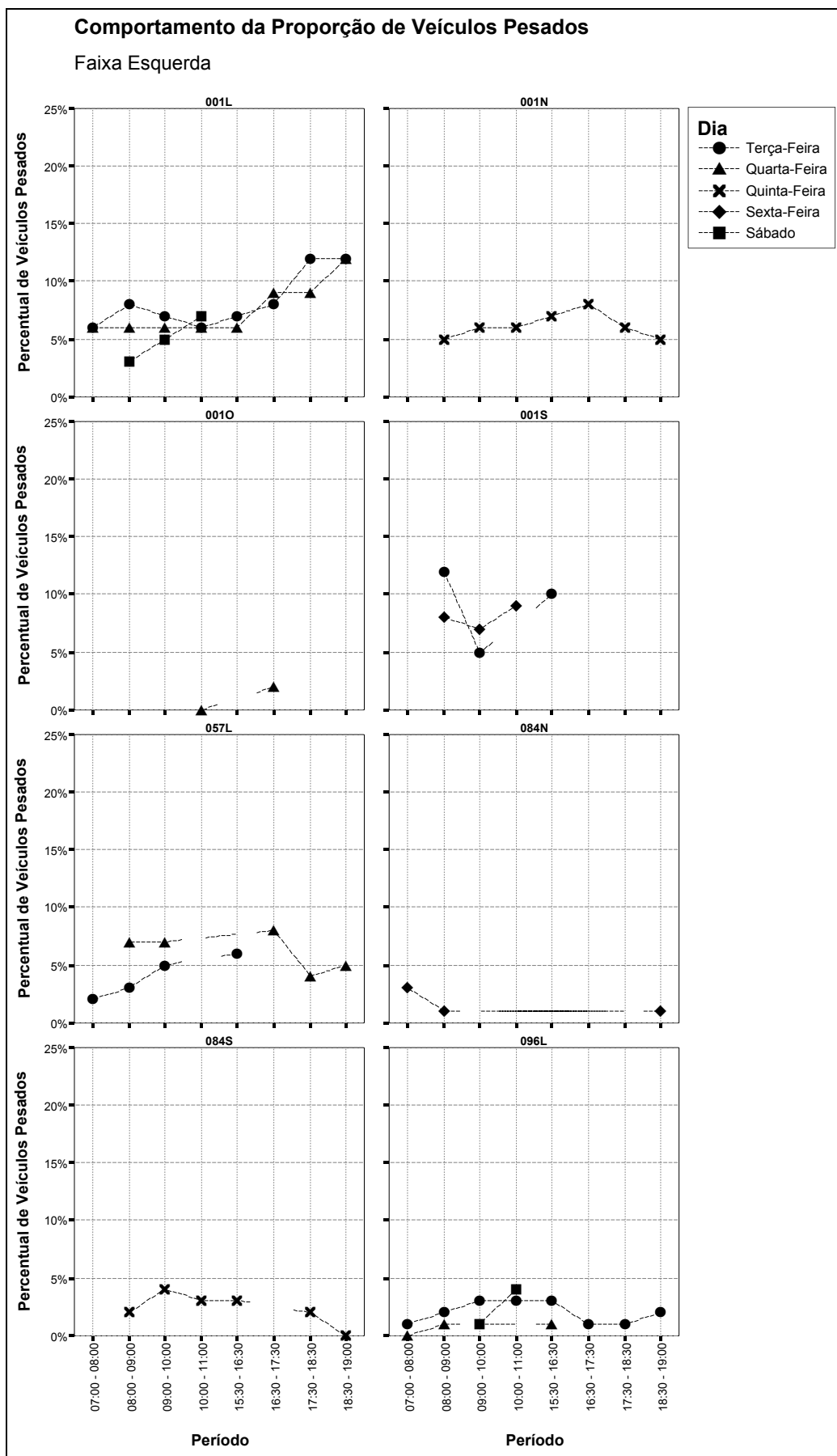


Figura 6.5: Percentual de veículos pesados nas observações das faixas esquerdas nos ciclos utilizados

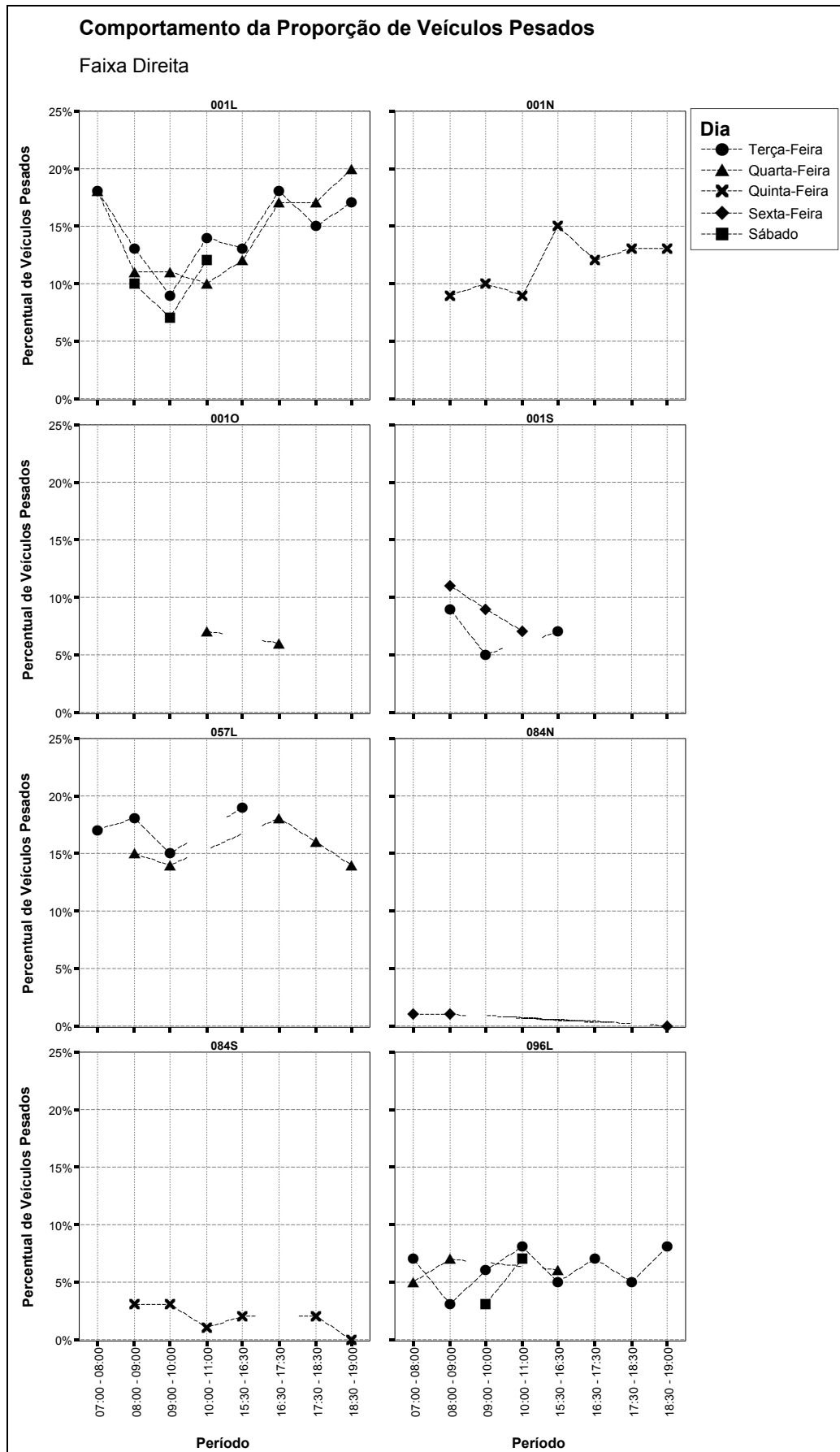


Figura 6.6: Percentual de veículos pesados nas observações das faixas direitas nos ciclos utilizados

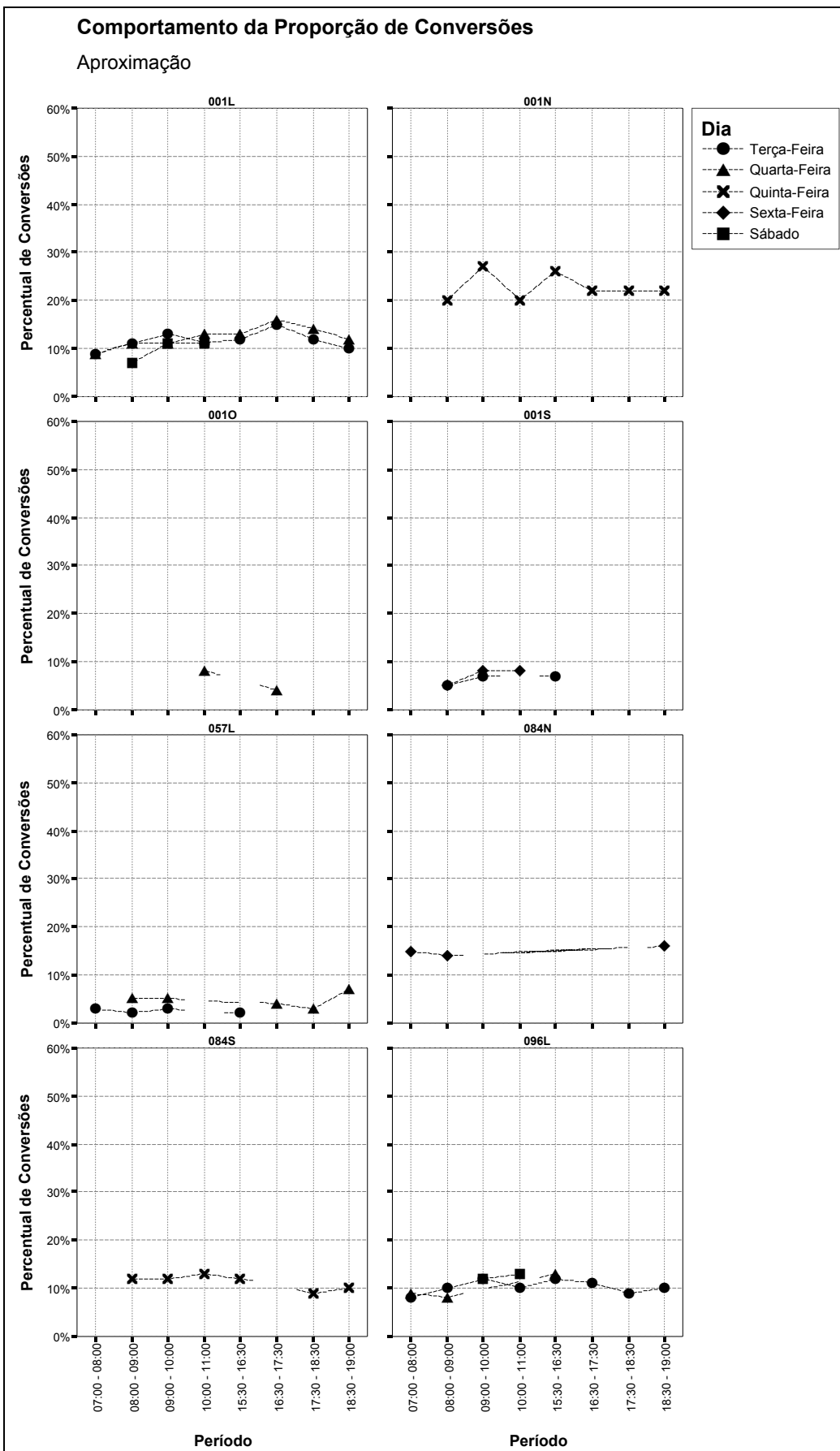


Figura 6.7: Percentual de conversões por aproximação nos ciclos utilizados

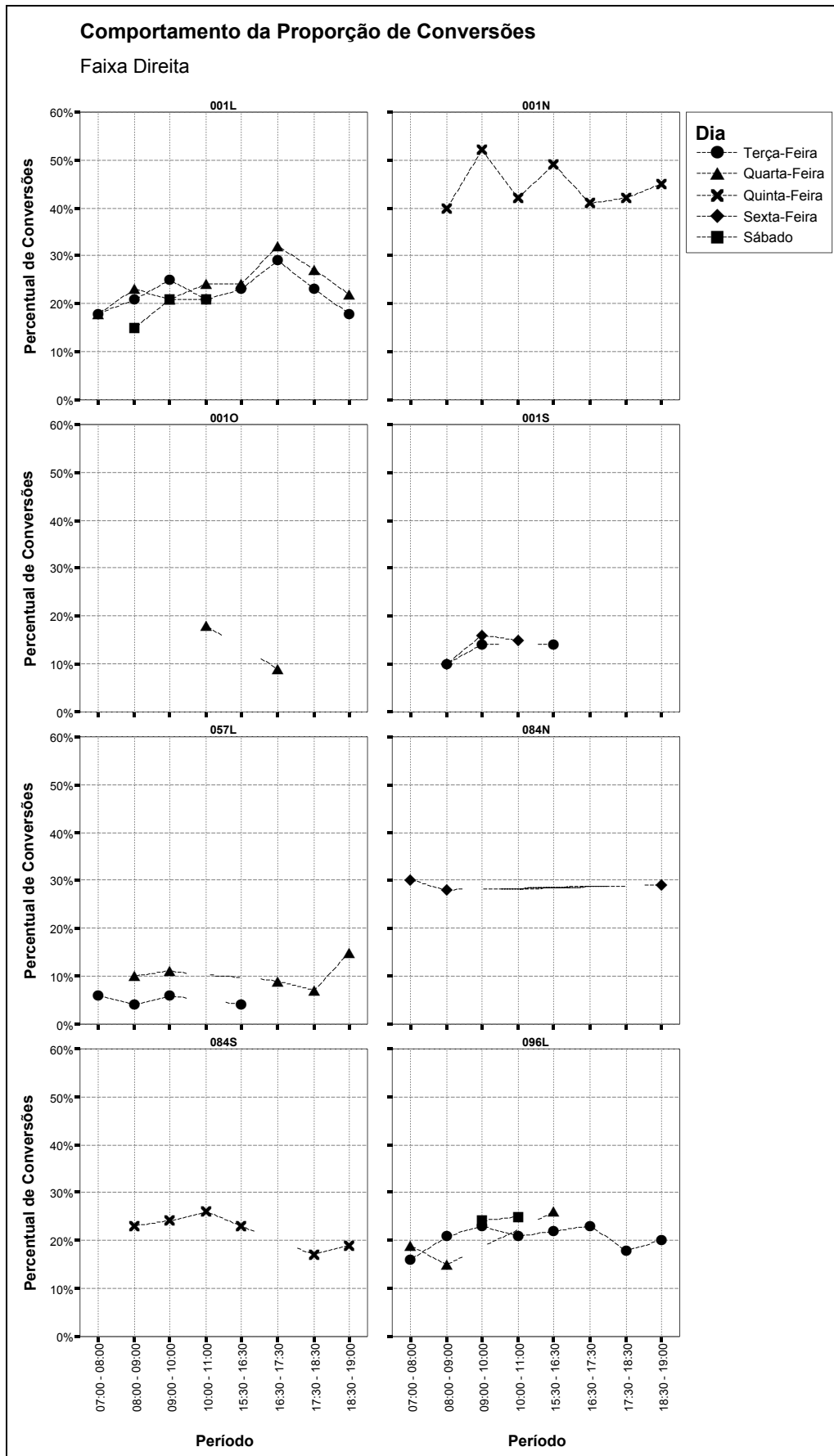


Figura 6.8: Percentual de conversões nas faixas direitas dos ciclos utilizados

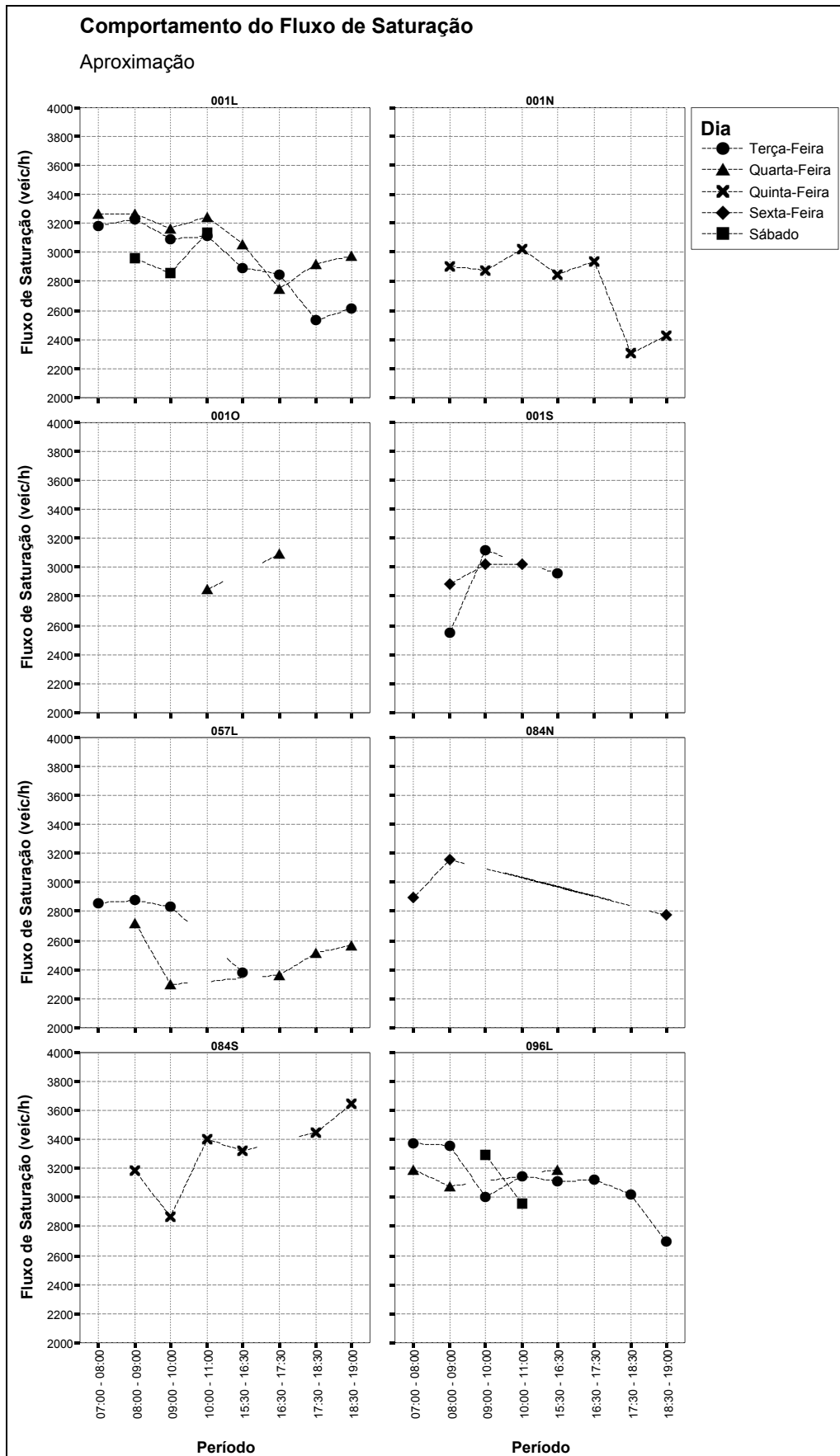


Figura 6.9: Fluxo de saturação por aproximação

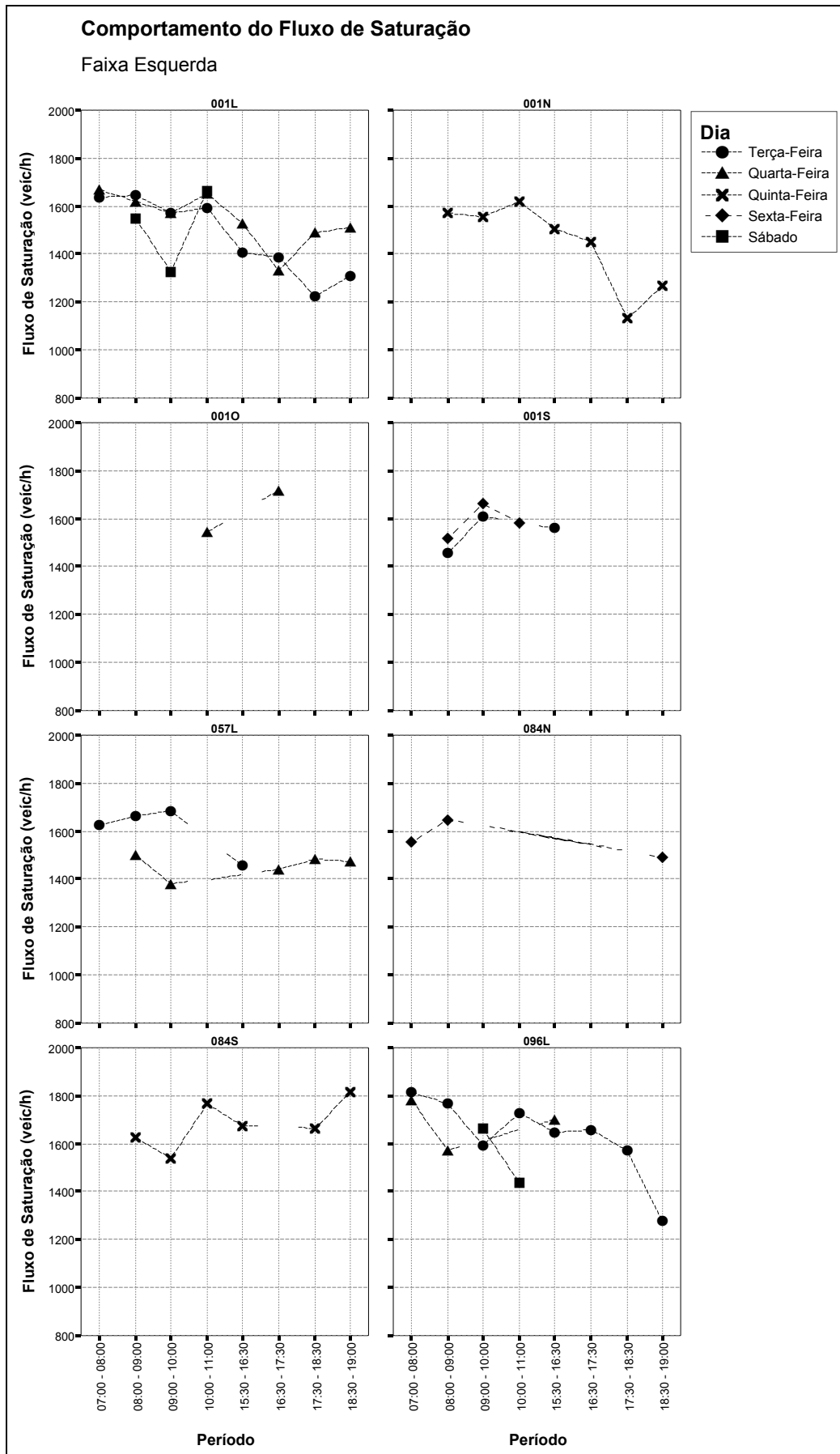


Figura 6.10: Fluxo de saturação das faixas esquerdas

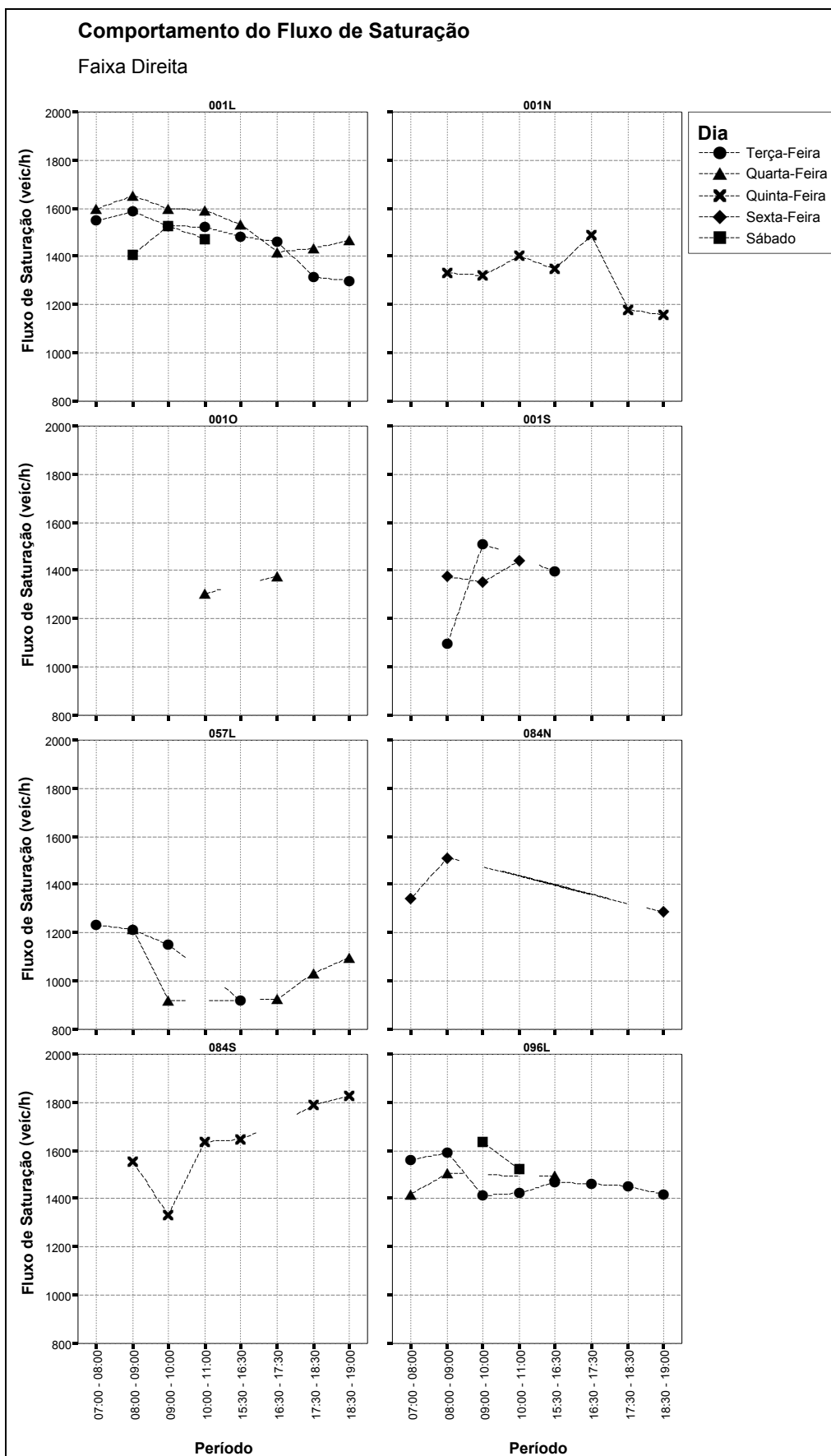


Figura 6.11: Fluxo de saturação das faixas direitas

6.3. VARIAÇÃO DO FLUXO DE SATURAÇÃO – FLUXO DIRETO

A intenção aqui é verificar a variação do valor do fluxo de saturação medido sob condições de tráfego e características físicas equivalentes. A identificação dessas variações implica de imediato que a relação de equivalência entre veículos não é constante, apontando uma fraqueza dos métodos de estimativa do fluxo de saturação por meio de fórmulas empíricas.

A abordagem inicial é de se trabalhar com as faixas esquerdas das aproximações estudadas de modo que se pudesse eliminar os efeitos das conversões. As observações são compostas de valores de fluxo de saturação para as faixas esquerdas obtidas com base no valor encontrado pelo método H/P, proposto no Capítulo 5, relativo ao período de uma hora contínua em que se puderam encontrar um mínimo de 15 ciclos, sem manobras de estacionamento ou operações de ônibus na faixa direita, com filas mínimas de seis veículos simultâneas em ambas as faixas, garantindo que os mesmos ciclos seriam usados em ambas as faixas.

6.3.1. Verificação da Independência entre Faixas

Desejando-se trabalhar com uma única faixa de forma a excluir os efeitos das conversões, é preciso, de início, garantir que a descarga veicular dessa faixa não seja influenciada por elementos pertencentes à descarga da faixa ao lado. Aqui se faz importante, a garantia de uso dos mesmos ciclos em ambas as faixas.

Verificando o comportamento das duas faixas simultaneamente, e usando-se as observações provenientes das aproximações de 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. O mesmo comportamento de baixo coeficiente de correlação de Spearman e valor-p elevado (acima de 25%) foi encontrado nas amostras das duas outras aproximações. Assume-se, portanto, que as conversões da faixa direita não têm força para afetar significativamente os valores do fluxo de saturação da faixa esquerda. A Figura 6.12 mostra graficamente a relação entre as duas variáveis.

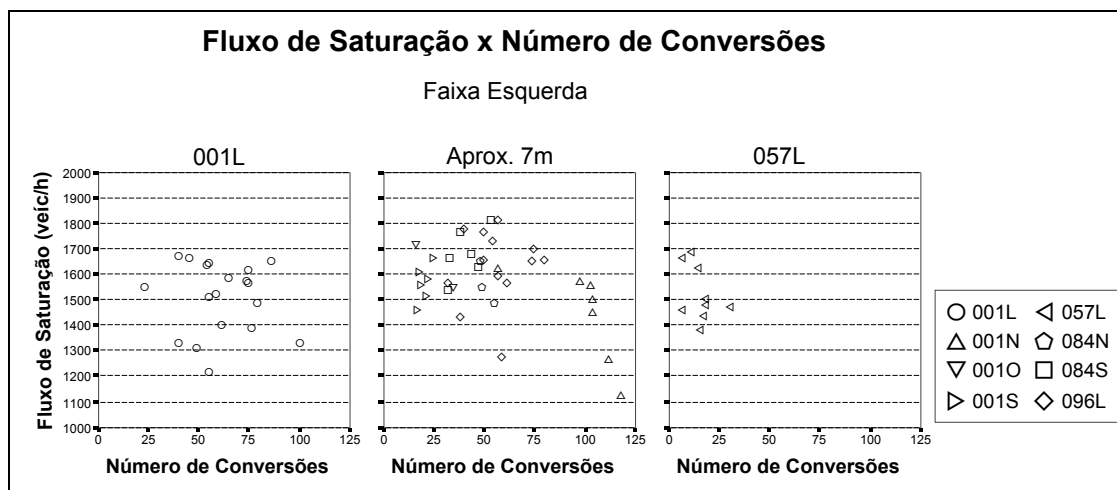


Figura 6.12: Relação entre o fluxo de saturação da faixa esquerda e o número de conversões da faixa direita.

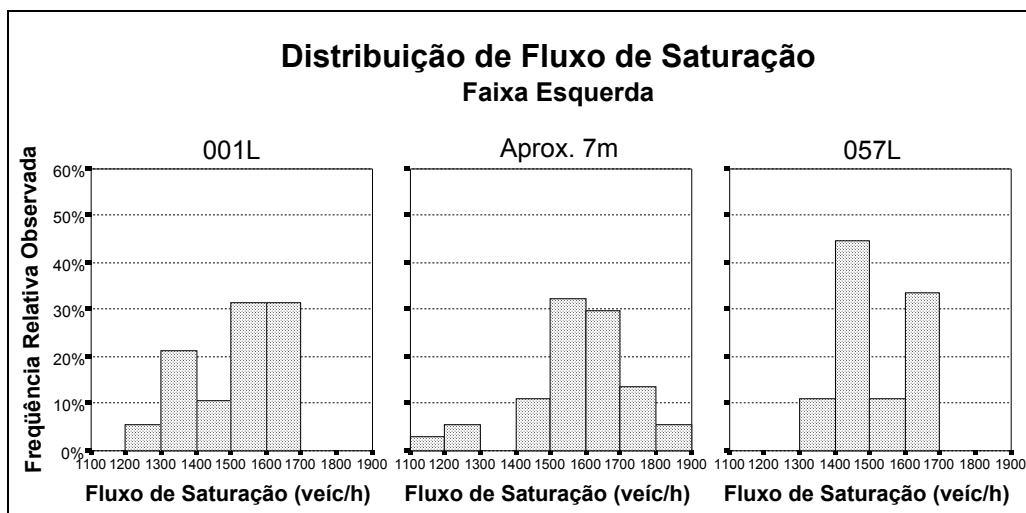
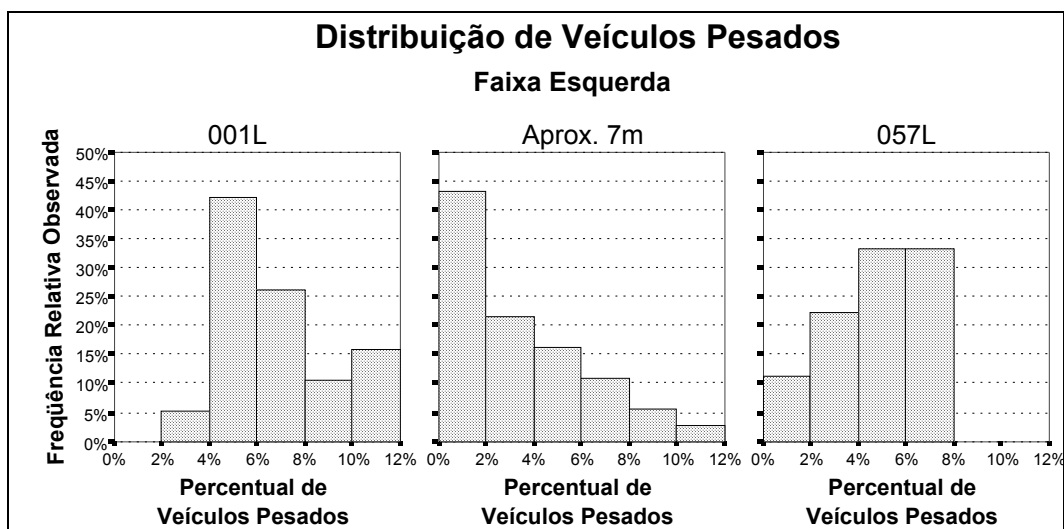
O efeito da presença de veículos pesados na faixa direita, agindo como um fator de atrito sobre a faixa esquerda, não pode ser verificado devido à alta correlação, já esperada, no número desses veículos entre as duas faixas. Nas duas aproximações (057L e 096L) onde a correlação do número de veículos pesados entre faixas não se verifica, e há um número razoável de observações (nove e 13, respectivamente), também não se verifica uma correlação entre o valor do fluxo de saturação da faixa esquerda e o número de veículos pesados na faixa direita. Assume-se, para todos os efeitos, que o fluxo de saturação da faixa esquerda não sofre influência da composição do tráfego e do número de conversões da faixa direita. Vale lembrar, que a rejeição da correlação é a única resposta a ser interpretada como significativa, uma vez que não se pode estabelecer uma relação causal estrita entre as variáveis.

6.3.2. Variação do Valor do Fluxo de Saturação

As variáveis avaliadas aqui foram o fluxo de saturação e o percentual de veículos pesados. A princípio, tratou-se de três amostras: as observações da aproximação 001L, da 057L e do conjunto formado pelas aproximações com largura da ordem de sete metros. A Tabela 6.1, a Figura 6.13 e a Figura 6.14 apresentam as características dessas amostras.

Tabela 6.1: Descrição estatística das variáveis por amostra

Amostra	Variável	n	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Coef. de variação
001L	Fluxo de Saturação (veíc/h)	19	1220	1669	1509	138	9,2%
	Percentual de Veículos Pesados	19	3%	12%	7,4%	2,5%	33,1%
Aprox. 7m	Fluxo de Saturação (veíc/h)	37	1129	1817	1587	149	9,4%
	Percentual de Veículos Pesados	37	0%	12%	3,7%	3,0%	81,6%
057L	Fluxo de Saturação (veíc/h)	9	1378	1683	1522	108	7,1%
	Percentual de Veículos Pesados	9	2%	8%	5,2%	2,0%	38,0%

**Figura 6.13:** Distribuição do fluxo de saturação nas faixas esquerdas.**Figura 6.14:** Distribuição de veículos pesados nas faixas esquerda.

Na Figura 6.15 e na Tabela 6.2 mostram-se os valores de fluxo de saturação para a aproximação 001L. Observa-se que a faixa esquerda da aproximação

apresenta maior tendência de operar sob 6% de tráfego de veículos pesados. Nessa abscissa, observa-se que sob mesma composição de tráfego, há uma variação da ordem de 150 veíc/h nos valores medidos do fluxo de saturação, variação detectada num mesmo dia, uma quarta-feira. Uma variação maior pôde ser observada na terça-feira, 26/11/2002, sob 8% de veículos pesados. Nesse dia, uma variação de cerca de 260 veíc/h pôde ser observada entre dois períodos o de 08:00 - 09:00 e o de 16:30 - 17:30. Em dois dias distintos, com mesma proporção de veículos pesados de 12%, observamos uma variação do fluxo de saturação da ordem de 200 veíc/h.

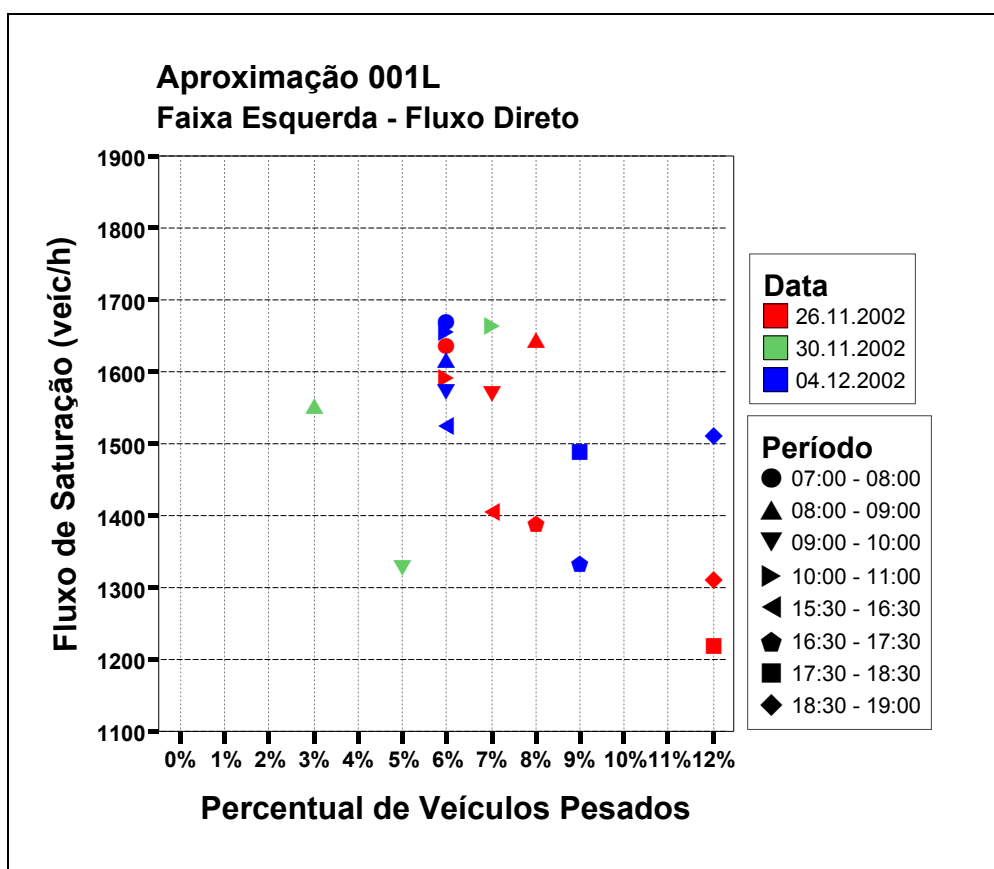


Figura 6.15: Variação do fluxo de saturação por proporção de veículos pesados (001L)

Tabela 6.2: Variação do fluxo de saturação por proporção de veículos pesados (001L)

Veículos Pesados	Média (veic/h)	Desvio Padrão (veic/h)	Coef. de Variação	Mínimo (veic/h)	Máximo (veic/h)	Intervalo (veic/h)	Contagem
3%	1551	-	-	1551	1551	0	1
5%	1328	-	-	1328	1328	0	1
6%	1609	50	3,1%	1525	1669	144	7
7%	1546	131	8,5%	1405	1664	259	3
8%	1516	182	12,0%	1388	1645	257	2
9%	1410	110	7,8%	1333	1488	156	2
12%	1347	149	11,0%	1220	1511	291	3

Avaliando a Figura 6.16 e a Tabela 6.3, referentes à aproximação 057L, observamos que em duas horas consecutivas, com 7% de veículos pesados, ocorre uma variação de 120 veíc/h no valor de fluxo de saturação. Considerando dias diferentes, uma variação da ordem de 200 veíc/h pode ser detectada entre um período horário matinal e um vespertino com 5% de veículos pesados.

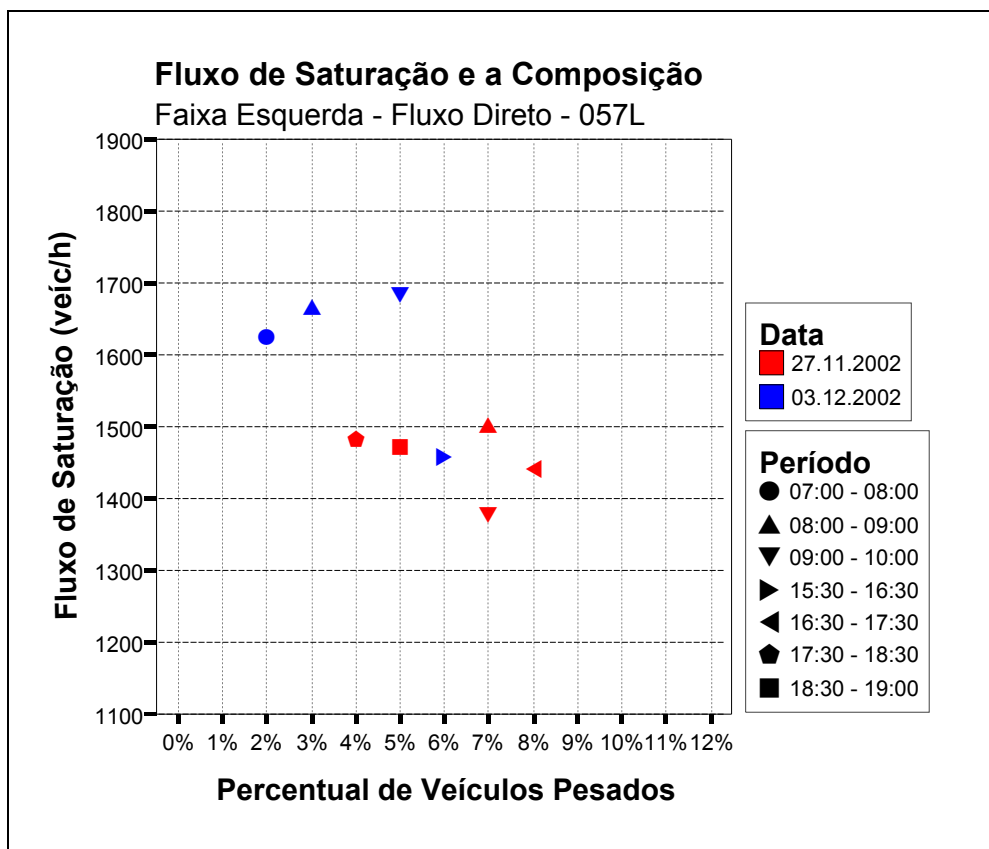


Figura 6.16: Variação do fluxo de saturação por proporção de veículos pesados (057L)

Tabela 6.3: Variação do fluxo de saturação por proporção de veículos pesados (057L)

Veículos Pesados	Média (veíc/h)	Desvio Padrão (veíc/h)	Coef. de Variação	Mínimo (veíc/h)	Máximo (veíc/h)	Intervalo Contagem
2%	1623	-	-	1623	1623	0
3%	1665	-	-	1665	1665	0
4%	1482	-	-	1482	1482	0
5%	1578	149	9,5%	1472	1683	211
6%	1457	-	-	1457	1457	0
7%	1440	87	6,0%	1378	1501	123
8%	1441	-	-	1441	1441	0

No caso da Figura 6.17, da Figura 6.18 e da Tabela 6.4, que se referem ao conjunto de aproximações com largura de cerca de sete metros, o que melhor se pode extrair dos dados é o grau de variação do fluxo de saturação que pode ser

encontrado sob o que se considerou mesmas condições físicas e operacionais. As maiores variações se observam sob 2% e 6% de veículos pesados, com um intervalo de 500 veíc/h; além da variação de cerca de 340 veíc/h com 5% de veículos pesados. Ainda, observamos considerável dispersão em 1% e 3% do tráfego pesado. Lembrando que os valores tratam-se de um comportamento médio obtido por cerca de 20 ciclos em um período de uma hora, o que caracteriza um comportamento estável desse fluxo de tráfego.

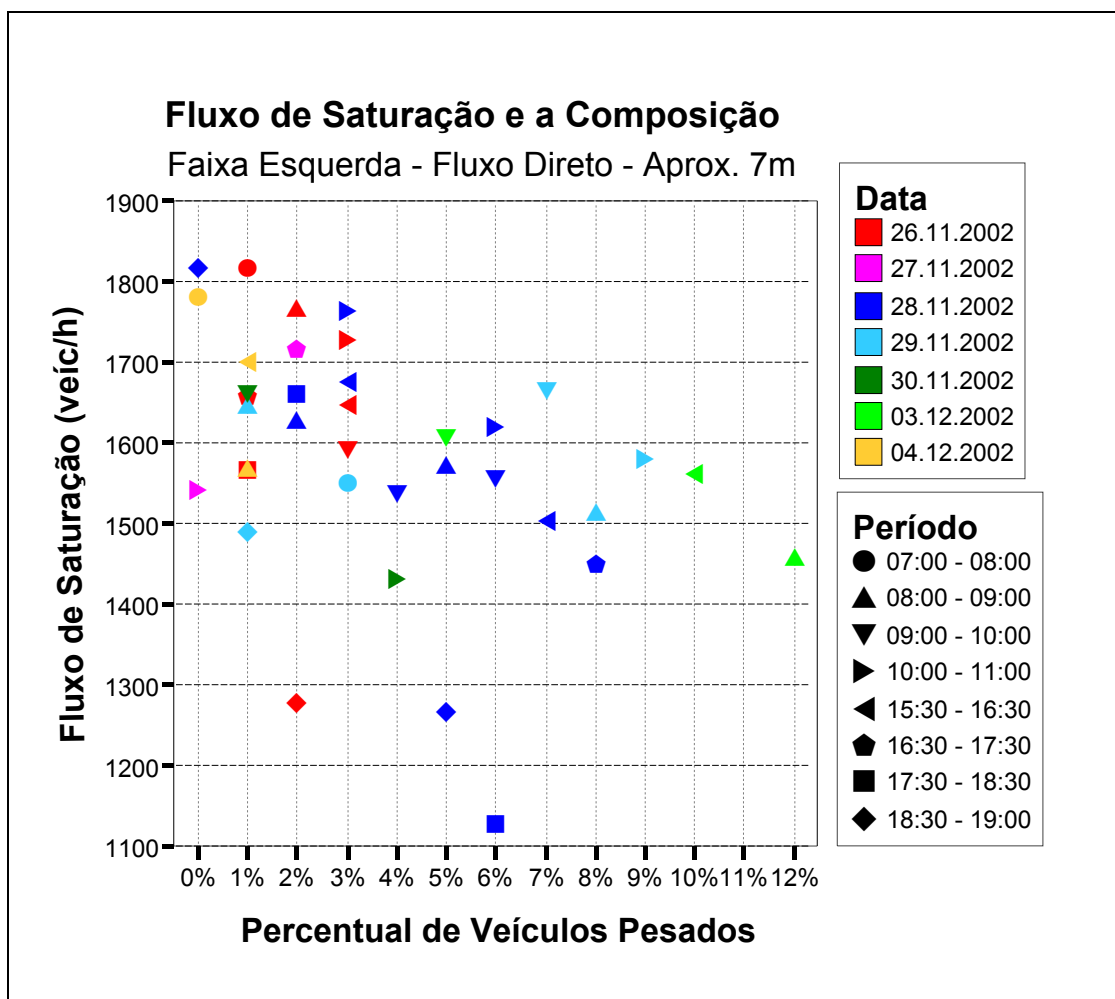


Figura 6.17: Variação do fluxo de saturação por proporção de veículos pesados (Aprox. de 7m)

Pela Figura 6.18, nota-se a pouca sobreposição, entre aproximações, dos valores da proporção de veículos pesados, de modo que os comentários feitos de variação sobre o fluxo de saturação se dão basicamente sobre uma aproximação específica.

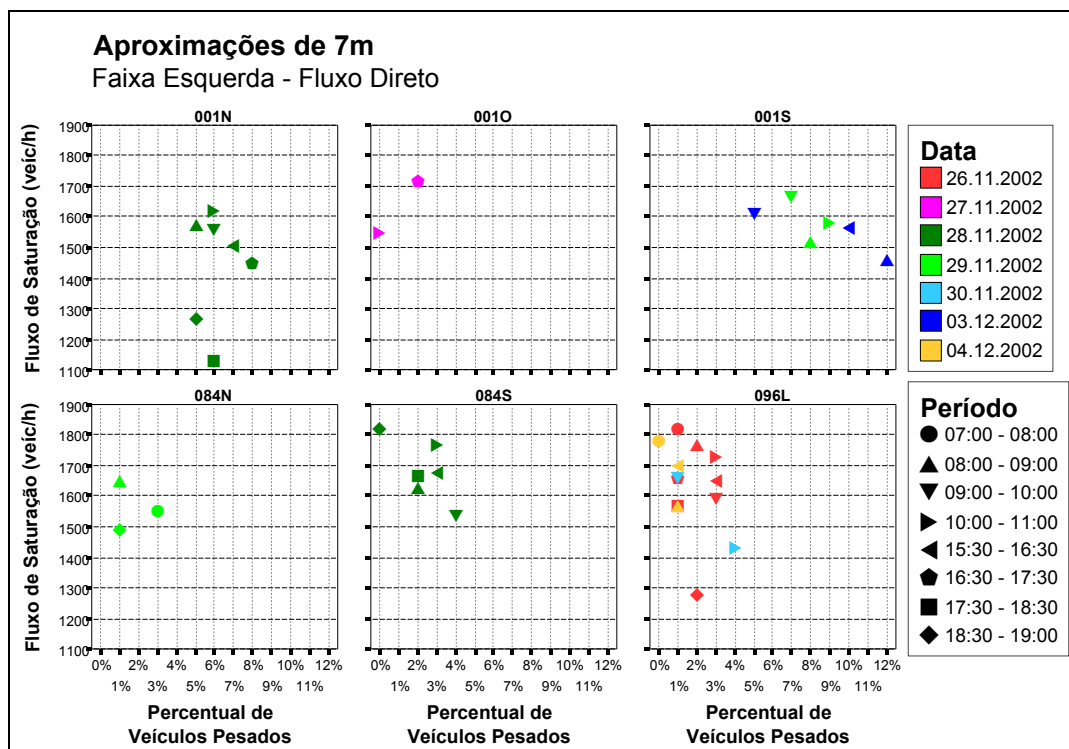


Figura 6.18: Variação do fluxo de saturação por proporção de veículos pesados nas aproximações de sete metros em apresentação desagregada

Tabela 6.4: Variação do fluxo de saturação por proporção de veículos pesados (Aprox. 7m)

Veículos Pesados	Média (veic/h)	Desvio Padrão (veic/h)	Coef. de Variação	Mínimo (veic/h)	Máximo (veic/h)	Intervalo (veic/h)	Contagem
0%	1713	149	8,7%	1543	1817	274	3
1%	1639	99	6,0%	1491	1816	325	8
2%	1610	194	12,0%	1277	1767	490	5
3%	1660	81	4,9%	1552	1766	214	6
4%	1484	73	4,9%	1433	1536	103	2
5%	1483	186	12,6%	1268	1607	339	3
6%	1435	267	18,6%	1129	1620	491	3
7%	1585	114	7,2%	1504	1666	162	2
8%	1482	46	3,1%	1449	1515	65	2
9%	1581	-	-	1581	1581	0	1
10%	1562	-	-	1562	1562	0	1
12%	1458	-	-	1458	1458	0	1

À luz dos resultados aqui encontrados, não parece se justificar o uso de fórmulas empíricas na análise operacional de aproximações semaforizadas, uma vez que mantidas todas as demais condições, se observam com frequência variações no fluxo de saturação da ordem de 200 veículos por hora, podendo chegar a 500 veic/h. Considerando que a grandeza do fluxo de saturação é da ordem de 1.600 veic/h, os números encontrados

parecem significativos. Vale observar também que a análise se deu com precisão de 1% na proporção de veículos pesados, se for considerada uma precisão menor, por supor que só se obtêm interferências significantes com uma variação do percentual de veículos pesados de maior ordem, os resultados se tornam ainda mais relevantes. A hipótese de que há fatores externos que alteram a taxa de descarga além daqueles normalmente considerados fica comprovada, apesar de não ser conclusivo quanto à razão dessas flutuações e se há uma tendência de recorrência capaz de caracterizá-las como atributos do local e do período de detecção.

Esses resultados mostram que a tomada de medida de fluxo de saturação não é um serviço trivial, exigindo conhecimento do comportamento local do tráfego. Da mesma forma, a decisão de divisão da operação de uma interseção em planos semaforicos vai além da identificação de padrões de demanda, sendo também necessário identificar os padrões de atendimento. Pode-se ainda discorrer sobre a influência do intervalo de recorrência de comportamento da descarga na escolha de planos semaforicos: se esse intervalo não é diário, mas semanal, pode gerar grande quantidade de planos distintos a serem implementados, e nesse caso, para simplificação de uso de um plano único em um dado período do dia, em todos os dias, uma abordagem de uso de redes grupadas como apresentada por RIBEIRO (1992b) pode ser apropriada.

A variabilidade do fluxo de saturação pode explicar parte das inadequações das temporizações obtidas por métodos diversos; inadequações muitas vezes atribuídas à má coleta de dados, estimativas e mesmo à deficiências da modelagem do método. Esse mesmo argumento pode explicar a razão da constante prática de ajustes de parâmetros que limitam a liberdade de ação automática do sistema SCOOT para diferentes horários do dia, na expectativa de melhorias de sua operação para esses períodos, enquanto mantém-se o valor da taxa de descarga de veículos fixa.

Não se considera relevante estender a análise de variação às faixas direitas ou às aproximações como um todo, visto que o processo disponível requer o cruzamento de duas variáveis (percentual de tráfego pesado e de conversões) com o valor do fluxo de saturação, o que reduz muito o número de observações com algum significado para serem analisados, de forma que um maior aprofundamento das razões dessa variabilidade e das tendências de variação deve ser deixado a um trabalho posterior, com uma abordagem mais objetiva do que a exploratória aqui feita.

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Resume-se aqui o que pôde ser apreendido pelo conteúdo do trabalho e o que é preciso ainda ser abordado para melhor entendimento do tema e uso mais apropriado dos conceitos.

7.1. CONCLUSÕES

7.1.1. Fluxo de saturação: conceito e uso

A idéia original do parâmetro fluxo de saturação é o da taxa de atendimento de um sistema de filas, visto que são técnicas da teoria das filas que são empregadas na estimativa de medidas de desempenho de um plano semafórico, de forma que se possa avaliar sua adequação às condições de tráfego e aos padrões operacionais desejáveis. A diferença fundamental em relação a uma abordagem tradicional de um modelo de filas é que, na formulação inicial de um modelo de tráfego em interseções semaforizadas, estabeleceu-se que o fluxo de saturação representaria a taxa de descarga de veículos do período em que essa atinge equilíbrio, incorporando-se fatores de correção ao modelo para o período de aceleração inicial do fluxo e para o de aproveitamento do entre-verdes. Esse conceito é aplicado principalmente à estimativa do atraso experimentado por veículos em fila de semáforo, e usado nos mais diversos métodos de temporização, incluído o método original de Webster, o programa TRANSYT para temporização de redes de semáforo e o sistema adaptativo em tempo real SCOOT.

Dois processos são usualmente empregados na obtenção do valor do fluxo de saturação: a medição direta e a estimativa por fórmulas experimentais. A preferência pelo uso de fórmulas gera uma má interpretação do conceito do fluxo de saturação, que de forma nenhuma quer ser a taxa máxima observada de descarga de veículos ou, na sua medição, devem ser desprezadas as observações de descargas em que houve interrupções por manobras de veículos, se estas são um comportamento recorrente do local e período de interesse. O fluxo de saturação deve, pois, refletir o comportamento de descarga usual e provável de ser encontrado nesse local e período.

A equivalência veicular requer mais estudo, uma vez que o processo usado nos métodos de estimativa de fluxo de saturação não parecem ser adequados e os trabalhos

independentes sobre o assunto se restringem à investigação intrínseca da equivalência de desempenho entre veículos, não se questionando como essas diferentes abordagens afetam os resultados obtidos nos métodos em que serão usadas, ou mesmo se seria necessário a obtenção de novas fórmulas, uma vez que essas são obtidas, provavelmente, por um processo de regressão tendo como uma das variáveis explicativas o fator de composição.

A variabilidade do fluxo de saturação não é abordada de forma consistente na bibliografia consultada e não pode ser elaborada qualquer conclusão definitiva. Pesquisas mostram que o comportamento de descarga dos veículos sofre influência de fatores que vão além daqueles normalmente expressos nos métodos empíricos, requerendo que, em um refinamento desses, sejam considerados fatores como períodos do dia e condições climáticas (de especial interesse em controle semafórico centralizado).

7.1.2. Processo de Coleta de Dados

O procedimento de coleta de dados pareceu bastante econômico e rápido. Necessita de duas pessoas para coleta em campo (podendo ser apenas uma no caso de períodos mais curtos de coleta) e a digitalização das informações requer apenas uma pessoa. No caso de necessidade de medição do fluxo de saturação apenas, o processo de digitalização fica enormemente simplificado, uma vez que não se necessita de classificação de veículos e movimentos, nem de determinação do *headway* de cada veículo individual, assim o processo se torna consideravelmente mais rápido e eventuais erros, diminuídos. Acredita-se ser possível substituir o uso das câmeras da central de controle de tráfego por câmeras portáteis, como usadas em outros trabalhos, posicionando-as em locais altos como edifícios comerciais. Essa abordagem aumentaria o número de aproximações possíveis de serem contempladas em estudos deste tipo.

7.1.3. Métodos de Medição de Fluxo de Saturação

A comparação entre os métodos de medição do HCM em suas edições dos anos 1985, 1994 e 2000, que se mostram como modernos e aceitos no meio técnico, e o método assemelhado do ARRB mostrou que suas formulações e os resultados obtidos por eles não são equivalentes, podendo-se observar diferenças de até cerca de 200 veíc/h/faixa entre eles.

Considera-se que a medição do fluxo de saturação, em concordância com os conceitos apresentados no item primeiro desta seção, é feita através da razão entre o número de veículos em regime de saturação descarregados pelo total de tempo requerido para a descarga de cada um deles. Diante desse princípio, os métodos do HCM não são coerentes com a concepção do fluxo de saturação ser a taxa média de atendimento de um sistema de filas, uma vez que usam a média aritmética das taxas de descarga de vários ciclos semafóricos. Foi possível provar que o uso dessa média aritmética resulta em uma estimativa do fluxo de saturação mais alta do que aquela obtida pelo conceito assumido como correto. Foi possível mostrar que a diferença entre os resultados de medidas do fluxo de saturação com uso de médias aritméticas e o processo considerado correto é proporcional à variação observada entre ciclos. Foi possível mostrar que o uso de um instante de tempo como demarcador de início do regime saturado de descarga, o critério dos dez segundos, resulta num cálculo de uma taxa de descarga superestimada.

Diante desses achados, sugeriu-se que um método correto de medição do fluxo de saturação devia basear-se numa média harmônica dos inversos dos *headways* saturados de todos os veículos de todos os ciclos válidos dentro do período de interesse, sendo que o ponto delimitador do início do regime saturado deveria ser uma posição de um veículo na fila. Dessas premissas, propôs-se o método Harmônico/Posicional que atende esses critérios, baseando-se no comportamento do tráfego observado nos locais de pesquisa.

7.1.4. Método Proposto para Medição do Fluxo de Saturação

Determinou-se que o primeiro veículo a integrar o período saturado é o sexto veículo na fila em descarga, portanto a contagem de tempo da descarga de veículos deve se iniciar com o cruzamento da extremidade traseira do quinto veículo com a faixa de retenção. Determinou-se também que, usando um mínimo de 15 ciclos amostrados para a determinação do fluxo de saturação representativo de uma hora de operação, era suficiente que a fila de veículos tivesse um tamanho mínimo de seis veículos.

Usando esses critérios, o método H/P foi 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 seis veículos.

7.1.5. Variação do Fluxo de Saturação

Foi possível mostrar que condições similares de tráfego resultam em valores variáveis de fluxos de saturação. A variabilidade observada do fluxo de saturação demonstra que a estimativa de um valor para o mesmo, ou correção de um valor medido, a partir apenas do conhecimento das características da demanda pode resultar em erro considerável em relação ao valor realmente observado. Esse resultado pode explicar parte da inadequação dos planos semaforicos calculados, usando esses expedientes, quando implementados em campo. Essa variabilidade condena a prática de calibração única do SATOCC do sistema SCOOT em Fortaleza e pode explicar parte da necessidade de uso de conjuntos de parâmetros operacionais próprios para diferentes horários do dia. Essa prática de calibração única, frente à variação encontrada, deve ainda degradar a velocidade de resposta às mudanças das condições diárias de tráfego.

7.2. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

O objetivo inicial do trabalho não foi plenamente alcançado devido às descobertas durante o processo de análise dos dados, principalmente quanto à inadequação dos métodos tradicionais de cálculo do fluxo de saturação. Considera-se, no entanto, bastante relevantes os achados da pesquisa, principalmente quanto à necessidade de desenvolvimento de métodos locais para sua medição.

É preciso, portanto, que um processo similar àquele usado na definição do método H/P seja posto em prática para determinação de um método mais geral de cálculo do fluxo de saturação, abrangendo outros tipo de aproximações, ou ainda, que se desenvolva métodos específicos para cada tipo de aproximação, se assim, for detectado melhoria na qualidade dos resultados.

Uma vez que o uso de equivalência veicular não é capaz de cumprir o papel que devia na eliminação das diferenças de desempenho entre classes de veículos, provavelmente por serem valores médios, uma pesquisa mais eficiente sobre a variabilidade do fluxo de saturação, quanto sua grandeza e tendências no tempo, requer uma pesquisa mais extensa no sentido de tempo numa mesma aproximação, ao invés do que foi feito em que, por desconhecimento do comportamento e efeitos das variáveis que se queria estudar, tentou-se abranger várias situações operacionais em períodos de tempo restritos.

Os resultados aqui obtidos fazem necessário recomendar que, na definição de planos semaforicos, deva-se considerar não só a variação da demanda de veículos, mas também, uma variação no comportamento de descarga destes junto à retenção. Um correto julgamento da delimitação do período de vigência desses planos requer, no entanto, o conhecimento de quão grande uma variação no valor do fluxo de saturação deve ser, mantidas as demais condições, para afetar a alocação do tempo de verde semaforico. Esse desconhecimento sugere a necessidade de desenvolvimento de trabalhos com esse objetivo.

As variações do valor do fluxo de saturação detectadas neste trabalho, sob condições operacionais similares, também sugerem que o emprego dos recursos de detecção, em tempo real, da taxa de descarga de veículos pelo sistema SCOOT (os laços SOFT) deve ser considerado como um requisito de operação do sistema, e uma avaliação da responsividade e melhoria operacional quando usados, deve ser desenvolvida.

Sobre os resultados encontrados, destaca-se, como principal alerta para a prática de Engenharia de Tráfego, que os modelos de descarga de veículos usados nos mais diversos métodos de temporização de semáforos e capacidade viária não são capazes de substituir a observação direta do fenômeno físico e que, nas mais diversas atividades humanas, constata-se a advertência de Stephen Jay Gould⁵ de que são cometidos graves erros em se tomar uma medida central como o resultado mais provável para uma situação isolada, pois *“a tendência central é uma abstração, a variação é a realidade”*.

⁵ Stephen Jay Gould in “Lance de Dados – A Idéia de Evolução de Platão a Darwin”. Editora Record (2001).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKÇELIK, R. (1993) *Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis*. Research Report ARR No. 123. Australian Road Research Board. 5a. Reimpressão.
- AL-GHAMDI, A. S. (1999). Entering Headway for Through Movements at Urban Signalized Intersections. *Transportation Research Record*. No. 1678. p. 42-47
- ALLSOP, R. E. (1981) *Computer Program SIGSET for Calculating Delay Minimising Traffic Signal Timings: Description and Manual for Users*. University College London. Londres.
- ANDRADE, J. P. (1994) Unidades de Carro de Passeio. *Anais do VIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, v. I, Recife, p. 347-358.
- BENEKOHAL, R. F. e W. ZHAO (1996) Effects of Heavy Vehicles on Intersection Delay and Passenger Car Equivalents. *1996 ITE International Conference* p. 70-74.
- BINNING, J. C. e M. R. CRABTREE (1999) *TRANSYT 11 User Guide*. Transportation Research Laboratory.
- BRANSTON D. (1979). Some Factors Affecting the Capacity of Signalized Intersections. *Traffic Engineering and Control*, n. 20, p. 390-396, *apud* STOKES, R. W. (1989). Some Factors Affecting Signalized Intersection Capacity. *ITE Journal*. Janeiro/1989. p. 35-40.
- COSTA NETO, P. L. O. (1977) *Estatística*. Ed. Edgar Blücher LTDA., São Paulo.
- DENATRAN (1984) *Manual de Semáforos*. Departamento Nacional de Trânsito, Ministério da Justiça, Brasília, DF.
- FOSTER, D. I. (1988) SCOOT – The Red Deer Experience. *Compendium of Technical Papers*. Institute of Transportation Engineers. P. 274-276.
- GERLOUGH, D. L. e M. J. HUBER (1975). *Traffic Flow Theory, a Monography*. Special Report 165. Transportation Research Bureau. Washington, D.C.
- HEYDECKER, B. G. (1982) Vehicles, PCUs and TCUs in Traffic Signal Calculations. *Traffic Engineering and Control*. v. 24, no. 3, p. 111-114.
- ITE (1992) *Traffic Engineering Handbook* (4^a ed.). Institute of Transportation Engineers, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- JACQUES, M. A. P. (1995a) Novo Método para a Medição do Fluxo de Saturação “in loco”. *Revista de Transporte e Tecnologia*. Ano VII, no. 14, jan. 1995, p. 95-110.

- JACQUES, M. A. P. (1995b) Avaliação do impacto do tamanho da amostra em medições do fluxo de saturação: um estudo de caso. *Transportes*. Ano 3, v.2, p.95-107.
- JACQUES, M.A.P.; E.R. ANASTÁCIO e S. FELISARI (1994) Avaliação dos Métodos Utilizados para a Medição do Fluxo de Saturação através de um Estudo de Caso. *Anais do VIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Recife, vol. 1, pp. 301-312.
- KAGOLANU, K. (1994) A Comparative Study of Traffic Control Systems. *Compendium of Technical Papers*. 64TH ITE Annual Meeting. Dallas, Texas, p. 374-378.
- KOCKELMAN, K. M. e R. A. SHABIH (2000) Effect of Light-Duty Trucks on the Capacity of Signalized Intersection. *Journal of Transportation Engineering*. No. 6, vol. 126. p 506-512.
- LI, H. e P. D. PREVDUROS (2002) Detailed Observations of Saturation Headways and Start-Up Lost Times. *Transportation Research Record*. No. 1802. p. 44-53.
- LOUREIRO, C. F. G. e LUNA, M. S. (1997) Metodologia para Determinação de Parâmetros de Fluxo no Sistema de Controle de Tráfego de Fortaleza. *Anais do XI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Rio de Janeiro, v. 2, p. 740-751.
- LUNA, M.S. e C.F.G. LOUREIRO (1997) SATUR - Manual do Usuário. 13º Relatório Parcial de Andamento dos Estudos e Projetos para Implantação do Sistema de Controle de Tráfego em Área de Fortaleza - CTA/FOR, Contrato DETRAN/ASTEF/UFC, Fortaleza.
- MACHADO NETO, E.F. e J. R. A. SETTI (1993) Fatores de equivalência veicular em interseções semaforizadas de cidades de porte médio. *Anais do VII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, São Paulo, vol. 2, p. 821-830.
- MAGALHÃES, D. J. A. V.; M. V. F. SOARES;; L. G. DAS MERCÊS; J. M. P. JÚNIOR; G. W. SANTOS; S. J. C. CAMPOS e C. E. L. MAGNANI (1998) Determinação Empírica do Fluxo de Saturação e Diagnóstico de Congestionamentos do Tráfego Urbano. *Anais do XII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Fortaleza, v. I, p. 29-38.
- MARTIN, P. T. e S. L. M. HOCKADAY (1995) SCOOT – An Update. *ITE Journal*, Janeiro/1995, p. 44-48.
- MAY, A. D. (1990) *Traffic Flow Fundamentals*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
- McCOY, P. T. e J. E. HEIMANN (1990). Effect of driveway traffic on saturation flow rates at signalized intersections. *ITE Journal*, Fevereiro/1990, v. 60, n. 2, p. 12-15.

- McMAHON, J. W.; J. P. KRANE e A. P. FEDERICO (1997). Saturation Flow Rates by Facility Type. *ITE Journal*, Janeiro/1997, v. 67, n. 1, p. 46-50.
- McSHANE, W. R. e R. P. ROESS (1990) *Traffic Engineering*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
- MERCEDES-BENZ (1987) *Sistema de Transporte Coletivo Urbano de Ônibus – Planejamento e Operação*. Departamento de Sistema de Trânsito e Transporte, Mercedes-Benz do Brasil.
- MILLER, A. J. (1968). *Australian Road Capacity Guide – Provisional Introduction and Signalised Intersection*. Australian Road Research Board, boletim n. 4 *apud* AKÇELIK, R. (1993) *Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis*. Research Report ARR No. 123. Australian Road Research Board. 5a. Reimpressão.
- MILTON, J. S. e J. C. ARNOLD (1995) *Introduction to Probability and Statistics: principles and applications for engineering and computing sciences* (3a. ed.). McGraw-Hill, Inc.
- MING, S. H. (1997) Uma Breve Descrição do Sistema SCOOT. *Notas Técnicas*, NT 201, Maio/1997. Companhia de Engenharia de Tráfego – CET/SP.
- MINITAB INC. *MINITAB Statistical Software release 13.20*.
- MOLINA Jr., C. J. (1987) Development of Passenger Car Equivalents for Large Trucks at Signalized Intersections. *ITE Journal*. v. 57, no. 11, p. 33-37.
- NEWELL, G. F. (1982) *Applications of Queueing Theory* (2a. ed.). Chapman and Hall Ltd., New York.
- NIITYMÄKI, J. e M. PURSULA (1997). Saturation Flows at Signal-Group-Controlled Traffic Signals. *Transportation Research Record*. No. 1572. p. 24-32.
- NOVAES, A. G. N. (1975) *Pesquisa Operacional e Transportes: modelos probabilísticos*. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, SP.
- OLIVEIRA NETO, F. M.; M. S. LUNA e C. F. G. LOUREIRO (2002) Variação do Fluxo de Saturação por Tipo de Faixa e Períodos de Pico em Interseções SemafORIZADAS de Fortaleza. *Anais do XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Natal, p. 379-390.
- PEARCE, V. (2001) Real-time Remedy. *Traffic Technology International*. Dec 2000/Jan 2001, p. 61-63.
- RIBEIRO, P. C. M. (1992) Um Método Moderno para Medir Fluxo de Saturação de Interseções SemafORIZADAS no Brasil. *Anais do VI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Rio de Janeiro, p. 236-246.

- RIBEIRO, P. C. M. (1992b) Planos Estatisticamente Robustos Calculados pelo Programa TRANSYT. *Anais do VI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Rio de Janeiro, p. 159-170.
- ROBERTSON, D. I. (1974) Cyclic Flow Profiles. *Traffic Engineering & Control*, Junho/1974, p. 640-641.
- ROBERTSON, D. I. (1986) Research on the TRANSYT and SCOOT Methods of Signal Coordination. *ITE Journal*, Janeiro/1986, p. 36-40.
- ROBERTSON, S. e G. ABU-LEBDEH (2002). Characterization of Heavy-Vehicle Headways in Oversaturated Interrupted Conditions: Toward Development of Equivalency Factors. *81 TRB Annual Meeting*.
- SETTI, J. R. A. e L. S. BARBUTO (1994) Caracterização do Tráfego em Interseções SemafORIZADAS de Cidades de Porte Médio. *Anais do VIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Recife, v. 1. p.361 - 372.
- SHANTEAU, R. M. (1988) Using Cumulative Curves to Measure Saturation Flow and Lost Time. *ITE Journal*. Outubro/1988. p. 27-31.
- SILVA, T. L. (2002). *Estudo do Headway de Descarga de Veículos em Interseções Controladas por Semáforos*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, DF.
- SPIEGEL, M. R. (1993) *Estatística* (3^a ed.). Makron Books, São Paulo, SP.
- SPSS INC. (2001). *SPSS for Windows release 11.0.0 standard version*.
- STOKES, R. W. (1988). Comparison of Saturation Flow Rates at Signalized Intersection. *ITE Journal*. Novembro/1988. p. 15-20.
- STOKES, R. W. (1989). Some Factors Affecting Signalized Intersection Capacity. *ITE Journal*. Janeiro/1989. p. 35-40.
- TARKO, A. P. e M. TRACZ (2000) Uncertainty in Saturation Flow Prediction. *Transportation Research Circular*. Fourth International Symposium on Highway Capacity. Transportation Research Bureau. Maui, Hawaii. p. 310-321.
- TAYLOR, M. A. P.; W. YOUNG e P. W. BONSALL (1996) *Understanding Traffic Systems: Data, Analysis and Presentation*. Avebury Technical. Inglaterra.
- TEPLY, S e A. M. JONES (1991) Saturation Flow: Do We Speak the Same Language? *Transportation Research Record 1320*, p. 144-153. Transportation Research Bureau. Washington. D. C.
- TORBIC, D. e L. ELEFTERIADOU (2000) Effects of Driver Population on the Traffic Operational Performance of Signalized Intersection. *Transportation Research Circular*. Fourth International Symposium on Highway Capacity, p. 336-347.

- TRB (1994) *Highway Capacity Manual*. Special Report 209. Transportation Research Board. Washington, D.C.
- TRB (2000) *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board. Washington, D.C.
- TRL (2000a) *Description of SCOOT*. SCOOT Traffic Handbook. SCOOT 0414. Transport Research Laboratory.
- TRL (2000b) *Validation – Data Parameters*. SCOOT Traffic Handbook. SCOOT 0454. Transport Research Laboratory.
- TRL (2000c) *Operational Guide – SOFT*. SCOOT Traffic Handbook. SCOOT 0478. Transport Research Laboratory.
- TRL (2000d). *Validation – Application Notes*. SCOOT Traffic Handbook. SCOOT 0455. Transport Research Laboratory.
- WEBSTER, F. V. (1964) Traffic Signals. In: Davies, E. (ed.) *Traffic Engineering Practice*. E. & F. N. LTD., Londres.
- WEST, J. E. e G. S. THURGOOD (1995) Developing Passenger-Car Equivalents for Left-Turning Trucks at Compressed Diamond Interchanges. *Transportation Research Record*. No. 1484, p. 90-97.
- WILSHIRE, R. L. (1992) Traffic Signals. In: Pline, J. L. (ed.) *Traffic Engineering Handbook*. 4^a ed. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- WOOD, K. (1993) *Urban Traffic Control: System Review*. Transport Research Laboratory. Crowthorne, Berkshire.

