

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Marcelo Leismann de Oliveira

**MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DE
NÍVEL DE SERVIÇO EM PRAÇAS DE PEDÁGIO**

Porto Alegre

2009

Marcelo Leismann de Oliveira

**MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DE
NÍVEL DE SERVIÇO EM PRAÇAS DE PEDÁGIO**

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração: Sistemas de Transporte.

Orientadora: Prof^a Helena Beatriz Bettella Cybis, Ph.D.

Porto Alegre

2009

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Professora Helena Beatriz Bettella Cybis, Ph.D.
Orientadora

Professor Flávio Sanson Fogliatto, Ph.D.
Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professor José Luis Duarte Ribeiro, Dr.
PPGEP / UFRGS

Professor José Reynaldo Anselmo Setti, Ph.D.
Escola de Engenharia / USP - São Carlos

Professor Luis Antonio Lindau, Ph.D.
PPGEP / UFRGS

Professor João Fortini Albano, Dr.
PPGEP / UFRGS

Professor Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, Ph.D.
PPGECIV / UFRGS

Porto Alegre

2009

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho somente foi possível através do acompanhamento dedicado e constante de minha orientadora Prof^a Helena Cybis. Sua dedicação ao ensino e a pesquisa representa fonte de inspiração.

Agradeço especialmente ao Prof. Ribeiro, co-orientador deste trabalho, que muito ajudou no desenvolvimento da pesquisa e modelagem matemática.

Agradecimentos também seguem aos professores participantes da minha banca de qualificação, Prof.Lindau, Prof.Setti e novamente Prof.Ribeiro, que muito contribuíram com idéias e a formatação da pesquisa.

Agradeço a CAPES pela concessão de auxílio financeiro, possibilitando assim dedicação integral a pesquisa.

Agradeço também a Concessionária de Rodovias UNIVIAS, representada pelos Sr.Carlo Framarim e Sr.Felipe Sousa, pela disponibilização de dados e arquivos digitais para a pesquisa.

Agradeço a Concessionária de Rodovias CONCEPA, representada pelos Sr.Odenir Sanches e Sr.Luciano Pletsch Leite, pela disponibilização de dados e imagens para a pesquisa.

Agradecimentos especiais também seguem aos demais professores, colegas e ex-colegas do LASTRAN – Laboratório de Sistemas de Transportes da UFRGS.

Agradeço a minha família por acreditar nos meus sonhos, pai, mãe e irmãos.

RESUMO

Este trabalho propõe um método para análise de níveis de serviço em praças de pedágio. Para atingir o objetivo proposto foi realizada revisão bibliográfica, e levantados (i) fatores que afetam as capacidades de rodovias e (ii) praças de pedágio, (iii) principais trabalhos que analisaram capacidades e níveis de serviço em praças, e suas limitações e (iv) indicadores de desempenho para praças de pedágio utilizados em trabalhos da literatura e na prática brasileira. Níveis de serviço estão diretamente relacionados à percepção de desconforto e inconveniência de usuários quando trafegando em distintas situações de tráfego. Neste sentido, foram elaborados cenários micro-simulados contendo alguns fatores intervenientes na percepção de qualidade de tráfego em praças. Os cenários foram utilizados em pesquisa qualitativa junto a usuários, com vistas a captar as percepções de qualidade de tráfego. O indicador de desempenho selecionado para representar a qualidade de tráfego nas praças foi o comprimento médio das filas nas cabines. De posse das percepções de qualidade do tráfego declaradas, realizou-se modelagem e foi obtida equação que relaciona os fatores (variáveis explicativas) com as percepções de qualidade de tráfego (variável dependente). Comprimentos de filas estão diretamente relacionados com o número de veículos em fila e a composição do fluxo de tráfego, assim foram propostos fatores de equivalência veicular. Com a finalidade de realizar aplicação do modelo, foram elaboradas tabelas, que relacionaram a percepção de qualidade do tráfego e o indicador de filas médias equivalentes nas cabines. Por fim, foram realizadas análises operacionais de processamentos de veículos, e obtidas capacidades de cabines para fluxos exclusivos. A análise proporcionou a obtenção de fatores de equivalência operacionais para processamento de veículos nas cabines e tempos de espera em fila, assim como identificação de que volumes de tráfego próximos as capacidades são julgados pelo método proposto como nível de serviço “D”, diferentemente de critério verificado, por exemplo, no HCM-2000.

Palavras-Chave: Praças de Pedágio. Nível de Serviço. Indicadores de Desempenho.

ABSTRACT

This work proposes a method for the analysis of the level of service at toll plazas. To achieve the proposed objective, a literature review was performed to identify: (i) factors that affect the capacity of roads, (ii) factors that affect the capacity of toll plazas, (iii) studies that examined capacity and level of service for toll plazas, and its limitations and, (iv) measures of efficiency for toll plazas. The levels of service are directly related to driver's perception of discomfort and inconvenience when traveling in different traffic conditions. To evaluate the relationship between driver's perception and level of service, scenarios were designed taking into account factors that involve the perception of quality of traffic at toll plazas. The scenarios were used in a qualitative study where drivers were asked concerning their perceptions about traffic quality. The control variable used to represent the traffic quality at toll plazas was the average queue length at booths. The outcome of the study was a model that relates the factors (explanatory variables) with the perceptions of traffic quality (dependent variable). Since queue length is directly proportional to the number of vehicles in queue and to traffic flow composition, equivalence factors were proposed for heavy vehicles in the queue. Results obtained from the model were placed into tables. Finally, operational analyses for processing vehicles were held and the capacity of microsimulated tollbooths was obtained. Through the analyses it was possible to define operational equivalence factors for processing vehicles at booths and corresponding waiting time in queue. In addition, unlike other methods, i.e. HCM2000, the levels of traffic flow near toll plaza capacities were evaluated by the proposed method as service level "D".

Key Words: Toll Plaza. Level of Service. Measures of Efficiency.

Lista de Ilustrações

Figura 1 : Fluxograma para cálculo de capacidades e nível de serviço em freeway	21
Figura 2 : Fluxograma para cálculo de capacidades e nível de serviço em rodovias de múltiplas faixas	24
Figura 3 : Fluxograma para cálculo de capacidades e nível de serviço em rodovias de pista simples	27
Figura 4 : Áreas de praças de pedágio	38
Figura 5 : Variação da fila média com taxas e duração do fluxo	41
Figura 6 : Fluxograma com as etapas do método do trabalho.....	57
Figura 7 : Fração de caminhões no fluxo de tráfego	65
Figura 8 : Distribuição de velocidades desejadas para veículos de passeio.....	71
Figura 9 : Distribuição de velocidades desejadas para caminhões leves e pesados.....	71
Figura 10 : Imagem representativa da situação PPSCF1	74
Figura 11 : Imagem representativa da situação PGMCF6	74
Figura 12 : Questionário utilizado para a avaliação dos cenários	78
Figura 13 : Relação entre julgamento e notas estipuladas para os cenários.....	79
Figura 14 : Gráfico de dispersão entre os dados observados e previstos pelo modelo	87
Figura 15 : Gráfico dos resíduos <i>versus</i> a distribuição acumulada dos resíduos	88
Figura 16 : Gráfico dos valores previstos <i>versus</i> resíduos.....	88
Figura 17 : Gráfico de Sensibilidade com variação da % de caminhões e número de cabines	91
Figura 18 : Gráfico de Sensibilidade com variação do número de cabines e % de caminhões	91
Figura 19 : Gráfico de Sensibilidade com variação do número de cabines e tamanho de filas	92
Figura 20 : Indicação de diferentes comprimentos de fila e a composição do tráfego	94
Figura 21 : Gráfico de veículos processados de acordo com a intensidade do fluxo	112
Figura 22 : Gráfico de atraso médio em fila de acordo com a intensidade do fluxo	113
Figura 23 : Gráfico de fila média na cabine de acordo com a intensidade do fluxo	113
Figura 24 : Volume de veículos equivalentes processados – praça com 3 cabines	116
Figura 25 : Volume de veículos equivalentes processados – praça com 10 cabines	117
Figura 26 : Representação das percepções Psicofísicas	133
Figura 27 : Representação da aproximação entre veículos e a reação psicofísica	135

Lista de Tabelas

Tabela 1 : Fatores de redução de capacidade para diferentes períodos do dia e clima	34
Tabela 2 : Valores para escalas de níveis de serviço segundo Woo e Hoel (1991)	39
Tabela 3 : Valores para definição de níveis de serviço por cabine segundo Lin e Su (1994) ...	43
Tabela 4 : Valores para definição de níveis de serviço por cabine segundo Klodzinski e Al-Deek (2002)	46
Tabela 5 : Indicadores de desempenho para praças de pedágio encontrados na literatura ...	51
Tabela 6 : Valores de tempos médios de atendimento encontrados na literatura nacional ...	54
Tabela 7 : Indicadores levantados na revisão bibliográfica	55
Tabela 8 : Apresentação dos fatores controláveis para o projeto de experimentos	64
Tabela 9 : Fatores e seus níveis para o experimento.....	64
Tabela 10 : Projeto fatorial cruzado completo	67
Tabela 12 : Dados de tempos de atendimento utilizados nas modelagens.....	70
Tabela 13 : Dados extraídos dos cenários gerados para a pesquisa	75
Tabela 14 : Distribuição dos cenários de pesquisa através de quadrado-latino.....	77
Tabela 15 : Média das notas de cada grupo e diferenças com relação à média geral.....	80
Tabela 16 : Resumo das notas normalizadas para os cenários de pesquisa	80
Tabela 17 : Relação entre notas de cenários e escala de níveis de serviço proposta.....	81
Tabela 18 : Correlações entre as Notas dos Cenários e demais variáveis.....	84
Tabela 19 : Banco de dados com notas médias dos cenários obtidas na pesquisa	85
Tabela 20 : Probabilidades para a estatística <i>t-Student</i> das variáveis explicativas.....	90
Tabela 21 : Extensão de fila ocupada pelas diversas classes de veículos deste estudo.....	94
Tabela 22 : Fatores de equivalência de veículos em filas de praças de pedágio	95
Tabela 23 : Escala de níveis de serviço proposta.....	100
Tabela 24 : Relação entre percepção da qualidade do tráfego e comprimento de filas equivalentes (m) e VPEs em fila (n VPEs) - fluxos com 0% de caminhões.....	101
Tabela 25 : Relação entre percepção da qualidade do tráfego e comprimento de filas equivalentes (m) e VPEs em fila (n VPEs) - fluxos com 1,5% de caminhões.....	102
Tabela 26 : Relação entre percepção da qualidade do tráfego e comprimento de filas equivalentes (m) e VPEs em fila (n VPEs) - fluxos com 3% de caminhões.....	103
Tabela 27 : Relação entre percepção da qualidade do tráfego e comprimento de filas equivalentes (m) e VPEs em fila (n VPEs) - fluxos com 5% de caminhões.....	104
Tabela 28 : Relação entre percepção da qualidade do tráfego e comprimento de filas equivalentes (m) e VPEs em fila (n VPEs) - fluxos com 7,5% de caminhões.....	105
Tabela 29 : Relação entre percepção da qualidade do tráfego e comprimento de filas equivalentes (m) e VPEs em fila (n VPEs) - fluxos com 15% de caminhões.....	106

Tabela 30 : Relação entre percepção da qualidade do tráfego e comprimento de filas equivalentes (m) e VPEs em fila (n VPEs) - fluxos com 30% de caminhões.....	107
Tabela 31 : Relação entre percepção da qualidade do tráfego e comprimento de filas equivalentes (m) e VPEs em fila (n VPEs) - fluxos com 50% de caminhões.....	108
Tabela 32 : Relação entre percepção da qualidade do tráfego e comprimento de filas equivalentes (m) e VPEs em fila (n VPEs) - fluxos com 65% de caminhões.....	109
Tabela 33 : Relação entre percepção da qualidade do tráfego e comprimento de filas equivalentes (m) e VPEs em fila (n VPEs) - fluxos com 80% de caminhões.....	110
Tabela 34 : Fatores de equivalência operacional de veículos em praça de pedágio	114
Tabela 35 : Volume de tráfego e veículos equivalentes processados.....	116

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA PARA A ESCOLHA DO TEMA	13
1.2	OBJETIVOS.....	14
1.2.1	<i>Objetivo Principal.....</i>	<i>14</i>
1.2.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>14</i>
1.3	DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	15
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	CAPACIDADE E NÍVEL DE SERVIÇO EM RODOVIAS SEGUNDO O HCM-2000.....	18
2.1.1	<i>Metodologias de Níveis de Serviço e os Fatores que Afetam as Capacidades em Trechos de Rodovias</i>	<i>19</i>
2.1.1.1	Segmentos Básicos de Freeways	20
2.1.1.2	Segmentos de Rodovias com Múltiplas Faixas (Multi-lane Highways)	22
2.1.1.3	Segmentos de Rodovias de Pista Simples (Two-Lane Highways)	25
2.1.2	<i>Considerações Finais sobre Fatores de Influência na Capacidade de Rodovias</i>	<i>28</i>
2.2	FATORES DE INFLUÊNCIA NA CAPACIDADE DE ATENDIMENTO DE PRAÇAS DE PEDÁGIO	29
2.2.1	<i>Fatores Humanos e Tempos de Atendimento.....</i>	<i>29</i>
2.2.1.1	Fator Humano Motorista e Tempos de Atendimento.....	30
2.2.1.2	Fator Humano Arrecadador e Tempos de Atendimento.....	30
2.2.2	<i>Fatores Operacionais e Tempos de Atendimento.....</i>	<i>31</i>
2.2.2.1	Influência das Formas de Pagamento sobre os Tempos de Atendimento.....	31
2.2.2.2	Influência da Categoria de Veículos nos Tempos de Atendimento.....	32
2.2.2.3	Influência dos Valores das Tarifas nos Tempos de Atendimento	32
2.2.2.4	Influência do Layout da Praça nos Tempos de Atendimento.....	33
2.2.2.5	Influência do Período do Dia e Condições Climatológicas nos Tempos de Atendimento	34
2.2.2.6	Influência da Intensidade do Fluxo de Tráfego nos Tempos de Atendimento	34
2.2.3	<i>Considerações Finais sobre Fatores de Influência nos Tempos de Atendimento</i>	<i>35</i>
2.3	PRINCIPAIS ESTUDOS SOBRE CAPACIDADE E NÍVEL DE SERVIÇO EM PRAÇAS DE PEDÁGIO.....	36
2.3.1	<i>Análise da Capacidade e Nível de Serviço para Praças de Pedágio Segundo Woo e Hoel (1991).....</i>	<i>36</i>
2.3.1.1	Análise do Estudo Apresentado por Woo e Hoel (1991).....	40
2.3.2	<i>Análise de Níveis de Serviço para Praças de Pedágio Segundo Lin e Su (1994)</i>	<i>40</i>
2.3.2.1	Análise do Estudo Apresentado por Lin e Su (1994)	44
2.3.3	<i>Metodologia para Níveis de Serviço em Praças de Pedágio Segundo Klodzinski e Al-Deek (2002).....</i>	<i>44</i>
2.3.3.1	Análise do Estudo Apresentado por Klodzinski e Al-Deek (2002)	46
2.3.4	<i>Considerações Finais sobre os Principais Estudos de Capacidade e Níveis de Serviço em Praças de Pedágio.....</i>	<i>46</i>
2.4	INDICADORES DE DESEMPENHO PARA PRAÇAS DE PEDÁGIO	48
2.4.1	<i>O Caráter do Transporte como um Serviço e sua Qualidade.....</i>	<i>48</i>
2.4.2	<i>Conceito de Nível de Serviço e sua Relação com Indicadores.....</i>	<i>49</i>
2.4.3	<i>Indicadores de Desempenho para Praças de Pedágio Obtidos da Bibliografia.....</i>	<i>49</i>
2.4.4	<i>Considerações sobre os Indicadores de Desempenho obtidos na Literatura</i>	<i>52</i>
2.4.5	<i>Indicadores de Desempenho Utilizados nas Praças de Pedágio Brasileiras.....</i>	<i>53</i>

2.4.6	<i>Considerações Finais sobre Indicadores de Desempenho para Praças de Pedágio</i>	55
3.	MÉTODO UTILIZADO	57
3.1	DESCRIÇÃO DAS ETAPAS METODOLÓGICAS.....	58
3.1.1	<i>A Revisão Bibliográfica</i>	58
3.1.2	<i>Etapa 1 – Elaboração do Projeto de Experimentos</i>	58
3.1.3	<i>Etapa 2 – Construção dos Cenários da Pesquisa</i>	59
3.1.4	<i>Etapa 3 – Planejamento e Execução da Pesquisa</i>	59
3.1.5	<i>Etapa 4 – Análise dos Resultados da Pesquisa</i>	60
3.1.6	<i>Etapa 5 – Modelagem</i>	60
3.1.7	<i>Etapa 6 – Análises de Sensibilidade</i>	61
3.1.8	<i>Etapa 7 - Resultados</i>	61
4.	PESQUISA SOBRE A PERCEPÇÃO DE QUALIDADE DO TRÁFEGO EM PRAÇAS	62
4.1	PROJETO DE EXPERIMENTO	62
4.1.1	<i>Seleção dos Fatores Intervenientes na Percepção da Qualidade do Tráfego em Praças de Pedágio</i>	63
4.1.2	<i>Definição do Projeto de Experimentos para a Pesquisa</i>	64
4.2	ELABORAÇÃO DOS CENÁRIOS PARA A PESQUISA	67
4.2.1	<i>Elaboração dos Cenários Através de Micro-simulação de Tráfego</i>	68
4.2.2	<i>Dados Utilizados e Parâmetros Alterados na Calibração dos Modelos</i>	69
4.2.3	<i>Obtenção das Imagens para os Cenários da Pesquisa</i>	73
4.3	PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DAS PESQUISAS	75
4.4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS PESQUISAS	78
5.	MODELAGEM DA PERCEPÇÃO DOS USUÁRIOS	83
5.1	ANÁLISE PRELIMINAR DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS NA MODELAGEM	83
5.2	MODELAGEM ATRAVÉS DE REGRESSÃO MÚLTIPLA.....	85
5.2.1	<i>O Processo de Modelagem Através de Regressão Múltipla Não-Linear</i>	86
5.3	ANÁLISES DE SENSIBILIDADE DO MODELO	89
5.3.1	<i>Representatividade das Variáveis Explicativas no Modelo</i>	89
5.3.2	<i>Comportamento do Modelo de Percepção de Qualidade do Tráfego</i>	90
5.4	FATORES DE EQUIVALÊNCIA VEICULAR EM FILAS DE PRAÇAS DE PEDÁGIO	93
6.	NÍVEIS DE SERVIÇO EM PRAÇAS DE PEDÁGIO	97
6.1	FILAS EQUIVALENTES EM PRAÇAS DE PEDÁGIO	97
6.2	ANÁLISES DE NÍVEIS DE SERVIÇO EM PRAÇAS DE PEDÁGIO	98
6.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE NÍVEIS DE SERVIÇO EM PRAÇAS DE PEDÁGIO.....	111
6.3.1	<i>Fatores de Equivalência Veicular Operacionais em Praças de Pedágio</i>	111
6.3.2	<i>Capacidade de Processamento para as Praças do Estudo</i>	115
7.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	118
7.1	A PESQUISA SOBRE PERCEPÇÃO DE QUALIDADE DO TRÁFEGO	118
7.2	A MODELAGEM DA PERCEPÇÃO DOS USUÁRIOS	119
7.3	ANÁLISES DE NÍVEIS DE SERVIÇO EM PRAÇAS DE PEDÁGIO	121
7.4	CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	123
	REFERÊNCIAS	124
	ANEXO 1 – ALGORITMOS DO MICRO-SIMULADOR DE TRÁFEGO VISSIM	131

1. INTRODUÇÃO

A administração da malha rodoviária brasileira tem passado por grandes modificações desde a década de 90, quando o governo, pressionado pelas péssimas condições de conservação das rodovias, por uma demanda crescente de usuários e pelo aumento do número de acidentes e custos operacionais de veículos, optou pela conservação da malha viária através de um Programa de Concessão de Rodovias. O Programa de Concessão de Rodovias visa obter fundos para manter as estradas. Esses fundos provem da cobrança de pedágio pela utilização efetiva da rodovia, e tem caráter de contrapartida para as operadoras das concessões, relativa à construção, manutenção ou ampliação da malha rodoviária concedida.

Com o aumento do número de concessões rodoviárias, verificou-se também um aumento no número de praças de pedágio, modo direto de cobrança na via. Atualmente existem 201 praças de pedágio nas rodovias brasileiras (ABCR, 2008a). Concessionárias filiadas a Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias - ABCR administram 175 praças de pedágio nos estados do Espírito Santo (2), Bahia (1), Minas Gerais (3), Rio de Janeiro (20), São Paulo (88), Paraná (27) e Rio Grande do Sul (34) (ABCR, 2008a). O poder público administra 26 praças de pedágio, distribuídas nos estados de São Paulo (19), Rio Grande do Sul (3), Ceará (1) e Mato Grosso do Sul (3) (ABCR, 2008b).

A Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT, através da segunda etapa do Programa de Concessões Federais, repassou mais 2.600 quilômetros de rodovias para a administração privada, onde foram implantadas mais 36 praças (ANTT, 2008). A Agência prevê, ainda, processo relativo à terceira etapa do Programa de Concessões Federais, onde serão repassados à iniciativa privada 2.055 quilômetros de rodovias, com a previsão de implantação de mais 24 praças de pedágio (ANTT, 2009).

As praças de pedágio, sob o ponto de vista de engenharia de tráfego, representam estruturas cujo regime de fluxo pode ser classificado como interrompido. A interrupção do fluxo de tráfego nas praças está relacionada aos pagamentos das tarifas e à necessidade de redução de velocidades e paradas nas cabines. As desacelerações e paradas são obrigatórias para pagamentos manuais ou automáticos nas cabines. O pagamento eletrônico exige que

veículos equipados diminuam as velocidades para uma correta leitura dos dispositivos embarcados.

Neste sentido, há uma efetiva diminuição das capacidades viárias em trechos com cobrança de pedágios, e o congestionamento ocasionado em períodos de pico de tráfego está ligado diretamente à relação entre a oferta e demanda de serviço nestes trechos.

Os congestionamentos e atrasos vivenciados por motoristas em trechos com praças podem ser indicativos para a adoção de medidas alternativas de projeto e operação. Medidas alternativas de projeto e operação estão relacionadas diretamente com a análise do comportamento do fluxo de tráfego nos segmentos com cobrança de pedágios, e com estimativas de parâmetros operacionais e escalas de níveis de serviço ligados a eles.

Parâmetros operacionais são indicadores de desempenho que captam quantitativamente as características de operação de tráfego. Exemplos destes indicadores são: (i) atrasos, (ii) relação entre volume e capacidade (V/C) e (iii) tamanho de filas.

O desempenho e a qualidade de serviço mensurada por um indicador pode ser comparado com valores padrões pré-fixados ou com medições anteriores do mesmo indicador. Neste sentido surge o conceito de nível de serviço (TRB, 2003). O conceito de nível de serviço foi originalmente desenvolvido em 1965 no *Highway Capacity Manual*, e escalas de níveis de serviço possuem o objetivo de qualificar situações de tráfego. A qualificação de situações de tráfego deve refletir o desconforto e inconveniência percebidos pelos usuários quando enfrentam diferentes situações de tráfego. Portanto, a definição de escala para níveis de serviço em praças de pedágio tem papel fundamental em avaliações operacionais, que subsidiem decisões para um melhor gerenciamento destes sistemas e ao conforto de usuários.

1.1 JUSTIFICATIVA PARA A ESCOLHA DO TEMA

A definição de níveis de serviço para praças de pedágio, que reflitam o real desconforto de usuários, é importante referencial para avaliar a operação destes sistemas.

Escala para níveis de serviço em praças deve ser quantificada por várias razões, dentre elas: (i) escalas de níveis de serviço são padrões que buscam traduzir situações de tráfego, e a sua definição permite que técnicos avaliem diferentes configurações de trechos,

baseando suas análises nestes padrões; (ii) escalas de níveis de serviço proporcionam forma de avaliar situações de antes-e-depois, analisando o impacto de alterações no sistema, e; (iii) a definição de escalas de níveis de serviço para praças de pedágio possibilita uma fiscalização mais apurada pelos órgãos reguladores, já que estes podem utilizar uma forma compreensível de medição de desempenho.

A avaliação do nível de serviço para praças de pedágio ainda não foi formalmente definida no *Highway Capacity Manual 2000*. Devido a este fato, estudos sobre o tema divergem com relação à (i) indicadores de desempenho que melhor representem as situações de tráfego nas praças, (ii) metodologias de cálculo de capacidades e (iii) escalas de níveis de serviço que melhor caracterizam seus funcionamentos.

As escalas propostas pela literatura, para aferição do nível de serviço em praças, são adaptações das escalas de nível de serviço em rodovias ou intersecções semaforizadas do HCM, ou um misto de ambas. Neste sentido, há uma lacuna na literatura quanto: (i) a indicadores de desempenho que melhor representem as situações de tráfego em praças de pedágio e; (ii) o real desconforto e inconveniência percebidos pelos usuários quando vivenciam diferentes situações de tráfego nestas infraestruturas.

1.2 OBJETIVOS

Nesta seção serão apresentados os objetivos.

1.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal deste estudo é o desenvolvimento de método para determinação de níveis de serviço em trechos viários com praças de pedágios.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do estudo serão:

- i) Identificar fatores que afetam capacidades e níveis de serviço em segmentos de rodovias, segundo o *Highway Capacity Manual* versão 2000;
- ii) Levantar fatores que afetam a capacidade de processamento de praças de pedágio;
- iii) Pesquisar indicadores de desempenho para análises operacionais de praças de pedágios;
- iv) Captar as percepções de qualidade do tráfego de usuários, e;
- v) Definir escalas de níveis de serviço.

1.3 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

As pesquisas realizadas durante o desenvolvimento deste trabalho buscaram desenvolver escala para níveis de serviço em praças de pedágio brasileiras, desta forma praticando algumas simplificações, como:

- a) A aferição de escala para níveis de serviço em trechos viários com cobrança de pedágios foi realizada de acordo com a percepção de usuários brasileiros, portanto características sócio-culturais podem estar presentes;
- b) A etapa de calibração do comportamento de veículos e geração dos cenários para a pesquisa qualitativa foi executada com características de frota brasileiras, portanto, escala de níveis de serviço está restrita ao ambiente simulado;
- c) O estudo não contempla a qualidade do tráfego percebida por usuários realizando pagamentos eletrônicos, já que estes executam pagamentos de tarifas sem a necessidade de parada nas cabines, experimentando outro regime de tráfego.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este estudo está dividido em sete capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução, além da justificativa para a escolha do tema e objetivos do estudo.

O segundo capítulo corresponde ao referencial teórico, onde foram levantados fatores que afetam capacidades e níveis de serviço em rodovias e fatores que afetam capacidades em praças de pedágio. O referencial teórico também realizou revisão sobre metodologias propostas pela literatura para verificação de níveis de serviços em praças, além de levantar o estado da arte e da prática sobre indicadores de desempenho para praças de pedágio.

O terceiro capítulo apresenta o método do trabalho, onde estão detalhadas as etapas seguidas para se atingir os objetivos do estudo. No quarto capítulo é apresentada a pesquisa sobre a percepção de usuários a respeito da qualidade do tráfego em praças. O quinto capítulo apresenta a modelagem das percepções dos usuários sobre a qualidade do tráfego em praças. No sexto capítulo são apresentadas análises para obtenção de níveis de serviço em praças utilizando o método proposto pelo estudo. O sétimo capítulo apresenta as conclusões e considerações para trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O objetivo deste capítulo é apresentar uma revisão bibliográfica a respeito de elementos importantes para o desenvolvimento do método que estima níveis de serviço em praças de pedágio. O método para aferição de níveis de serviço deste trabalho é embasada em fatores intervenientes na percepção de qualidade do tráfego e em indicadores de desempenho aptos a captar o processo a ser medido. Tanto fatores intervenientes na percepção da qualidade do tráfego, como indicadores de desempenho foram extraídos de levantamentos apresentados nesta revisão.

Assim, a fim de levantar fatores intervenientes na percepção de qualidade de tráfego em rodovias, foi realizada revisão a respeito de metodologias presentes no HCM-2000 para o cálculo de capacidades e determinação de níveis de serviço em segmentos rodoviários. Da mesma forma, na segunda parte do capítulo, foram extraídos da bibliografia fatores intervenientes na capacidade de atendimento em praças de pedágio.

A terceira parte deste capítulo apresenta trabalhos que buscaram definir métodos para análises de capacidade e níveis de serviço em praças de pedágio.

O quarto e último tópico apresentado neste capítulo refere-se aos indicadores de desempenho para praças. Neste tópico foi realizado levantamento a respeito do estado da arte de indicadores de desempenho, além de pesquisa sobre o estado da prática brasileira sobre indicadores utilizados nestas infraestruturas.

A seguir serão apresentados alguns conceitos presentes no HCM-2000, como a classificação das infraestruturas de acordo com o regime de fluxo, conceitos de capacidade e demanda e fatores que influenciam as metodologias para obtenção de capacidades e níveis de serviço para segmentos de rodovias. Estes conceitos serão utilizados durante todo estudo.

2.1 CAPACIDADE E NÍVEL DE SERVIÇO EM RODOVIAS SEGUNDO O HCM-2000

O HCM-2000 apresenta metodologias para análise de capacidade e níveis de serviço para muitas infraestruturas de transportes, e as classifica em duas categorias de acordo com seus regimes de fluxo de tráfego: (i) fluxo interrompido ou (ii) fluxo ininterrupto.

Infraestruturas de fluxo ininterrupto não apresentam elementos que influenciam no escoamento normal do fluxo de tráfego, como semáforos, por exemplo. Nestas situações, o fluxo de tráfego só é afetado pelas interações entre os veículos presentes no fluxo, e entre os veículos e as características geométricas e ambientais.

Infraestruturas de fluxo interrompido, por outro lado, possuem elementos que alteram a corrente normal de fluxo de tráfego, interrompendo-a de alguma forma. Estes elementos podem parar o tráfego periodicamente (ou diminuir significativamente o fluxo), como semáforos e sinais de parada obrigatória.

Fluxos interrompidos ou ininterruptos descrevem o tipo de regime de fluxo, não a qualidade do tráfego em um dado momento. Uma rodovia apresentando situação extrema de congestionamento ainda é uma estrutura ininterrupta, já que as causas do congestionamento são internas ao sistema (TRB, 2000).

Desta forma, trechos com praças de pedágio podem ser classificados como de fluxo interrompido, já que há a presença de elementos que forçam a parada de veículos, impedindo um fluxo normal e diminuindo a capacidade. As capacidades serão limitadas não apenas pela acomodação do tráfego no espaço físico da praça, mas também pelos tempos gastos com o pagamento de tarifas e transposição da praça.

Análises de capacidades, segundo TRB (2000), são um conjunto de procedimentos utilizados para estimar o número máximo de veículos que determinada infra-estrutura pode processar, com razoável segurança, durante determinado período de tempo, enquanto são mantidas condições conhecidas de tráfego, geométricas e operacionais.

A demanda é o principal indicador relativo à quantidade de tráfego utilizando uma infra-estrutura (TRB, 2000). Demanda está relacionada às chegadas de veículos; volumes estão relacionados aos veículos processados. Se filas não existem, a demanda é equivalente ao volume de tráfego em determinado ponto de controle na via. Para o HCM, o termo volume geralmente é utilizado para condições operacionais abaixo do limite da capacidade.

A seguir serão apresentadas as metodologias para determinação das taxas máximas de fluxo (demanda) e níveis de serviço para segmentos de rodovias segundo o HCM-2000. No Brasil, em sua maioria, praças de pedágio estão localizadas em rodovias, e o estudo destas metodologias contribui para o levantamento de fatores que afetam o cálculo das taxas máximas de fluxo nestes trechos, e na determinação do nível de serviço oferecido aos usuários nos trechos analisados.

2.1.1 Metodologias de Níveis de Serviço e os Fatores que Afetam as Capacidades em Trechos de Rodovias

As metodologias apresentadas no HCM-2000 para verificação de capacidades e níveis de serviço de diversas infraestruturas de transportes estão baseadas em um conjunto de condições ideais. Cada metodologia é ajustada por parâmetros de via e tráfego na medida em que condições reais diferem das condições ideais, buscando então refletir a realidade de cada segmento analisado.

Para condições ideais, o HCM presume certos parâmetros geométricos, operacionais e de tráfego, como: dimensões e números de faixas de tráfego; um fluxo hipotético composto por veículos leves equivalentes (onde veículos pesados são traduzidos em termos de veículos leves equivalentes, de forma a simplificar o cálculo); boas condições meteorológicas; boas condições de pavimento; usuários familiarizados com a via e ; tráfego sem impedimentos, acidentes ou incidentes que venham a bloquear ou interferir no fluxo.

Esta primeira parte da revisão está focada nas metodologias de análise para Segmentos Básicos de *Freeways*, Rodovias de Múltiplas Faixas (*Multilane Highways*) e de Pistas Simples (*Two-lane Highways*). As três metodologias serão apresentadas de forma simplificada, e haverá descrição das principais características e fatores que afetam os cálculos, além da realização de comparações entre as mesmas. Explicações mais detalhadas sobre as metodologias podem ser encontradas no HCM versão 2000, nos capítulos 12, 13, 20, 21 e 23.

A identificação destes fatores contribui para o levantamento de aspectos que podem afetar a qualidade de serviço em praças de pedágio.

2.1.1.1 Segmentos Básicos de Freeways

Trechos rodoviários de *freeways* constituem pequena parcela da malha rodoviária brasileira, porém são importantes elementos de ligação entre as principais cidades do país.

As principais características destes trechos são: (i) divisão entre sentidos de fluxo de tráfego; (ii) total controle de acessos de entradas e saídas através de rampas; (iii) duas ou mais pistas para cada direção de tráfego, e; (iv) não existência de intersecções em nível ou semáforos que resultem em paradas, provendo um fluxo ininterrupto.

As curvas de fluxo-velocidade padrões são definidas para as condições ideais de geometria da via e de demanda. As condições ideais geométricas para segmentos de *freeways* são:

- a) Largura mínima de faixas de tráfego: 3,6 metros;
- b) Largura mínima de acostamentos à direita do fluxo de tráfego (distância mínima entre a borda da faixa de rolamento até uma obstrução): 1,8 metros;
- c) Largura mínima de acostamento à esquerda do fluxo de tráfego (distância entre a borda da faixa de rolamento até uma obstrução no canteiro central): 0,6 metros;
- d) Duas ou mais faixas por sentido de tráfego em áreas rurais, ou cinco ou mais faixas por sentido de tráfego em áreas urbanas;
- e) Distância mínima de 3,3 quilômetros entre rampas de acesso (entradas/saídas);
- f) Greides com rampas menores do que 2%, e;
- g) Velocidades Ideais de Fluxo Livre: 120km/h (rural), 110km/h (urbana).

As condições ideais de demanda para segmentos de *freeways* são:

- a) Fluxo de tráfego composto apenas por veículos leves (carros de passeio);
- b) Período mínimo de análise: 15 minutos;
- c) Fator de hora-pico: 0,88 (rural) ou 0,92 (urbano); e,
- d) Usuários familiarizados com a via.

O fluxograma que descreve a metodologia de cálculo de capacidades e níveis de serviço para segmentos básicos de *freeways* é apresentado a seguir na Figura 1.

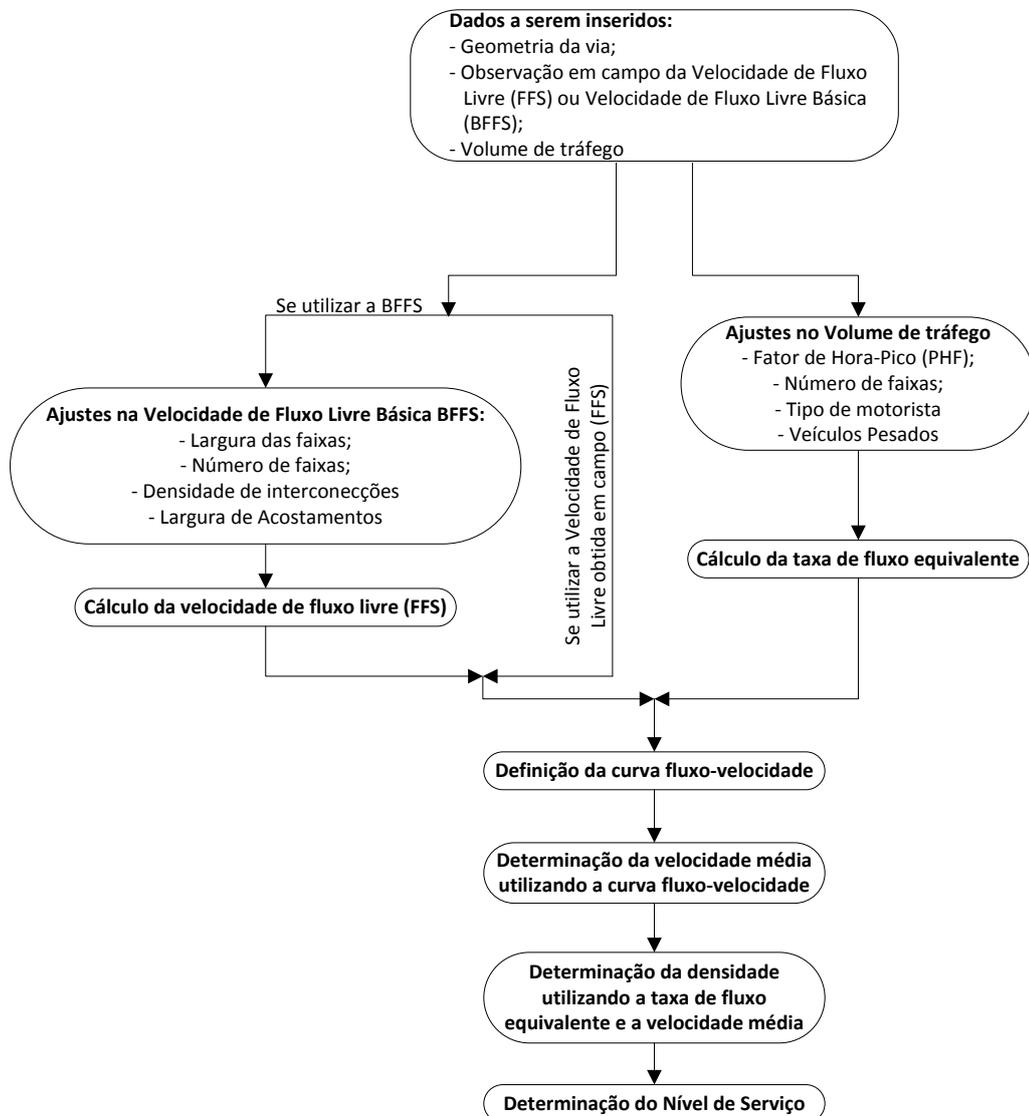


Figura 1: Fluxograma para cálculo de capacidades e nível de serviço em freeway

Fonte: TRB (2000, p.23-2)

Se as velocidades de fluxo livre forem obtidas em campo, serão diretamente utilizadas na confecção das curvas fluxo-velocidade. Caso não seja possível o levantamento em campo, então toma-se uma velocidade básica de fluxo livre, e fatores geométricos serão levados em conta para o ajuste das velocidades de fluxo livre da via em análise. Os fatores geométricos que afetam a velocidade de fluxo livre são (i) a largura e (ii) número de faixas, (iii) largura de acostamentos e (iv) densidade de rampas de acesso.

Os fatores que afetam o cálculo da taxa de fluxo são aqueles relativos ao tráfego, além de um ajuste de fluxo representado pelo fator de hora-pico. Os fatores de tráfego correspondem a (i) influência de veículos pesados (f_{HV}) e os efeitos secundários de greides, (ii) composição do fluxo de tráfego e (iii) efeito da população de motoristas e sua familiaridade com a via.

Os indicadores de desempenho utilizados para avaliar os níveis de serviço em segmentos básicos de *freeways* são (i) a densidade de tráfego (veic/km/faixa) e (ii) velocidade média de veículos (km/h).

2.1.1.2 Segmentos de Rodovias com Múltiplas Faixas (Multi-lane Highways)

Trechos rodoviários de múltiplas faixas, também conhecidos como rodovias de pista dupla convencionais, possuem padrão operacional menor do que *freeways*, já que seus acessos são menos controlados e os sentidos de fluxo de tráfego podem não ser fisicamente separados.

As principais características de segmentos de rodovias com múltiplas faixas são: (i) divisão entre sentidos de fluxo de tráfego, ou fluxo não dividido com faixa central reservada para manobras à esquerda; (ii) controle de acessos de entradas e saídas, porém acessos não são diretos à rodovia e menos controlados do que em *freeways*; (iii) trechos com mais do que 3 quilômetros de espaçamento entre semáforos para trechos rurais, e; (iv) trechos com menos de 3 quilômetros de espaçamento entre semáforos para trechos urbanos.

Em segmentos rodoviários de múltiplas faixas, as curvas de fluxo-velocidade padrões são definidas para as seguintes condições ideais, que são de geometria da via e de demanda.

As condições ideais geométricas para segmentos de múltiplas faixas são:

- a) Largura mínima de faixas de tráfego: 3,6 metros;
- b) Soma das larguras de acostamentos à direita e à esquerda do fluxo de tráfego (distância mínima entre a borda da faixa de rolamento até uma obstrução): mínimo de 3,6 metros;
- c) Duas ou mais faixas por sentido de tráfego;

- d) Pistas de sentidos opostos de tráfego separadas por algum dispositivo físico no canteiro central;
- e) Rodovia sem pontos de acesso (intersecções em nível ou pontos de entrada/saída de veículos) e densidade máxima de acessos depende do meio onde está inserida (rural ou urbano);
- f) Velocidades de fluxo livre maiores do que 100 km/h, e;
- g) Greides com rampas menores do que 2%.

As condições ideais de demanda para segmentos de múltiplas faixas são:

- a) Fluxo de tráfego composto apenas por veículos leves (carros de passeio);
- b) Período mínimo de análise: 15 minutos;
- c) Fator de hora-pico: 0,88 (rural) ou 0,92 (urbano); e,
- d) Usuários familiarizados com a via.

Da mesma forma que o item anterior, é apresentado o fluxograma que descreve a metodologia de cálculo de capacidades e níveis de serviço para segmentos de rodovias de múltiplas faixas.

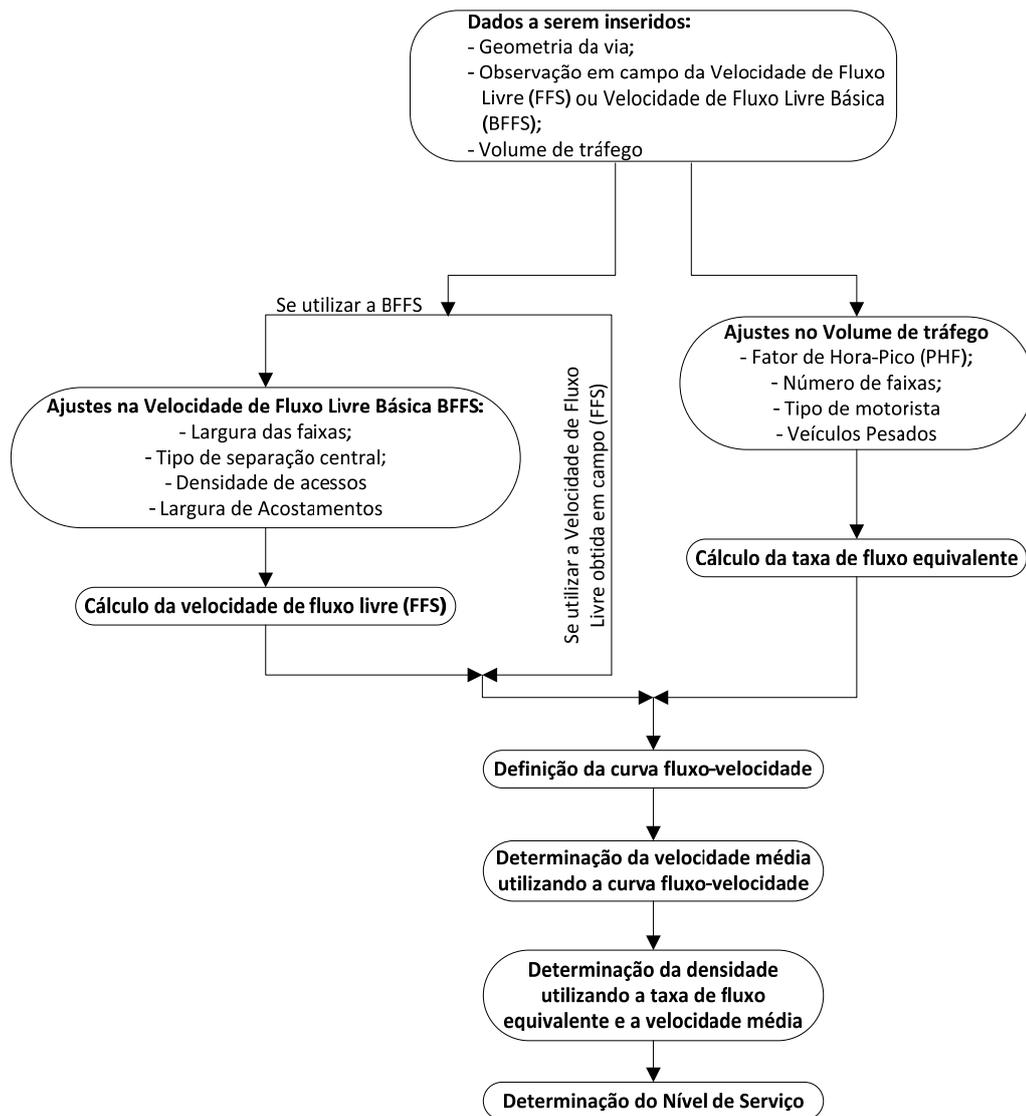


Figura 2: Fluxograma para cálculo de capacidades e nível de serviço em rodovias de múltiplas faixas

Fonte: TRB (2000, p.21-2)

Como na metodologia anterior, se velocidades de fluxo livre forem obtidas em campo, serão diretamente utilizadas na confecção das curvas fluxo-velocidade. Caso não seja possível o levantamento em campo, será tomada uma velocidade básica de fluxo livre, e fatores geométricos ajustarão as velocidades de fluxo livre da via em análise. Os fatores que afetam a velocidade de fluxo livre contabilizam a influência da largura de faixas, largura de acostamentos, densidade de dispositivos de acesso e, nesta metodologia, o tipo de separação central entre os sentidos do fluxo de tráfego. A separação central pode assumir diversos níveis, desde a inexistência total, faixa extra para manobras à esquerda, meio-fio ou desnível de terreno.

Os fatores que afetam o cálculo da taxa de fluxo são aqueles relativos ao tráfego, além de um ajuste através do fator de hora-pico. Os fatores de tráfego correspondem a (i)

influência de veículos pesados (f_{HV}) e os efeitos secundários de greides, (ii) composição do fluxo de tráfego e (iii) efeito da população de motoristas e sua familiaridade com a via.

Os indicadores de desempenho utilizados para avaliar os níveis de serviço em segmentos de rodovias com múltiplas faixas são (i) a densidade de tráfego (veic/km/faixa), (ii) velocidade média de veículos (km/h) e (iii) relação Volume/Capacidade (V/C).

As duas metodologias apresentadas possuem similaridade com relação aos dados necessários para o cálculo, formas de obtenção das velocidades de fluxo livre e de taxas de fluxo equivalentes, dados necessários para a elaboração das curvas de fluxo-velocidade.

A diferença entre as metodologias está na utilização de diferentes fatores para a correção de velocidades básicas de fluxo livre. Na metodologia para segmentos de *freeways*, o número de faixas é utilizado tanto para o ajuste da velocidade básica de fluxo livre, como para o ajuste do volume de tráfego e obtenção da taxa de fluxo equivalente. Já na metodologia de rodovias com múltiplas faixas, é utilizado o fator de tipo de separação central entre os sentidos do fluxo, que pode assumir diversas características (sem divisão, faixa extra, meio-fio, desnível no terreno, etc).

2.1.1.3 Segmentos de Rodovias de Pista Simples (Two-Lane Highways)

Segmentos de rodovias de pista simples são aqueles segmentos que apresentam uma faixa por sentido de tráfego, onde as ultrapassagens de veículos mais rápidos sobre os mais lentos é necessariamente executada com a invasão da faixa do fluxo oposto.

Trechos de rodovias de pista simples compõem grande parcela das rodovias brasileiras, o que torna seu estudo obrigatório, já que interligam todas as regiões do Brasil. Elas são utilizadas tanto para rotas principais de tráfego como em regiões turísticas e em locais montanhosos, onde a construção de rodovias com maiores capacidades e faixas é economicamente onerosa.

O HCM separa os trechos de rodovias de pista simples em duas classes distintas:

- a) Classe I - rodovia de pista simples, cujos motoristas esperam trafegar em velocidades altas. Servem viagens de longa distância, ou conectam a rodovias que proporcionam viagens de longa distância.

- b) Classe II - rodovia de pista simples, cujos motoristas não esperam trafegar em velocidades elevadas. São rodovias secundárias que servem viagens de curtas distâncias, ou o começo ou fim de viagens de longas distâncias, ou onde viagens com fins turísticos são a maioria.

Em segmentos rodoviários de pista simples, as curvas de fluxo-velocidade padrões são definidas para as seguintes condições ideais, que podem ser de geometria da via e de demanda.

As condições ideais geométricas para segmentos de pista simples são:

- a) Largura mínima de faixas de tráfego: 3,6 metros;
- b) Largura mínima de acostamentos à direita do fluxo de tráfego (distância mínima entre a borda da faixa de rolamento até uma obstrução): 1,8 metros;
- c) Rodovia sem pontos de acesso (intersecções em nível ou pontos de entrada/saída de veículos pela lateral da pista);
- d) Inexistência de trechos com proibições de ultrapassagens;
- e) Inexistência de impedimentos ao movimento de veículos (semáforos, placas de parada obrigatória, conversões, etc), e;
- f) Greide com rampas menores do que 2%.

As condições ideais de demanda para segmentos de pista simples são:

- a) Fluxo de tráfego composto apenas por veículos leves (carros de passeio);
- b) Período mínimo de análise: 15 minutos;
- c) Fator de hora-pico: 0,88 (rural) ou 0,92 (urbano);
- d) Divisão direcional do fluxo: (60/40-rural ou urbano; 80/20-recreacional); e,
- e) Porcentagem de veículos pesados: rural (14%-caminhões, 4% veículos recreacionais) ou urbana (2% caminhões, 0% de veículos recreacionais).

Na Figura 3 é apresentado fluxograma que descreve a metodologia de cálculo de capacidades e obtenção de níveis de serviço para segmentos de rodovias de pista simples.

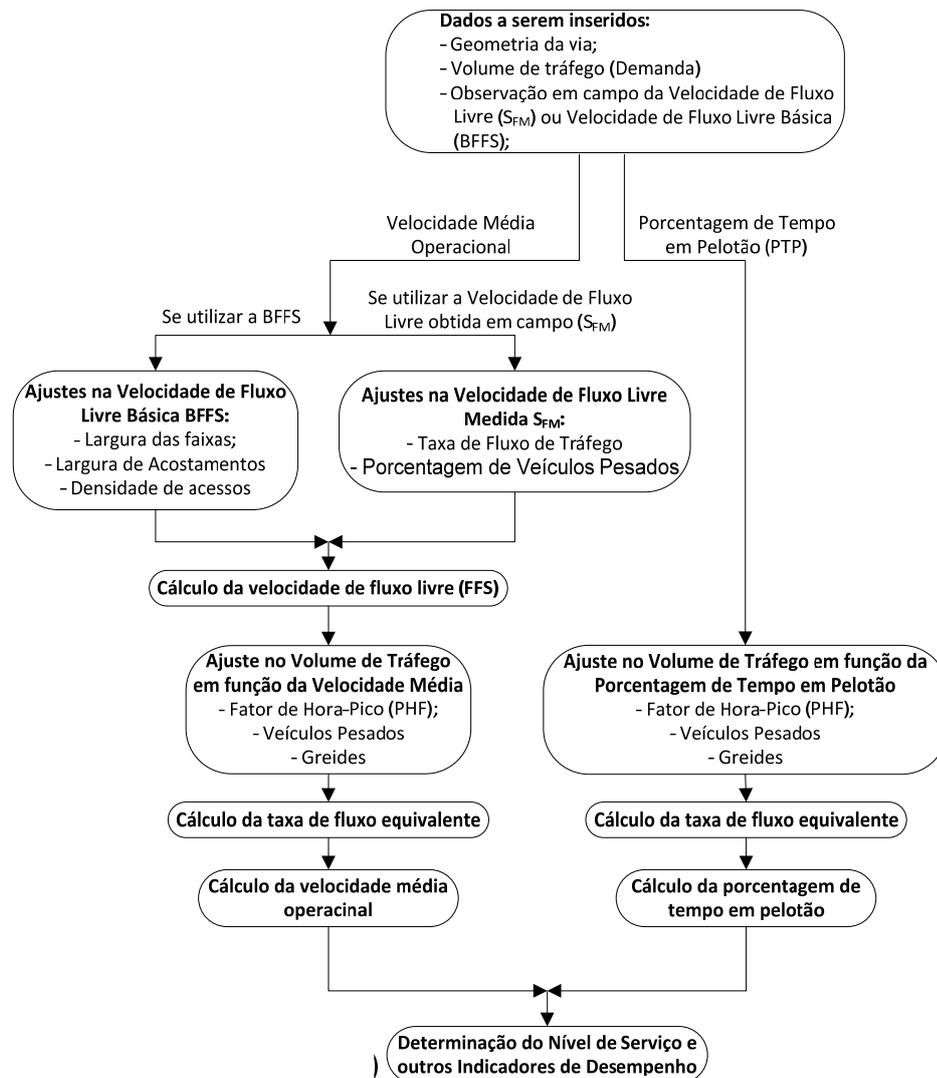


Figura 3: Fluxograma para cálculo de capacidades e nível de serviço em rodovias de pista simples

Fonte: TRB (2000, p.21-2)

A velocidade de fluxo livre é medida em campo ou obtida através de ajustes na velocidade de fluxo livre básica. Os ajustes são devidos aos fatores geométricos diferentes daqueles que determinam as condições ideais. Os fatores geométricos que afetam a velocidade de fluxo livre são a classificação da rodovia (Classe I ou II), largura de faixas, largura de acostamentos, densidade de dispositivos de acesso à direita do fluxo de tráfego e, nesta metodologia, a porcentagem de zonas com impedimento de ultrapassagens e o comprimento das zonas de ultrapassagens.

A porcentagem de trechos com proibição de ultrapassagens e o comprimento das zonas de ultrapassagens representam elementos importantes na formação de pelotões de veículos, quando veículos mais rápidos são impedidos de realizarem ultrapassagens, sendo obrigados a praticar velocidades inferiores impostas por veículos mais lentos. A verificação

do inconveniente percebido pelos usuários tem relação direta com o tempo gasto trafegando em pelotões, e este é indicador de desempenho para a metodologia.

Os fatores que afetam o cálculo da taxa de fluxo estão relacionados ao tráfego, além do fator de hora-pico. Os fatores de tráfego correspondem a (i) influência de veículos pesados (f_{HV}) e os efeitos secundários de greides, (ii) composição do fluxo de tráfego e (iii) efeito da população de motoristas e sua familiaridade com a via.

Os indicadores de desempenho utilizados para avaliar os níveis de serviço em segmentos de rodovias de pista simples são o tempo gasto por veículos trafegando em pelotões (representado pela proporção do tempo de viagem) e a velocidade média de veículos leves (km/h).

Esta metodologia apresenta característica peculiar, na medida em que leva em consideração para o cálculo de seus indicadores dois fatores típicos de rodovias de pista simples: porcentagem de trechos com proibição de ultrapassagens e a distribuição direcional do tráfego.

O comprimento de trechos com proibição de ultrapassagens, como já descrito, aumenta o tempo de viagem quando veículos trafegam em pelotões. A distribuição direcional do fluxo de tráfego influencia da mesma forma o tempo em que veículos trafegam em pelotões. Na medida em que há um aumento do volume tráfego no sentido oposto, diminuem as oportunidades de realização de utrapassagens.

2.1.2 Considerações Finais sobre Fatores de Influência na Capacidade de Rodovias

Através das metodologias apresentadas no HCM-2000, identifica-se um grande número de fatores que influenciam o cálculo das taxas máximas de fluxo e obtenção de níveis de serviço em segmentos básicos de rodovias. Os principais fatores identificados são relativos à geometria das vias e características de tráfego.

Como fatores geométricos das vias pode-se citar largura e número de faixas, distribuição de dispositivos de acesso, tipo de separação entre fluxos opostos de tráfego, greide e comprimentos de trechos com impossibilidade de ultrapassagens.

Como fatores de tráfego podem ser citados volumes de tráfego e determinação do fator de hora-pico, composição do fluxo, familiaridade de motoristas com a via, o efeito secundário entre composição do fluxo e greide e a distribuição direcional do fluxo de tráfego em rodovias de pista simples.

A identificação de fatores influentes na obtenção de níveis de serviço em rodovias contribui para a seleção de fatores a serem utilizados na pesquisa subsequente sobre níveis de serviço em praças de pedágio.

O próximo tópico do referencial teórico busca identificar fatores que interferem na capacidade de processamento em praças de pedágio, no qual serão apresentados trabalhos focados no processamento de veículos nas cabines de arrecadação e otimização de infraestruturas de praças de pedágio.

2.2 FATORES DE INFLUÊNCIA NA CAPACIDADE DE ATENDIMENTO DE PRAÇAS DE PEDÁGIO

A capacidade de processamento em praças de pedágio está diretamente correlacionada aos tempos de atendimento praticados nas cabines.

Os fatores que afetam tempos de atendimento nas cabines de pedágio podem ser humanos ou operacionais. Fatores humanos estão relacionados à interferência humana de motoristas e arrecadadores nos tempos de atendimento. Fatores operacionais estão relacionados a outros fatores, como por exemplo: forma de pagamento, valor de tarifas, categoria de veículo sendo atendido, condições climatológicas e etc.

2.2.1 Fatores Humanos e Tempos de Atendimento

O fator humano envolvido no processo de pagamento de pedágios é relativo a atuação de arrecadadores e motoristas dos veículos, e varia de acordo com a forma de cobrança realizada. A cobrança manual, por exigir interação entre motorista e arrecadadores, é a forma de cobrança que apresenta maiores tempos de atendimento e menores capacidades de processamento de cabines.

A cobrança eletrônica é menos afetada pelo fator humano, refletido sobre a condução dos veículos (desacelerações e reacelerações), por ser realizada através de dispositivos eletrônicos instalados nos veículos equipados. Veículos não param para efetuar pagamentos, e tempos de atendimento são os menores dentre as formas de cobrança.

2.2.1.1 Fator Humano Motorista e Tempos de Atendimento

Motoristas de veículos influenciam tempos de atendimento nas cabines na medida em que podem apresentar diferentes características, e podem ser classificados como usuários frequentes e não-frequentes (ARAÚJO, 2001), e por características comportamentais (AL-DEEK, 2000; ASTARITA *et al* , 2001 e HORN, 2003a).

A frequência de utilização de uma rodovia faz com que usuários obtenham conhecimentos prévios sobre o local e tarifas, influenciando seus tempos de atendimento.

Características comportamentais estão ligadas ao comportamento dos motoristas refletido na condução dos veículos (aceleração, desaceleração, trocas de faixas e demais reações que um condutor pode apresentar), e foram observadas na literatura em trabalhos envolvendo micro-simulação de praças de pedágio.

2.2.1.2 Fator Humano Arrecadador e Tempos de Atendimento

Alguns autores sugerem que, sob condições de tráfego leve, operadores consomem mais tempo processando veículos do que quando pressionados por uma fila crescente, quando tendem a executar a transação com maior velocidade (WOO E HOEL, 1991). O aumento da eficiência de processamento foi verificada por Oliveira *et al.* (2003a), que correlacionaram estatisticamente tamanhos de filas com tempos de atendimento nas cabines, chegando a conclusão que filas longas influenciam tempos de atendimento, na medida em que arrecadores sentem-se pressionados à agilizar os atendimentos.

2.2.2 Fatores Operacionais e Tempos de Atendimento

Fatores operacionais que interferem nos tempos de atendimento nas cabines, abrangem formas variadas de: (i) pagamentos de tarifas, (ii) categorias de veículos, (iii) valores de tarifas; (iv) características geométricas de praças de pedágio e alocação das formas de cobrança nas cabines; (v) período do dia e condições climatológicas e (vi) intensidade de fluxo de tráfego, dentre outros.

2.2.2.1 Influência das Formas de Pagamento sobre os Tempos de Atendimento

Araújo (2001) e Oliveira (2004) realizaram análises estatísticas das características operacionais de praças de pedágio para os estados de São Paulo e Rio Grande do Sul, respectivamente, chegando à conclusão de que formas de pagamento, dentre outras, são variáveis que influenciam os tempos de atendimento em praças de pedágio.

Diversos estudos realizados fora do país correlacionam diferentes taxas de atendimento com formas de pagamento variadas (EDIE, 1954; WOO E HOEL, 1991; PIETRZYK E MIERZEJEWSKI, 1993; MORTON E LAM, 1994; LIN E SU, 1994; PESQUERA *et al.*, 1997; POLUS E RESHETNIK, 1997; ZARRILLO, 1998; VAN DIJK *et al.*, 1999; PREVEDOUROS, 2002; KLODZINSKI E AL-DEEK, 2002).

Astarita *et al.* (2001) avaliaram a influência da quantidade de veículos equipados com pagamento eletrônico no atraso geral das praças de pedágio. Os autores concluíram que a instalação de cabines com cobrança eletrônica não influencia atrasos médios de veículos para fluxos com menos de 10% de veículos equipados. O atraso médio tem redução expressiva quando mais de 20% do fluxo de tráfego utiliza pagamentos eletrônicos em cabines mistas.

A fração de tráfego equipada com pagamentos eletrônicos de tarifas é parâmetro importante na determinação das dimensões de projeto das praças e no número de cabines abertas, como demonstrado em estudos de Robinson e Van Aerde (1995) e Polus (1996).

2.2.2.2 Influência da Categoria de Veículos nos Tempos de Atendimento

A categoria do veículo é um dos fatores de grande interferência nos tempos de atendimento nas cabines. Diversos autores realizaram análises estatísticas, identificando médias significativamente diferentes entre tempos de atendimento de diferentes categorias (JUNGA, 1990; DANKO E GULEWICZ, 1991 e 1994; ZARRILLO, 1998; VAN DIJK *et al.*, 1999; ARAÚJO, 2001; LIN, 2001; OLIVEIRA, 2004).

Em estudos sobre praças de pedágio, a diferenciação entre categorias de veículos é necessária visto que: (i) a relação peso-potência influenciará as acelerações e desacelerações dos veículos nas cabines; (ii) diferentes categorias de veículos podem apresentar diferentes perfis comportamentais de motoristas; (iii) valores de tarifas (inteiros ou fracionados) diferem entre categorias; e, (iv) as dimensões dos veículos (largura, comprimento e altura) podem influenciar:

- a) na locomoção dos mesmos entre as cabines de pedágio (veículos mais largos podem apresentar velocidades mais baixas para evitar acidentes);
- b) no comprimento das filas nas cabines (veículos mais longos fazem com que filas sejam maiores devido ao tamanho equivalente entre categorias); e,
- c) no pagamento manual das tarifas nas cabines (veículos mais altos podem apresentar dificuldades quando da interação entre motoristas e arrecadadores).

2.2.2.3 Influência dos Valores das Tarifas nos Tempos de Atendimento

Os valores das tarifas, se inteiros ou fracionados, influenciam os tempos de atendimento nas cabines de cobrança de pedágio. Boronico e Siegel (1998) avaliaram o aumento dos atrasos provocados pelas praças devido à alteração de tarifas para valores fracionados. Identificaram grande impacto, pois arrecadadores necessitaram realizar um maior número de transações com necessidade de troco.

Araújo (2001) também avaliou a influência de valores de tarifas nos tempos de atendimento em praças no estado de São Paulo. A autora constatou que a cobrança de tarifas com valores inteiros leva a reduções substanciais nos tempos de processamento.

2.2.2.4 Influência do Layout da Praça nos Tempos de Atendimento

Praças de pedágio podem apresentar variadas geometrias quanto ao número de cabines, áreas de aproximação, largura de faixas em cabines de pagamento, áreas de retomada e aceleração, altura de janelas das cabines dentre outros.

A largura da faixa de rolamento, em cabines de cobrança, influencia os tempos de atendimento de veículos. Na medida em que diferentes categorias apresentam diferentes dimensões (larguras), a travessia das cabines é executada com diferentes velocidades, principalmente por medida de segurança, impactando nos tempos de atendimento.

A altura de janelas de cobrança das cabines influencia os tempos de atendimento, já que veículos mais altos (ônibus e caminhões) enfrentam dificuldades no momento da interação entre motoristas realizando pagamentos e os arrecadadores.

O fator geométrico foi avaliado estatisticamente por Araújo (2001). A autora concluiu que geometria de praças é variável que influencia os tempos de atendimento.

A iluminação das praças, cabines e entornos também é ponto fundamental para o processamento e segurança de veículos. Schaufler (1997) argumenta que a aproximação das praças é área de intenso movimento, onde são tomadas decisões de troca de faixas, portanto uma adequada iluminação aumenta a segurança e percepção de espaço de motoristas, além de diminuir atrasos.

A literatura apresenta ainda diversos trabalhos relacionados com a locação e configuração das formas de cobrança nas cabines de praças de pedágio (SCHAUFLER, 1997; MCDONALD E STAMMER, 2001; MOHAMED *et al.*, 2001). Estes trabalhos relacionam (i) a necessidade de cuidados quanto à diferença de velocidades entre usuários realizando pagamentos manuais e eletrônicos, (ii) instalação de cabines com cobrança eletrônica à esquerda da praça com relação ao fluxo, evitando trocas de faixas por veículos com velocidades elevadas, e que realizarão pagamentos eletrônicos, (iii) cuidados especiais com

sinalização e velocidades de aproximação nas praças para veículos pagando eletronicamente.

2.2.2.5 *Influência do Período do Dia e Condições Climatológicas nos Tempos de Atendimento*

Chang (1987; *apud* LIN E SU, 1994) realizou trabalho que considerou a influência dos períodos do dia (dia, noite) e das condições climatológicas (seco, chuvoso) nos tempos de atendimento nas cabines. Baseado neste trabalho, fatores de redução das capacidades de processamento são propostos de acordo com o clima e a luminosidade do dia para algumas formas de pagamento e categorias de veículos. A Tabela 1 apresenta os fatores de redução.

Tabela 1 : Fatores de redução de capacidade para diferentes períodos do dia e clima

Condições Meteorológicas	Veículos Leves		Caminhões Leves	Caminhões Pesados e Ônibus
	<i>Sem troco</i>	<i>Com troco</i>	<i>Qualquer forma de pagamento</i>	<i>Qualquer forma de pagamento</i>
Tempo seco, noite	4%	4%	21%	7%
Chuvoso, dia	13%	6%	11%	4%
Chuvoso, noite	23%	6%	-	-

Fonte: Lin e Su (1994) *apud* Chang (1987)

Os fatores de redução de capacidade propostos por Chang (1987; *apud* LIN E SU, 1994) devem ser aplicados em capacidades observadas sob o turno do dia, e em condições de tempo seco. Por exemplo, para veículos leves pagando exatamente as tarifas, uma redução de 23% na capacidade é proposta quando estes estiverem sob condições de chuva e à noite.

2.2.2.6 *Influência da Intensidade do Fluxo de Tráfego nos Tempos de Atendimento*

A influência da intensidade do fluxo de tráfego nos tempos de atendimento foi estudada por Oliveira *et al.* (2003a). Os autores identificaram que filas nas cabines podem proporcionar tempo hábil para que motoristas procurem valores exatos de tarifas, agilizando os atendimentos.

A influência da intensidade de tráfego nos tempos de atendimento também foi citada por Zarrillo (1998). A autora afirma que arrecadadores atingem seu processamento máximo quando filas apresentassem doze veículos em espera. Danko e Gulewicz (1991) observaram em seu estudo que existe relação direta entre o número de veículos nas filas e tempos de atendimento. Os autores identificaram ganhos de produtividade quando filas eram maiores do que oito veículos.

2.2.3 Considerações Finais sobre Fatores de Influência nos Tempos de Atendimento

A capacidade de processamento de veículos em praças de pedágio depende da agilidade dos atendimentos nas cabines, ou seja, dos tempos de atendimento. Esta etapa da revisão bibliográfica apresentou fatores que interferem nos tempos de atendimento em cabines de praças de pedágio. Trabalhos levantados na bibliografia apresentam isoladamente estes fatores, e não foram observadas análises do efeito secundário de interação entre alguns fatores, como por exemplo, valores de tarifas e o efeito secundário nas formas de pagamentos (exatos ou não-exatos).

A análise das metodologias do HCM-2000, para obtenção de níveis de serviço em rodovias, e dos trabalhos focados na operação de praças proporcionaram o levantamento de uma ampla gama de fatores que podem ser considerados no desenvolvimento de metodologia para níveis de serviço em praças de pedágio. Os fatores observados podem ser classificados em fatores geométricos, de tráfego e operacionais.

Dentre os fatores geométricos podem ser citados, como exemplo, largura e número de faixas de rolamento e o greide. Fatores de tráfego são relativos, por exemplo, à presença de veículos pesados no fluxo e a familiaridade de motoristas com a via. Dentre os fatores operacionais levantados podem ser citados, por exemplo, valores de tarifas, forma de pagamento praticada e o layout das cabines de cobrança.

Deve-se ressaltar ainda que nenhuma metodologia de cálculo de capacidades de processamento para praças foi aceita na prática. Estudos que propuseram metodologias não incorporam todos os fatores de influência relatados anteriormente, além de apresentarem técnicas variadas de obtenção de capacidades (WOO E HOEL, 1991; AL-DEEK *et al.*, 1996 e 1997; ZARRILLO, 1998 e 2000; ZARRILLO *et al.*, 2004).

A seguir, serão apresentados os principais estudos que buscaram definir capacidades e níveis de serviço para praças de pedágio, com detalhamento das metodologias propostas pelos autores.

2.3 PRINCIPAIS ESTUDOS SOBRE CAPACIDADE E NÍVEL DE SERVIÇO EM PRAÇAS DE PEDÁGIO

O objetivo desta seção é apresentar os principais trabalhos que propuseram métodos para o cálculo de capacidades e níveis de serviço para praças de pedágio. O estudo de capacidades de atendimento e níveis de serviço para praças de pedágio é reconhecido como sendo uma necessidade de pesquisa desde 1987, quando o *Transportation Research Board* (TRB, 1987) levantou diversas lacunas existentes na verificação de capacidades de infraestruturas de transportes nos Estados Unidos.

Estudos que analisam especificamente este tema aparecem na literatura desde 1991, quando Woo e Hoel (1991) buscaram avaliar capacidades de atendimento e níveis de serviço para praças de pedágio. Lin e Su (1994) também realizaram estudos enfocando a mesma problemática. Mais recentemente, e utilizando micro-simulação, Klodzinski e Al-Deek (2002) propuseram nova metodologia para avaliação de níveis de serviço.

Os estudos citados serão apresentados e analisados nos próximos itens, e devido a suas relevâncias ao objetivo final deste trabalho, serão detalhadas as metodologias e formas de obtenção de escalas de níveis de serviço.

2.3.1 **Análise da Capacidade e Nível de Serviço para Praças de Pedágio Segundo Woo e Hoel (1991)**

O propósito do estudo realizado por Woo e Hoel (1991) foi aumentar a compreensão das características de tráfego nas praças de pedágio, desenvolvendo método que contribua para a análise da operação de tráfego nestas infraestruturas.

Woo e Hoel (1991) levantaram hipóteses baseadas em observações de campo, referentes ao comportamento do tráfego e possíveis influências nas capacidades de atendimento de cabines.

A primeira análise teórica realizada pelos autores foi a determinação da capacidade de atendimento para uma cabine de pedágio genérica, onde houve a diferenciação entre tempos de atendimento para diferentes classes de veículos (i) e formas de pagamento (j):

$$t_{ij} = \alpha_i \cdot t_{1j} \quad (1)$$

onde:

t_{1j} = tempo de atendimento para automóveis (tipo 1) e forma de pagamento j , e

α_i = automóveis equivalente para veículo tipo i nas filas ou cabines de cobrança.

Os autores afirmam que comprimentos dos veículos e a relação peso-potência são os dois principais fatores que afetam os tempos de atendimento, e realizam uma divisão no tráfego entre veículos leves (automóveis) e veículos pesados (ônibus e caminhões).

Similarmente, diferenciam tempos de atendimento praticados para diferentes formas de pagamento:

$$t_{ij} = \beta_j \cdot t_{i1} \quad (2)$$

onde:

t_{i1} = tempo de atendimento para veículos i e forma de pagamento manual (tipo 1), e

β_j = fator de equivalência da forma de pagamento j para a forma de pagamento manual.

Desta forma, os autores propõem a capacidade de processamento (c_j) para uma cabine com forma de atendimento j como sendo:

$$c_j = \frac{3600}{t_{1j}} \quad (3)$$

Considerando a existência de n_j cabines abertas, com formas de cobrança j , então a capacidade de atendimento total (C) de uma praça de pedágio será:

$$C = \sum_{j=1}^j n_j c_j = n_1 \frac{3600}{t_{11}} + n_2 \frac{3600}{t_{12}} + \dots + n_j \frac{3600}{t_{1j}} = \sum_{j=1}^j n_j \frac{3600}{t_{1j}} \quad (4)$$

As capacidades c_j e C são expressas em termos de veículos leves por hora.

A seguir, os autores realizaram ponderação entre as capacidades (C) previamente obtidas e condições de fluxo de tráfego. Antes do fluxo de tráfego atingir a capacidade de

ser acomodado nas áreas de chegadas da praça, as cabines são capazes de processar todo o tráfego. Quando taxas de chegada do fluxo de tráfego aproximam-se das taxas de processamento das cabines, atrasos começam a ocorrer, evidenciando uma situação de instabilidade no sistema. Quando taxas de chegada excedem taxas de processamento, o sistema entra em colapso, pois a praça somente irá servir ao tráfego até sua capacidade.

Velocidades e densidades são comumente utilizadas como indicadores de desempenho para representar a qualidade do tráfego em rodovias. Segundo Woo e Hoel (1991), a relação entre volume-capacidade possui representatividade superior do que velocidades, particularmente porque velocidades são uma função do volume.

Volume é um bom indicador de desempenho sob o ponto de vista de engenharia, e densidade e a relação volume-capacidade são adequadas na determinação da liberdade de manobras de veículos e na obtenção da qualidade de serviço. Já as velocidades e desacelerações executadas pelo fluxo de tráfego são parâmetros importantes na representação do nível de serviço sob o ponto de vista dos motoristas (WOO E HOEL ,1991).

Buscando determinar a quantidade de tráfego que uma praça de pedágio pode acomodar, Woo e Hoel (1991) realizaram cálculo para determinação das áreas de aproximação e saída de praças. Os autores utilizaram o número de faixas de aproximação (n_1), número de cabines de atendimento (n_2) e número de faixas de saída (n_3) apresentadas na Figura 4. As áreas de aproximação e saída são, respectivamente, A_1 e A_2 . A área total é representada por A .

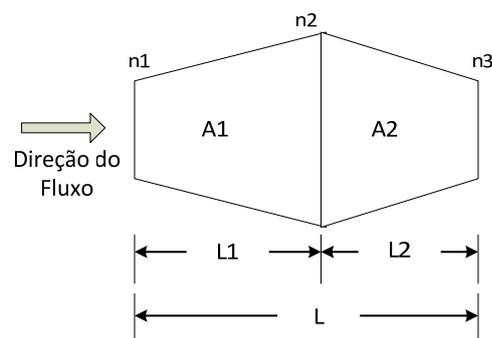


Figura 4: Áreas de praças de pedágio

Fonte: Woo e Hoel (1991)

Se o tempo total médio para atravessar a área de praça for T , o número de veículos atravessando esta área é a taxa de fluxo Q multiplicado por T . Se veículos são divididos em duas categorias, então a densidade na área de praça de pedágio pode ser expressa por K ,

$$K = \frac{\sum Q_i T_i}{A} = \frac{2 \cdot (Q_a T_a + Q_t T_t)}{A_1 + A_2} \quad (5)$$

onde i representa a classe veicular, e a e t denotam automóveis e caminhões respectivamente (WOO E HOEL, 1991).

Na medida em que a intensidade do fluxo aumenta, também aumenta a ocupação das áreas de praça e a densidade, enquanto as velocidades diminuem.

Os autores obtiveram dados de oito praças de pedágio, onde foram realizadas filmagens e coletados tempos de atendimento, taxas de chegadas de 15 em 15 segundos e o tempo total de percurso de cada veículo que atravessou o segmento de rodovia com praça. Dividiram os dados de tráfego em intervalos de 1, 3 e 5 minutos e, conhecendo as capacidades de atendimento totais de cada praça, obtiveram a relação volume-capacidade. Volume foi representado em unidades de veículos equivalentes por hora, e caminhões e ônibus convertidos por um fator α de equivalência.

A seguir, os autores correlacionaram estatisticamente a relação V/C com a densidade nas áreas das praças, e concluíram que densidades podem ser utilizadas para estimar a relação V/C de tráfego em praças de pedágio.

Para determinar escalas de níveis de serviço em praças, Woo e Hoel (1991) correlacionaram a relação V/C e densidades apresentadas no HCM, para níveis de serviço em rodovias, com a relação V/C e densidades calculadas nas praças do estudo. Os autores verificaram similaridade estatística no comportamento de V/C e densidades para rodovias e V/C e densidades obtidas nas praças.

Para classificar os níveis de serviço, definiram então as densidades em praças como sendo as mesmas densidades observadas em rodovias. A Tabela 2 apresenta a relação entre densidades e níveis de serviço proposta por Woo e Hoel (1991).

Tabela 2 : Valores para escalas de níveis de serviço segundo Woo e Hoel (1991)

Nível de Serviço	Densidade (veic/milha/faixa)	V/C
A	< 12	0,24
B	< 20	0,40
C	< 30	0,57
D	< 42	0,74
E	< 67	1,00
F	> 67	-

Fonte: Woo e Hoel (1991)

2.3.1.1 Análise do Estudo Apresentado por Woo e Hoel (1991)

Woo e Hoel (1991) buscam representar o inconveniente sofrido pelos usuários comparando a existência da praça com e sem congestionamento, e afirmam que atrasos em praças de pedágio somente passam a ocorrer quando os limites de processamento das cabines são alcançados. Esta suposição representa uma realidade onde usuários estão familiarizados e acostumados com a presença de praça na rodovia, fato este que não reflete a realidade observada no Brasil.

Uma metodologia para análises de níveis de serviço deve levar em consideração a inexistência da praça no sistema, comparando segmentos com atrasos e congestionamentos provocados por elas com segmentos rodoviários de fluxo ininterrupto, assim obtendo o inconveniente total percebido pelos usuários. Outro ponto crítico a respeito da metodologia proposta pelos autores está na utilização do indicador de desempenho “relação volume-capacidade (V/C)” para a determinação de níveis de serviço. A proposição de utilização deste indicador, neste caso, representa a adaptação de métodos já consagrados no HCM a fim de analisar praças de pedágio. Através de estudos, foi verificado que esta relação não pode ser feita, pois a capacidade de processamento nas cabines é muito variável, distorcendo consideravelmente o indicador. Já a utilização do indicador de desempenho “densidade de ocupação” das áreas de entrada e saída das praças pode fornecer importante informação a respeito do desconforto e inconveniência vivenciados por motoristas em segmentos com praças de pedágio.

2.3.2 Análise de Níveis de Serviço para Praças de Pedágio Segundo Lin e Su (1994)

Lin e Su (1994) afirmam que indicadores de desempenho agregados para toda a praça, como densidade e a relação V/C propostos por Woo e Hoel (1991), são convenientes para serem utilizados, porém não conseguem diferenciar variações entre operações de tráfego nas diferentes cabines de arrecadação.

Devido à complexidade operacional envolvida, Lin e Su (1994) desenvolveram um modelo de simulação chamado TPS (Toll Plaza Simulator), com indicadores de desempenho específicos para cada cabine de atendimento, como: tempo médio no sistema, comprimento

médio e máximo de fila. Os autores consideraram tempo no sistema como o intervalo de tempo compreendido entre a entrada e a saída do veículo no sistema de praça de pedágio. Caso o veículo encontrou fila para atendimento, o tempo no sistema foi chamado pelos autores de atraso de parada. Comprimento de fila é caracterizado pelo número de veículos em fila, incluindo o veículo em posição de atendimento na cabine.

Dados foram coletados através de filmagens, e os autores observaram que motoristas preferem escolher aquelas cabines que não necessitam trocas de faixa. A troca de faixa foi verificada quando existia diferença de quatro ou mais veículos nas filas, situação onde motoristas passavam a realizar trocas de faixas buscando a menor fila.

Lin e Su (1994) realizaram diversas rodadas de simulação, e correlacionaram filas médias nas cabines com as taxas de chegadas na praça (veic/h) e a duração do fluxo (60 minutos, 15 minutos), classificando as operações de processamento dos veículos nas praças em três estados (estável, meta-estável e instável). As características destes estados estão ilustradas na Figura 5, em termos das filas médias simuladas em cabines exclusivas para veículos leves, pagamentos exatos ou com tickets, com taxas de chegada de 775 veic/h.

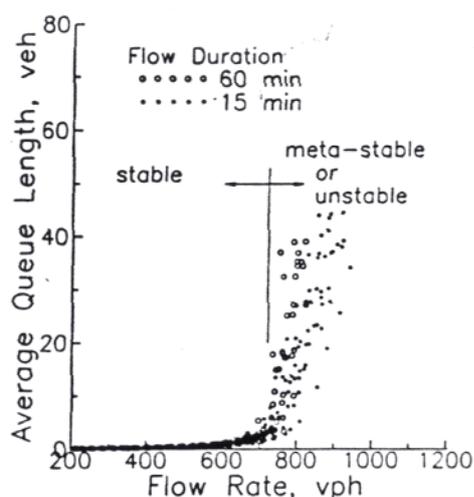


Figura 5: Variação da fila média com taxas e duração do fluxo

Fonte: Lin e Su (1994)

O que diferencia os estados meta-estável e instável são as taxas do fluxo de chegadas, da seqüência dos headways de chegada e da duração do fluxo. No estado estável, filas médias e outros indicadores de desempenho são diretamente uma função da taxa de fluxo de chegadas; não são influenciadas pela seqüência de headways e pela duração do fluxo (LIN E SU, 1994). Sob certa condição, os indicadores de desempenho estimados durante as simulações, com a mesma taxa de fluxo e diferentes durações de fluxo e

seqüência de headways de chegadas, tendem a convergirem e permanecerem estáveis. Como resultado, as taxas de fluxo ou relações de V/C podem ser usadas isoladamente para a definição de alguns indicadores de desempenho, como, por exemplo, atrasos e tamanho de filas em determinada cabine (LIN E SU, 1994).

Baseados nestas considerações, os autores buscaram uma relação matemática entre os tamanhos de fila média (L em n veículos), relação V/C e duração do fluxo de chegadas quando da operação de múltiplas cabines (com taxas de chegadas constantes), e são:

$$L \approx 0 \rightarrow \text{Se } \frac{V}{C} \leq 0,5 \quad (6)$$

$$L = 7\frac{V}{C} - 3,5 \rightarrow \text{Se } 0,5 < \frac{V}{C} \leq 0,93 \quad (7)$$

$$L = 3 \left[1 + 6,29 \left(\frac{V}{C} - 0,93 \right) \left(\frac{C}{360} - 1 \right) \right] \left[1 + \left(14\frac{V}{C} - 13 \right)^2 t \right] \rightarrow \text{Se } \frac{V}{C} > 0,93 \quad (8)$$

onde t é a duração do fluxo de tráfego, em horas.

Os autores, baseados nas respostas do simulador, e com propósito de projeto de áreas de chegadas das praças, também definiram a relação matemática entre o tamanho de fila média (L em n veículos) e o tamanho de fila máxima ($L_{m\acute{a}x}$ em n veículos):

$$L_{m\acute{a}x} = 7 + 1,7L \rightarrow L \leq 10 \quad (9)$$

e

$$L_{m\acute{a}x} = 11 + 1,3L \rightarrow L > 10 \quad (10)$$

As simulações apontaram que fila média (L em n veículos), tempo médio no sistema (T em segundos) e atrasos médios (d em segundos) são fortemente correlacionados, resultando nas seguintes equações, onde C é a capacidade de processamento da cabine, em veículos por hora:

$$d = 0,92T \quad (11)$$

$$T = \frac{1,605 + 3,250L}{C} \rightarrow \text{para } L \leq 15 \quad (12)$$

$$T = \frac{8,748 + 2,776L}{C} \rightarrow \text{para } L > 15 \quad (13)$$

$$d = \frac{2,060 + 2,980L}{C} \rightarrow \text{para } L \leq 15 \quad (14)$$

$$d = \frac{8,244 + 2,570L}{C} \rightarrow \text{para } L > 15 \quad (15)$$

Lin e Su (1994) selecionaram dois indicadores de desempenho para representar os níveis de serviço: fila média nas cabines e tempo médio no sistema.

A proposição feita pelos autores, a fim de definir escalas de níveis de serviço para praças de pedágio, está embasada na semelhança existente entre os atrasos sofridos em intersecções semaforizadas e os atrasos vivenciados nas cabines de pedágio. Os autores propõem, buscando estabelecer escalas de níveis de serviço em praças, a utilização das mesmas escalas de serviço existentes no *“Taiwan Highway Capacity Manual - 1988”* para intersecções semaforizadas.

Com relação ao tamanho de fila média, Lin e Su (1994) identificaram, através das simulações, que uma cabine opera em estado estável quando filas médias estão com até três veículos. Portanto, definiram para níveis de serviço “A”, “B” e “C” filas médias de 1, 2 e 3 veículos respectivamente. Quando filas médias excedem três veículos, o processamento de tráfego nas cabines pode se tornar, de acordo com definição prévia, em meta-estável ou instável. As filas médias entre três e seis veículos foram observadas na simulação para o estado primário de situação meta-estável, e os autores definiram esta situação como nível de serviço “D”.

Filas médias de dez veículos estão associadas, na simulação realizada pelos autores, com o estado de processamento chamado instável, e foram designadas como nível de serviço “F”. Por lógica, condições de tráfego foram classificadas como de nível de serviço “E” quando filas apresentaram entre seis e dez veículos.

Tabela 3 : Valores para definição de níveis de serviço por cabine segundo Lin e Su (1994)

Nível de Serviço	Fila média (L veículos)	Tempo médio no sistema (T s por veículo)
A	≤ 1	≤ 15
B	$1 < L \leq 2$	$15 < T \leq 30$
C	$2 < L \leq 3$	$30 < T \leq 45$
D	$3 < L \leq 6$	$45 < T \leq 60$
E	$6 < L \leq 10$	$60 < T \leq 80$
F	> 10	> 80

Fonte: Lin e Su (1994)

2.3.2.1 Análise do Estudo Apresentado por Lin e Su (1994)

Lin e Su (1994) utilizaram filas médias como indicador de desempenho na definição de níveis de serviço em praças de pedágio. Filas médias são uma característica do tráfego que motoristas podem perceber como incômodo, sendo de fácil mensuração prática em campo. O projeto geométrico de praças pode afetar e ser afetado pelo comprimento das filas. Tamanho de filas, ainda, pode ser utilizado para representar o incômodo percebido pelos usuários, já que é medida correlacionada diretamente com atrasos.

No estudo realizado por Lin e Su (1994), a escala de nível de serviço para praças de pedágio foi definida a partir da semelhança existente entre os atrasos sofridos em intersecções semaforizadas e os atrasos vivenciados nas cabines de pedágio.

Esta suposição pode não ser verdadeira, na medida em que motoristas que trafegam em rodovias possivelmente apresentam menos tolerância a atrasos do que aqueles vivenciando situações de tráfego em intersecções semaforizadas. O que ainda é ponto a ser estudado.

2.3.3 Metodologia para Níveis de Serviço em Praças de Pedágio Segundo Klodzinski e Al-Deek (2002)

O estudo de Klodzinski e Al-Deek (2002) incluiu, como evolução das pesquisas anteriores, a avaliação de cobrança eletrônica de pedágios, implantada em cabines adaptadas de praças, e sua influência nos níveis de serviço.

Uma das características mais importantes é a causa do atraso. O atraso em intersecções semaforizadas é resultado de um semáforo. Os atrasos em cabines de praças de pedágio são resultado das paradas para pagamento de tarifas, sendo influenciados por um grande número de fatores, incluindo a forma de pagamento e características humanas que podem ser únicas para cada motorista e arrecadador. Outras características que também podem influenciar os atrasos são a decisão de requisitar o recibo de pagamento e os valores das tarifas (se exatas ou não). Estas características fazem com que a natureza do atraso em praças de pedágio seja uma variável muito imprevisível, o que não ocorre nos atrasos provocados pelos semáforos (KLODZINSKI E AL-DEEK, 2002).

Klodzinski e Al-Deek (2002) simularam praças, e propuseram a utilização do atraso total sofrido por cada motorista, chamado de atraso individual acumulado, como indicador de desempenho. Os autores afirmaram que o atraso individual acumulado é menos suscetível a variações de tráfego, e captura fielmente o atraso vivenciado por motoristas, já que compreende o tempo total gasto para a travessia do trecho viário com praça de pedágio.

A fim de capturar a maior parte do atraso em todos os cenários simulados, Klodzinski e Al-Deek (2002) escolheram o percentil 85% do atraso individual acumulado, esclarecendo que este percentil pode capturar níveis de serviço tanto para períodos de pico como para períodos fora do pico de tráfego.

Buscando determinar escalas de níveis de serviço, Klodzinski e Al-Deek (2002) definiram como melhor situação aquela onde veículos não encontram filas nas cabines de atendimento. Neste caso, o atraso seria diretamente relacionado com as escolhas individuais de motoristas e com seus tempos de atendimentos nas cabines. Para tanto, Klodzinski e Al-Deek (2002) aplicaram pesquisa junto às concessionárias, com o objetivo de determinar o tempo médio de atendimento em diversas praças de pedágio. As respostas indicaram um máximo de 14 segundos para tempos médios de atendimento.

Klodzinski e Al-Deek (2002) citam Pecheux *et al.* (2000 *apud* KLODZINSKI E AL-DEEK, 2002), cujo trabalho afirma que características humanas tendem a ser razoavelmente constantes se não influenciadas por fatores externos. Baseados nesta afirmação, os autores compararam atrasos em cabines de pedágio e atrasos em intersecções semaforizadas. Propuseram, para definição de níveis de serviço em praças, a utilização do aumento percentual entre os valores que determinam os níveis de serviço em intersecções semaforizadas existente no HCM-2000.

O percentual de aumento entre níveis de serviço para intersecções semaforizadas no HCM-2000 é: entre A e B (100%); entre B e C (75%); entre C e D (57%); entre D e E (46%). Conhecendo-se o primeiro nível de serviço, obtido através de pesquisa (14 segundos), os autores obtiveram as demais escalas, como segue:

Tabela 4 : Valores para definição de níveis de serviço por cabine segundo Klodzinski e Al-Deek (2002)

Nível de Serviço	85th Percentil do atraso (segundos por veículo)
A	$T \leq 14$ (obtido em pesquisa)
B	$14 < T \leq 28$ (incremento de 100% sobre 14s)
C	$28 < T \leq 49$ (incremento de 75% sobre 28s)
D	$49 < T \leq 77$ (incremento de 57% sobre 49s)
E	$77 < T \leq 112$ (incremento de 46% sobre 77s)
F	$T > 112$

Fonte: Klodzinski e Al-Deek (2002)

2.3.3.1 Análise do Estudo Apresentado por Klodzinski e Al-Deek (2002)

O estudo realizado por Klodzinski e Al-Deek (2002) utiliza, como indicador de desempenho para aferição de níveis de serviço, os atrasos individuais vivenciados pelos veículos que cruzam o sistema de pedagiamento.

Quando analisamos a operacionalidade do tráfego em praças através de ambiente de simulação, os atrasos são obtidos com o processamento dos algoritmos do software, e o atraso individual acumulado facilmente computado. Este indicador de desempenho, apesar de capturar fielmente os atrasos provocados pelas praças, não é indicador possível de ser obtido facilmente na prática. Um indicador de desempenho aconselhável para representar o incômodo de usuários, e com fácil mensuração prática é, por exemplo, tamanho de filas.

Ainda, os autores realizam uma analogia entre atrasos sofridos em intersecções semaforizadas e atrasos sofridos em praças de pedágio, afirmando que as percepções de atraso tendem a ser constantes se não influenciadas por fatores externos. Contudo, esta afirmação pode não representar a realidade brasileira, já que fatores externos percebidos pelos usuários provavelmente são diferentes entre o meio urbano e rodoviário.

2.3.4 Considerações Finais sobre os Principais Estudos de Capacidade e Níveis de Serviço em Praças de Pedágio

Os principais estudos sobre níveis de serviço em praças de pedágio apresentaram desenvolvimentos metodológicos e indicadores de desempenho diversos, cada qual com sua particularidade. Contudo, representam tentativas de adaptação de metodologias do HCM para níveis de serviço em rodovias e intersecções semaforizadas.

Woo e Hoel (1991) buscaram correlacionar densidades e relação volume-capacidade nas áreas da praça com níveis de serviço, porém não consideraram a cobrança eletrônica de pedágios, que à época não era praticada. Apesar da densidade de tráfego ser um indicador altamente correlacionado com desconforto e inconveniência percebidos pelos usuários, ela não captura fielmente a operação de tráfego nas praças, e faixas com formas variadas de cobrança podem apresentar diferentes densidades. O incremento do uso da cobrança eletrônica possibilita altas densidades de tráfego com menores atrasos, provendo melhores níveis de serviço.

Lin e Su (1994) analisaram as situações de tráfego em praças através de indicadores de desempenho específicos para cada cabine de cobrança, como filas médias e tempo médio no sistema. Ainda, os autores definem a escala de nível de serviço para praças de pedágio a partir da semelhança existente entre os atrasos sofridos em intersecções semaforizadas e os atrasos vivenciados nas cabines de pedágio. Esta suposição pode não ser verdadeira, na medida em que motoristas que trafegam em rodovias possivelmente apresentam menos tolerância a atrasos do que aqueles vivenciando situações de tráfego em intersecções semaforizadas. A percepção de desconforto e inconveniência em praças ainda é ponto a ser estudado, e uma pesquisa direta com usuários se faz necessária.

Klodzinski e Al-Deek (2002) utilizaram, como indicador de desempenho, os atrasos individuais vivenciados pelos motoristas que cruzam o sistema de pedagiamento. Os autores realizaram simulações, e os atrasos individuais foram calculados através dos algoritmos do software. Uma metodologia de nível de serviço deve apresentar característica de fácil aplicação em campo, na qual o indicador escolhido para quantificar as escalas deve ser de fácil mensuração prática, representativo e com dados de fácil obtenção. Klodzinski e Al-Deek (2002) também estabelecem relação entre atrasos em intersecções semaforizadas do HCM-2000 e atrasos em praças, o que pode apresentar distorções de níveis de serviço.

Após apresentação e análise dos principais trabalhos que buscaram estabelecer metodologias para níveis de serviço em praças de pedágio, será apresentada revisão bibliográfica sobre indicadores de desempenho utilizados nestas infraestruturas. A revisão buscou o estado da arte sobre indicadores de desempenho, além de apresentar resultados de trabalho que levantou o estado da prática brasileira.

2.4 INDICADORES DE DESEMPENHO PARA PRAÇAS DE PEDÁGIO

Praças de pedágio devem ser analisadas, como qualquer outra infra-estrutura de transportes, quanto à qualidade de serviço oferecido aos usuários. O HCM-2000 e a bibliografia não apresentam metodologia tacitamente aceita para este fim, por este motivo estudos que buscam analisar praças divergem com relação a métodos e indicadores de desempenho utilizados. Portanto, esta secção do trabalho possui o objetivo de agregar as informações a respeito de indicadores de desempenho utilizados em estudos referenciados na bibliografia, realizando coletânea de indicadores e fornecendo subsídios para escolha de indicador a ser utilizado na metodologia de níveis de serviço proposta por este trabalho.

A cobrança de pedágios será enquadrada como um serviço prestado, abrangendo sua qualidade.

2.4.1 O Caráter do Transporte como um Serviço e sua Qualidade

Em função de sua natureza, a atividade de transportes é considerada um serviço. A produção e o consumo da atividade de transporte são coincidentes, o produto resultante da atividade não pode ser estocado e o cliente participa de sua produção (ORTÚZAR E WILLUMSEN, 1990). Da mesma forma, a atividade desenvolvida em uma praça de pedágio pode ser medida através de mecanismos utilizados para avaliar o desempenho de um serviço.

A qualidade em serviços é um assunto amplamente estudado por diversos autores. Cada autor define a qualidade em serviços de acordo com a sua experiência e ramo de atuação. Contudo, as definições de qualidade existentes na literatura apresentam princípios similares o que, algumas vezes, torna sua pesquisa repetitiva. Porém, existem alguns conceitos ligados à qualidade em serviço que são indispensáveis ao entendimento do assunto.

Uma definição conveniente para a qualidade é a proposta por Juran (1993). Segundo ele, a qualidade consiste da adequação ao uso. Em uma análise mais detalhada, considera-se que adequação ao uso se divide em duas diferentes direções: uma direção tangível, abrangendo a ausência de deficiências, a redução de falhas e de desperdícios, o aumento da

capacidade e do desempenho, e a redução de custos; e outra direção intangível, abrangendo as características que atendem os clientes, o aumento da satisfação, com percepção de um serviço bem prestado.

2.4.2 Conceito de Nível de Serviço e sua Relação com Indicadores

Uma maneira objetiva e sistêmica de acompanhamento e controle dos atributos componentes dos transportes consiste na utilização de indicadores. Segundo Rummier e Brache (1994), servem de base para: comunicar as expectativas de desempenho esperadas; identificar falhas no desempenho e; fornecer *feedback* para comparar seu desempenho a um padrão. Em outras palavras, os indicadores são índices numéricos estabelecidos sobre os efeitos de cada processo para medir o desempenho, sendo ferramentas valiosas nesse contexto (MÜLLER, 2003).

O desempenho e a qualidade de serviço mensurada por um indicador pode ser comparada com valores padrões pré-fixados ou com medições anteriores do mesmo indicador. Neste sentido surge o conceito de nível de serviço (TRB, 2003), que foi originalmente desenvolvido em 1965 no *Highway Capacity Manual*, e divide o desempenho de um indicador em 6 classes, onde cada classe é identificada por uma letra, de “A” (mais alta qualidade) a “F” (mais baixa qualidade). O nível de serviço deve medir o ponto de vista dos usuários e não do operador de transporte.

2.4.3 Indicadores de Desempenho para Praças de Pedágio Obtidos da Bibliografia

Indicadores de desempenho utilizados para análises operacionais de praças de pedágio variam muito entre os trabalhos levantados na bibliografia.

Em estudo pioneiro sobre a operação e otimização da coleta manual de pedágios, Edie (1954) utiliza, como indicador de desempenho, atrasos médios por veículo e fila máxima nas cabines como critério para avaliação do desempenho operacional de praças de pedágio.

O atraso total gerado pelas praças foi utilizado como indicador de desempenho na definição de níveis de serviço por Zarrillo (1998), Polus (1996) e Gulewicz e Danko (1995). Considera-se atraso total, neste caso, a soma dos atrasos sofridos por todos os veículos, que são obrigados a praticar velocidades inferiores, devido à presença da praça de pedágio no sistema. Burris e Hildebrand (1996) utilizaram comprimento médio de fila e tempo médio no sistema como indicadores de desempenho para avaliar o desempenho de praças. Outro possível indicador é o tempo de espera do usuário na fila para pagamento (WANISUBUT, 1989 e NIELSTEN, 1988 *apud* ZARRILLO, 1998).

O atraso médio por veículo, gerado pelas paradas nas filas, também foi utilizado como indicador de desempenho para avaliar a operação de praças por Fan e Saito (1998). Como indicado por Schaufler (1997), o tamanho das filas e os atrasos são utilizados por diversas agências de transportes norte-americanas como indicadores de desempenho na avaliação de alternativas de planejamento e projeto para praças de pedágio.

Al-Deek e Radwan (1995) sugerem um sistema para avaliação do nível de serviço nas praças, com cobrança eletrônica de pedágios, baseado em vários indicadores incluindo o tempo médio de espera por veículo e relação volume-capacidade (V/C). Assim como Woo e Hoel (1991), que sugerem que a relação volume-capacidade, agregada para todas as cabines da praça, pode ser utilizada para classificar o nível de serviço.

O indicador de desempenho comumente utilizado para determinação do nível de serviço em rodovias e interseções é a relação volume-capacidade. Lin e Su (1994) acrescentam que, para praças de pedágio, a relação volume-capacidade (V/C) é mais fácil de ser obtida em campo do que outros indicadores.

A relação volume-capacidade (V/C) foi largamente utilizada para determinação do nível de serviço nas praças. Porém, Zarrillo (2000) contesta que a relação volume-capacidade (V/C) é inadequada para avaliação de praças de pedágio, pois a capacidade é dependente de fatores humanos que influenciam no tempo de atendimento e escolha da forma de pagamento, portanto muito variável. Oliveira *et al.* (2003a) também realizaram estudo sobre a influência de fatores humanos (motoristas e arrecadadores) nos tempos de atendimento e capacidades de processamento nas cabines, chegando a conclusão de que estes fatores não devem ser desprezados em análises de capacidade em praças de pedágio.

Em estudo mais recente, Klodzinski e Al-Deek (2002) propõem uma avaliação do nível de serviço baseado na formação de grupos de veículos que sofreram o mesmo atraso

individual acumulado (em segundos). De acordo com o estudo, o percentil de 85% do atraso experimentado pelo total de veículos que atravessam a praça pode ser tomado como indicador de desempenho na determinação do nível de serviço global da praça em estudo.

Em trabalho desenvolvido por Horn (2003), são utilizados indicadores de desempenho genéricos para praças de pedágio, correspondentes, em sua maioria, a indicadores provenientes do micro-simulador de tráfego, já que praças são simuladas em conjunto com rodovias e entornos. Para praças, os indicadores de desempenho escolhidos são apresentados por cabine de atendimento.

A Tabela 5 apresenta um resumo, e os respectivos níveis de agregação, para indicadores de desempenho encontrados na literatura quando da avaliação de praças de pedágio.

Tabela 5 : Indicadores de desempenho para praças de pedágio encontrados na literatura

Estudos	Indicadores de Desempenho	Nível de Agregação
Edie (1954)	Atraso Médio; e Fila Máxima	Individual por veículo; e por cabine da praça
Wanisubut (1989) e Nielsten (1988) <i>apud</i> Zarrillo (1998);	Tempo de Espera na Fila	Individual por veículo
Woo e Hoel (1991)	Relação Volume–Capacidade (V/C)	Agregado para toda a praça
Burris e Hildebrand (1996) e Lin e Su (1994)	Comprimento Médio de Fila; e Tempo Médio no Sistema	Por cabine; e Individual por veículo
Gulewicz e Danko (1995)	Comprimento de Fila; e Tempo de Espera Médio	Individual por cabine
Al-Deek e Radwan (1995)	Tempo Médio de Espera na Fila; e Relação Volume-Capacidade (V/C)	Individual por veículo; e (V/C) agregado para toda a praça
Morin <i>et al.</i> (1996)	Comprimento de Filas; e Tempos de Espera	Por cabine; e para cada forma de coleta de pedágio (incluindo <i>mix</i> de formas)
Polus (1996)	Atraso Total	Agregado para toda a praça
Zarrillo (1998)	Atrasos; Tamanho de Fila Máxima	Agregado para toda a praça ou por cabine; e por cabine.
Fan e Saito (1998)	Atraso Médio de Parada nas Filas	Individual por veículo
Van Dijk <i>et al.</i> (1999)	Tempos de Espera; Tamanho de Fila Máxima; e Nível de Utilização das Cabines	Agregado para toda a praça; separado por intervalos; por cabine - (%) de utilização das cabines
Astarita <i>et al.</i> (2001)	Capacidade de Processamento da praça; Atraso Médio; e Nível de Utilização das Cabines	Agregado para toda a praça; atraso médio de cada veículo; por cabine - (%) de utilização das cabines
Klodzinski e Al-Deek (2002)	Atraso Individual Acumulado	Individual por veículo
Horn (2003)	Velocidades, Volume, atraso, Filas, Número de troca de Pistas, Consumo de Combustível e Emissão de Poluentes	Individual por cabine para cada praça de pedágio simulada

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

2.4.4 Considerações sobre os Indicadores de Desempenho obtidos na Literatura

Dentre os trabalhos levantados na bibliografia, nota-se que a relação volume-capacidade (V/C) foi medida utilizada na verificação do funcionamento de praças em trabalhos mais antigos, revelando a tentativa de adaptação de métodos já existentes no HCM para análises de praças de pedágio.

O indicador de desempenho mais freqüentemente encontrado nos trabalhos levantados foi o tempo de espera na fila, aparecendo em cinco trabalhos.

Atraso médio por veículo, fila máxima observada e comprimento médio de fila foram indicadores também encontrados com freqüência, sendo sugeridos em três dos dezesseis trabalhos levantados.

Indicadores de desempenho que apresentaram duas observações cada são: (i) atrasos totais; (ii) nível de utilização das cabines e (iii) a relação volume-capacidade. E, por último, com uma observação cada, estão os indicadores: (i) tempo médio no sistema e (ii) atraso individual acumulado; destacando-se que autores podem apresentar, em um mesmo trabalho, vários indicadores de desempenho.

Existem algumas considerações quando tratamos de indicadores de desempenho relacionados a atrasos. Em praças de pedágio existem três principais atrasos: (i) aqueles que são sofridos pelos veículos devido às filas nas cabines, (ii) aqueles que são resultados da diferença de velocidades devido à presença da praça de pedágio no sistema, ou seja, diferença entre o tempo gasto para percorrer a mesma seção de rodovia com e sem a praça de pedágio, e (iii) atrasos vivenciados pelos veículos quando executando o pagamento de tarifas. Atrasos totais ou acumulados seriam aqueles atrasos onde estão somados todos os atrasos vivenciados pelos veículos no sistema de pedagiamento, com desacelerações, espera na fila, tempo para atendimento e reaceleração para retomada de velocidade.

No próximo item será apresentado levantamento sobre indicadores de desempenho utilizados nas praças de pedágio brasileiras, e por fim realizadas observações a respeito de indicadores de desempenho mais representativos em relação ao desconforto e inconveniência percebidos pelos usuários que trafegam em sistemas de praças de pedágio.

2.4.5 Indicadores de Desempenho Utilizados nas Praças de Pedágio Brasileiras

Um levantamento sobre indicadores de desempenho utilizados nas praças de pedágio brasileiras foi realizado por Oliveira e Cybis (2006). Os autores executaram pesquisa junto aos gerentes operacionais de concessionárias de rodovias do Brasil. Durante a pesquisa foi aplicado questionário com objetivo de coletar informações sobre indicadores de desempenho e parâmetros operacionais mínimos aceitáveis quando da operação de praças de pedágio no Brasil. As respostas obtidas englobaram um terço do total de concessionárias pesquisadas. As concessionárias que responderam ao questionário são responsáveis por 2.667 quilômetros de rodovias concedidas, 46 praças de pedágio em 5 estados e os maiores VDMs observados em trechos sob concessão (OLIVEIRA E CYBIS, 2006).

De acordo com os autores, os indicadores de desempenho mais verificados em contratos daquelas concessões pesquisadas foram o “tempo máximo de espera na fila” e o “tempo de atendimento de veículos”, com seis observações cada. Estes indicadores pertencem a contratos de concessão nos estados do Espírito Santo, Rio Grande do Sul e São Paulo. O indicador de desempenho “tempos de atendimento de veículos” apresentou uma de suas observações para o Estado do Paraná.

A bibliografia apresenta o “tempo máximo de espera na fila” como sendo o indicador de desempenho mais utilizado dentre os trabalhos levantados sobre praças de pedágio. O “tempo de atendimento de veículos” nas cabines não foi observado na literatura.

O “tamanho de fila máxima nas cabines” apresentou quatro observações na pesquisa, de acordo com Oliveira e Cybis (2006), e pertence aos contratos das concessões federais pesquisadas e das concessões rodoviárias do Estado do Paraná. O “tempo médio de espera na fila” pertence a um contrato do Estado de São Paulo.

Oliveira e Cybis (2006) também levantaram informação a respeito de utilização de indicadores de desempenho diferentes daqueles previstos nos contratos, e as respostas foram muito variadas, ficando suas confiabilidades limitadas. Porém, de acordo com os autores, dois índices mereceram destaque: (i) número de reclamações, utilizada em rodovia de São Paulo e (ii) nível de utilização das cabines, em concessão no Paraná. O número de reclamações, apesar de não ser um indicador de desempenho para praças de pedágio, pode fornecer indicativos sobre o processamento do fluxo de tráfego nas praças quando motoristas vivenciam altos atrasos com filas longas. Já o nível de utilização das cabines pode

ser utilizado como indicador de desempenho na formação de estratégias operacionais de aberturas de cabines. Cabines em extremidades opostas da praça podem apresentar diferentes taxas de ocupação e utilização, o que pode ser ocasionado muitas vezes por preferências de motoristas na escolha da cabine para pagamento ou influencia do layout da praça, quando filas em cabines tornam-se longas o suficiente para bloquear o acesso de veículos em cabines adjacentes (fenômeno de *SpillBack* reportado por ASTARITA *et al.*, 2001).

Oliveira e Cybis (2006) obtiveram dos entrevistados informações a respeito de tempos máximos de atendimento para automóveis e caminhões. A extração destas informações buscou avaliar a percepção dos entrevistados quanto à influência da categoria do veículo nos tempos de atendimento, além de revelar tendências para a adoção de medidas operacionais ligadas à melhorias nos processos de cobrança nas praças. Os autores forneceram diversas alternativas de tempos máximos de atendimento para automóveis e caminhões, todas as alternativas foram consideradas como sendo realizadas com cobrança manual e necessidade de troco. Como resultado, todos os entrevistados declararam que tempos máximos admissíveis para que caminhões executem o processo de pagamento são maiores do que tempos máximos admissíveis de automóveis.

Esta identificação, a princípio trivial, na realidade representa percepção importante para pessoas ligadas à operacionalidade das praças, na medida em que, por exemplo, pode embasar decisões sobre aberturas de cabines exclusivas para atendimento de veículos pesados quando estes representarem grande parcela do fluxo.

Tabela 6 : Valores de tempos médios de atendimento encontrados na literatura nacional

	Automóveis	Caminhões
Araújo (2001)	18,92 s	30,79 s
Oliveira (2004)	26,25 s	31,92 s

Fonte: Oliveira e Cybis (2006)

Os valores declarados pelos entrevistados para tempos máximos admissíveis de automóveis variaram entre 10 e 30 segundos, com média de 18 segundos. Valores declarados para caminhões variaram de 15 a 60 segundos, e média de 36 segundos (OLIVEIRA E CYBIS, 2006). Comparando-se estes valores médios com aqueles observados na literatura nacional, apresentados na Tabela 6, identifica-se que existem diferenças, mas possuem consistência e podem ser tomados como bons indicativos para tempos médios de atendimento em cabines de praças de pedágio brasileiras.

2.4.6 Considerações Finais sobre Indicadores de Desempenho para Praças de Pedágio

A revisão bibliográfica e a análise da prática brasileira forneceram um número considerável de indicadores que podem ser utilizados na avaliação operacional de praças de pedágio, e a Tabela 7 apresenta um resumo de todos os indicadores verificados.

Indicadores de desempenho relativos às medidas obtidas em filas, como por exemplo, “tamanho de fila nas cabines” e “tempo máximo de espera na fila”, possuem relação direta com o desconforto experimentado pelos usuários quando do ato de pagamento das tarifas, representado forte apelo sensitivo. Ainda, apresentam características de fácil mensuração prática pelos operadores, e rápidas resposta a situações operacionais adversas, reforçando a necessidade de incorporação de indicadores deste tipo no desenvolvimento de metodologia para avaliação do nível de serviço em praças.

Tabela 7 : Indicadores levantados na revisão bibliográfica

Grupo	Indicador de desempenho
Atrasos	atraso médio por veículo atraso total por praça atraso individual acumulado 85%
Tamanhos de Fila	tamanho de fila média nas cabines tamanho de fila máxima nas cabines
Atendimento	tempo de atendimento de veículos
Tempos de espera em fila	tempo de espera na fila por veículo tempo de espera na fila por cabine tempo máximo de espera na fila por veículo tempo de espera por forma de pagamento
Outros	tempo médio no sistema por veículo relação (V/C) nível de utilização das cabines número de reclamações

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

Neste sentido, indicadores para praças de pedágio podem ser classificados como (i) indicadores operacionais da operadora e (ii) indicadores de níveis de serviço. Indicadores operacionais buscam analisar a operação das praças e fornecer subsídios para uma operação eficiente, atendendo à restrições contratuais, diminuindo custos (eficiência de mão-de-obra) e satisfazendo aos usuários, como exemplo deste tipo de indicador pode-se citar “nível de utilização das cabines”. Indicadores de níveis de serviço possuem o objetivo de definir

referências de comparação na forma de escalas, que representem as opiniões dos usuários, seu desconforto e inconveniência percebidos quando enfrentam determinadas situações de tráfego, como “atrasos” e “tamanho de filas”.

A intensidade do fluxo, traduzida em termos de “tamanho de filas”, foi utilizada como indicador na pesquisa junto aos usuários de praças, que buscou levantar as percepções de usuários sobre a qualidade do tráfego em praças de pedágio, de forma a definir escala de níveis de serviço para estas infraestruturas.

Apresentados os tópicos do referencial teórico, passa-se ao próximo capítulo, onde será descrito o método para realização do estudo.

3. MÉTODO UTILIZADO

Este capítulo apresenta as etapas metodológicas para o desenvolvimento do presente trabalho. Em cada etapa serão descritos, de forma objetiva, os procedimentos executados, seus objetivos, insumos e produtos. A Figura 6 apresenta o fluxograma com as relações entre as etapas do trabalho.

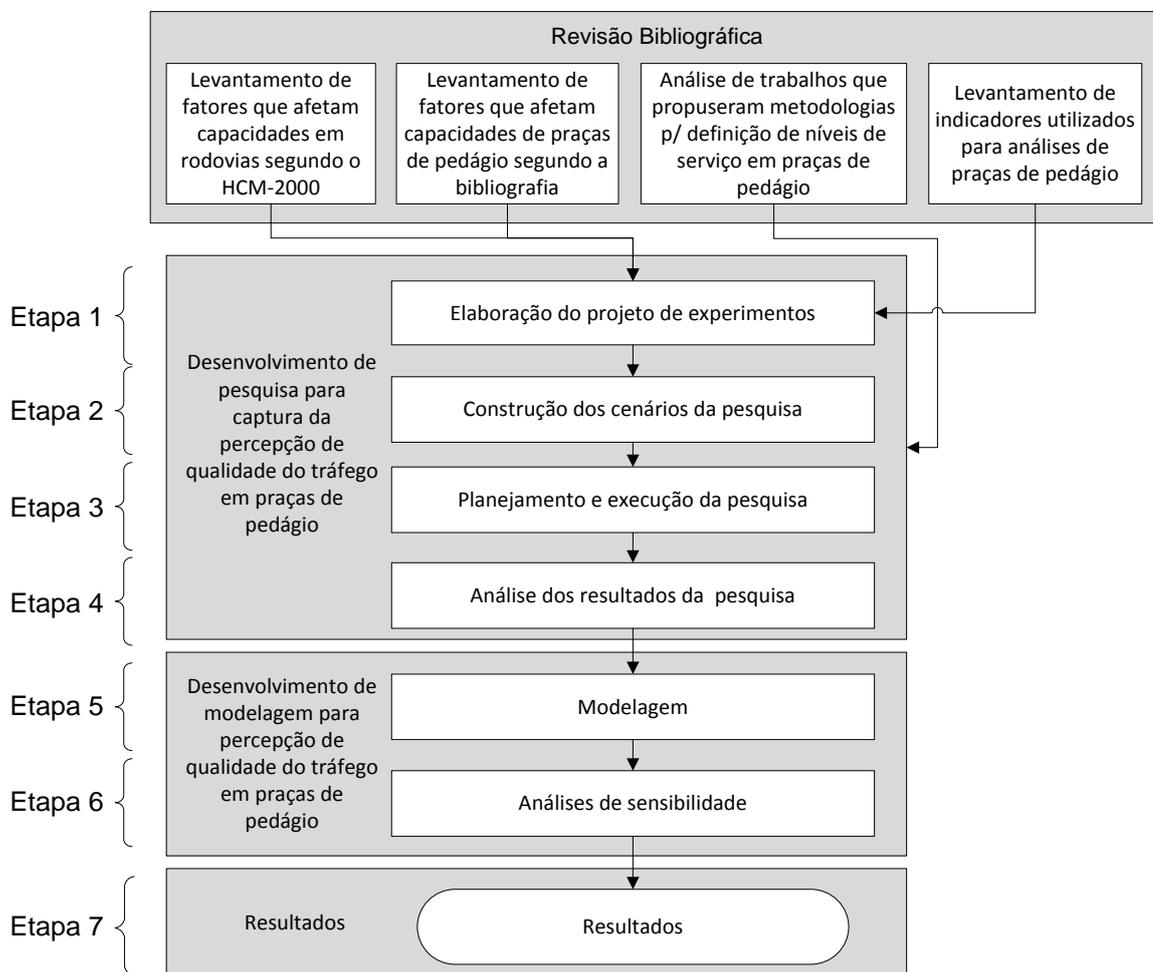


Figura 6: Fluxograma com as etapas do método do trabalho

Fonte: figura elaborada pelo autor (2009)

O método proposto para a realização deste estudo inclui pesquisa direta com usuários de praças de pedágio e a modelagem da percepção de qualidade dos usuários obtida

com a pesquisa. Este método apresenta uma abordagem inédita para obtenção de níveis de serviço em praças de pedágio.

3.1 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS METODOLÓGICAS

O trabalho foi dividido em (i) revisão bibliográfica, (ii) pesquisa para a captura da percepção de qualidade do tráfego em praças de pedágio, (iii) modelagem das percepções de qualidade do tráfego e (iv) resultados. A pesquisa foi realizada entre as etapas 1 a 4. A modelagem foi executada nas etapas 5 e 6. A etapa 7 contempla a análise dos resultados.

3.1.1 A Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica possuiu três objetivos distintos. O primeiro objetivo foi levantar fatores que afetam as capacidades viárias em rodovias e praças de pedágio. O levantamento destes fatores contribuiu para a elaboração do projeto de experimentos.

O segundo objetivo da revisão bibliográfica foi analisar trabalhos que propuseram metodologias para a definição de níveis de serviço em praças de pedágio. A análise destes trabalhos identificou analogias com metodologias para avaliação de níveis de serviço em rodovias e intersecções semaforizadas.

O terceiro objetivo da revisão bibliográfica foi levantar o estado da arte e da prática sobre indicadores de desempenho para praças de pedágio. Este levantamento subsidiou a definição de indicadores no método proposto.

3.1.2 Etapa 1 – Elaboração do Projeto de Experimentos

A etapa 1 corresponde à elaboração do projeto de experimentos, cujo objetivo foi pesquisar a percepção de usuários sobre a qualidade do tráfego em praças de pedágio.

Projetos de experimentos são compostos por fatores de experimento controláveis, que assumem determinado número de níveis e valores estabelecidos pelo pesquisador, a fim de captar influências destes fatores sobre a variável de resposta.

Neste sentido, a primeira fase desta etapa corresponde à seleção dos fatores intervenientes na percepção de qualidade do tráfego a serem controlados e pesquisados no experimento. Os fatores selecionados foram (i) número de veículos em fila nas cabines, (ii) fração de veículos pesados no fluxo e (iii) número de cabines na praça de pedágio.

A segunda fase da etapa 1 consistiu da definição dos níveis de pesquisa assumidos pelos fatores controlados. O resultado foi a formação de conjuntos de características de tráfego e praça que foram utilizados na elaboração dos cenários para a pesquisa.

3.1.3 Etapa 2 – Construção dos Cenários da Pesquisa

A etapa de construção dos cenários utilizados na pesquisa foi desenvolvida através da captura de imagens provenientes da simulação de praças de pedágio. Os cenários possuíam características de tráfego e praças definidas no projeto de experimentos da etapa anterior. O processo de calibração da micro-simulação buscou compatibilizar (i) tempos de atendimento nas cabines, (ii) tempos de percurso nas entradas das praças (acelerações, desacelerações e velocidades desejadas nas chegadas das cabines) e (iii) espaçamento entre veículos em fila.

Para a visualização dos cenários foi utilizado módulo adicional do micro-simulador, que possibilita visualização de veículos e redes de tráfego em terceira dimensão. Portanto, os cenários foram obtidos na forma de vídeos.

3.1.4 Etapa 3 – Planejamento e Execução da Pesquisa

O planejamento da pesquisa teve o objetivo de definir a amostra de usuários pesquisada e a representatividade desta amostra segundo alguns critérios considerados importantes. Também foi objetivo da etapa de planejamento elaborar questionário utilizado durante as pesquisas.

As pesquisas foram executadas através da apresentação de vídeos contendo imagens dos cenários. Para cada grupo de usuários pesquisados, foram apresentados cenários com as melhores e piores situações de tráfego do estudo. Desta forma, procurou-se fornecer aos entrevistados parâmetros de julgamento.

Os entrevistados indicaram em questionário quais suas percepções de conforto se estivessem trafegando nas situações de tráfego apresentadas. Os julgamentos de qualidade do tráfego foram realizados para cada cenário individualmente, e tiveram notas variando entre 1 e 7 pontos.

3.1.5 Etapa 4 – Análise dos Resultados da Pesquisa

O objetivo desta etapa foi realizar análise de consistência das respostas obtidas com as entrevistas, verificando a influência dos fatores pesquisados sobre a percepção da qualidade do tráfego em praças, como por exemplo, uma percepção de desconforto proporcional ao tamanho das filas nas cabines de pedágio.

Esta etapa também objetivou enquadrar as notas de julgamento dos cenários em escala de níveis de serviço proposta, verificando os limites estabelecidos para esta escala.

3.1.6 Etapa 5 – Modelagem

A etapa de modelagem objetivou obter equação que correlacione os julgamentos dos cenários (percepção de qualidade de tráfego) com os níveis estabelecidos para os fatores controlados na pesquisa.

A modelagem foi realizada através de regressão, e as variáveis explicativas foram os fatores controlados nos cenários, tendo como variável dependente a nota de qualidade do tráfego dos cenários.

3.1.7 Etapa 6 – Análises de Sensibilidade

A análise de sensibilidade do modelo para percepção de qualidade de tráfego em praças possuiu dois objetivos. O primeiro objetivo foi avaliar o comportamento do modelo frente a variações das variáveis explicativas, identificando se a modelagem satisfaz limites de contorno para notas dos cenários. O segundo objetivo da análise de sensibilidade foi avaliar a importância relativa das parcelas do modelo. A identificação da importância relativa das parcelas do modelo contribuiu para o entendimento da influência isolada das variáveis explicativas sobre a percepção de qualidade do tráfego.

3.1.8 Etapa 7 - Resultados

A etapa correspondente a apresentação dos resultados foi dividida em duas fases.

A primeira fase apresenta a uma proposta de equivalência veicular para veículos pesados em situação de fila nas cabines de pedágio. A equivalência veicular é necessária na medida em que comprimentos de filas são dependentes da composição de fluxo de tráfego.

A segunda fase da apresentação dos resultados realizou uma análise dos níveis de serviço propostos por este estudo. A análise foi apresentada através de um conjunto de tabelas que relacionam a percepção de qualidade do tráfego, obtidas do modelo de regressão, e os indicadores (i) comprimento de filas equivalentes (em metros) e (ii) filas equivalentes (em veículos de passeio equivalentes), resultados da equivalência veicular proposta. Diferentes tabelas foram elaboradas baseadas em diferentes composições de fluxo de tráfego e seus respectivos comprimentos de filas equivalentes resultantes.

4. PESQUISA SOBRE A PERCEPÇÃO DE QUALIDADE DO TRÁFEGO EM PRAÇAS

Este capítulo apresenta a pesquisa realizada com usuários de praças de pedágio. O objetivo da pesquisa é identificar a percepção de desconforto e inconveniência de usuários em diferentes situações de tráfego, definindo escala de níveis de serviço para praças.

A pesquisa foi planejada através de um projeto de experimentos, e cenários foram elaborados por meio de micro-simulação, onde fatores intervenientes na percepção da qualidade do tráfego foram controlados. Os níveis para os fatores controlados nos cenários representaram as variáveis de entrada da pesquisa. A variável de resposta do experimento foi a “nota do cenário”, que variou entre 1 e 7, e representa o conforto percebido pelos usuários entrevistados relativo as situações de tráfego apresentadas.

As pesquisas foram realizadas através da apresentação de imagens em vídeo para uma amostra da população de usuários de praças de pedágio.

A seguir será apresentado o projeto de experimentos, a seleção dos fatores intervenientes na qualidade do tráfego utilizados na pesquisa, a elaboração dos cenários e o planejamento e execução da pesquisa. Ao fim do capítulo serão tecidas considerações a respeito dos resultados da pesquisa e da consistência das respostas.

4.1 PROJETO DE EXPERIMENTO

Um experimento pode ser definido como um teste ou uma série de testes, onde são feitas mudanças propositais nos dados de entrada de um processo ou cenário, de modo que seja possível observar e identificar o efeito dessas mudanças sobre os dados de saída. O Projeto de Experimentos, por sua vez, diz respeito ao planejamento e condução do experimento, além da análise dos dados de saída, para que conclusões válidas e objetivas possam ser obtidas desse experimento (MONTGOMERY, 1997).

O planejamento refere-se ao projeto propriamente dito do experimento, sendo que, quando bem realizado, possibilita acesso a maiores informações a respeito dos fatores

estudados do que o erro experimental associado. A análise ou avaliação diz respeito ao levantamento da significância do efeito de um ou vários fatores sobre uma variável aleatória, que mede ou caracteriza a resposta do experimento (TEN CATEN, 1995).

O ítem a seguir apresenta os fatores selecionados para a elaboração do experimento, além da condução da pesquisa.

4.1.1 Seleção dos Fatores Intervenientes na Percepção da Qualidade do Tráfego em Praças de Pedágio

A seleção dos fatores intervenientes na percepção da qualidade do tráfego em praças de pedágio possuiu o objetivo de definir os fatores controláveis para o experimento. Desta forma, foram levantadas na revisão bibliográfica, diversas características de tráfego e infraestrutura que podem interferir na percepção de qualidade do tráfego em rodovias e praças de pedágio. Como a pesquisa é processo onde tempo e recursos são limitados, foram selecionados alguns fatores que mais poderiam influenciar a percepção de qualidade de tráfego em praças.

O primeiro fator selecionado foi a quantidade de caminhões no fluxo de tráfego, e foi escolhido por ser tradicionalmente incluído em metodologias de análise de capacidade, como o *Highway Capacity Manual*, por exemplo. Este fator pode influenciar diretamente o conforto percebido pelos usuários devido às características operacionais de caminhões refletidas nos deslocamentos destes veículos no fluxo de tráfego. Caminhões também contribuem para a formação de filas mais longas nas cabines, resultado dos comprimentos equivalentes maiores de veículos pesados.

O segundo fator incluído na pesquisa de qualidade do tráfego foi o número de veículos em fila nas cabines de atendimento. O número de veículos em fila é variável resultante da relação entre a demanda e a capacidade de processamento das cabines. A demanda de tráfego foi identificada pela bibliografia como um dos fatores mais influentes no processamento dos veículos (OLIVEIRA *et al.*, 2003a). O tamanho de filas nas cabines é diretamente proporcional aos tempos de espera em fila e aos atrasos vivenciados pelos usuários, conseqüentemente ao desconforto percebido.

O terceiro fator selecionado, relacionado à infra-estrutura das praças de pedágio, foi o número de cabines. A quantidade de cabines nas praças possui relação direta com a área disponível para manobras de veículos na chegada das praças. Este fator, traduzido em termos de área para manobras, pode ser parâmetro influente na percepção da qualidade do tráfego em praças de pedágio.

A Tabela 8 apresenta os três fatores selecionados para a elaboração do experimento e composição dos cenários para a pesquisa.

Tabela 8 : Apresentação dos fatores controláveis para o projeto de experimentos

Fator	Unidade	Abreviatura
Proporção de caminhões no fluxo de tráfego	%	CAM
Número de veículos em fila nas cabines	n veículos	FILA
Número de cabines nas praças	n cabines	CAB

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

4.1.2 Definição do Projeto de Experimentos para a Pesquisa

Após apresentados os fatores controlados da pesquisa, passa-se à descrição do experimento realizado. O experimento resultou em conjuntos de parâmetros de tráfego e infra-estrutura utilizados na montagem dos cenários da pesquisa.

A dimensão da pesquisa foi definida através de um projeto fatorial cruzado completo, onde o fator “número de veículos em fila” assumiu seis níveis, a “quantidade de caminhões no fluxo de tráfego” assumiu três níveis e o “número de cabines” assumiu dois níveis. Portanto, o projeto fatorial cruzado foi composto por 36 cenários de pesquisa. A Tabela 9 apresenta os fatores com seus respectivos níveis adotados.

Tabela 9 : Fatores e seus níveis para o experimento

Fatores	Níveis adotados no experimento					
	N1	N2	N3	N4	N5	N6
Filas nas cabines – FILA (n veículos quaisquer)	0,5	1	2	4	8	16
Fração de Caminhões no Fluxo – CAM (%)	0	15	30	----	----	----
Número de Cabines na Praça – CAB (n cabines)	3	10	----	----	----	----

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

O fator FILA teve seu nível inicial definido como 0,5 veículos, em média, em fila nas cabines. Este nível representa a probabilidade de 50% para que um veículo encontre uma cabine vazia para atendimento imediato, ou a probabilidade de 50% para que encontre pelo menos um veículo em fila.

A partir do nível inicial para FILA, os demais níveis foram definidos através de uma progressão geométrica de grau 2, e estão apresentados na Tabela 9. A progressão geométrica de grau 2 pode garantir diferença estatisticamente significativa para percepção de qualidade de tráfego entre os níveis adotados para o fator FILA. Filas de 16 veículos, em média, podem apresentar comprimentos de até 211 metros (tabela com dados sobre cenários gerados será apresentada posteriormente), e foram definidas como o número máximo de veículos em fila nesta pesquisa.

A variável que representa a quantidade de caminhões no fluxo de tráfego teve seus níveis definidos após análise de um banco de dados fornecido por uma concessionária. O banco de dados possui medições horárias de passagens de veículos, separadas por cabine, em 14 praças de pedágios. A amostra contém dados de 2.490 horas. A Figura 7 apresenta a distribuição da fração de caminhões de acordo com o fluxo horário.

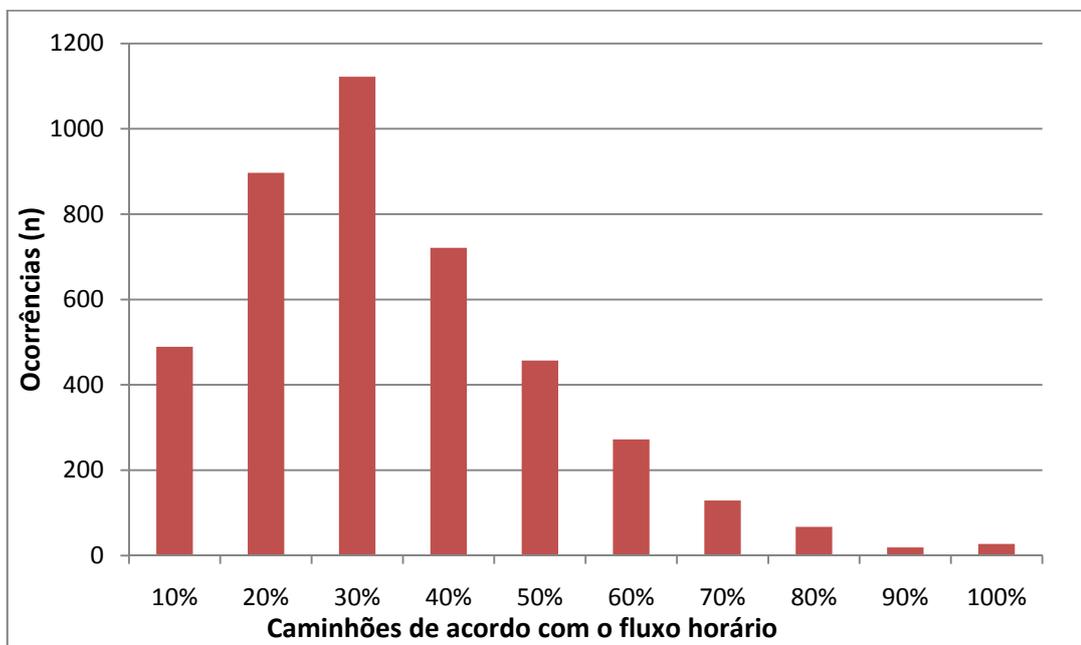


Figura 7: Fração de caminhões no fluxo de tráfego

Fonte: figura elaborada pelo autor (2009)

A partir das observações de quantidades de caminhões nos fluxos horários de tráfego, a fração de 30% de caminhões foi definida como nível máximo estudado na pesquisa.

Embora a quantidade de caminhões no fluxo de tráfego possa ser observada em índices superiores ao de 30%, estas ocorrências foram identificadas para baixas intensidades de tráfego nas cabines de pedágio. Para baixas intensidades de tráfego, o impacto de veículos pesados sobre a percepção de qualidade do tráfego é menor se comparada a tráfegos mais intensos. Desta forma, adotou-se, como pressuposto, que a presença de 30% de veículos pesados no fluxo representaria um nível de desconforto máximo para usuários de praças.

O nível mais baixo para parcela de caminhões foi definido como 0% correspondente à ausência destes no fluxo. O nível intermediário foi definido como 15%. A extratificação de variáveis em três ou mais níveis de pesquisa pode garantir que sejam analisados efeitos de segunda ordem das variáveis pesquisadas, se existirem tais efeitos.

A área na chegada das praças, representada aqui pela inclusão da variável número de cabines - CAB, procura capturar o desconforto percebido devido à ocupação das áreas de chegada das praças.

O número de cabines abertas para atendimento de veículos é definido por rotina implementada por cada concessionária, e pode variar muito entre concessionárias. Desta forma, nos cenários elaborados, todas as cabines estavam disponíveis e abertas ao tráfego.

Foram levantadas informações a respeito do número de cabines disponíveis em algumas praças de pedágio no Brasil, e foi assumido que praça com 3 cabines provê uma boa representação de praça pequena e 10 cabines para praças grandes.

A pesquisa da variável CAB pode contribuir para explicar parte da percepção da qualidade do tráfego nestas infraestruturas.

O projeto fatorial cruzado completo, resultado das interações dos níveis dos fatores, é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 : Projeto fatorial cruzado completo

		Fluxo1	Fluxo2	Fluxo3	Fluxo4	Fluxo5	Fluxo6
		Filas médias nas cabines (n veículos)					
		0,5	1	2	4	8	16
Praça Pequena (3 cabines)	Sem Caminhões (0%)	PPSCF1	PPSCF2	PPSCF3	PPSCF4	PPSCF5	PPSCF6
Praça Pequena (3 cabines)	Médios Caminhões (15%)	PPCMF1	PPCMF2	PPCMF3	PPCMF4	PPCMF5	PPCMF6
Praça Pequena (3 cabines)	Muitos Caminhões (30%)	PPMCF1	PPMCF2	PPMCF3	PPMCF4	PPMCF5	PPMCF6
Praça Grande (10 cabines)	Sem Caminhões (0%)	PGSCF1	PGSCF2	PGSCF3	PGSCF4	PGSCF5	PGSCF6
Praça Grande (10 cabines)	Médios Caminhões (15%)	PGCMF1	PGCMF2	PGCMF3	PGCMF4	PGCMF5	PGCMF6
Praça Grande (10 cabines)	Muitos Caminhões (30%)	PGMCF1	PGMCF2	PGMCF3	PGMCF4	PGMCF5	PGMCF6

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

Para fins de controle e facilitação na elaboração dos cenários da pesquisa, foi criada nomenclatura de forma a transparecer ao pesquisador qual situação específica um determinado cenário busca representar. Desta maneira, praças com 3 cabines foram chamadas de “praças pequenas-PP”, analogamente “praças grandes-PG” possuem 10 cabines. Fluxos com 30%, 15% e 0% de veículos pesados foram chamados de fluxos com “muitos caminhões-MC”, “médios caminhões-CM” e “sem caminhões-SC” respectivamente.

O tamanho das filas nas cabines variou desde 0,5 veículos, em média, nas filas para pagamento (Fluxo1) até 16 veículos, em média, nas filas (Fluxo6). Para o cômputo do número de veículos em fila, veículos de todas as categorias foram considerados como uma unidade para a formação das filas.

Desta forma, por exemplo, um cenário que buscou representar praça com 10 cabines, fluxos compostos por 30% de caminhões e filas de 16 veículos, em média, recebeu a nomenclatura de PGMCF6. Definidas as características de tráfego e praça para os cenários da pesquisa, será apresentado o processo de construção e captura dos cenários através de micro-simulação de tráfego.

4.2 ELABORAÇÃO DOS CENÁRIOS PARA A PESQUISA

A percepção de desconforto e inconveniência varia muito entre indivíduos e depende de fatores comportamentais, motivos de viagens, situações anteriores de tráfego vivenciadas, fatores externos ambientais, etc. Portanto, uma pesquisa que obtenha a percepção dos agentes envolvidos (usuários) se faz necessária.

De acordo com a bibliografia (OPPENHEIM, 1966 e OAKLANDER, 1980 *apud* FARIA, 2002), as técnicas usualmente empregadas para pesquisar a percepção de indivíduos são: (i) entrevistas, (ii) questionários ou (iii) imagens.

A entrevista é uma conversa entre duas pessoas, com objetivo específico de recolher informação através do interrogatório para a pesquisa. É utilizada como instrumento quando há a necessidade de obtenção de dados que não estão disponíveis através de registros e fontes documentárias, e que podem ser fornecidos pelo entrevistado.

Os questionários são instrumentos de pesquisa que contém um conjunto de questões, todas logicamente relacionadas a um ou mais problemas centrais. Os questionários e as entrevistas foram criados para auxiliar pesquisadores na obtenção de informações sobre percepções, sentimentos, crenças, motivações, previsões ou planos de determinados grupos de pessoas, já que estas não podem ser claramente adquiridas através da observação.

As imagens são a forma simbólica de representação de um estado ou situação, onde as características de qualidade estão intrínsecas. Estudos envolvendo imagens possuem o objetivo de capturar as características percebidas pelos indivíduos de acordo com os limites individuais de percepção. A pesquisa de percepção envolvendo imagens geralmente é realizada através da aplicação de múltiplas imagens com diferentes características, e o respondente necessita identificar situações ou características que lhe são aceitáveis ou peculiares.

A praticidade e agilidade dos meios eletrônicos de micro-simulação colaboram para a geração de cenários, cujas obtenções em campo seriam extremamente trabalhosas, visto que nem sempre seriam encontradas situações tidas como ideais para pesquisa.

Portanto, o levantamento da percepção dos usuários foi realizado através da apresentação de vídeos contendo os cenários da pesquisa. A seguir será apresentado o processo de elaboração e obtenção dos cenários.

4.2.1 Elaboração dos Cenários Através de Micro-simulação de Tráfego

Para a elaboração dos cenários da pesquisa foi utilizado o software de micro-simulação VISSIM versão 4.30-05 (PTV, 2006). Foram criadas duas redes de tráfego,

buscando representar praças pequenas (3 cabines) e praças grandes (10 cabines). Em cada rede foram configuradas três composições de tráfego, representando diferentes frações de caminhões no fluxo. Os algoritmos do software VISSIM estão descritos no anexo 1.

A seguir será apresentado o processo de calibração executada e a forma de captura e seleção das imagens.

4.2.2 Dados Utilizados e Parâmetros Alterados na Calibração dos Modelos

As duas redes de tráfego utilizadas para a geração dos cenários (praças de 3 e 10 cabines) tiveram dados e parâmetros identicamente calibrados. A calibração executada foi agregada, de maneira que os cenários gerados pudessem reproduzir de forma visualmente aceitável as situações de tráfego desejadas. A calibração agregada buscou ajustar parâmetros de desacelerações, velocidades desejadas, tempos de atendimento nas cabines e espaçamento entre veículos nas filas. O tráfego nas modelagens foi dividido em três classes: (i) veículos leves de passeio, (ii) caminhões leves e (iii) caminhões pesados.

As informações para a calibração foram extraídas da bibliografia e de um banco de dados fornecido por uma concessionária.

As informações sobre acelerações, desacelerações e tempos de percurso em praças de pedágio foram retiradas de trabalho desenvolvido por Araújo (2001), que realizou análises operacionais em praças de pedágio no estado de São Paulo. Informações sobre características de frota brasileira foram extraídas do Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (DNIT, 2006).

O banco de dados fornecido por uma concessionária do estado do Rio Grande do Sul possui tempos de atendimento, obtidos em pesquisa de campo, realizada em outubro de 2004, junto a 14 praças de pedágio. A pesquisa em campo resultou na observação de 57.580 veículos. Para cada veículo foram coletados tempo de atendimento nas cabines, além da forma de pagamento praticada e categoria de veículo.

Os valores de desacelerações de veículos nas chegadas de praças utilizados na calibração agregada foram provenientes da pesquisa realizada por Araújo (2001). A autora coletou tempos de percurso para que veículos percorressem trechos de 300 metros na entrada e saída de praças de pedágio. A Tabela 11 apresenta os valores obtidos pela autora.

Tabela 11 : Valores de aceleração, desaceleração e tempos de percurso em praças

PARÂMETRO		CLASSE VEICULAR		
		Automóveis	Caminhões	Ônibus
Entrada da praça	Tempo (s)	19,79	23,60	23,24
	Velocidade (km/h)	95,72	78,30	79,58
	Taxa de desaceleração (m/s ²)	1,17	0,78	0,81
Saída da praça	Tempo (s)	19,99	29,48	24,89
	Velocidade (km/h)	94,17	59,74	72,46
	Taxa de aceleração (m/s ²)	1,13	0,45	0,65

Fonte: Araújo (2001)

Nos modelos desenvolvidos, a classe de caminhões foi dividida em duas categorias devido (i) ao impacto desta classe no processamento de veículos nas cabines e (ii) a sua interferência na formação e comprimento de filas. Caminhões leves foram considerados aqueles de 2 e 3 eixos, comprimento de 14 metros e Peso Bruto Total-PBT variando entre 16 a 23 toneladas. Caminhões pesados foram considerados aqueles de 5 e 6 eixos, com comprimentos variando entre 18,15 metros e 19,80 metros e Peso Bruto Total-PBT variando entre 41,5 e 57 toneladas, de acordo com o Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (DNIT, 2006).

A partir do banco de dados fornecido pela concessionária, foram separadas informações sobre tempos de atendimento de veículos de passeio, caminhões leves e caminhões pesados, além das composições do fluxo de tráfego. Observou-se através da análise do banco de dados que a categoria de caminhões foi composta por, aproximadamente, 1/3 de caminhões pesados e 2/3 de caminhões leves.

A Tabela 12 apresenta os tempos de atendimento obtidos através das pesquisas em campo realizadas pela concessionária, e utilizados nos modelos para tempos de processamento nas cabines.

Tabela 12 : Dados de tempos de atendimento utilizados nas modelagens

	Observações (n)	Fração da Coleta	Tempos de Atendimento (s)	
			Média	Desvio Padrão
Totalidade dos dados	57.580	100,00%	25,68	13,12
Veículos de Passeio	34.929	60,66%	20,29	7,57
Caminhões Leves - 2 e 3 eixos	13.665	23,73%	25,07	9,47
Caminhões Pesados - 5 e 6 eixos	4.897	8,50%	30,78	9,95

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

Foi realizada análise a fim de verificar diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos tempos de atendimento de veículos de passeio, caminhões leves e pesados. Com o auxílio do pacote estatístico SPSS v15, foi verificado que médias de tempos de atendimento de todas as categorias apresentam diferenças estatisticamente significativas, ao nível de significância de 5%.

Buscando calibrar tempos de percurso nas chegadas das praças, a codificação dos modelos das praças foi estruturada de forma a incluir arcos nas aproximações das cabines que possibilitassem a verificação dos tempos de percurso. Os arcos partiam das cabines de cobrança até uma distância de 300 metros anteriores as mesmas, buscando representar situação semelhante à observada em trabalho de Araujo (2001). Diversas rodadas de simulação foram realizadas, e alterados dados de velocidades desejadas para todas as categorias. Os melhores resultados foram obtidos com as distribuições de velocidades desejadas apresentadas na Figura 8 para veículos de passeio, e Figura 9 para caminhões leves e pesados.

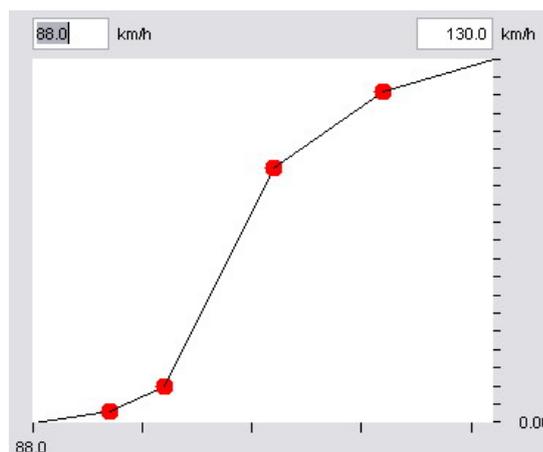


Figura 8: Distribuição de velocidades desejadas para veículos de passeio

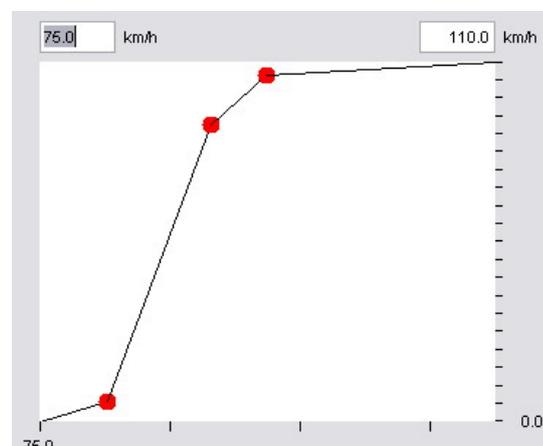


Figura 9: Distribuição de velocidades desejadas para caminhões leves e pesados

Utilizando as distribuições de velocidades apresentadas, foram realizadas 30 rodadas de simulação. As rodadas simularam diferentes intensidades de fluxo durante períodos de 1 hora. Dados dos 15 minutos iniciais e finais de cada rodada foram descartados devido ao efeito de *warm-up* e *cooling-off* nas redes.

O Erro Relativo Absoluto Médio (ERAM) foi utilizado para verificação da compatibilidade dos tempos de percurso simulados com aqueles retirados da bibliografia. O Erro Relativo Absoluto Médio é medida de desempenho que fornece uma noção do erro encontrado em um modelo, e é calculado através da média das diferenças absolutas. As diferenças absolutas correspondem ao módulo das diferenças entre os valores reais observados e estimados pelo modelo, divididas pelo número de valores estimados correspondente.

Os ERAMs para tempos médios de percurso de veículos de passeio e caminhões são, respectivamente, 5,88% e 5,90%, e foram considerados satisfatórios para os objetivos da pesquisa.

Após a inserção no modelo dos tempos de atendimento obtidos na coleta de dados, e da compatibilização dos tempos de percurso com aqueles obtidos na bibliografia, foram realizadas rodadas testes a fim de verificação visual do comportamento dos modelos. Foi constatado, entretanto, que veículos apresentavam espaçamentos ligeiramente maiores do que o visualmente esperado, quando em fila nas cabines. O motivo para este comportamento pode estar relacionado com a utilização do algoritmo de car-following psico-físico de Wiedemann-99 (PTV, 2006), que é específico para contextos rodoviários e fluxos ininterruptos. Em contextos rodoviários, devido às altas velocidades, motoristas procuram manter maiores distâncias com relação aos veículos líderes, e este fenômeno foi representado pela modelagem.

O algoritmo de car-following psico-físico de Wiedemann-99 apresenta diversos parâmetros de calibração, e o parâmetro que regula a distância de parada entre veículos é CCO (Distância de Parada). O valor padrão do software para este parâmetro é 1,5 metros. Portanto, foi adotado o valor de 1,2 metros como forma de diminuir espaçamentos de veículos em situações de parada nas filas. As modelagens passaram, então, a apresentar comportamentos visualmente esperados para situações de tráfego e filas.

Após as alterações descritas nas redes, considerou-se que as modelagens estavam aptas a representar o comportamento de veículos em praças de pedágio, e, portanto, possíveis de serem utilizadas na geração dos cenários da pesquisa.

A seguir será apresentado o processo de captura das imagens para os cenários da pesquisa.

4.2.3 Obtenção das Imagens para os Cenários da Pesquisa

A calibração resultou em modelos que satisfazem aos objetivos da pesquisa, na medida em que possibilitam a representação das situações de tráfego em praças.

Os cenários gerados nas micro-simulações foram apresentados através do módulo de visualização em terceira dimensão do software VISSIM. As imagens foram capturadas em máquina cujo processador apresenta quatro centrais de processamento, 3Gb de memória RAM e placa de vídeo dedicada com 512Mb.

Apesar de o VISSIM apresentar forma de exportação das imagens geradas, optou-se pela utilização de outro software para este fim. Portanto, para a captura das imagens, foi utilizado o software Camtasia Studio v.5.1.0 (TECHSMITH, 2008). Este software pode capturar todos os eventos visuais ocorridos em uma tela, além de realizar edição de imagens e salvamento de arquivo no formato padrão de software presente na maioria dos sistemas operacionais.

Devido à relação entre o carregamento das redes e a capacidade computacional, veículos poderiam apresentar diferentes velocidades de deslocamento nas redes. Desta forma, a edição de imagens foi ferramenta utilizada com frequência para a compatibilização das velocidades de deslocamento de veículos em terceira dimensão nas redes simuladas.

Foram gerados 16 cenários para cada configuração de praça (3 e 10 cabines). Nestes cenários, variou-se a quantidade de caminhões no fluxo de tráfego e a intensidade do fluxo, de tal forma que tamanhos de filas fossem compatíveis com os níveis estipulados e apresentados na Tabela 9 do item 4.1. Todos os vídeos dos cenários possuíram duração entre 30 e 45 segundos. Veículos de todas as classes envolvidas foram considerados como uma unidade para a formação das filas nas cabines. As Figura 10 e Figura 11 apresentam exemplos estáticos dos vídeos. A Figura 10 representa a situação do estudo PPSCF1, com

praça pequena (3 cabines), sem caminhões (0% de caminhões) e até 0,5 veículos, em média, nas filas. Já a Figura 11 representa a situação do estudo PGMCF6, com praça grande (10 cabines), muitos caminhões (30% de caminhões) e fluxos que resultam em até 16 veículos, em média, nas filas.

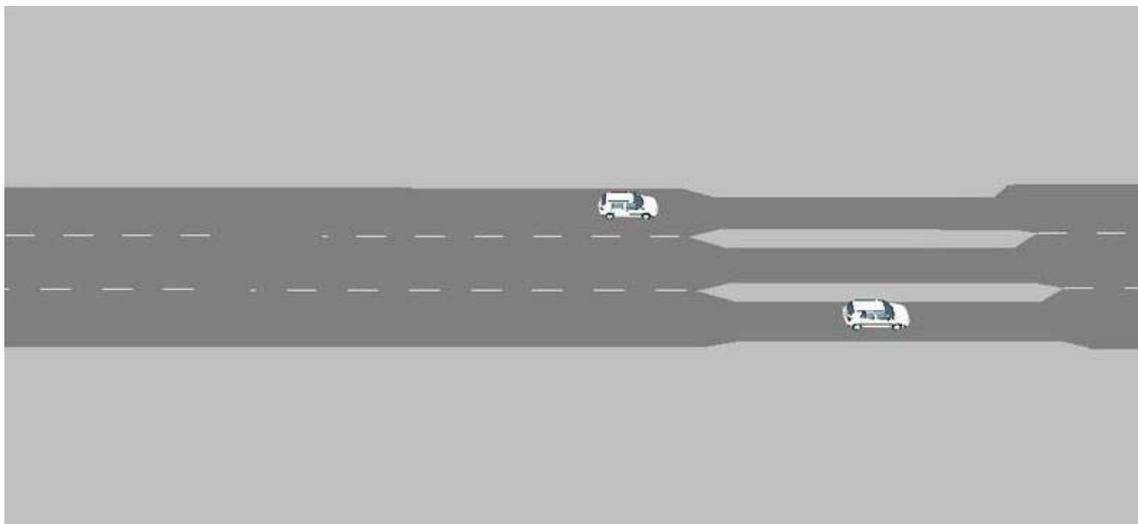


Figura 10: Imagem representativa da situação PPSCF1

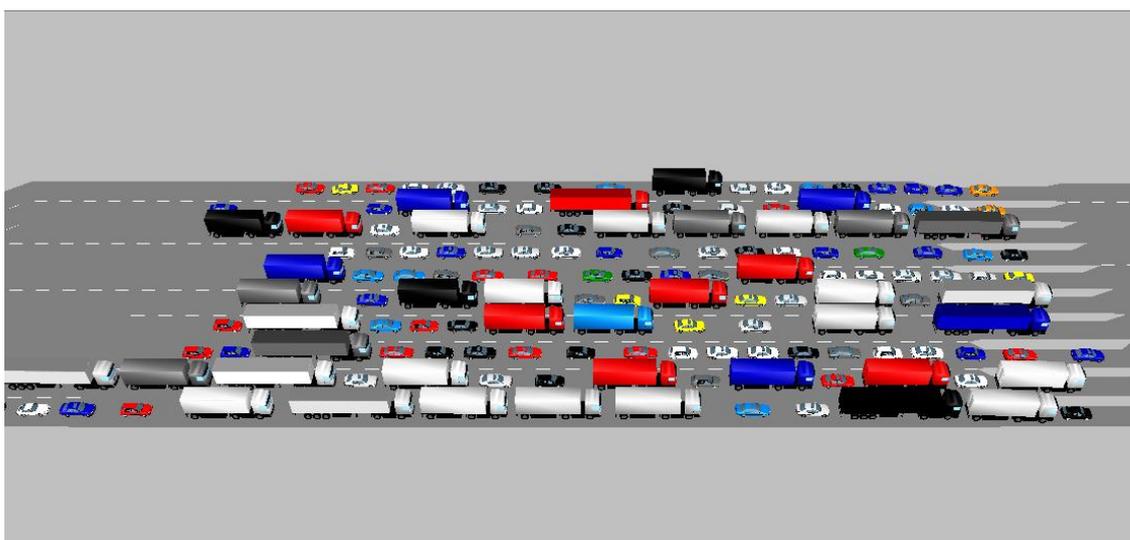


Figura 11: Imagem representativa da situação PGMCF6

Com o objetivo de realizar análises a respeito do comportamento dos modelos frente a alterações de parâmetros de intensidade e quantidade de veículos pesados nos fluxos, foram coletadas informações a respeito de volumes de entrada na praça e volumes processados nas cabines.

A Tabela 13 apresenta os dados extraídos dos cenários gerados, e filas e atrasos em praças podem apresentar grande variabilidade quando demandas de tráfego são maiores que as capacidades de processamento. Neste sentido, análises de capacidades operacionais das praças do estudo serão apresentadas posteriormente.

Observando os dados, percebe-se a influência de veículos pesados sobre as capacidades de atendimento das cabines. Para praça pequena e sem veículos pesados, por exemplo, a capacidade de atendimento é de 101 veículos/15minutos. Quando veículos pesados são inseridos no fluxo de tráfego em parcelas de 15% e 30%, as capacidades são atingidas em 91 veículos/15minutos e 84 veículos/15minutos, respectivamente. Igual relação pode ser estabelecida para praças com 10 cabines de atendimento.

Após a obtenção das imagens representativas dos cenários, foram realizadas as pesquisas junto aos usuários. A seção seguinte apresenta o processo de planejamento e execução das pesquisas.

Tabela 13 : Dados extraídos dos cenários gerados para a pesquisa

Cenários	Volume na entrada da praça (Intervalo de 15min)	Veículos processados nas cabines (Intervalo de 15min)
1 PPSCF1	40	40
2 PPSCF2	70	70
3 PPSCF3	100	93
4 PPSCF4	112	101
5 PPSCF5	120	101
6 PPSCF6	131	101
7 PPCMF1	38	38
8 PPCMF2	71	71
9 PPCMF3	99	87
10 PPCMF4	112	92
11 PPCMF5	116	91
12 PPCMF6	121	91
13 PPMCF1	41	40
14 PPMCF2	69	70
15 PPMCF3	82	79
16 PPMCF4	99	84
17 PPMCF5	112	85
18 PPMCF6	114	84
19 PGSCF1	153	154
20 PGSCF2	254	253
21 PGSCF3	321	333
22 PGSCF4	339	342
23 PGSCF5	360	343
24 PGSCF6	393	340
25 PGCMF1	135	134
26 PGCMF2	257	256
27 PGCMF3	308	291
28 PGCMF4	317	330
29 PGCMF5	339	329
30 PGCMF6	364	327
31 PGMCF1	111	112
32 PGMCF2	238	235
33 PGMCF3	277	284
34 PGMCF4	309	306
35 PGMCF5	320	311
36 PGMCF6	344	310

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

4.3 PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DAS PESQUISAS

O planejamento da pesquisa possuiu o objetivo de definir a amostra de usuários entrevistados. A amostra foi selecionada buscando uma representatividade da população segundo alguns critérios considerados importantes. O planejamento da pesquisa também definiu a distribuição dos cenários entre os grupos de pesquisa.

A amostra de entrevistados foi composta por 36 indivíduos, motoristas de veículos de passeio, usuários de praças de pedágios. A representatividade da amostra buscou um balanceamento de graus de escolaridade e faixas etárias. Neste sentido, foram entrevistados mesmo número de indivíduos com nível superior e com grau escolar até o ensino médio. Dentro de cada grau de escolaridade, também foram selecionados um mesmo número de indivíduos com diferentes faixas etárias, sendo as faixas etárias compostas por entrevistados jovens de até 35 anos e por entrevistados de meia idade, com idades acima de 35 anos. O sexo dos entrevistados não foi considerado nas pesquisas, porém grupos de entrevistados apresentaram equilíbrio quanto a esta característica.

Desta forma, as pesquisas de avaliação dos cenários foram executadas com motoristas de veículos de passeio, de ambos os sexos, usuários de praças, e que apresentavam distintos graus de escolaridade e faixas etárias.

A pesquisa em campo foi estruturada de forma a ser aplicada em 6 grupos de pesquisa, cada grupo contendo 6 indivíduos. Portanto, cada cenário foi julgado por 6 usuários quanto à qualidade de tráfego percebida.

A distribuição dos cenários entre os grupos de pesquisa foi realizada através de um quadrado-latino, de modo que, no conjunto das sequências que integram um plano, cada tratamento apareça uma e somente uma vez, em cada linha e em cada coluna (Ribeiro, 1999). Desta forma, a distribuição dos cenários entre os grupos de pesquisa é apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 : Distribuição dos cenários de pesquisa através de quadrado-latino

Grupos de Pesquisa		1	2	3	4	5	6
Praça Pequena	Sem Caminhões	Fluxo1	Fluxo3	Fluxo2	Fluxo6	Fluxo4	Fluxo5
Praça Pequena	Médios caminhões	Fluxo4	Fluxo1	Fluxo6	Fluxo5	Fluxo3	Fluxo2
Praça Pequena	Muitos Caminhões	Fluxo3	Fluxo4	Fluxo1	Fluxo2	Fluxo5	Fluxo6
Praça Grande	Sem Caminhões	Fluxo6	Fluxo5	Fluxo4	Fluxo1	Fluxo2	Fluxo3
Praça Grande	Médios caminhões	Fluxo2	Fluxo6	Fluxo5	Fluxo3	Fluxo1	Fluxo4
Praça Grande	Muitos Caminhões	Fluxo5	Fluxo2	Fluxo3	Fluxo4	Fluxo6	Fluxo1

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

O quadrado-latino garante que: (i) todos os grupos de pesquisa analisem todas as condições de tamanhos de filas nas cabines; (ii) um mesmo grupo analise 3 cenários com praça pequena e 3 cenários com praça grande; (iii) cenários com diferentes tamanhos de filas na cabines sejam analisados em uma seqüência controlada dentre todos os grupos; e (iv) um mesmo grupo analise todas as possibilidades de combinações entre tamanhos de praça e quantidades de caminhões no fluxo.

A forma de distribuição dos cenários entre os grupos faz com que sejam suprimidas possíveis tendências de julgamento de grupos. Possíveis tendências de julgamento estariam relacionadas a notas muito baixas ou muito altas para todos os cenários julgados por um grupo específico. Ainda, esta distribuição de cenários minimiza ruídos intrínsecos e comuns em pesquisas voltadas ao levantamento de percepções e opiniões. Ruídos, neste caso, estariam ligados as seqüências de apresentação dos cenários, onde cenários apresentados poderiam influenciar respostas de cenários subsequentes.

A visualização dos vídeos dos cenários foi realizada através de um microcomputador portátil com boa capacidade de reprodução de vídeo, a fim de manter uniforme as velocidades dos veículos em todos os cenários. Antes da realização das pesquisas, foram apresentados vídeos que representavam as melhores e piores situações de tráfego do estudo. Este procedimento procurou oferecer um referencial de julgamento aos entrevistados.

O questionário utilizado para capturar as notas (percepção da qualidade do tráfego) de cada cenário foi elaborado de forma a dar liberdade de julgamento aos respondentes. O questionário apresentou uma linha contínua de julgamento para cada cenário, e respostas poderiam variar desde “Péssimo” até “Excelente”. Os entrevistados foram instruídos a marcar, sobre a linha contínua, aquela resposta que mais se aproximava do nível de conforto

4.4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS PESQUISAS

As notas dos cenários, variável de resposta do experimento, foram extraídas dos questionários através de relação matemática entre o comprimento total da linha contínua e o ponto marcado pelo entrevistado sobre a linha. Cenário cujo julgamento foi considerado como “excelente” recebeu nota máxima 7, e cenário julgado como “péssimo” recebeu nota mínima 1, como mostra a Figura 13.

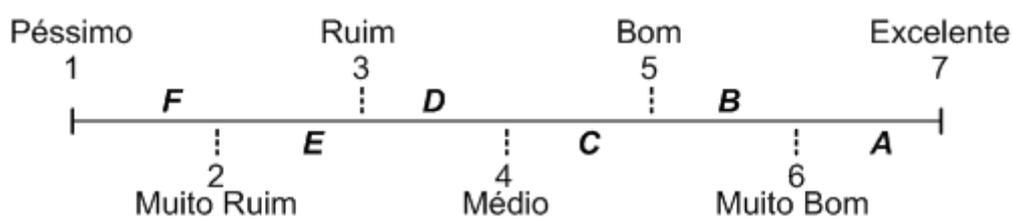


Figura 13: Relação entre julgamento e notas estipuladas para os cenários

Fonte: figura elaborada pelo autor (2009)

As notas dos cenários foram correlacionadas com uma escala de seis letras para a descrição da qualidade do tráfego, que varia de “A” até “F”. Considerou-se como nível de serviço “A” aquelas notas que variaram entre 7 e 6 pontos, e representam as melhores situações de tráfego encontradas. Assim, sucessivamente, foram classificadas como nível de serviço “F” aquelas notas que variaram de 2 a 1 pontos, cujos cenários representam as piores situações de densidade de tráfego, atrasos e filas. A escala de notas dos cenários, e as respectivas letras para designação da qualidade do tráfego, também estão apresentadas na Figura 13.

As pesquisas resultaram em seis julgamentos para cada cenário, e a nota de um cenário foi obtida com a média das notas a ele atribuídas. Após, foi realizada normalização das notas entre os seis grupos de pesquisa. A normalização entre grupos tem o objetivo de padronizar o julgamento dos cenários, e se faz necessária na medida em que grupos podem apresentar diferentes rigores em seus julgamentos.

A média geral de notas para todos os cenários da pesquisa foi de 4,46 pontos, e as médias das notas de cada grupo estão apresentadas na Tabela 15. Com a finalidade de normalizar as notas, as diferenças entre a média de cada grupo e a média geral foram acrescentadas às notas de seus respectivos grupos.

Tabela 15 : Média das notas de cada grupo e diferenças com relação à média geral

	GRUPO 1	GRUPO 2	GRUPO 3	GRUPO 4	GRUPO 5	GRUPO 6
Média do Grupo	4,05	4,43	4,16	4,95	4,29	4,89
Diferença com relação à média geral	0,41	0,03	0,31	-0,49	0,17	-0,43

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

Assim, foram obtidas notas normalizadas para todos os cenários da pesquisa, e a Tabela 16 apresenta os resultados das notas para cada cenário.

Tabela 16 : Resumo das notas normalizadas para os cenários de pesquisa

		Fluxo1	Fluxo2	Fluxo3	Fluxo4	Fluxo5	Fluxo6
Praça Pequena	Sem Caminhões	7,25	6,48	5,82	4,05	2,91	2,87
Praça Pequena	Caminhões Médios	6,35	5,54	5,04	4,10	3,76	1,69
Praça Pequena	Muitos Caminhões	6,48	5,71	5,21	3,55	3,11	2,20
Praça Grande	Sem Caminhões	6,02	6,56	5,61	4,29	3,04	1,57
Praça Grande	Caminhões Médios	6,67	6,53	4,17	3,93	2,74	1,72
Praça Grande	Muitos Caminhões	6,57	6,30	5,09	4,24	2,10	1,34

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

Deve-se notar que, devido a normalização dos dados, houve ocorrência de nota acima da nota máxima 7. Este resultado não prejudica as análises, e é indicação de que o grupo responsável pelo julgamento do respectivo cenário apresentou critérios rigorosos em seus julgamentos, se comparado aos demais grupos da pesquisa.

Relacionando as notas dos cenários com a escala de letras proposta para designação de níveis de serviço, obtém-se a distribuição apresentada na Tabela 17.

Tabela 17 : Relação entre notas de cenários e escala de níveis de serviço proposta

		Fluxo1	Fluxo2	Fluxo3	Fluxo4	Fluxo5	Fluxo6
Praça Pequena	Sem Caminhões	A	A	B	C	E	E
Praça Pequena	Caminhões Médios	A	B	B	C	D	F
Praça Pequena	Muitos Caminhões	A	B	B	D	D	E
Praça Grande	Sem Caminhões	A	A	B	C	D	F
Praça Grande	Caminhões Médios	A	A	C	D	E	F
Praça Grande	Muitos Caminhões	A	A	B	C	E	F

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

Pode-se notar clara deterioração na percepção dos níveis de serviço na medida em que filas apresentam um maior número de veículos em espera para pagamento das tarifas. Este efeito corresponde à realidade esperada, na medida em que atrasos e o desconforto são proporcionais ao tamanho das filas nas cabines.

De acordo com a percepção dos entrevistados, fluxos de geram filas médias entre 0,5 (Fluxo1) e 1 (Fluxo2) veículo em todas as cabines foram considerados como ótimos, e classificados como “A”. Contudo, em uma análise mais detalhada, é possível estabelecer uma relação entre o tamanho das áreas das praças com a percepção de qualidade do tráfego. Para praça grande, com 10 cabines de atendimento, todos os cenários com filas médias entre 0,5 e 1 veículo foram avaliados como nível de serviço “A”. Já para praça pequena, com 3 cabines, dois dos cenários apresentaram notas que resultaram em classificação “B”. Estes dois cenários podem ter sido julgados como nível de serviço “B” devido à presença de caminhões, já que existem veículos pesados nos fluxos de tráfego destes cenários.

Outro ponto a destacar é o julgamento de cenários que geraram filas médias de 2 veículos (Fluxo3) nas cabines de atendimento. Neste caso, quase a totalidade de cenários foram julgados com notas que variaram entre 5 e 6 pontos, e observou-se consistência nos julgamentos, com exceção de julgamento de um dos cenários.

Com o aumento gradual do fluxo de tráfego e formação das filas nos cenários, há uma maior instabilidade de julgamentos por parte dos entrevistados. A provável causa desta instabilidade pode estar relacionada a limites de percepção dos usuários entrevistados, e sua ocorrência era esperada, na medida em que as imagens buscam representar situações de tráfego, onde as características de qualidade estão intrínsecas. A percepção de qualidade é pessoal e depende de experiências anteriores, por isso muito variável.

Para fluxos que produzem filas médias de 4 veículos nas cabines (Fluxo4), quatro cenários foram julgados como apresentando nível de serviço “C”, e dois julgados como “D”, de acordo com a escala proposta. Fluxos que geram filas médias de 8 veículos (Fluxo5) foram julgados como apresentando serviços “D” e “E” igualmente três vezes. Fluxos que produzem 16 veículos em média nas filas (Fluxo6) foram julgados como apresentando nível de serviço “E” duas vezes, e “F” quatro vezes.

Contudo, apesar da instabilidade gradual dos julgamentos dos cenários, observa-se certa consistência quanto ao equilíbrio de julgamentos e a qualidade de tráfego representada pelos cenários. Desta maneira, os resultados da pesquisa podem ser considerados como consistentes, e próprios para a obtenção de modelo que explique a percepção da qualidade do tráfego em praças através das variáveis estudadas (filas nas cabines - FILA, parcela de caminhões no fluxo – CAM e número de cabines na praça - CAB). O capítulo seguinte apresenta a etapa de modelagem da percepção de usuários a respeito da qualidade do tráfego em praças de pedágio.

5. MODELAGEM DA PERCEPÇÃO DOS USUÁRIOS

Este capítulo apresenta a etapa de modelagem da percepção de qualidade do tráfego obtida através da pesquisa. A modelagem relacionou as notas (percepção de qualidade de tráfego) com os níveis dos fatores utilizados para a elaboração dos cenários. Através do modelo obtido também foi possível identificar tendências de influência destes fatores sobre a percepção da qualidade do tráfego em praças de pedágio.

O capítulo inicia com a identificação prévia da influência das variáveis estudadas sobre a percepção da qualidade de tráfego. Após, será apresentado o processo de modelagem através de regressão e as análises de sensibilidade do modelo obtido. Por fim, serão propostos fatores de equivalência veicular para os diferentes tipos de veículos em filas de praças de pedágio.

5.1 ANÁLISE PRELIMINAR DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS NA MODELAGEM

Após a realização da pesquisa, e visando executar uma análise preliminar, verificou-se o grau de associação das variáveis pesquisadas com as notas obtidas para os cenários. Neste sentido, foram calculados os valores de correlação de Pearson (r). O coeficiente de correlação de Pearson entre duas variáveis genéricas x_i e y_i é dado por (Anderson *et al.*, 2002):

$$r_{xy} = \frac{\sum x_i y_i - \frac{(\sum x_i \sum y_i)}{n}}{\sqrt{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} \sqrt{\sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n}}} \quad (16)$$

onde:

n é número de pares de dados (x_i, y_i)

Quando o coeficiente de correlação r é alto (valor próximo de 1 ou -1), há uma grande possibilidade daquela variável ter forte influência na variável de saída do modelo, portanto sua inclusão na modelagem pode vir a ser adequada. Por outro lado, valores baixos (próximos de 0) não determinam que a variável deva ser necessariamente descartada da análise, mas indicam uma correlação fraca entre a variável explicativa analisada e a variável dependente. Neste caso, pode haver uma relação não-linear entre as variáveis analisadas.

Na Tabela 18 são apresentadas as correlações entre a variável de resposta do modelo (Notas dos Cenários) e as variáveis explicativas pesquisadas. Esta tabela corresponde a uma das linhas da Matriz de Correlações obtida através do software StatGraphics v.15.2.06 (STATPOINT, 2005).

Tabela 18 : Correlações entre as Notas dos Cenários e demais variáveis

	CAB	CAM	FILA	CAB*CAM
NOTACENARIO	-0,0581	-0,0896	-0,9004	-0,3041
Estatística Valor de P	0,7363	0,6031	< 0,0001	0,0451

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

As correlações obtidas demonstram uma forte correlação (-0,9004) entre as variáveis “tamanho de fila nas cabines” e “notas dos cenários”. Já as variáveis “número de cabines nas praças” e “quantidade de caminhões no fluxo de tráfego” apresentam fraca correlação com a variável de saída “notas dos cenários”, com ambos os valores próximos de zero. A interação entre as variáveis CAB e CAM apresentou média correlação (-0,3041) em relação à variável “notas dos cenários”.

A estatística para o valor de P testa a significância estatística da estimativa da correlação. Os valores calculados abaixo de 0,05 indicam, com 95% de confiança, uma correlação estatisticamente diferente de zero, caso verificado entre “notas dos cenários” e “tamanho de filas” e entre “notas dos cenários” e a interação CAB*CAM.

Contudo, apesar de apresentarem correlações próximas à zero, as variáveis “quantidade de caminhões no fluxo” e “número de cabines nas praças” serão incluídas nas modelagens. A inclusão destas variáveis na modelagem está baseada no efeito conjunto (interação de segunda ordem) que possam exercer sobre a percepção de qualidade do tráfego. Uma interação de segunda ordem entre elas pode ser traduzida como uma percepção de ocupação dos espaços físicos da praça e quantidade de veículos envolvidos no processo de pedagiamento, o que pode vir a colaborar para a modelagem de estimativas de

percepção de qualidade do tráfego e obtenção de escala para níveis de serviço em praças de pedágio.

Verificada a correlação entre as variáveis FILA e CAB*CAM com relação à variável “Nota dos Cenários”, será apresentado a seguir o processo de modelagem através de regressão múltipla.

5.2 MODELAGEM ATRAVÉS DE REGRESSÃO MÚLTIPLA

No processo de modelagem, juntamente com o coeficiente de determinação (R^2), foram observadas a representatividade das variáveis de entrada e os limites de contorno para o modelo concebido. O banco de dados com as médias das notas dos cenários, resultantes da pesquisa de percepção da qualidade do tráfego, está apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 : Banco de dados com notas médias dos cenários obtidas na pesquisa

No. Cabines	% Caminhões	Tamanho de Fila	Nota do Cenário
3	0	0.5	7.25
3	0	1	6.48
3	0	2	5.82
3	0	4	4.05
3	0	8	2.91
3	0	16	2.87
3	15	0.5	6.35
3	15	1	5.54
3	15	2	5.04
3	15	4	4.10
3	15	8	3.76
3	15	16	1.69
3	30	0.5	6.48
3	30	1	5.71
3	30	2	5.21
3	30	4	3.55
3	30	8	3.11
3	30	16	2.20
10	0	0.5	6.02
10	0	1	6.56
10	0	2	5.61
10	0	4	4.29
10	0	8	3.04
10	0	16	1.57
10	15	0.5	6.67
10	15	1	6.53
10	15	2	4.17
10	15	4	3.93
10	15	8	2.74
10	15	16	1.72
10	30	0.5	6.57
10	30	1	6.30
10	30	2	5.09
10	30	4	4.24
10	30	8	2.10
10	30	16	1.34

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

Desta forma, as variáveis explicativas consideradas na modelagem foram: (i) tamanho de fila nas cabines - FILA, (ii) quantidade de caminhões no fluxo de tráfego - CAM e (iii) número de cabines na praça de pedágio - CAB. A variável dependente foi “Nota do Cenário”.

5.2.1 O Processo de Modelagem Através de Regressão Múltipla Não-Linear

Inicialmente foram realizadas modelagens através de regressão linear simples, a fim de verificar possíveis relações lineares entre as variáveis explicativas e a dependente (Nota do Cenário). Após, foram executadas análises através de regressão linear múltipla, com o objetivo de verificar possíveis associações entre as variáveis explicativas.

As regressões lineares indicaram que polinômios eram capazes de representar os dados de entrada, contudo, em caso de extrapolação de dados para obtenção de notas de cenários, poderiam apresentar valores negativos, o que descredencia tais modelos como os mais indicados neste caso.

Após, foram realizadas modelagens não-lineares em separado, com o objetivo de analisar comportamentos independentes entre as três variáveis explicativas e a dependente. Concluiu-se que a relação entre a variável “tamanho de filas nas cabines” e “notas dos cenários” poderia ser estabelecida através de uma equação exponencial negativa. As demais variáveis explicativas (número de cabines - CAB e quantidade de caminhões no fluxo - CAM) apresentaram padrão de comportamento indefinido com relação à variável dependente, e modelos obtidos foram de baixa representatividade (R^2).

Embora verificado um baixo efeito isolado de explicação entre as variáveis CAB e CAM com relação à “notas dos cenários”, a associação entre elas produz ajuste na percepção de qualidade do tráfego, e não foram descartadas das modelagens, conforme indicação do valor de correlação de Pearson para a associação entre elas (CAB*CAM).

As modelagens foram realizadas através do software StatGraphics v.15.2.06 (StatPoint, 2005), e a equação que melhor representou os dados foi do tipo exponencial negativa, obtida através de regressão múltipla não-linear:

$$NotaCenário = 1 + 6,3 \cdot e^{-\left\{ \left(\frac{FILA}{7,87} \right)^{0,85} \cdot \left[1 + \left(\frac{CAB}{70} \right) + \left(\frac{CAM}{90} \right) \right] \right\}} \quad (17)$$

onde,

FILA representa a variável “tamanho de fila nas cabines” [em *n* veículos quaisquer];

CAB representa o “número de cabines” na praça [em *n* cabines], e;

CAM representa a “parcela de caminhões no fluxo de tráfego” [em % de caminhões].

O coeficiente de determinação (R^2), cujo objetivo é avaliar o potencial do modelo em explicar a variável dependente, foi de 94,42%. A Figura 14 apresenta o gráfico de dispersão entre os dados observados e aqueles previstos pelo modelo.

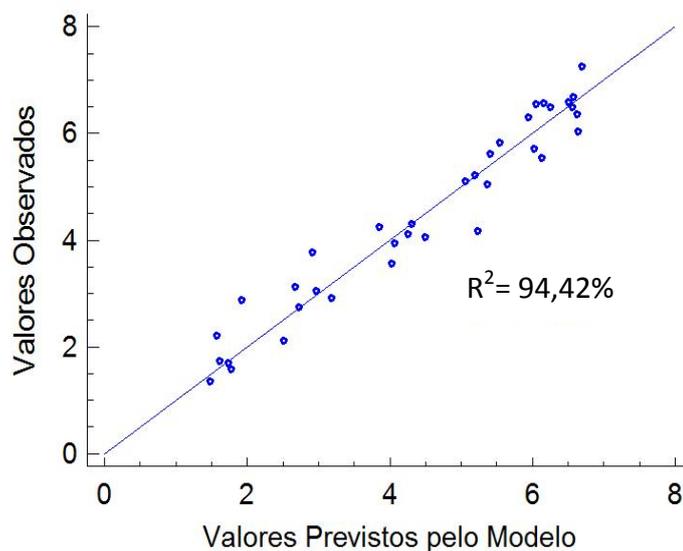


Figura 14: Gráfico de dispersão entre os dados observados e previstos pelo modelo

Fonte: figura elaborada pelo autor (2009)

Há duas suposições que necessitam ser atendidas por modelos obtidos através de estudos de regressão: (i) normalidade dos resíduos e (ii) homogeneidade (ou homocedasticidade) dos resíduos. Normalidade significa que os resíduos devem seguir uma distribuição aproximadamente normal.

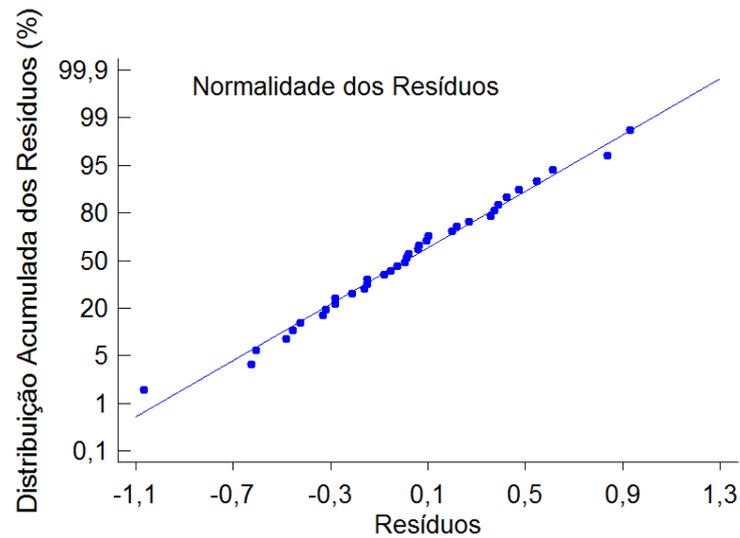


Figura 15: Gráfico dos resíduos versus a distribuição acumulada dos resíduos

Fonte: figura elaborada pelo autor (2009)

A Figura 15 apresenta distribuição acumulada dos resíduos, e esta distribuição atesta que a suposição de normalidade dos resíduos é atendida, já que resíduos podem ser ajustados à uma reta.

Homogeneidade dos resíduos significa que a variância dos resíduos é aproximadamente a mesma em diferentes regiões do espaço amostral.

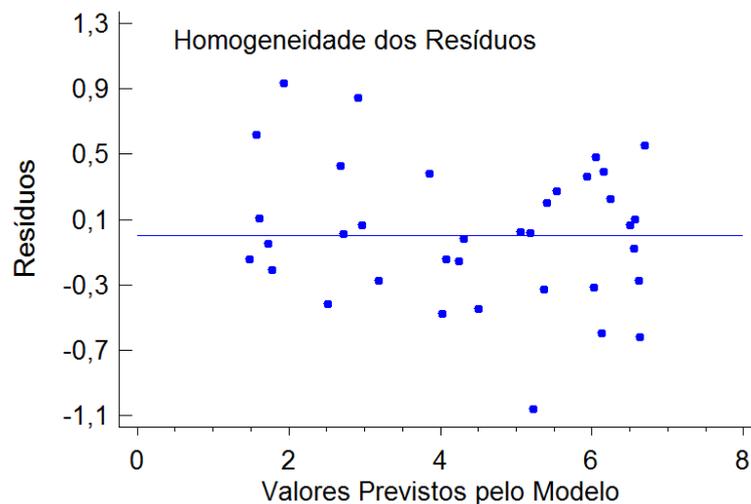


Figura 16: Gráfico dos valores previstos versus resíduos

Fonte: figura elaborada pelo autor (2009)

Buscando verificar a homogeneidade dos resíduos é apresentada a Figura 16. Através desta figura pode-se notar que resíduos aparecem dispostos como uma nuvem, indicando que a variância não aumenta/diminui na medida em que a variável de resposta aumenta.

Neste sentido, o modelo obtido atende as questões de normalidade e homogeneidade dos resíduos.

A modelo reproduz valores para “Notas dos Cenários” que variam entre 1 e 7, respeitando os limites de contorno estabelecidos pela pesquisa. Além disto, representa corretamente o efeito do decaimento da qualidade do tráfego devido ao aumento do número de veículos nas filas, e capta o efeito conjunto das variáveis “número de cabines” e “quantidade de caminhões no fluxo de tráfego”.

Portanto, a equação é composta por dois termos. O termo onde se encontra a variável FILA representa o efeito direto do tamanho das filas na percepção de desconforto e inconveniência dos usuários. Já o termo onde se encontram as variáveis CAM e CAB pode ser traduzido como o desconforto percebido pela ocupação da área de chegada da praça, representando a quantidade de veículos envolvidos no processo de pedagiamento.

A seguir será apresentada a análise de sensibilidade do modelo para a percepção de qualidade do tráfego.

5.3 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE DO MODELO

A análise de sensibilidade do modelo para percepção de qualidade de tráfego em praças possuiu dois principais objetivos. O primeiro objetivo foi avaliar a importância relativa das parcelas do modelo. A identificação da importância relativa das parcelas do modelo contribui para o entendimento da influência isolada das variáveis explicativas sobre a percepção de qualidade do tráfego. O segundo objetivo foi avaliar o comportamento do modelo para variações das variáveis explicativas, buscando verificar a robustez da modelagem com relação a limites de contorno para notas dos cenários.

5.3.1 Representatividade das Variáveis Explicativas no Modelo

A análise da representatividade das variáveis explicativas possui o objetivo de verificar a importância destas variáveis no modelo de regressão para qualidade do tráfego (Nota do Cenário).

As estatísticas de *t-Student*, provenientes da divisão entre as estimativas dos parâmetros da equação e seus respectivos erros padrões assintóticos, podem ser utilizadas como uma boa aproximação para a análise de representatividade das variáveis explicativas. A equação apresenta 31 graus de liberdade, e os valores das probabilidades da estatística *t-Student* para as variáveis explicativas estão apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 : Probabilidades para a estatística *t-Student* das variáveis explicativas

G.L.=31	<i>t-Student</i>	Probabilidade Associada
FILA	19,8015	< 0,0001
CAB	1,5857	0,0615
CAM	2,9655	0,0029

Fonte: figura elaborada pelo autor (2009)

Analisando-se os valores de probabilidades verifica-se que a variável com menos evidência estatística é o “número de cabines” nas praças. Contudo, mesmo assim, possui valor próximo a 94%, justificando sua inclusão no modelo.

A seguir serão apresentadas as análises de sensibilidade do comportamento do modelo.

5.3.2 Comportamento do Modelo de Percepção de Qualidade do Tráfego

As análises de sensibilidade possuem o objetivo de testar o modelo obtido, demonstrando seus comportamentos e verificando limites de contorno. Para as análises de sensibilidade, duas das variáveis explicativas foram fixadas, e variou-se a terceira.

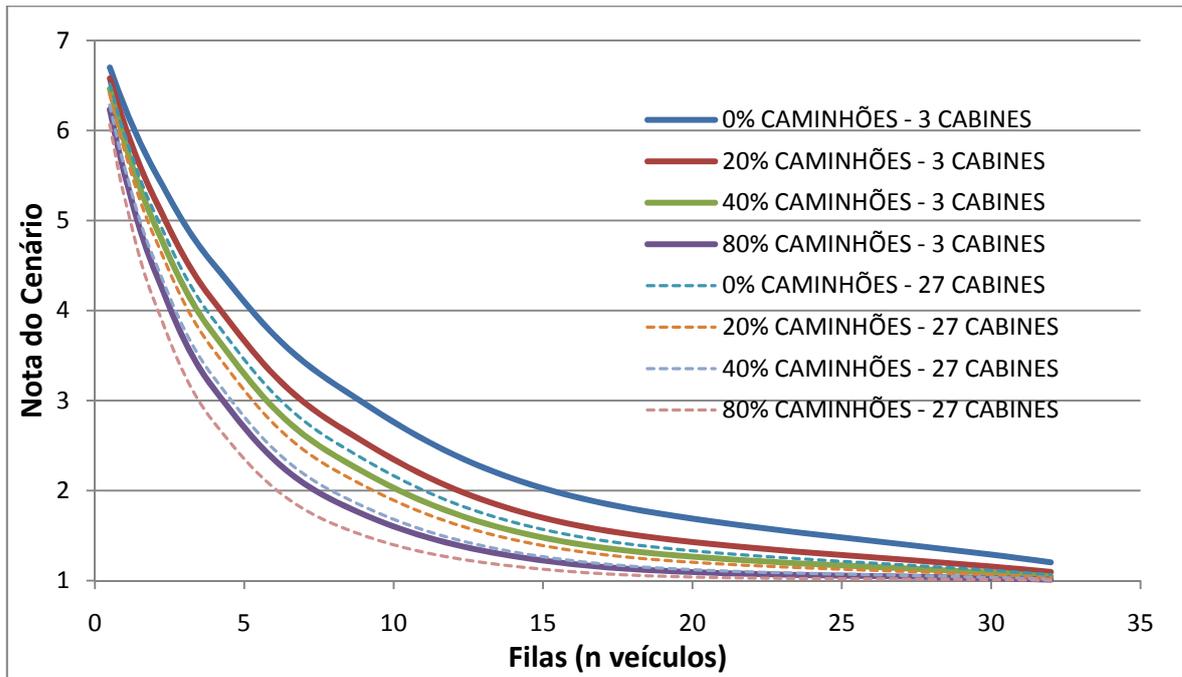


Figura 17: Gráfico de Sensibilidade com variação da % de caminhões e número de cabines

Fonte: figura elaborada pelo autor (2009)

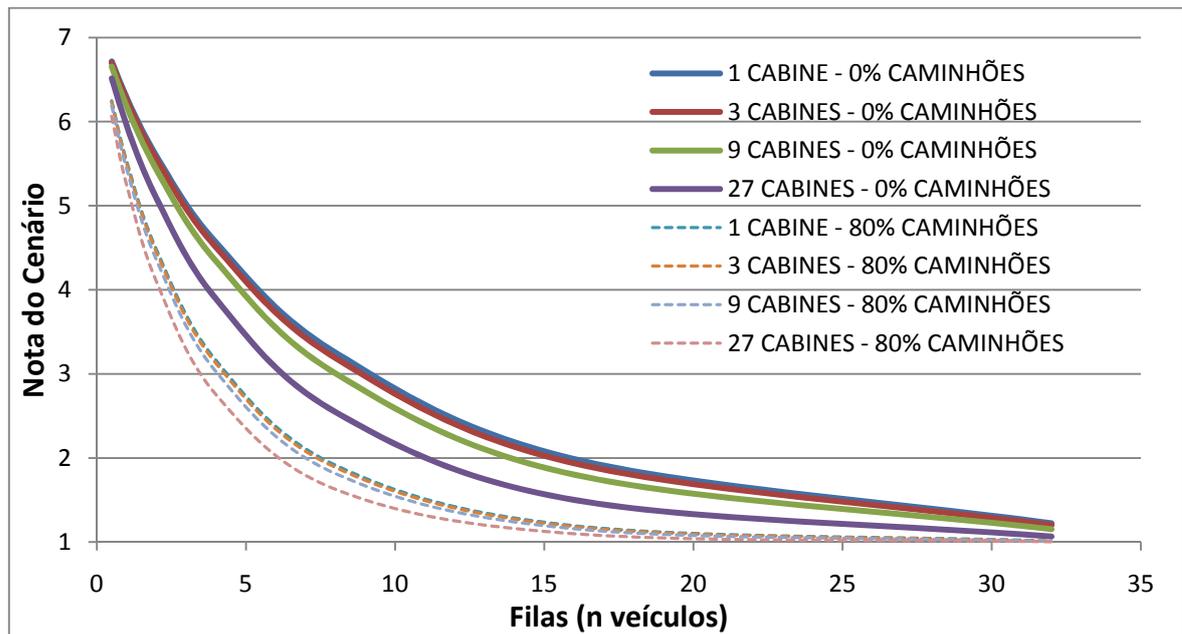


Figura 18: Gráfico de Sensibilidade com variação do número de cabines e % de caminhões

Fonte: figura elaborada pelo autor (2009)

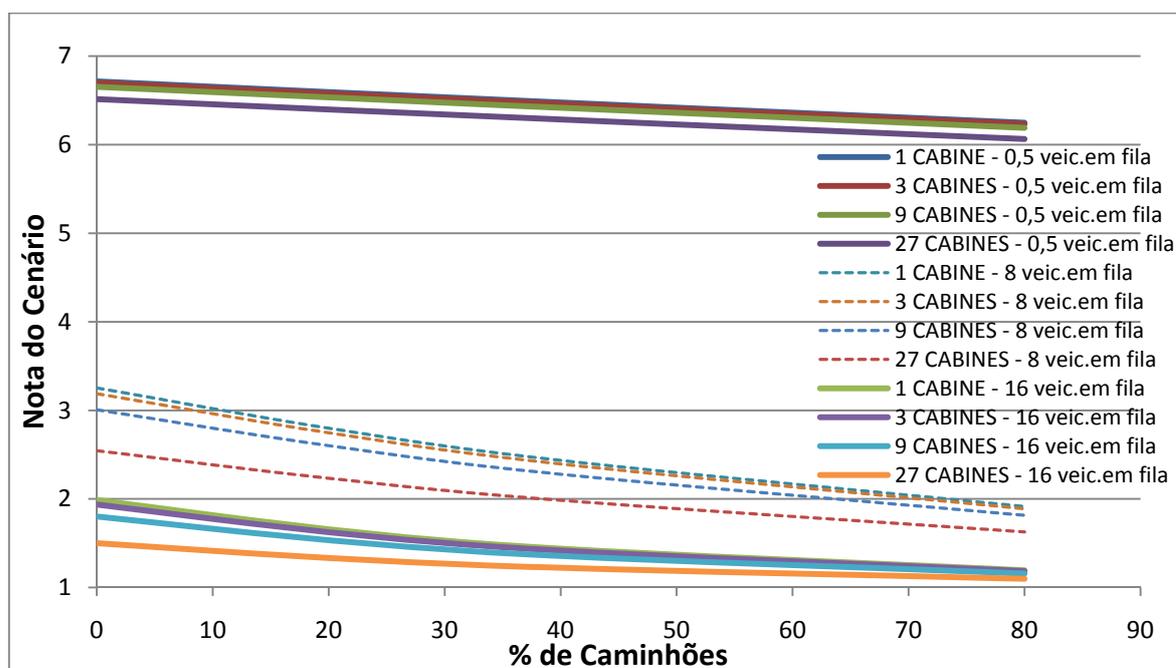


Figura 19: Gráfico de Sensibilidade com variação do número de cabines e tamanho de filas

Fonte: figura elaborada pelo autor (2009)

Através dos gráficos de sensibilidade percebe-se que o modelo respeita as condições de contorno impostas, já que gera notas que variam entre 1 e 7 pontos. Deve ser destacado o comportamento do modelo quando variada tamanho de filas nas cabines na Figura 17 e Figura 18. Esta variável explicativa gera efeito muito maior sobre “notas dos cenários” do que as variáveis relativas a caminhões e cabines. Este fato corresponde à realidade pesquisada, já que o desconforto e inconveniência percebidos pelos usuários estão diretamente relacionados ao tamanho das filas nas cabines. Ainda, a variável FILA possui alta correlação com a percepção de qualidade do tráfego, de acordo com a análise de correlação de Pearson no item 5.1. Filas maiores produzem atrasos maiores, e esta relação foi capturada nas pesquisas e reproduzida no modelo matemático.

Também deve ser destacado o efeito do “número de cabines” e “quantidade de caminhões no fluxo de tráfego” sobre a percepção dos usuários. Estas variáveis apresentam efeito conjunto significativo sobre as “notas dos cenários”, e a percepção dos usuários pode ser traduzida de maneira que, quanto maior o número de veículos pesados envolvidos no processo de chegada na praça, menores serão as áreas de manobras, conseqüentemente, maior será a sensação de limitação de manobras e desconforto o inconveniente percebido.

Ainda, para filas com o mesmo número de veículos, o inconveniente percebido é maior em praças com muitas cabines se comparado a praças pequenas e poucas cabines.

A seguir será apresentada uma análise a respeito de fatores de equivalência em filas de praças de pedágio, já que comprimentos das filas nas cabines podem variar em decorrência da composição do fluxo de tráfego.

5.4 FATORES DE EQUIVALÊNCIA VEICULAR EM FILAS DE PRAÇAS DE PEDÁGIO

Nos cenários gerados para a pesquisa, veículos de qualquer classe foram considerados como uma unidade para a formação de filas nas cabines. Desta forma, o comprimento das filas varia de acordo com o incremento de veículos pesados no fluxo de tráfego, e fatores de equivalência para veículos pesados são necessários.

O conceito de equivalência veicular está relacionado com os diferentes impactos que categorias de veículos exercem sobre a operacionalidade de um fluxo de tráfego. Assim, a função do fator de equivalência é converter um fluxo de tráfego real, formado por diferentes tipos de veículos, em um fluxo hipotético, composto apenas por veículos de passeio equivalentes - VPE, de forma que análises de níveis de serviço possam ser padronizadas em função de um único tipo de veículo.

A equivalência veicular possui papel fundamental em metodologias para análises de capacidades em infraestruturas de transportes, sendo utilizada, por exemplo, nas metodologias presentes no HCM-2000 para a padronização dos cálculos de capacidade para rodovias.

Com o objetivo de realizar uma análise do comprimento das filas conforme o aumento de veículos pesados no fluxo é apresentada a Tabela 21, onde estão os comprimentos de veículos sugeridos pelo Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (DNIT, 2006), e utilizados para a geração dos cenários micro-simulados deste estudo. Portanto, a extensão em fila ocupada pelas diversas classes de veículos pode ser obtida através da soma dos comprimentos dos veículos com o espaçamento em fila desejado. O espaçamento em fila desejado foi definido pelo algoritmo de car-following, e estabelecido na calibração como 1,2 metros em média.

Tabela 21 : Extensão de fila ocupada pelas diversas classes de veículos deste estudo

	Fração do Fluxo	Comprimento Médio dos Veículos (m)	Espaçamento em fila (m)	Comprimento em Fila (m)
Veículos de Passeio	1-x	4,11	1,20	5,31
Caminhões Leves	$(\frac{2}{3})x$	14,00	1,20	15,20
Caminhões Pesados	$(\frac{1}{3})x$	(18,15 a 19,80) 18,975	1,20	20,18

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

Veículos de passeio, desta forma, ocupam uma extensão média em fila de 5,31 metros. Caminhões leves e pesados ocupam extensões médias em fila de 15,20 metros e 20,18 metros, respectivamente.

A Tabela 21 também apresenta as frações de composição dos fluxos de tráfego utilizados para a elaboração dos cenários deste estudo, sendo “x” o percentual de caminhões no fluxo de tráfego. Aqueles caminhões classificados como leves representaram 2/3 da parcela desta classe nos fluxos. Caminhões pesados representam 1/3 da parcela da classe de caminhões nos fluxos. Veículos leves compuseram o restante de veículos nos fluxos (1-x).

De posse dos comprimentos médios dos veículos e da composição dos fluxos, foi realizado o cálculo do comprimento médio de fila (em metros) para duas distintas situações, apresentadas no gráfico de sensibilidade da Figura 20.

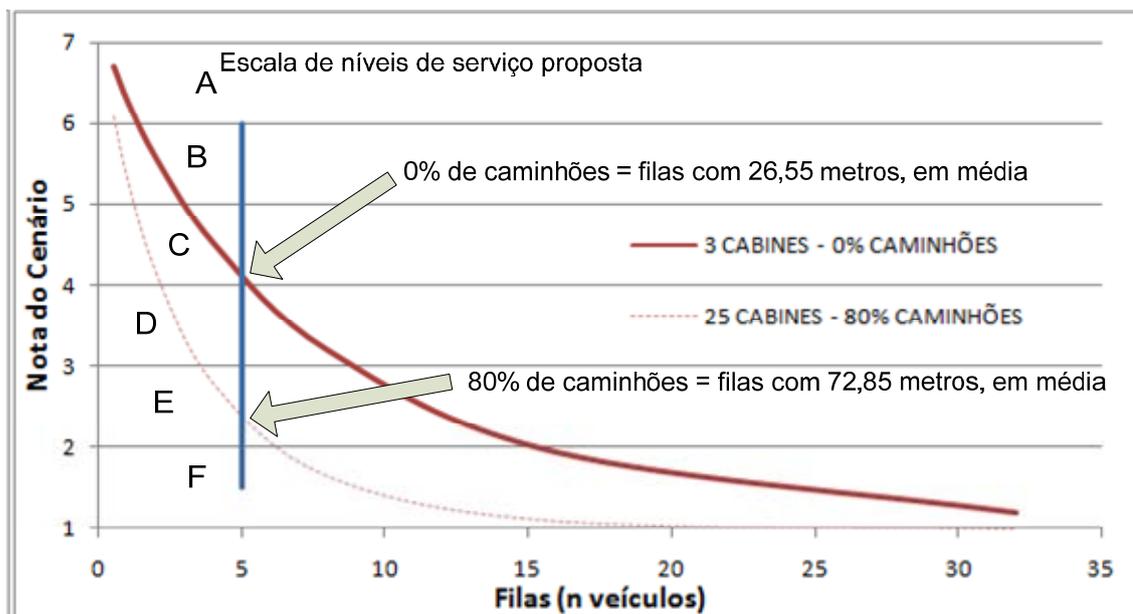


Figura 20: Indicação de diferentes comprimentos de fila e a composição do tráfego

Fonte: figura elaborada pelo autor (2009)

O gráfico de sensibilidade da Figura 20 apresenta linha vertical correspondente a filas compostas por 5 veículos e está indicado, como exemplo, o efeito da composição do tráfego sobre o comprimento das filas. Fluxo composto por 80% de caminhões pode apresentar fila média de 72,85 metros e, de acordo com escala para níveis de serviço proposta na Figura 13 do item 0, a qualidade do tráfego seria classificada como “E”. Analogamente, fluxo sem caminhões pode apresentar fila média de 26,55 metros e a qualidade do tráfego seria classificada como “C”, de acordo com a escala proposta.

Esta análise de sensibilidade contribui para a observação do impacto de veículos pesados sobre comprimentos de filas nas cabines e qualidades de tráfego percebidas pelos usuários.

Elefteriadou *et al.* (1997) realizaram levantamento sobre diversos trabalhos que propuseram fatores de equivalência, e citam a falta de consenso sobre o método mais adequado para cálculo da equivalência veicular.

Neste estudo, os equivalentes veiculares surgem de uma relação de equivalência entre comprimentos de diferentes classes de veículos em fila nas praças de pedágio. A Tabela 22 apresenta os fatores de equivalência propostos para caminhões leves e pesados.

Tabela 22 : Fatores de equivalência de veículos em filas de praças de pedágio

	Comprimento em Fila(m)	Fator de Equivalência - VPE
Veículos de Passeio	5,31	1,00
Caminhões Leves	15,20	2,86
Caminhões Pesados	20,18	3,80

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

Caminhões leves equivalem, como efeito nas filas de pedagiamento, a 2,86 veículos de passeio equivalentes - VPE. Caminhões pesados, devido aos seus comprimentos mais longos, equivalem a 3,80 VPEs.

A equivalência veicular será utilizada para a determinação do comprimento de filas equivalentes (em metros) e para a determinação das filas equivalentes (em VPEs). As duas formas de apresentação para filas foram correlacionadas com a percepção de desconforto e inconveniência obtidos através do modelo.

Para tanto, o próximo capítulo apresenta análises de níveis de serviço em praças de pedágio em função de comprimento de filas equivalentes (em metros) e de filas equivalentes (em VPEs).

6. NÍVEIS DE SERVIÇO EM PRAÇAS DE PEDÁGIO

Este capítulo possui o objetivo de apresentar análises para níveis de serviço em praças de pedágio. A análise foi realizada através da relação entre a percepção de qualidade do tráfego, obtida do modelo de regressão, e os indicadores (i) comprimento de filas equivalentes (em metros) e (ii) filas equivalentes (em veículos de passeio equivalentes).

O capítulo inicia com o processo de formulação para obtenção das filas equivalentes em praças de pedágio, após serão apresentadas tabelas contendo as análises dos níveis de serviço em praças. Ainda, foram tecidas considerações a respeito da escala de níveis de serviço proposta. Por fim, equivalentes veiculares operacionais foram obtidos, com o objetivo de padronizar os fluxos das modelagens realizadas, identificando a capacidade de processamento das praças do estudo.

6.1 FILAS EQUIVALENTES EM PRAÇAS DE PEDÁGIO

O indicador “comprimento das filas nas cabines de pedágio” foi escolhido para traduzir o conforto de usuários por possuir relação direta com os atrasos vivenciados em praças, além de ser parâmetro de fácil mensuração prática.

O comprimento das filas está diretamente relacionado com o número de veículos em fila e a composição do fluxo de tráfego. Fluxos que apresentam maiores frações de veículos pesados compõem filas com comprimentos equivalentes maiores. Neste sentido, filas equivalentes foram obtidas a partir (i) do tamanho das filas (variável FILA da modelagem, em n veículos quaisquer) e (ii) da composição do fluxo de tráfego (variável CAM da modelagem, em % de caminhões no fluxo).

Neste estudo, caminhões leves representaram $1/3$ do total de caminhões nos fluxos das modelagens, e caminhões pesados compuseram o restante de $2/3$ da parcela desta categoria nos fluxos. Assim, foi possível obter equação que relaciona diretamente o comprimento das filas equivalentes (em metros) com o tamanho das filas-FILAS e quantidade de caminhões no fluxo de tráfego-CAM. A equação 18 apresenta a relação

matemática entre comprimentos de filas equivalentes e as variáveis FILAS e CAM. A equação é composta por três parcelas, cada parcela representa a influência de uma categoria no comprimento das filas, com o comprimento do veículo específico e sua parcela no fluxo.

$$\text{ComprimentoFila} = 5,31[FILA(1-CAM)] + 15,20\left[FILA\left(CAM.\frac{2}{3}\right)\right] + 20,18\left[FILA\left(CAM.\frac{1}{3}\right)\right] \quad (18)$$

onde,

ComprimentoFila representa o “comprimento das filas equivalentes” [em metros]

FILA representa o “tamanho de fila nas cabines” [em *n* veículos quaisquer];

CAM representa a “quantidade de caminhões no fluxo” [em % de caminhões].

Realizando-se uma simplificação algébrica na equação 18, obtêm-se a forma a seguir:

$$\text{ComprimentoFila} = FILA(5,31 + 11,55.CAM) \quad (19)$$

Para a obtenção de VPEs - veículos de passeio equivalentes em fila, a equação 19 foi dividida pelo comprimento dos veículos de passeio (5,31 metros). Assim, a equação 20 apresenta a formulação para obtenção de VPEs em fila.

$$\text{VPEemFila} = FILA(1 + 2,17.CAM) \quad (20)$$

As equações 19 e 20 foram utilizadas para a obtenção dos comprimentos de filas equivalentes (em metros) e do número de VPEs em fila (em *n* VPEs). As informações sobre comprimentos de filas equivalentes e do número de VPEs em fila serão utilizadas no item seguinte para a composição de tabelas de níveis de serviço, que correlacionam informações de tamanhos de filas com a percepção de qualidade do tráfego obtida pelo modelo de regressão.

6.2 ANÁLISES DE NÍVEIS DE SERVIÇO EM PRAÇAS DE PEDÁGIO

As análises dos níveis de serviço em praças de pedágio propostas neste trabalho estão apresentadas em um conjunto de tabelas, que relacionam os indicadores de filas

equivalentes (em metros) e veículos equivalentes em fila (em VPE) com a percepção de qualidade do tráfego resultante do modelo de regressão.

O modelo de regressão possuiu como variáveis explicativas o tamanho médio das filas nas cabines – FILA (em n veículos), quantidade de caminhões no fluxo de tráfego – CAM (em % de caminhões) e o número de cabines na praça de pedágio – CAB (em n cabines). A variável de saída foi a “nota do cenário”, que busca representar a qualidade de tráfego percebida pelos usuários.

As variáveis explicativas do modelo devem ser utilizadas como segue:

- a) Variável FILA: a variável FILA representa a quantidade média de veículos nas filas de todas as cabines de pedágio abertas para atendimento, e todos os veículos devem ser contabilizados como uma unidade para a formação das filas;
- b) Variável CAB: a variável CAB representa o número de cabines da praça de pedágio a ser analisada. A abertura e fechamento das cabines de atendimento variam muito entre concessionárias, e dependem de preferências operacionais de cada administrador de praça. Porém, a variável CAB representa o número total de cabines disponíveis, abertas ou não, para atendimento. O número total de cabines determinará a área de manobras na chegada da praça;
- c) Variável CAM: a variável CAM representa a fração de veículos pesados no fluxo de tráfego, e deve ser utilizada na forma inteira de fração, como por exemplo, 1%=1, 2%=2, 4%=4, 7%=7, 10%=10, 13%=13, 17%=17, 25%=25.

A Tabela 23 apresenta a escala para classificação de níveis de serviço proposta na Figura 13 do item 4.4. Esta escala é composta por seis níveis, representados por letras que variam desde “A” até “F”, onde “A” caracteriza as melhores situações vivenciadas pelos usuários e “F” representa as piores situações, com grandes atrasos e filas longas.

Tabela 23 : Escala de níveis de serviço proposta

Nível de Serviço	Escala Proposta Nota Cenário
A	$7 > N \geq 6$
B	$6 > N \geq 5$
C	$5 > N \geq 4$
D	$4 > N \geq 3$
E	$3 > N \geq 2$
F	$2 > N \geq 1$

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

A Tabela 24 até a Tabela 33 apresentam as filas equivalentes (em metros e VPEs) e a percepção de qualidade do tráfego para diferentes composições de fluxo de tráfego, que foram variadas entre 0% e 80% de veículos pesados.

Para fins de melhor identificação nas tabelas, os valores para níveis de serviço receberam diferentes cores.

Tabela 24 : Relação entre percepção da qualidade do tráfego e comprimento de filas equivalentes (m) e VPEs em fila (n VPEs) - fluxos com 0% de caminhões

Veículos em Fila-FILA		0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	20	25	32
$VPE_{em\ Fila} = FILA(1 + 2,17.CAM)$																					
VPE em fila		0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	20	25	32
$ComprimentoFila = FILA(5,31 + 11,55.CAM)$																					
		Comprimento Médio de Fila Equivalente (m)																			
		2,66	5,31	10,62	15,93	21,24	26,55	31,86	37,17	42,48	47,79	53,10	58,41	63,72	69,03	74,34	79,65	84,96	106,20	132,75	169,92
Nº Cabines na Praça	1	6,72	6,29	5,59	5,03	4,56	4,16	3,82	3,52	3,25	3,02	2,82	2,64	2,48	2,33	2,20	2,09	1,99	1,67	1,42	1,22
	2	6,71	6,27	5,57	5,00	4,53	4,13	3,78	3,48	3,22	2,99	2,79	2,61	2,45	2,30	2,18	2,06	1,96	1,65	1,40	1,21
	3	6,70	6,26	5,55	4,98	4,50	4,10	3,75	3,45	3,19	2,96	2,75	2,58	2,42	2,27	2,15	2,04	1,94	1,63	1,39	1,20
	4	6,69	6,25	5,53	4,95	4,48	4,07	3,72	3,42	3,16	2,93	2,72	2,55	2,39	2,25	2,12	2,01	1,91	1,61	1,37	1,19
	5	6,68	6,23	5,51	4,93	4,45	4,04	3,69	3,39	3,13	2,90	2,69	2,52	2,36	2,22	2,10	1,99	1,89	1,59	1,36	1,18
	6	6,68	6,22	5,49	4,91	4,42	4,01	3,66	3,36	3,10	2,87	2,66	2,49	2,33	2,19	2,07	1,96	1,87	1,57	1,35	1,18
	7	6,67	6,21	5,47	4,88	4,39	3,98	3,63	3,33	3,06	2,84	2,64	2,46	2,30	2,17	2,05	1,94	1,84	1,55	1,33	1,17
	8	6,66	6,19	5,45	4,86	4,37	3,95	3,60	3,30	3,04	2,81	2,61	2,43	2,28	2,14	2,02	1,92	1,82	1,54	1,32	1,16
	9	6,65	6,18	5,43	4,83	4,34	3,92	3,57	3,27	3,01	2,78	2,58	2,41	2,25	2,12	2,00	1,89	1,80	1,52	1,31	1,15
	10	6,64	6,17	5,41	4,81	4,31	3,90	3,54	3,24	2,98	2,75	2,55	2,38	2,23	2,09	1,98	1,87	1,78	1,50	1,30	1,15
	11	6,64	6,16	5,39	4,78	4,29	3,87	3,51	3,21	2,95	2,72	2,53	2,35	2,20	2,07	1,95	1,85	1,76	1,49	1,29	1,14
	12	6,63	6,14	5,37	4,76	4,26	3,84	3,49	3,18	2,92	2,69	2,50	2,33	2,18	2,05	1,93	1,83	1,74	1,47	1,28	1,13
	13	6,62	6,13	5,35	4,74	4,23	3,81	3,46	3,15	2,89	2,67	2,47	2,30	2,15	2,02	1,91	1,81	1,72	1,46	1,27	1,13
	14	6,61	6,12	5,33	4,71	4,21	3,79	3,43	3,13	2,87	2,64	2,45	2,28	2,13	2,00	1,89	1,79	1,70	1,44	1,26	1,12
	15	6,61	6,11	5,31	4,69	4,18	3,76	3,40	3,10	2,84	2,62	2,42	2,25	2,11	1,98	1,87	1,77	1,68	1,43	1,25	1,12
	16	6,60	6,09	5,29	4,67	4,16	3,73	3,38	3,07	2,81	2,59	2,40	2,23	2,09	1,96	1,85	1,75	1,67	1,42	1,24	1,11
	17	6,59	6,08	5,27	4,64	4,13	3,71	3,35	3,05	2,79	2,56	2,37	2,21	2,06	1,94	1,83	1,73	1,65	1,40	1,23	1,10
	18	6,58	6,07	5,26	4,62	4,11	3,68	3,32	3,02	2,76	2,54	2,35	2,18	2,04	1,92	1,81	1,72	1,63	1,39	1,22	1,10
	19	6,58	6,06	5,24	4,60	4,08	3,65	3,30	2,99	2,74	2,52	2,33	2,16	2,02	1,90	1,79	1,70	1,62	1,38	1,21	1,10
	20	6,57	6,04	5,22	4,58	4,06	3,63	3,27	2,97	2,71	2,49	2,30	2,14	2,00	1,88	1,77	1,68	1,60	1,37	1,20	1,09
	21	6,56	6,03	5,20	4,55	4,03	3,60	3,24	2,94	2,69	2,47	2,28	2,12	1,98	1,86	1,76	1,66	1,59	1,36	1,20	1,09
	22	6,55	6,02	5,18	4,53	4,01	3,58	3,22	2,92	2,66	2,44	2,26	2,10	1,96	1,84	1,74	1,65	1,57	1,35	1,19	1,08
	23	6,55	6,01	5,16	4,51	3,98	3,55	3,19	2,89	2,64	2,42	2,24	2,08	1,94	1,82	1,72	1,63	1,56	1,33	1,18	1,08
	24	6,54	5,99	5,14	4,49	3,96	3,53	3,17	2,87	2,61	2,40	2,21	2,06	1,92	1,81	1,70	1,62	1,54	1,32	1,17	1,08
	25	6,53	5,98	5,12	4,46	3,94	3,50	3,14	2,84	2,59	2,38	2,19	2,04	1,90	1,79	1,69	1,60	1,53	1,31	1,17	1,07

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

Tabela 25 : Relação entre percepção da qualidade do tráfego e comprimento de filas equivalentes (m) e VPEs em fila (n VPEs) - fluxos com 1,5% de caminhões

Veículos em Fila-FILA		0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	20	25	32
$VPE_{em\ Fila} = FILA(1 + 2,17.CAM)$																					
VPE em fila		0,52	1,03	2,07	3,10	4,13	5,16	6,20	7,23	8,26	9,29	10,33	11,36	12,39	13,42	14,46	15,49	16,52	20,65	25,81	33,04
$ComprimentoFila = FILA(5,31 + 11,55.CAM)$																					
		Comprimento Médio de Fila Equivalente (m)																			
		2,74	5,48	10,97	16,45	21,93	27,42	32,90	38,38	43,87	49,35	54,83	60,32	65,80	71,28	76,77	82,25	87,73	109,67	137,08	175,46
Nº Cabines na Praça	1	6,71	6,27	5,57	5,00	4,53	4,13	3,78	3,48	3,21	2,98	2,78	2,60	2,44	2,30	2,17	2,06	1,96	1,65	1,40	1,21
	2	6,70	6,26	5,55	4,98	4,50	4,09	3,75	3,45	3,18	2,95	2,75	2,57	2,41	2,27	2,14	2,03	1,93	1,63	1,39	1,20
	3	6,69	6,24	5,53	4,95	4,47	4,06	3,72	3,41	3,15	2,92	2,72	2,54	2,38	2,24	2,12	2,01	1,91	1,61	1,37	1,19
	4	6,68	6,23	5,51	4,93	4,44	4,04	3,69	3,38	3,12	2,89	2,69	2,51	2,35	2,22	2,09	1,98	1,89	1,59	1,36	1,18
	5	6,67	6,22	5,49	4,90	4,42	4,01	3,66	3,35	3,09	2,86	2,66	2,48	2,33	2,19	2,07	1,96	1,86	1,57	1,34	1,17
	6	6,67	6,21	5,47	4,88	4,39	3,98	3,63	3,32	3,06	2,83	2,63	2,46	2,30	2,16	2,04	1,94	1,84	1,55	1,33	1,17
	7	6,66	6,19	5,45	4,85	4,36	3,95	3,60	3,29	3,03	2,80	2,60	2,43	2,27	2,14	2,02	1,91	1,82	1,53	1,32	1,16
	8	6,65	6,18	5,43	4,83	4,33	3,92	3,57	3,26	3,00	2,77	2,57	2,40	2,25	2,11	2,00	1,89	1,80	1,52	1,31	1,15
	9	6,64	6,17	5,41	4,80	4,31	3,89	3,54	3,23	2,97	2,75	2,55	2,37	2,22	2,09	1,97	1,87	1,78	1,50	1,30	1,14
	10	6,64	6,15	5,39	4,78	4,28	3,86	3,51	3,21	2,94	2,72	2,52	2,35	2,20	2,07	1,95	1,85	1,76	1,49	1,28	1,14
	11	6,63	6,14	5,37	4,76	4,26	3,84	3,48	3,18	2,92	2,69	2,49	2,32	2,17	2,04	1,93	1,83	1,74	1,47	1,27	1,13
	12	6,62	6,13	5,35	4,73	4,23	3,81	3,45	3,15	2,89	2,66	2,47	2,30	2,15	2,02	1,91	1,81	1,72	1,46	1,26	1,13
	13	6,61	6,12	5,33	4,71	4,20	3,78	3,42	3,12	2,86	2,64	2,44	2,27	2,13	2,00	1,89	1,79	1,70	1,44	1,25	1,12
	14	6,61	6,10	5,31	4,69	4,18	3,75	3,40	3,09	2,83	2,61	2,42	2,25	2,10	1,98	1,87	1,77	1,68	1,43	1,24	1,11
	15	6,60	6,09	5,29	4,66	4,15	3,73	3,37	3,07	2,81	2,59	2,39	2,23	2,08	1,96	1,85	1,75	1,66	1,42	1,24	1,11
	16	6,59	6,08	5,27	4,64	4,13	3,70	3,34	3,04	2,78	2,56	2,37	2,20	2,06	1,93	1,83	1,73	1,65	1,40	1,23	1,10
	17	6,58	6,07	5,25	4,62	4,10	3,68	3,32	3,01	2,76	2,54	2,35	2,18	2,04	1,91	1,81	1,71	1,63	1,39	1,22	1,10
	18	6,57	6,05	5,23	4,59	4,08	3,65	3,29	2,99	2,73	2,51	2,32	2,16	2,02	1,89	1,79	1,70	1,61	1,38	1,21	1,09
	19	6,57	6,04	5,21	4,57	4,05	3,62	3,27	2,96	2,71	2,49	2,30	2,14	2,00	1,88	1,77	1,68	1,60	1,37	1,20	1,09
	20	6,56	6,03	5,20	4,55	4,03	3,60	3,24	2,94	2,68	2,46	2,28	2,12	1,98	1,86	1,75	1,66	1,58	1,35	1,19	1,09
	21	6,55	6,02	5,18	4,53	4,00	3,57	3,21	2,91	2,66	2,44	2,25	2,09	1,96	1,84	1,74	1,65	1,57	1,34	1,19	1,08
	22	6,54	6,00	5,16	4,51	3,98	3,55	3,19	2,89	2,63	2,42	2,23	2,07	1,94	1,82	1,72	1,63	1,55	1,33	1,18	1,08
	23	6,54	5,99	5,14	4,48	3,96	3,52	3,16	2,86	2,61	2,39	2,21	2,05	1,92	1,80	1,70	1,61	1,54	1,32	1,17	1,07
	24	6,53	5,98	5,12	4,46	3,93	3,50	3,14	2,84	2,59	2,37	2,19	2,03	1,90	1,78	1,69	1,60	1,52	1,31	1,17	1,07
	25	6,52	5,97	5,10	4,44	3,91	3,48	3,12	2,82	2,56	2,35	2,17	2,01	1,88	1,77	1,67	1,58	1,51	1,30	1,16	1,07

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

Tabela 26 : Relação entre percepção da qualidade do tráfego e comprimento de filas equivalentes (m) e VPEs em fila (n VPEs) - fluxos com 3% de caminhões

Veículos em Fila-FILA		0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	20	25	32
$VPEemFila = FILA(1 + 2,17.CAM)$																					
VPE em fila		0,53	1,07	2,13	3,20	4,26	5,33	6,39	7,46	8,52	9,59	10,65	11,72	12,78	13,85	14,91	15,98	17,04	21,30	26,63	34,08
$ComprimentoFila = FILA(5,31 + 11,55.CAM)$																					
		Comprimento Médio de Fila Equivalente (m)																			
		2,83	5,66	11,31	16,97	22,63	28,28	33,94	39,60	45,25	50,91	56,57	62,22	67,88	73,53	79,19	84,85	90,50	113,13	141,41	181,01
Nº Cabines na Praça	1	6,70	6,25	5,54	4,97	4,49	4,09	3,74	3,44	3,18	2,95	2,74	2,57	2,41	2,27	2,14	2,03	1,93	1,62	1,38	1,20
	2	6,69	6,24	5,52	4,95	4,47	4,06	3,71	3,41	3,15	2,92	2,71	2,54	2,38	2,24	2,11	2,00	1,90	1,60	1,37	1,19
	3	6,68	6,23	5,50	4,92	4,44	4,03	3,68	3,38	3,12	2,89	2,68	2,51	2,35	2,21	2,09	1,98	1,88	1,58	1,36	1,18
	4	6,67	6,22	5,48	4,90	4,41	4,00	3,65	3,35	3,09	2,86	2,66	2,48	2,32	2,19	2,06	1,95	1,86	1,57	1,34	1,17
	5	6,67	6,20	5,46	4,87	4,38	3,97	3,62	3,32	3,06	2,83	2,63	2,45	2,30	2,16	2,04	1,93	1,84	1,55	1,33	1,17
	6	6,66	6,19	5,44	4,85	4,36	3,94	3,59	3,29	3,03	2,80	2,60	2,42	2,27	2,13	2,01	1,91	1,81	1,53	1,32	1,16
	7	6,65	6,18	5,42	4,82	4,33	3,91	3,56	3,26	3,00	2,77	2,57	2,40	2,24	2,11	1,99	1,89	1,79	1,52	1,31	1,15
	8	6,64	6,16	5,40	4,80	4,30	3,89	3,53	3,23	2,97	2,74	2,54	2,37	2,22	2,09	1,97	1,86	1,77	1,50	1,29	1,14
	9	6,63	6,15	5,38	4,78	4,28	3,86	3,50	3,20	2,94	2,71	2,52	2,34	2,19	2,06	1,95	1,84	1,75	1,48	1,28	1,14
	10	6,63	6,14	5,36	4,75	4,25	3,83	3,48	3,17	2,91	2,69	2,49	2,32	2,17	2,04	1,92	1,82	1,73	1,47	1,27	1,13
	11	6,62	6,13	5,34	4,73	4,22	3,80	3,45	3,14	2,88	2,66	2,46	2,29	2,15	2,02	1,90	1,80	1,72	1,45	1,26	1,12
	12	6,61	6,11	5,33	4,71	4,20	3,78	3,42	3,12	2,86	2,63	2,44	2,27	2,12	1,99	1,88	1,78	1,70	1,44	1,25	1,12
	13	6,60	6,10	5,31	4,68	4,17	3,75	3,39	3,09	2,83	2,61	2,41	2,25	2,10	1,97	1,86	1,76	1,68	1,43	1,24	1,11
	14	6,60	6,09	5,29	4,66	4,15	3,72	3,37	3,06	2,80	2,58	2,39	2,22	2,08	1,95	1,84	1,75	1,66	1,41	1,23	1,11
	15	6,59	6,08	5,27	4,64	4,12	3,70	3,34	3,04	2,78	2,56	2,37	2,20	2,06	1,93	1,82	1,73	1,64	1,40	1,22	1,10
	16	6,58	6,06	5,25	4,61	4,10	3,67	3,31	3,01	2,75	2,53	2,34	2,18	2,04	1,91	1,80	1,71	1,63	1,39	1,22	1,10
	17	6,57	6,05	5,23	4,59	4,07	3,64	3,29	2,98	2,73	2,51	2,32	2,16	2,01	1,89	1,79	1,69	1,61	1,38	1,21	1,09
	18	6,57	6,04	5,21	4,57	4,05	3,62	3,26	2,96	2,70	2,48	2,30	2,13	1,99	1,87	1,77	1,68	1,60	1,36	1,20	1,09
	19	6,56	6,03	5,19	4,55	4,02	3,59	3,24	2,93	2,68	2,46	2,27	2,11	1,97	1,85	1,75	1,66	1,58	1,35	1,19	1,09
	20	6,55	6,01	5,17	4,52	4,00	3,57	3,21	2,91	2,65	2,44	2,25	2,09	1,95	1,84	1,73	1,64	1,57	1,34	1,19	1,08
	21	6,54	6,00	5,16	4,50	3,98	3,54	3,19	2,88	2,63	2,41	2,23	2,07	1,93	1,82	1,72	1,63	1,55	1,33	1,18	1,08
	22	6,54	5,99	5,14	4,48	3,95	3,52	3,16	2,86	2,61	2,39	2,21	2,05	1,92	1,80	1,70	1,61	1,54	1,32	1,17	1,07
	23	6,53	5,98	5,12	4,46	3,93	3,50	3,14	2,84	2,58	2,37	2,19	2,03	1,90	1,78	1,68	1,60	1,52	1,31	1,17	1,07
	24	6,52	5,96	5,10	4,44	3,90	3,47	3,11	2,81	2,56	2,35	2,17	2,01	1,88	1,77	1,67	1,58	1,51	1,30	1,16	1,07
	25	6,51	5,95	5,08	4,41	3,88	3,45	3,09	2,79	2,54	2,33	2,15	1,99	1,86	1,75	1,65	1,57	1,50	1,29	1,15	1,06

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

Tabela 27 : Relação entre percepção da qualidade do tráfego e comprimento de filas equivalentes (m) e VPEs em fila (n VPEs) - fluxos com 5% de caminhões

Veículos em Fila-FILA		0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	20	25	32
$VPEemFila = FILA(1 + 2,17.CAM)$																					
VPE em fila		0,55	1,11	2,22	3,33	4,43	5,54	6,65	7,76	8,87	9,98	11,09	12,19	13,30	14,41	15,52	16,63	17,74	22,17	27,71	35,47
$ComprimentoFila = FILA(5,31 + 11,55.CAM)$																					
		Comprimento Médio de Fila Equivalente (m)																			
		2,94	5,89	11,78	17,66	23,55	29,44	35,33	41,21	47,10	52,99	58,88	64,76	70,65	76,54	82,43	88,31	94,20	117,75	147,19	188,40
Nº Cabines na Praça	1	6,68	6,23	5,51	4,93	4,45	4,04	3,69	3,39	3,13	2,90	2,70	2,52	2,36	2,22	2,10	1,99	1,89	1,59	1,36	1,19
	2	6,68	6,22	5,49	4,91	4,42	4,01	3,66	3,36	3,10	2,87	2,67	2,49	2,33	2,20	2,07	1,97	1,87	1,57	1,35	1,18
	3	6,67	6,21	5,47	4,88	4,40	3,98	3,63	3,33	3,07	2,84	2,64	2,46	2,31	2,17	2,05	1,94	1,85	1,56	1,34	1,17
	4	6,66	6,20	5,45	4,86	4,37	3,96	3,60	3,30	3,04	2,81	2,61	2,44	2,28	2,15	2,03	1,92	1,82	1,54	1,32	1,16
	5	6,65	6,18	5,43	4,83	4,34	3,93	3,57	3,27	3,01	2,78	2,58	2,41	2,26	2,12	2,00	1,90	1,80	1,52	1,31	1,15
	6	6,65	6,17	5,41	4,81	4,32	3,90	3,55	3,24	2,98	2,75	2,56	2,38	2,23	2,10	1,98	1,87	1,78	1,51	1,30	1,15
	7	6,64	6,16	5,39	4,79	4,29	3,87	3,52	3,21	2,95	2,73	2,53	2,36	2,21	2,07	1,96	1,85	1,76	1,49	1,29	1,14
	8	6,63	6,14	5,37	4,76	4,26	3,84	3,49	3,18	2,92	2,70	2,50	2,33	2,18	2,05	1,93	1,83	1,74	1,48	1,28	1,13
	9	6,62	6,13	5,35	4,74	4,24	3,82	3,46	3,16	2,90	2,67	2,48	2,31	2,16	2,03	1,91	1,81	1,72	1,46	1,27	1,13
	10	6,61	6,12	5,33	4,72	4,21	3,79	3,43	3,13	2,87	2,64	2,45	2,28	2,13	2,00	1,89	1,79	1,70	1,45	1,26	1,12
	11	6,61	6,11	5,31	4,69	4,18	3,76	3,41	3,10	2,84	2,62	2,42	2,26	2,11	1,98	1,87	1,77	1,69	1,43	1,25	1,12
	12	6,60	6,09	5,30	4,67	4,16	3,73	3,38	3,07	2,82	2,59	2,40	2,23	2,09	1,96	1,85	1,75	1,67	1,42	1,24	1,11
	13	6,59	6,08	5,28	4,65	4,13	3,71	3,35	3,05	2,79	2,57	2,38	2,21	2,07	1,94	1,83	1,74	1,65	1,41	1,23	1,11
	14	6,58	6,07	5,26	4,62	4,11	3,68	3,32	3,02	2,76	2,54	2,35	2,19	2,04	1,92	1,81	1,72	1,63	1,39	1,22	1,10
	15	6,58	6,06	5,24	4,60	4,08	3,66	3,30	3,00	2,74	2,52	2,33	2,16	2,02	1,90	1,79	1,70	1,62	1,38	1,21	1,10
	16	6,57	6,04	5,22	4,58	4,06	3,63	3,27	2,97	2,71	2,49	2,31	2,14	2,00	1,88	1,78	1,68	1,60	1,37	1,20	1,09
	17	6,56	6,03	5,20	4,56	4,03	3,61	3,25	2,94	2,69	2,47	2,28	2,12	1,98	1,86	1,76	1,67	1,59	1,36	1,20	1,09
	18	6,55	6,02	5,18	4,53	4,01	3,58	3,22	2,92	2,66	2,45	2,26	2,10	1,96	1,84	1,74	1,65	1,57	1,35	1,19	1,08
	19	6,55	6,01	5,16	4,51	3,99	3,56	3,20	2,90	2,64	2,42	2,24	2,08	1,94	1,82	1,72	1,63	1,56	1,34	1,18	1,08
	20	6,54	5,99	5,15	4,49	3,96	3,53	3,17	2,87	2,62	2,40	2,22	2,06	1,92	1,81	1,71	1,62	1,54	1,33	1,18	1,08
	21	6,53	5,98	5,13	4,47	3,94	3,51	3,15	2,85	2,59	2,38	2,20	2,04	1,91	1,79	1,69	1,60	1,53	1,32	1,17	1,07
	22	6,52	5,97	5,11	4,45	3,92	3,48	3,12	2,82	2,57	2,36	2,18	2,02	1,89	1,77	1,67	1,59	1,52	1,31	1,16	1,07
	23	6,52	5,96	5,09	4,42	3,89	3,46	3,10	2,80	2,55	2,34	2,15	2,00	1,87	1,76	1,66	1,57	1,50	1,30	1,16	1,07
	24	6,51	5,95	5,07	4,40	3,87	3,43	3,08	2,78	2,53	2,31	2,13	1,98	1,85	1,74	1,64	1,56	1,49	1,29	1,15	1,06
	25	6,50	5,93	5,05	4,38	3,85	3,41	3,05	2,75	2,50	2,29	2,12	1,96	1,83	1,72	1,63	1,55	1,48	1,28	1,14	1,06

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

Tabela 28 : Relação entre percepção da qualidade do tráfego e comprimento de filas equivalentes (m) e VPEs em fila (n VPEs) - fluxos com 7,5% de caminhões

Veículos em Fila-FILA		0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	20	25	32
$VPEemFila = FILA(1 + 2,17.CAM)$																					
VPE em fila		0,58	1,16	2,33	3,49	4,65	5,81	6,98	8,14	9,30	10,46	11,63	12,79	13,95	15,12	16,28	17,44	18,60	23,26	29,07	37,21
$ComprimentoFila = FILA(5,31 + 11,55.CAM)$																					
		Comprimento Médio de Fila Equivalente (m)																			
		3,09	6,18	12,35	18,53	24,71	30,88	37,06	43,23	49,41	55,59	61,76	67,94	74,12	80,29	86,47	92,64	98,82	123,53	154,41	197,64
Nº Cabines na Praça	1	6,67	6,21	5,47	4,88	4,40	3,99	3,64	3,33	3,07	2,84	2,64	2,46	2,31	2,17	2,05	1,94	1,85	1,56	1,34	1,17
	2	6,66	6,20	5,45	4,86	4,37	3,96	3,61	3,30	3,04	2,81	2,61	2,44	2,28	2,15	2,03	1,92	1,83	1,54	1,32	1,16
	3	6,65	6,18	5,43	4,84	4,34	3,93	3,58	3,27	3,01	2,78	2,58	2,41	2,26	2,12	2,00	1,90	1,80	1,52	1,31	1,15
	4	6,65	6,17	5,41	4,81	4,32	3,90	3,55	3,24	2,98	2,75	2,56	2,38	2,23	2,10	1,98	1,88	1,78	1,51	1,30	1,15
	5	6,64	6,16	5,39	4,79	4,29	3,87	3,52	3,21	2,95	2,73	2,53	2,36	2,21	2,07	1,96	1,85	1,76	1,49	1,29	1,14
	6	6,63	6,15	5,37	4,76	4,26	3,84	3,49	3,19	2,93	2,70	2,50	2,33	2,18	2,05	1,94	1,83	1,74	1,48	1,28	1,13
	7	6,62	6,13	5,35	4,74	4,24	3,82	3,46	3,16	2,90	2,67	2,48	2,31	2,16	2,03	1,91	1,81	1,72	1,46	1,27	1,13
	8	6,62	6,12	5,34	4,72	4,21	3,79	3,43	3,13	2,87	2,65	2,45	2,28	2,13	2,01	1,89	1,79	1,71	1,45	1,26	1,12
	9	6,61	6,11	5,32	4,69	4,19	3,76	3,41	3,10	2,84	2,62	2,43	2,26	2,11	1,98	1,87	1,77	1,69	1,43	1,25	1,12
	10	6,60	6,09	5,30	4,67	4,16	3,74	3,38	3,08	2,82	2,59	2,40	2,23	2,09	1,96	1,85	1,76	1,67	1,42	1,24	1,11
	11	6,59	6,08	5,28	4,65	4,14	3,71	3,35	3,05	2,79	2,57	2,38	2,21	2,07	1,94	1,83	1,74	1,65	1,41	1,23	1,11
	12	6,58	6,07	5,26	4,62	4,11	3,68	3,33	3,02	2,77	2,54	2,35	2,19	2,05	1,92	1,81	1,72	1,64	1,39	1,22	1,10
	13	6,58	6,06	5,24	4,60	4,09	3,66	3,30	3,00	2,74	2,52	2,33	2,17	2,02	1,90	1,79	1,70	1,62	1,38	1,21	1,10
	14	6,57	6,04	5,22	4,58	4,06	3,63	3,27	2,97	2,71	2,50	2,31	2,14	2,00	1,88	1,78	1,68	1,60	1,37	1,20	1,09
	15	6,56	6,03	5,20	4,56	4,04	3,61	3,25	2,95	2,69	2,47	2,28	2,12	1,98	1,86	1,76	1,67	1,59	1,36	1,20	1,09
	16	6,55	6,02	5,18	4,53	4,01	3,58	3,22	2,92	2,67	2,45	2,26	2,10	1,96	1,84	1,74	1,65	1,57	1,35	1,19	1,08
	17	6,55	6,01	5,16	4,51	3,99	3,56	3,20	2,90	2,64	2,42	2,24	2,08	1,94	1,83	1,72	1,64	1,56	1,34	1,18	1,08
	18	6,54	6,00	5,15	4,49	3,96	3,53	3,17	2,87	2,62	2,40	2,22	2,06	1,92	1,81	1,71	1,62	1,54	1,33	1,18	1,08
	19	6,53	5,98	5,13	4,47	3,94	3,51	3,15	2,85	2,59	2,38	2,20	2,04	1,91	1,79	1,69	1,60	1,53	1,32	1,17	1,07
	20	6,52	5,97	5,11	4,45	3,92	3,48	3,12	2,82	2,57	2,36	2,18	2,02	1,89	1,77	1,67	1,59	1,52	1,31	1,16	1,07
	21	6,52	5,96	5,09	4,43	3,89	3,46	3,10	2,80	2,55	2,34	2,16	2,00	1,87	1,76	1,66	1,58	1,50	1,30	1,16	1,07
	22	6,51	5,95	5,07	4,40	3,87	3,44	3,08	2,78	2,53	2,32	2,14	1,98	1,85	1,74	1,64	1,56	1,49	1,29	1,15	1,06
	23	6,50	5,93	5,05	4,38	3,85	3,41	3,05	2,75	2,51	2,29	2,12	1,96	1,84	1,72	1,63	1,55	1,48	1,28	1,15	1,06
	24	6,49	5,92	5,04	4,36	3,82	3,39	3,03	2,73	2,48	2,27	2,10	1,95	1,82	1,71	1,61	1,53	1,46	1,27	1,14	1,06
	25	6,49	5,91	5,02	4,34	3,80	3,37	3,01	2,71	2,46	2,25	2,08	1,93	1,80	1,69	1,60	1,52	1,45	1,26	1,13	1,05

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

Tabela 29 : Relação entre percepção da qualidade do tráfego e comprimento de filas equivalentes (m) e VPEs em fila (n VPEs) - fluxos com 15% de caminhões

Veículos em Fila-FILA		0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	20	25	32
$VPE_{em\ Fila} = FILA(1 + 2,17.CAM)$																					
VPE em fila		0,66	1,33	2,65	3,98	5,30	6,63	7,95	9,28	10,60	11,93	13,26	14,58	15,91	17,23	18,56	19,88	21,21	26,51	33,14	42,42
$ComprimentoFila = FILA(5,31 + 11,55.CAM)$																					
Comprimento Médio de Fila Equivalente (m)																					
		3,52	7,04	14,09	21,13	28,17	35,21	42,26	49,30	56,34	63,38	70,43	77,47	84,51	91,55	98,60	105,64	112,68	140,85	176,06	225,36
Nº Cabines na Praça	1	6,62	6,13	5,36	4,74	4,24	3,82	3,47	3,16	2,90	2,68	2,48	2,31	2,16	2,03	1,92	1,82	1,73	1,46	1,27	1,13
	2	6,62	6,12	5,34	4,72	4,22	3,79	3,44	3,14	2,87	2,65	2,46	2,29	2,14	2,01	1,90	1,80	1,71	1,45	1,26	1,12
	3	6,61	6,11	5,32	4,70	4,19	3,77	3,41	3,11	2,85	2,62	2,43	2,26	2,12	1,99	1,88	1,78	1,69	1,44	1,25	1,12
	4	6,60	6,10	5,30	4,67	4,16	3,74	3,38	3,08	2,82	2,60	2,41	2,24	2,09	1,97	1,86	1,76	1,67	1,42	1,24	1,11
	5	6,59	6,08	5,28	4,65	4,14	3,71	3,36	3,05	2,80	2,57	2,38	2,22	2,07	1,95	1,84	1,74	1,66	1,41	1,23	1,11
	6	6,59	6,07	5,26	4,63	4,11	3,69	3,33	3,03	2,77	2,55	2,36	2,19	2,05	1,92	1,82	1,72	1,64	1,40	1,22	1,10
	7	6,58	6,06	5,24	4,61	4,09	3,66	3,30	3,00	2,74	2,52	2,33	2,17	2,03	1,90	1,80	1,70	1,62	1,38	1,21	1,10
	8	6,57	6,05	5,22	4,58	4,06	3,64	3,28	2,98	2,72	2,50	2,31	2,15	2,01	1,89	1,78	1,69	1,61	1,37	1,21	1,09
	9	6,56	6,03	5,21	4,56	4,04	3,61	3,25	2,95	2,69	2,48	2,29	2,13	1,99	1,87	1,76	1,67	1,59	1,36	1,20	1,09
	10	6,56	6,02	5,19	4,54	4,02	3,59	3,23	2,93	2,67	2,45	2,27	2,11	1,97	1,85	1,74	1,65	1,58	1,35	1,19	1,08
	11	6,55	6,01	5,17	4,52	3,99	3,56	3,20	2,90	2,65	2,43	2,24	2,08	1,95	1,83	1,73	1,64	1,56	1,34	1,18	1,08
	12	6,54	6,00	5,15	4,49	3,97	3,54	3,18	2,88	2,62	2,41	2,22	2,06	1,93	1,81	1,71	1,62	1,55	1,33	1,18	1,08
	13	6,53	5,98	5,13	4,47	3,94	3,51	3,15	2,85	2,60	2,38	2,20	2,04	1,91	1,79	1,69	1,61	1,53	1,32	1,17	1,07
	14	6,52	5,97	5,11	4,45	3,92	3,49	3,13	2,83	2,58	2,36	2,18	2,02	1,89	1,78	1,68	1,59	1,52	1,31	1,16	1,07
	15	6,52	5,96	5,09	4,43	3,90	3,46	3,10	2,80	2,55	2,34	2,16	2,00	1,87	1,76	1,66	1,58	1,50	1,30	1,16	1,07
	16	6,51	5,95	5,08	4,41	3,87	3,44	3,08	2,78	2,53	2,32	2,14	1,99	1,86	1,74	1,65	1,56	1,49	1,29	1,15	1,06
	17	6,50	5,94	5,06	4,39	3,85	3,42	3,06	2,76	2,51	2,30	2,12	1,97	1,84	1,73	1,63	1,55	1,48	1,28	1,15	1,06
	18	6,49	5,92	5,04	4,36	3,83	3,39	3,03	2,74	2,49	2,28	2,10	1,95	1,82	1,71	1,62	1,54	1,47	1,27	1,14	1,06
	19	6,49	5,91	5,02	4,34	3,81	3,37	3,01	2,71	2,47	2,26	2,08	1,93	1,80	1,70	1,60	1,52	1,45	1,26	1,14	1,06
	20	6,48	5,90	5,00	4,32	3,78	3,35	2,99	2,69	2,44	2,24	2,06	1,91	1,79	1,68	1,59	1,51	1,44	1,25	1,13	1,05
	21	6,47	5,89	4,99	4,30	3,76	3,32	2,97	2,67	2,42	2,22	2,04	1,90	1,77	1,67	1,58	1,50	1,43	1,25	1,13	1,05
	22	6,46	5,88	4,97	4,28	3,74	3,30	2,94	2,65	2,40	2,20	2,03	1,88	1,76	1,65	1,56	1,49	1,42	1,24	1,12	1,05
	23	6,46	5,86	4,95	4,26	3,72	3,28	2,92	2,63	2,38	2,18	2,01	1,86	1,74	1,64	1,55	1,47	1,41	1,23	1,12	1,05
	24	6,45	5,85	4,93	4,24	3,69	3,26	2,90	2,61	2,36	2,16	1,99	1,85	1,73	1,62	1,54	1,46	1,40	1,22	1,11	1,04
	25	6,44	5,84	4,92	4,22	3,67	3,24	2,88	2,59	2,34	2,14	1,97	1,83	1,71	1,61	1,52	1,45	1,39	1,22	1,11	1,04

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

Tabela 30 : Relação entre percepção da qualidade do tráfego e comprimento de filas equivalentes (m) e VPEs em fila (n VPEs) - fluxos com 30% de caminhões

Veículos em Fila-FILA		0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	20	25	32
$VPE_{em\ Fila} = FILA(1 + 2,17.CAM)$																					
VPE em fila		0,83	1,65	3,30	4,95	6,60	8,26	9,91	11,56	13,21	14,86	16,51	18,16	19,81	21,46	23,11	24,77	26,42	33,02	41,28	52,83
$ComprimentoFila = FILA(5,31 + 11,55.CAM)$																					
		Comprimento Médio de Fila Equivalente (m)																			
		4,39	8,78	17,55	26,33	35,10	43,88	52,65	61,43	70,20	78,98	87,75	96,53	105,30	114,08	122,85	131,63	140,40	175,50	219,38	280,80
Nº Cabines na Praça	1	6,54	5,99	5,14	4,48	3,95	3,52	3,16	2,86	2,61	2,39	2,21	2,05	1,92	1,80	1,70	1,61	1,54	1,32	1,17	1,07
	2	6,53	5,98	5,12	4,46	3,93	3,50	3,14	2,84	2,58	2,37	2,19	2,03	1,90	1,78	1,68	1,60	1,52	1,31	1,17	1,07
	3	6,52	5,96	5,10	4,44	3,90	3,47	3,11	2,81	2,56	2,35	2,17	2,01	1,88	1,77	1,67	1,58	1,51	1,30	1,16	1,07
	4	6,51	5,95	5,08	4,41	3,88	3,45	3,09	2,79	2,54	2,33	2,15	1,99	1,86	1,75	1,65	1,57	1,50	1,29	1,15	1,06
	5	6,50	5,94	5,06	4,39	3,86	3,42	3,06	2,77	2,52	2,30	2,13	1,97	1,84	1,73	1,64	1,55	1,48	1,28	1,15	1,06
	6	6,50	5,93	5,05	4,37	3,84	3,40	3,04	2,74	2,49	2,28	2,11	1,96	1,83	1,72	1,62	1,54	1,47	1,27	1,14	1,06
	7	6,49	5,92	5,03	4,35	3,81	3,38	3,02	2,72	2,47	2,26	2,09	1,94	1,81	1,70	1,61	1,53	1,46	1,27	1,14	1,06
	8	6,48	5,90	5,01	4,33	3,79	3,35	3,00	2,70	2,45	2,24	2,07	1,92	1,79	1,69	1,59	1,51	1,45	1,26	1,13	1,05
	9	6,47	5,89	4,99	4,31	3,77	3,33	2,97	2,68	2,43	2,22	2,05	1,90	1,78	1,67	1,58	1,50	1,44	1,25	1,13	1,05
	10	6,47	5,88	4,97	4,29	3,75	3,31	2,95	2,66	2,41	2,20	2,03	1,89	1,76	1,66	1,57	1,49	1,42	1,24	1,12	1,05
	11	6,46	5,87	4,96	4,27	3,72	3,29	2,93	2,63	2,39	2,19	2,01	1,87	1,75	1,64	1,55	1,48	1,41	1,23	1,12	1,05
	12	6,45	5,85	4,94	4,25	3,70	3,26	2,91	2,61	2,37	2,17	2,00	1,85	1,73	1,63	1,54	1,47	1,40	1,23	1,11	1,04
	13	6,44	5,84	4,92	4,23	3,68	3,24	2,89	2,59	2,35	2,15	1,98	1,84	1,72	1,61	1,53	1,45	1,39	1,22	1,11	1,04
	14	6,44	5,83	4,90	4,21	3,66	3,22	2,86	2,57	2,33	2,13	1,96	1,82	1,70	1,60	1,52	1,44	1,38	1,21	1,10	1,04
	15	6,43	5,82	4,89	4,19	3,64	3,20	2,84	2,55	2,31	2,11	1,95	1,81	1,69	1,59	1,50	1,43	1,37	1,21	1,10	1,04
	16	6,42	5,81	4,87	4,17	3,62	3,18	2,82	2,53	2,29	2,09	1,93	1,79	1,67	1,58	1,49	1,42	1,36	1,20	1,10	1,04
	17	6,41	5,80	4,85	4,15	3,60	3,16	2,80	2,51	2,27	2,08	1,91	1,78	1,66	1,56	1,48	1,41	1,35	1,19	1,09	1,04
	18	6,41	5,78	4,83	4,13	3,57	3,14	2,78	2,49	2,26	2,06	1,90	1,76	1,65	1,55	1,47	1,40	1,34	1,19	1,09	1,03
	19	6,40	5,77	4,82	4,11	3,55	3,12	2,76	2,47	2,24	2,04	1,88	1,75	1,63	1,54	1,46	1,39	1,34	1,18	1,09	1,03
	20	6,39	5,76	4,80	4,09	3,53	3,09	2,74	2,45	2,22	2,03	1,87	1,73	1,62	1,53	1,45	1,38	1,33	1,18	1,08	1,03
	21	6,39	5,75	4,78	4,07	3,51	3,07	2,72	2,44	2,20	2,01	1,85	1,72	1,61	1,52	1,44	1,37	1,32	1,17	1,08	1,03
	22	6,38	5,74	4,77	4,05	3,49	3,05	2,70	2,42	2,19	1,99	1,84	1,71	1,60	1,50	1,43	1,36	1,31	1,17	1,08	1,03
	23	6,37	5,72	4,75	4,03	3,47	3,03	2,68	2,40	2,17	1,98	1,82	1,69	1,58	1,49	1,42	1,36	1,30	1,16	1,07	1,03
	24	6,36	5,71	4,73	4,01	3,45	3,02	2,66	2,38	2,15	1,96	1,81	1,68	1,57	1,48	1,41	1,35	1,29	1,16	1,07	1,03
	25	6,36	5,70	4,72	3,99	3,43	3,00	2,65	2,36	2,13	1,95	1,79	1,67	1,56	1,47	1,40	1,34	1,29	1,15	1,07	1,02

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

Tabela 31 : Relação entre percepção da qualidade do tráfego e comprimento de filas equivalentes (m) e VPEs em fila (n VPEs) - fluxos com 50% de caminhões

Veículos em Fila-FILA		0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	20	25	32
$VPEemFila = FILA(1 + 2,17.CAM)$																					
VPE em fila		1,04	2,09	4,17	6,26	8,34	10,43	12,51	14,60	16,68	18,77	20,85	22,94	25,02	27,11	29,19	31,28	33,36	41,70	52,13	66,72
$ComprimentoFila = FILA(5,31 + 11,55.CAM)$																					
		Comprimento Médio de Fila Equivalente (m)																			
		5,54	11,09	22,17	33,26	44,34	55,43	66,51	77,60	88,68	99,77	110,85	121,94	133,02	144,11	155,19	166,28	177,36	221,70	277,13	354,72
Nº Cabines na Praça	1	6,42	5,80	4,86	4,16	3,60	3,17	2,81	2,52	2,28	2,08	1,92	1,78	1,67	1,57	1,49	1,42	1,36	1,20	1,10	1,04
	2	6,41	5,79	4,84	4,14	3,58	3,15	2,79	2,50	2,26	2,07	1,90	1,77	1,65	1,56	1,48	1,41	1,35	1,19	1,09	1,03
	3	6,40	5,78	4,83	4,12	3,56	3,12	2,77	2,48	2,25	2,05	1,89	1,75	1,64	1,54	1,46	1,40	1,34	1,18	1,09	1,03
	4	6,40	5,77	4,81	4,10	3,54	3,10	2,75	2,46	2,23	2,03	1,87	1,74	1,63	1,53	1,45	1,39	1,33	1,18	1,08	1,03
	5	6,39	5,75	4,79	4,08	3,52	3,08	2,73	2,44	2,21	2,02	1,86	1,72	1,61	1,52	1,44	1,38	1,32	1,17	1,08	1,03
	6	6,38	5,74	4,77	4,06	3,50	3,06	2,71	2,43	2,19	2,00	1,84	1,71	1,60	1,51	1,43	1,37	1,31	1,17	1,08	1,03
	7	6,37	5,73	4,76	4,04	3,48	3,04	2,69	2,41	2,18	1,99	1,83	1,70	1,59	1,50	1,42	1,36	1,31	1,16	1,08	1,03
	8	6,37	5,72	4,74	4,02	3,46	3,02	2,67	2,39	2,16	1,97	1,81	1,68	1,58	1,49	1,41	1,35	1,30	1,16	1,07	1,03
	9	6,36	5,71	4,72	4,00	3,44	3,00	2,65	2,37	2,14	1,95	1,80	1,67	1,57	1,48	1,40	1,34	1,29	1,15	1,07	1,02
	10	6,35	5,69	4,71	3,98	3,42	2,98	2,64	2,35	2,13	1,94	1,79	1,66	1,55	1,47	1,39	1,33	1,28	1,15	1,07	1,02
	11	6,34	5,68	4,69	3,96	3,40	2,97	2,62	2,34	2,11	1,92	1,77	1,65	1,54	1,46	1,39	1,33	1,28	1,14	1,06	1,02
	12	6,34	5,67	4,68	3,94	3,38	2,95	2,60	2,32	2,09	1,91	1,76	1,63	1,53	1,45	1,38	1,32	1,27	1,14	1,06	1,02
	13	6,33	5,66	4,66	3,93	3,37	2,93	2,58	2,30	2,08	1,89	1,75	1,62	1,52	1,44	1,37	1,31	1,26	1,13	1,06	1,02
	14	6,32	5,65	4,64	3,91	3,35	2,91	2,56	2,29	2,06	1,88	1,73	1,61	1,51	1,43	1,36	1,30	1,25	1,13	1,06	1,02
	15	6,32	5,64	4,63	3,89	3,33	2,89	2,55	2,27	2,05	1,87	1,72	1,60	1,50	1,42	1,35	1,29	1,25	1,13	1,06	1,02
	16	6,31	5,63	4,61	3,87	3,31	2,87	2,53	2,25	2,03	1,85	1,71	1,59	1,49	1,41	1,34	1,29	1,24	1,12	1,05	1,02
	17	6,30	5,61	4,59	3,85	3,29	2,85	2,51	2,24	2,02	1,84	1,69	1,58	1,48	1,40	1,33	1,28	1,24	1,12	1,05	1,02
	18	6,29	5,60	4,58	3,83	3,27	2,84	2,49	2,22	2,00	1,83	1,68	1,57	1,47	1,39	1,33	1,27	1,23	1,11	1,05	1,02
	19	6,29	5,59	4,56	3,82	3,25	2,82	2,48	2,21	1,99	1,81	1,67	1,56	1,46	1,38	1,32	1,27	1,22	1,11	1,05	1,02
	20	6,28	5,58	4,55	3,80	3,24	2,80	2,46	2,19	1,97	1,80	1,66	1,55	1,45	1,38	1,31	1,26	1,22	1,11	1,05	1,01
	21	6,27	5,57	4,53	3,78	3,22	2,78	2,44	2,17	1,96	1,79	1,65	1,53	1,44	1,37	1,31	1,25	1,21	1,10	1,04	1,01
	22	6,26	5,56	4,51	3,76	3,20	2,77	2,43	2,16	1,95	1,77	1,64	1,52	1,43	1,36	1,30	1,25	1,21	1,10	1,04	1,01
	23	6,26	5,55	4,50	3,75	3,18	2,75	2,41	2,14	1,93	1,76	1,63	1,51	1,42	1,35	1,29	1,24	1,20	1,10	1,04	1,01
	24	6,25	5,54	4,48	3,73	3,17	2,73	2,40	2,13	1,92	1,75	1,61	1,51	1,42	1,34	1,28	1,24	1,20	1,09	1,04	1,01
	25	6,24	5,52	4,47	3,71	3,15	2,72	2,38	2,12	1,91	1,74	1,60	1,50	1,41	1,34	1,28	1,23	1,19	1,09	1,04	1,01

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

Tabela 32 : Relação entre percepção da qualidade do tráfego e comprimento de filas equivalentes (m) e VPEs em fila (n VPEs) - fluxos com 65% de caminhões

Veículos em Fila-FILA		0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	20	25	32
$VPE_{em\ Fila} = FILA(1 + 2,17.CAM)$																					
VPE em fila		1,21	2,41	4,82	7,23	9,64	12,05	14,46	16,87	19,28	21,69	24,11	26,52	28,93	31,34	33,75	36,16	38,57	48,21	60,26	77,14
$ComprimentoFila = FILA(5,31 + 11,55.CAM)$																					
		Comprimento Médio de Fila Equivalente (m)																			
		6,41	12,82	25,64	38,45	51,27	64,09	76,91	89,72	102,54	115,36	128,18	140,99	153,81	166,63	179,45	192,26	205,08	256,35	320,44	410,16
Nº Cabines na Praça	1	6,33	5,66	4,66	3,93	3,37	2,93	2,59	2,31	2,08	1,90	1,75	1,63	1,52	1,44	1,37	1,31	1,26	1,14	1,06	1,02
	2	6,32	5,65	4,65	3,91	3,35	2,92	2,57	2,29	2,07	1,89	1,74	1,61	1,51	1,43	1,36	1,30	1,26	1,13	1,06	1,02
	3	6,32	5,64	4,63	3,89	3,33	2,90	2,55	2,27	2,05	1,87	1,72	1,60	1,50	1,42	1,35	1,30	1,25	1,13	1,06	1,02
	4	6,31	5,63	4,62	3,88	3,32	2,88	2,53	2,26	2,04	1,86	1,71	1,59	1,49	1,41	1,35	1,29	1,24	1,12	1,05	1,02
	5	6,30	5,62	4,60	3,86	3,30	2,86	2,52	2,24	2,02	1,84	1,70	1,58	1,48	1,40	1,34	1,28	1,24	1,12	1,05	1,02
	6	6,30	5,61	4,58	3,84	3,28	2,84	2,50	2,23	2,01	1,83	1,69	1,57	1,47	1,39	1,33	1,28	1,23	1,12	1,05	1,02
	7	6,29	5,60	4,57	3,82	3,26	2,82	2,48	2,21	1,99	1,82	1,67	1,56	1,46	1,39	1,32	1,27	1,23	1,11	1,05	1,02
	8	6,28	5,58	4,55	3,81	3,24	2,81	2,47	2,19	1,98	1,80	1,66	1,55	1,45	1,38	1,31	1,26	1,22	1,11	1,05	1,01
	9	6,27	5,57	4,54	3,79	3,22	2,79	2,45	2,18	1,96	1,79	1,65	1,54	1,45	1,37	1,31	1,26	1,21	1,11	1,04	1,01
	10	6,27	5,56	4,52	3,77	3,21	2,77	2,43	2,16	1,95	1,78	1,64	1,53	1,44	1,36	1,30	1,25	1,21	1,10	1,04	1,01
	11	6,26	5,55	4,50	3,75	3,19	2,76	2,42	2,15	1,94	1,77	1,63	1,52	1,43	1,35	1,29	1,24	1,20	1,10	1,04	1,01
	12	6,25	5,54	4,49	3,74	3,17	2,74	2,40	2,13	1,92	1,75	1,62	1,51	1,42	1,35	1,29	1,24	1,20	1,10	1,04	1,01
	13	6,24	5,53	4,47	3,72	3,15	2,72	2,38	2,12	1,91	1,74	1,61	1,50	1,41	1,34	1,28	1,23	1,19	1,09	1,04	1,01
	14	6,24	5,52	4,46	3,70	3,14	2,70	2,37	2,11	1,90	1,73	1,60	1,49	1,40	1,33	1,27	1,23	1,19	1,09	1,04	1,01
	15	6,23	5,51	4,44	3,68	3,12	2,69	2,35	2,09	1,88	1,72	1,59	1,48	1,39	1,32	1,27	1,22	1,18	1,09	1,04	1,01
	16	6,22	5,49	4,43	3,67	3,10	2,67	2,34	2,08	1,87	1,71	1,58	1,47	1,39	1,32	1,26	1,22	1,18	1,08	1,03	1,01
	17	6,22	5,48	4,41	3,65	3,09	2,66	2,32	2,06	1,86	1,70	1,57	1,46	1,38	1,31	1,26	1,21	1,17	1,08	1,03	1,01
	18	6,21	5,47	4,40	3,63	3,07	2,64	2,31	2,05	1,85	1,69	1,56	1,45	1,37	1,30	1,25	1,21	1,17	1,08	1,03	1,01
	19	6,20	5,46	4,38	3,62	3,05	2,62	2,29	2,04	1,83	1,67	1,55	1,45	1,36	1,30	1,24	1,20	1,16	1,08	1,03	1,01
	20	6,19	5,45	4,37	3,60	3,04	2,61	2,28	2,02	1,82	1,66	1,54	1,44	1,36	1,29	1,24	1,20	1,16	1,07	1,03	1,01
	21	6,19	5,44	4,35	3,58	3,02	2,59	2,26	2,01	1,81	1,65	1,53	1,43	1,35	1,28	1,23	1,19	1,16	1,07	1,03	1,01
	22	6,18	5,43	4,34	3,57	3,00	2,58	2,25	2,00	1,80	1,64	1,52	1,42	1,34	1,28	1,23	1,19	1,15	1,07	1,03	1,01
	23	6,17	5,42	4,32	3,55	2,99	2,56	2,24	1,98	1,79	1,63	1,51	1,41	1,33	1,27	1,22	1,18	1,15	1,07	1,03	1,01
	24	6,17	5,41	4,31	3,54	2,97	2,55	2,22	1,97	1,78	1,62	1,50	1,40	1,33	1,27	1,22	1,18	1,14	1,07	1,03	1,01
	25	6,16	5,40	4,29	3,52	2,96	2,53	2,21	1,96	1,76	1,61	1,49	1,40	1,32	1,26	1,21	1,17	1,14	1,06	1,02	1,01

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

Tabela 33 : Relação entre percepção da qualidade do tráfego e comprimento de filas equivalentes (m) e VPEs em fila (n VPEs) - fluxos com 80% de caminhões

Veículos em Fila-FILA		0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	20	25	32
$VPE_{em\ Fila} = FILA(1 + 2,17.CAM)$																					
VPE em fila		1,37	2,74	5,47	8,21	10,94	13,68	16,42	19,15	21,89	24,62	27,36	30,10	32,83	35,57	38,30	41,04	43,78	54,72	68,40	87,55
$ComprimentoFila = FILA(5,31 + 11,55.CAM)$																					
		Comprimento Médio de Fila Equivalente (m)																			
		7,28	14,55	29,10	43,65	58,20	72,75	87,30	101,85	116,40	130,95	145,50	160,05	174,60	189,15	203,70	218,25	232,80	291,00	363,75	465,60
Nº Cabines na Praça	1	6,25	5,53	4,48	3,72	3,16	2,73	2,39	2,12	1,91	1,75	1,61	1,50	1,41	1,34	1,28	1,23	1,19	1,09	1,04	1,01
	2	6,24	5,52	4,46	3,71	3,14	2,71	2,37	2,11	1,90	1,73	1,60	1,49	1,40	1,33	1,28	1,23	1,19	1,09	1,04	1,01
	3	6,23	5,51	4,45	3,69	3,13	2,69	2,36	2,10	1,89	1,72	1,59	1,48	1,40	1,33	1,27	1,22	1,18	1,09	1,04	1,01
	4	6,23	5,50	4,43	3,67	3,11	2,68	2,34	2,08	1,88	1,71	1,58	1,47	1,39	1,32	1,26	1,22	1,18	1,09	1,03	1,01
	5	6,22	5,49	4,42	3,66	3,09	2,66	2,33	2,07	1,86	1,70	1,57	1,47	1,38	1,31	1,26	1,21	1,18	1,08	1,03	1,01
	6	6,21	5,48	4,40	3,64	3,07	2,64	2,31	2,05	1,85	1,69	1,56	1,46	1,37	1,31	1,25	1,21	1,17	1,08	1,03	1,01
	7	6,20	5,46	4,39	3,62	3,06	2,63	2,30	2,04	1,84	1,68	1,55	1,45	1,37	1,30	1,25	1,20	1,17	1,08	1,03	1,01
	8	6,20	5,45	4,37	3,61	3,04	2,61	2,28	2,03	1,83	1,67	1,54	1,44	1,36	1,29	1,24	1,20	1,16	1,08	1,03	1,01
	9	6,19	5,44	4,36	3,59	3,03	2,60	2,27	2,01	1,81	1,66	1,53	1,43	1,35	1,29	1,23	1,19	1,16	1,07	1,03	1,01
	10	6,18	5,43	4,34	3,57	3,01	2,58	2,26	2,00	1,80	1,65	1,52	1,42	1,34	1,28	1,23	1,19	1,15	1,07	1,03	1,01
	11	6,18	5,42	4,33	3,56	2,99	2,57	2,24	1,99	1,79	1,64	1,51	1,42	1,34	1,27	1,22	1,18	1,15	1,07	1,03	1,01
	12	6,17	5,41	4,31	3,54	2,98	2,55	2,23	1,98	1,78	1,63	1,50	1,41	1,33	1,27	1,22	1,18	1,15	1,07	1,03	1,01
	13	6,16	5,40	4,30	3,53	2,96	2,54	2,21	1,96	1,77	1,62	1,50	1,40	1,32	1,26	1,21	1,17	1,14	1,06	1,02	1,01
	14	6,15	5,39	4,28	3,51	2,95	2,52	2,20	1,95	1,76	1,61	1,49	1,39	1,32	1,26	1,21	1,17	1,14	1,06	1,02	1,01
	15	6,15	5,38	4,27	3,49	2,93	2,51	2,19	1,94	1,75	1,60	1,48	1,38	1,31	1,25	1,20	1,17	1,13	1,06	1,02	1,01
	16	6,14	5,37	4,25	3,48	2,91	2,49	2,17	1,93	1,74	1,59	1,47	1,38	1,30	1,25	1,20	1,16	1,13	1,06	1,02	1,01
	17	6,13	5,36	4,24	3,46	2,90	2,48	2,16	1,91	1,73	1,58	1,46	1,37	1,30	1,24	1,19	1,16	1,13	1,06	1,02	1,01
	18	6,13	5,34	4,22	3,45	2,88	2,46	2,15	1,90	1,71	1,57	1,45	1,36	1,29	1,24	1,19	1,15	1,12	1,05	1,02	1,01
	19	6,12	5,33	4,21	3,43	2,87	2,45	2,13	1,89	1,70	1,56	1,45	1,36	1,29	1,23	1,19	1,15	1,12	1,05	1,02	1,01
	20	6,11	5,32	4,20	3,42	2,85	2,44	2,12	1,88	1,69	1,55	1,44	1,35	1,28	1,23	1,18	1,15	1,12	1,05	1,02	1,00
	21	6,11	5,31	4,18	3,40	2,84	2,42	2,11	1,87	1,68	1,54	1,43	1,34	1,27	1,22	1,18	1,14	1,12	1,05	1,02	1,00
	22	6,10	5,30	4,17	3,39	2,82	2,41	2,10	1,86	1,67	1,53	1,42	1,34	1,27	1,22	1,17	1,14	1,11	1,05	1,02	1,00
	23	6,09	5,29	4,15	3,37	2,81	2,39	2,08	1,85	1,66	1,52	1,42	1,33	1,26	1,21	1,17	1,14	1,11	1,05	1,02	1,00
	24	6,08	5,28	4,14	3,36	2,80	2,38	2,07	1,84	1,66	1,52	1,41	1,32	1,26	1,21	1,17	1,13	1,11	1,05	1,02	1,00
	25	6,08	5,27	4,13	3,34	2,78	2,37	2,06	1,82	1,65	1,51	1,40	1,32	1,25	1,20	1,16	1,13	1,10	1,04	1,02	1,00

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

6.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE NÍVEIS DE SERVIÇO EM PRAÇAS DE PEDÁGIO

O HCM-2000 apresenta escala composta por seis níveis, designados por letras de “A” a “F”, para descrever a qualidade do serviço de tráfego em rodovias. Volumes de tráfego abaixo das capacidades da infra-estrutura analisada podem provocar qualidades de serviço classificadas entre os níveis “A” e “E”, volumes acima da capacidade provocam qualidades de tráfego classificadas como “F”.

Neste sentido, foi realizada avaliação da escala proposta neste estudo para níveis de serviço. A avaliação foi baseada em análise operacional, que verificou as capacidades máximas de processamento das praças do estudo (3 e 10 cabines), com vistas a identificar seus respectivos níveis de serviço resultantes, e compatibilidade com os princípios de classificação de níveis de serviço utilizados no HCM-2000.

Como fluxos das praças foram compostos por 0%, 15% e 30% de caminhões, houve a necessidade de buscar fatores de equivalência operacionais para processamento de veículos nas cabines das praças.

6.3.1 Fatores de Equivalência Veicular Operacionais em Praças de Pedágio

A equivalência veicular proposta anteriormente para estabelecer tamanhos de filas equivalentes, embora útil para aquelas situações, não é indicada para análises de capacidades das cabines, já que foi elaborada considerando somente o impacto dos comprimentos das diferentes categorias. Assim, foram realizadas simulações a fim de estabelecer fatores de equivalência veicular para capacidades de processamento, considerando, desta forma, a influência de tempos de atendimento e características operacionais das diferentes categorias refletidas sobre os deslocamentos nas cabines.

O processo de obtenção dos equivalentes veiculares para capacidades de processamento nas cabines foi executado a partir do modelo utilizado na elaboração dos cenários da pesquisa. O modelo utilizado na pesquisa foi modificado, de tal forma que o arco representativo da praça apresentasse uma faixa de tráfego, buscando configurar a existência

de somente uma cabine de atendimento. Três diferentes fluxos foram gerados, cada um deles foi composto exclusivamente por uma categoria (veículos leves ou caminhões leves ou caminhões pesados).

Diversas rodadas de simulação foram executadas variando-se as intensidades de fluxo. A partir das modelagens, foram coletados dados sobre número de veículos processados, fila média na cabine e atraso médio em fila. A Figura 21 apresenta gráfico contendo dados de veículos processados. Na Figura 22 e Figura 23 são apresentados os gráficos de dados relativos aos atrasos médios em fila e filas médias na cabine, respectivamente.

Os parâmetros originais do software foram utilizados para o cálculo do atraso em fila. De acordo com os parâmetros originais do software, atrasos em fila começam a ser computados quando veículos apresentam velocidades inferiores a 5 km/h. O cômputo do atraso encerra-se quando, a partir da situação parado, veículos imprimem velocidades acima de 10 km/h ou headways maiores do que 20 metros.

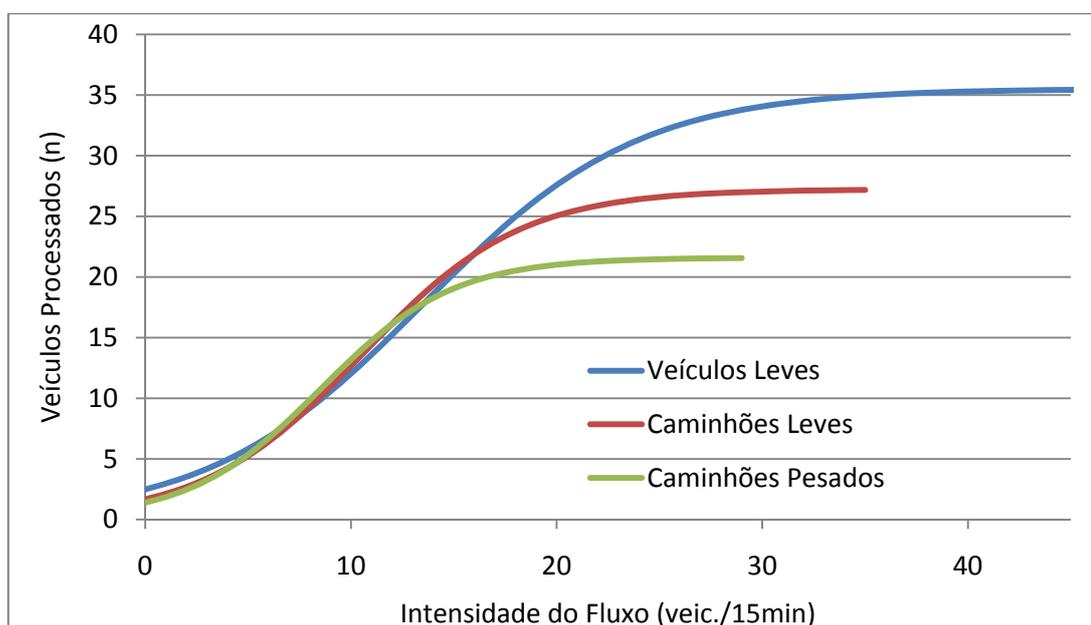


Figura 21: Gráfico de veículos processados de acordo com a intensidade do fluxo

Fonte: figura elaborada pelo autor (2009)

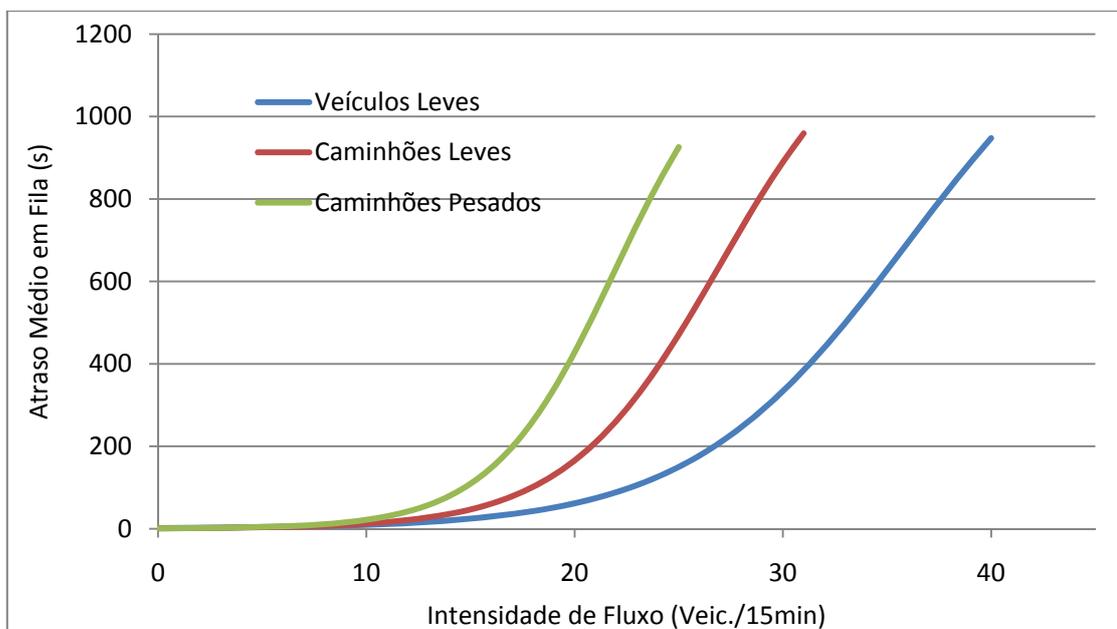


Figura 22: Gráfico de atraso médio em fila de acordo com a intensidade do fluxo

Fonte: figura elaborada pelo autor (2009)

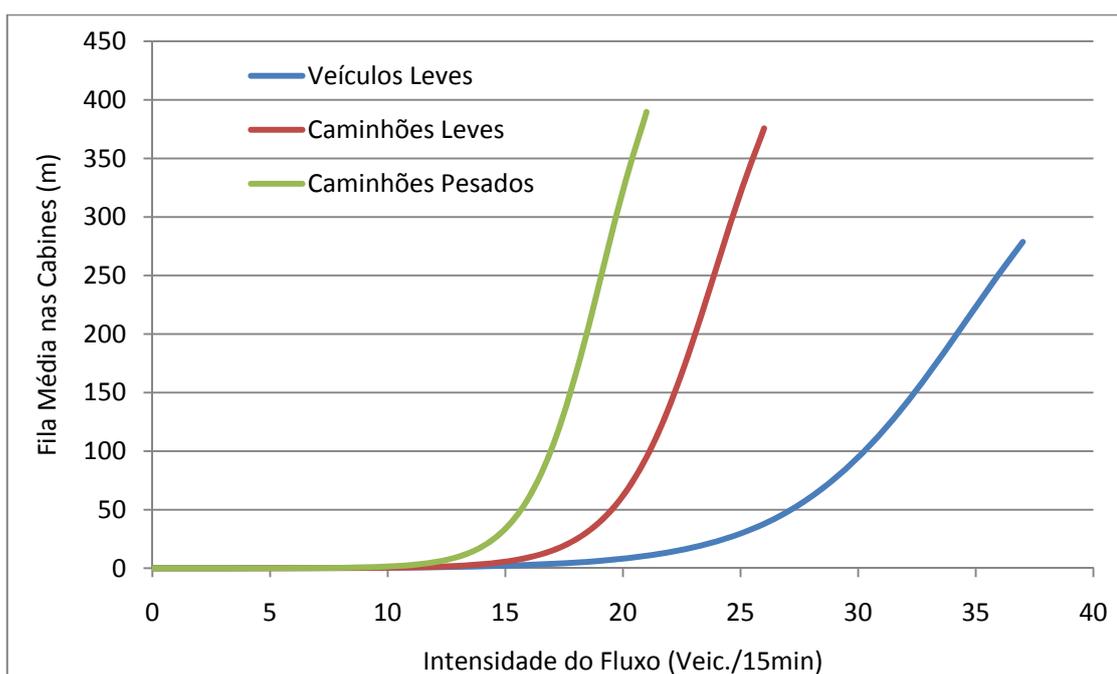


Figura 23: Gráfico de fila média na cabine de acordo com a intensidade do fluxo

Fonte: figura elaborada pelo autor (2009)

A partir da observação da Figura 21, percebe-se que fluxo composto exclusivamente por veículos leves atinge a capacidade de processamento da cabine com valores próximos a 35 veículos/15 minutos (140 veic./h). Fluxo composto exclusivamente por caminhões leves atinge a capacidade de processamento com valores próximos a 27 veículos/15 minutos (108

veic./h). Já fluxo de caminhões pesados, que apresentam diferentes características operacionais e tempos de atendimento, atinge a capacidade de processamento com valores próximos a 21 veículos/15 minutos (84 veic./h).

Através da relação cartesiana entre as curvas que descrevem o número de veículos processados, entre aquelas que descrevem atraso médio em fila e entre aquelas que representam fila média na cabine, foram extraídos os equivalentes veiculares para processamento, fila média e atraso médio.

A Tabela 34 apresenta os equivalentes veiculares, em VPEs – Veículos de Passeio Equivalentes, obtidos através da simulação operacional de fluxos exclusivos em cabine de pedágio.

Tabela 34 : Fatores de equivalência operacional de veículos em praça de pedágio

	Fatores de Equivalência - VPE		
	Atraso Médio em Fila	Veículos Processados na Cabine	Fila Média na Cabine
Veículos de Passeio	1,00	1,00	1,00
Caminhões Leves	1,30	1,30	1,45
Caminhões Pesados	1,60	1,60	1,80

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

Portanto, caminhões leves equivalem, como efeito no processamento de veículos nas cabines e atrasos médios, a 1,3 VPEs - Veículos de Passeio Equivalentes. Caminhões pesados, devido aos tempos de atendimento mais longos e características operacionais, equivalem a 1,6 VPEs. Já equivalências obtidas para fila média na cabine de caminhões leves e pesados são, respectivamente, 1,45 VPEs e 1,80 VPEs.

Os resultados para equivalências veiculares, obtidas com simulação de fluxos exclusivos, possibilitam a verificação de que equivalentes para atraso médio em fila e processamento de veículos são os mesmos. Os indicadores de atraso em fila e processamento de veículos nas cabines são resultado direto dos tempos de processamento e agilidade dos veículos em transpor a cabine.

Já o indicador relacionado à fila média na cabine apontou para equivalentes veiculares diferentes dos demais, e a diferença de valores é justificada na medida em que tamanhos de filas são diretamente dependentes dos comprimentos dos veículos, não tendo relação direta com a locomoção dos mesmos nas cabines e tempos de atendimento.

Os equivalentes veiculares encontrados para comprimentos de filas nesta análise operacional, respectivos a caminhões leves e pesados, diferem para menos em 97% e 111% daqueles propostos anteriormente neste estudo.

Os equivalentes veiculares propostos anteriormente derivam da relação entre as extensões ocupadas em fila pelos veículos de diferentes categorias, e equivalentes obtidos com a análise atual foram extraídos baseados na capacidade de processamento das cabines refletida na formação da fila. A formação de fila nas cabines de pedágio é fenômeno resultante da relação entre a demanda de tráfego e a capacidade de processamento da infraestrutura, portanto muito variável.

O método para obtenção de níveis de serviço proposto deriva do julgamento de cenários de tráfego com diferentes tamanhos de filas, portanto o comprimento dos veículos, característica diretamente percebida pelos usuários no momento das entrevistas, é parâmetro fundamental no método. Sendo assim, os fatores de equivalência mais indicados na análise qualitativa de percepção de qualidade de tráfego são aqueles obtidos anteriormente, com a relação entre extensões ocupadas em fila pelos veículos de diferentes categorias.

Caso equivalentes veiculares obtidos através desta análise operacional fossem aplicados no método para níveis de serviço proposto, análises mais rígidas a respeito de níveis de serviço seriam realizadas, significando uma distorção da percepção declarada pelos usuários entrevistados. A seguir será apresentada análise da capacidade de processamento nas cabines do estudo.

6.3.2 Capacidade de Processamento para as Praças do Estudo

Nesta seção será apresentado o processo de obtenção das capacidades para as praças modeladas no estudo (3 e 10 cabines). Os equivalentes veiculares operacionais foram utilizados para padronizar os fluxos dos cenários, de forma a tornar possível a identificação das capacidades de processamento máximas.

A Tabela 35 apresenta transcrição das colunas da Tabela 13 apresentada no item 4.2.3, juntamente com coluna respectiva aos fluxos padronizados em termos de VPEs.

Tabela 35 : Volume de tráfego e veículos equivalentes processados

Cenários	Volume de Tráfego (Veic./15min)	Veículos Processados (Veic./15min)	Veículos Equivalentes Processados (VPEs./15min)
1 PPSCF1	40	40	40
2 PPSCF2	70	70	70
3 PPSCF3	100	93	93
4 PPSCF4	112	101	101
5 PPSCF5	120	101	101
6 PPSCF6	131	101	101
7 PPCMF1	38	38	40
8 PPCMF2	71	71	75
9 PPCMF3	99	87	92
10 PPCMF4	112	92	98
11 PPCMF5	116	91	96
12 PPCMF6	121	91	96
13 PPMCF1	41	40	45
14 PPMCF2	69	70	78
15 PPMCF3	82	79	88
16 PPMCF4	99	84	94
17 PPMCF5	112	85	95
18 PPMCF6	114	84	94
19 PGSCF1	153	154	154
20 PGSCF2	254	253	253
21 PGSCF3	321	333	333
22 PGSCF4	339	342	342
23 PGSCF5	360	343	343
24 PGSCF6	393	340	340
25 PGCMF1	135	134	142
26 PGCMF2	257	256	271
27 PGCMF3	308	291	308
28 PGCMF4	317	330	350
29 PGCMF5	339	329	349
30 PGCMF6	364	327	347
31 PGMCF1	111	112	125
32 PGMCF2	238	235	263
33 PGMCF3	277	284	318
34 PGMCF4	309	306	343
35 PGMCF5	320	311	348
36 PGMCF6	344	310	347

Fonte: tabela elaborada pelo autor (2009)

A Figura 24 e Figura 25 apresentam gráficos que relacionam o volume de tráfego com o número de veículos equivalentes processados nas cabines.

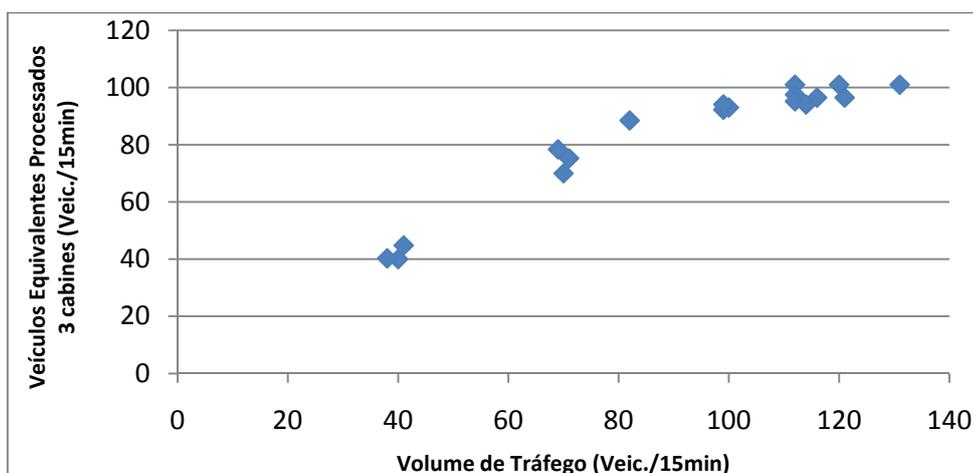


Figura 24: Volume de veículos equivalentes processados – praça com 3 cabines

Fonte: figura elaborada pelo autor (2009)

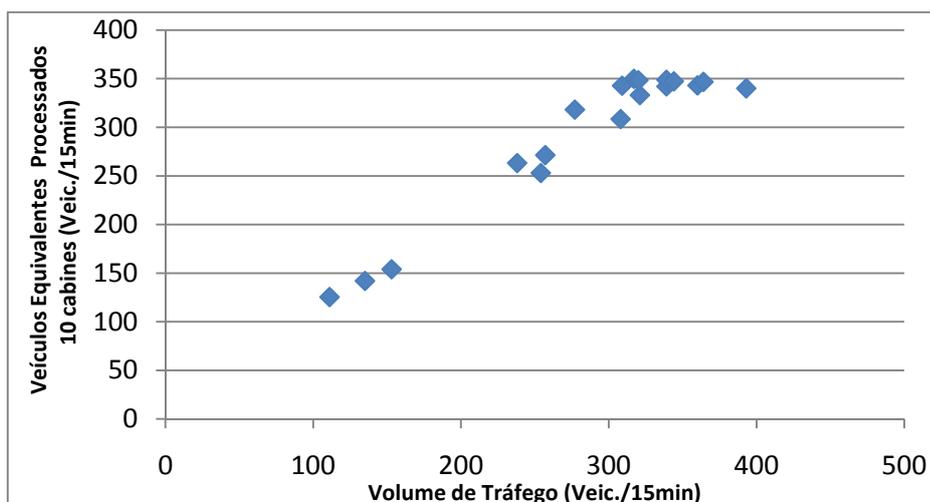


Figura 25: Volume de veículos equivalentes processados – praça com 10 cabines

Fonte: figura elaborada pelo autor (2009)

As Figura 24 e Figura 25 apresentam os volumes de veículos equivalentes processados nas praças de 3 e 10 cabines, respectivamente. Observando-se a relação entre o volume de tráfego e o volume equivalente processado percebe-se que praça com 3 cabines atinge sua capacidade máxima de processamento em, aproximadamente, 100 VPEs a cada 15 minutos. Já praça com 10 cabines atinge o processamento máximo em, aproximadamente, 350 VPEs a cada 15 minutos.

Assim, as capacidades máximas de processamento para as praças do estudo ficaram em 135 VPEs/cabine/h, em média. Este valor para capacidade máxima de processamento é semelhante àquele encontrado quando da simulação de praça com uma cabine e fluxo exclusivamente composto por veículos leves (140 veic./h), credenciando desta forma os dados para fluxos equivalentes dos cenários da pesquisa.

Estas capacidades foram verificadas em cenários da pesquisa que resultaram em classificação “D” para níveis de serviço. A identificação desta ocorrência é importante na medida em que vem apresentar padrão de julgamento de qualidade de tráfego diferente do observado no HCM-2000 para rodovias. Qualidades de fluxos próximos a capacidade de rodovias são julgadas pelo HCM-2000 como nível de serviço “E”.

7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo apresenta as conclusões obtidas com o desenvolvimento do estudo, assim como as considerações para trabalhos futuros.

O método do trabalho foi baseado no julgamento de cenários micro-simulados de tráfego em praças de pedágio. A praticidade e agilidade dos meios eletrônicos de micro-simulação colaboraram para a geração de cenários, cujas obtenções em campo seriam extremamente trabalhosas, visto que nem sempre seriam encontradas situações tidas como ideais para pesquisa. Os cenários buscaram refletir a influência de alguns fatores sobre a percepção de qualidade do tráfego.

Sendo assim, as conclusões do trabalho foram divididas de acordo com as etapas metodológicas, e serão detalhadas para (i) a pesquisa de percepção junto a usuários sobre a qualidade do tráfego em praças de pedágio, (ii) a modelagem da percepção sobre a qualidade do tráfego e (iii) as análises de níveis de serviço em praças de pedágio.

Ao final do capítulo serão tecidas considerações para trabalhos futuros.

7.1 A PESQUISA SOBRE PERCEPÇÃO DE QUALIDADE DO TRÁFEGO

A pesquisa junto aos usuários sobre a percepção da qualidade do tráfego em praças de pedágio foi elaborada através de um projeto de experimentos, que possibilitou o desenvolvimento de cenários para a pesquisa. Os cenários da pesquisa foram então avaliados por uma amostra representativa de usuários quanto à qualidade de tráfego. As qualidades do tráfego indicadas pelos usuários entrevistados foram enquadradas em uma proposta de escala para níveis de serviço. A escala é composta por seis níveis, representados por letras, que variam desde “A” até “F”, onde “A” caracteriza as melhores situações vivenciadas pelos usuários e “F” representa as piores situações, com grandes atrasos e filas longas.

Os resultados da pesquisa indicaram clara deteriorização nos níveis de serviço na medida em que filas nos cenários apresentaram um maior número de veículos em espera para pagamento das tarifas. Este efeito corresponde à realidade esperada, já que atrasos e o desconforto em ambientes com maiores taxas de ocupação se fazem presentes.

Com o aumento gradual do fluxo de tráfego e formação das filas nos cenários, houve uma maior instabilidade de julgamentos por parte dos entrevistados. A provável causa desta instabilidade pode estar relacionada a diferentes tolerâncias dos usuários entrevistados, e sua ocorrência era esperada, na medida em que as imagens buscam representar situações de tráfego, onde as características de qualidade estão intrínsecas. A percepção de qualidade é pessoal e depende de experiências anteriores, por isso muito variável.

Contudo, apesar da instabilidade gradual dos julgamentos dos cenários, observou-se consistência entre os julgamentos e as qualidades de tráfego representadas pelos cenários.

Praças de pedágio podem ser consideradas como sistemas instáveis para a caracterização de níveis de serviço, muito dependentes da capacidade de processamento das cabines e da intensidade do fluxo de tráfego utilizando a infra-estrutura. Quando a demanda de tráfego aproxima-se da capacidade de processamento, pode-se evidenciar uma maior variabilidade na formação das filas, com relação a comprimentos e seus atrasos relacionados. Desta maneira, os resultados da pesquisa foram considerados como consistentes.

7.2 A MODELAGEM DA PERCEPÇÃO DOS USUÁRIOS

A modelagem da percepção dos usuários sobre a qualidade do tráfego foi executada através de regressão. O modelo de regressão obtido buscou relacionar os fatores intervenientes na qualidade do tráfego estudados com a percepção de conforto indicada pelos entrevistados. Assim, as variáveis explicativas do modelo foram (i) número médio de veículos em fila nas cabines, (ii) fração de veículos pesados no fluxo de tráfego e (iii) número de cabines na praça. A variável dependente foi a “Nota do Cenário”, que representa a qualidade do tráfego indicada pelos usuários de praças de pedágio.

A equação que melhor representou a percepção de qualidade do tráfego foi do tipo exponencial negativa, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 94,42%. Tanto o

coeficiente de determinação, como o teste da homogeneidade da variância, credenciaram a modelagem.

O modelo reproduz valores para “Notas dos Cenários” que variam entre 1 e 7, respeitando os limites de contorno estabelecidos pela pesquisa. Além disto, representa corretamente o efeito do decaimento da qualidade do tráfego devido ao aumento do número de veículos nas filas, e capta o efeito conjunto das variáveis “número de cabines” e “quantidade de veículos pesados no fluxo de tráfego”.

Portanto, a equação é composta por dois termos. O termo onde se encontra a variável FILA representa o efeito direto do tamanho das filas na percepção de desconforto e inconveniência dos usuários. Já o termo onde se encontram as variáveis CAM e CAB pode ser traduzido como o desconforto percebido pela ocupação da área de chegada da praça, representando a quantidade de veículos envolvidos no processo de pedagiamento.

A análise de sensibilidade indicou que a maior parte do inconveniente percebido pelos usuários pode ser explicado pelos tamanhos das filas nas cabines e os atrasos percebidos em filas longas. Neste sentido, o termo com a variável explicativa FILA apresenta peso relativo maior para explicar a variável dependente do que o termo onde se encontram as variáveis CAB e CAM.

O termo com as variáveis CAB e CAM exerce um papel de ajuste na percepção de usuários, de tal forma que quanto maior a praça de pedágio e quantidade de caminhões no fluxo, menor será o nível de serviço percebido. Uma explicação para este fenômeno está relacionada com a sensação de engarrafamento provocada pelo grande número de filas ocupando o espaço de chegada da praça. Já a presença de caminhões provoca filas com comprimentos maiores, aumentando os tempos de espera, atrasos e ocupação da área de chegada da praça.

O estudo propõe ainda fatores de equivalência para veículos pesados em situação de fila nas praças de pedágio. Os fatores de equivalência propostos surgiram de uma relação de equivalência entre comprimentos de diferentes classes de veículos em fila.

Fatores de equivalência veicular foram utilizados para a determinação do comprimento médio de filas equivalentes (em metros) e para a determinação das filas equivalentes (em VPEs). As duas formas de apresentação para filas foram correlacionadas

com a percepção de desconforto e inconveniência obtida através do modelo de regressão, e possibilitaram análises de níveis de serviço em praças de pedágio.

7.3 ANÁLISES DE NÍVEIS DE SERVIÇO EM PRAÇAS DE PEDÁGIO

As análises dos níveis de serviço em praças de pedágio propostas neste trabalho foram apresentadas em um conjunto de tabelas, que relacionaram os indicadores de filas equivalentes (em metros) e veículos equivalentes em fila (em VPE) com a percepção de qualidade do tráfego resultante do modelo de regressão.

As tabelas, contendo a relação entre a percepção de usuários sobre a qualidade de tráfego e os indicadores de filas, foram elaboradas para distintas frações de veículos pesados no fluxo. A qualidade do tráfego percebida foi enquadrada em uma proposta de escala para níveis de serviço.

O HCM apresenta escala composta por seis níveis, designados por letras de “A” a “F”, para descrever a qualidade do serviço de tráfego em rodovias. Volumes de tráfego abaixo das capacidades da infra-estrutura analisada podem provocar qualidades de serviço classificadas entre os níveis “A” e “E”, volumes acima das capacidades provocam qualidades de tráfego classificadas como “F”.

Neste sentido, foi realizada avaliação da escala proposta neste estudo, com vistas a identificar seus respectivos níveis de serviço resultantes, e compatibilidade com os princípios de classificação de níveis de serviço utilizados no HCM.

A avaliação foi baseada em análise operacional, que verificou as capacidades máximas de processamento das praças do estudo (3 e 10 cabines), utilizando equivalentes veiculares obtidos através de simulação operacional de fluxos exclusivos em cabine de pedágio.

As equivalências encontradas para comprimentos de filas nesta análise operacional, respectivos a caminhões leves e pesados, são 2,20 e 2,38 vezes menores do que aquelas propostas anteriormente neste estudo.

Os equivalentes veiculares propostos anteriormente para a definição de comprimentos de filas equivalentes derivaram da relação entre as extensões ocupadas em

fila pelos veículos de diferentes categorias, e equivalências obtidas com a análise operacional foram extraídas baseadas na capacidade de processamento das cabines refletida na formação da fila. A formação de fila nas cabines de pedágio é fenômeno resultante da relação entre o volume de tráfego e a capacidade de processamento da infraestrutura, portanto muito variável.

Assim, pôde-se identificar dois tipos de equivalências: (i) equivalências operacionais devido ao processamento dos veículos nas cabines e (ii) equivalências de ocupação de espaços físicos em fila, resultados dos comprimentos em fila ocupados pelas diferentes categorias.

As equivalências operacionais foram obtidas através dos diferentes tempos de processamento nas cabines, resultados diretos de escolhas pessoais de motoristas e características operacionais de veículos e formas de pagamento. Este tipo de equivalência, por possuir relação direta com os atendimentos nas cabines, apresenta aplicação na determinação dos indicadores relativos à processamentos nas cabines e atrasos em fila.

Os equivalentes veiculares relacionados à ocupação de espaços físicos em fila possui aplicação na determinação de indicadores relativos à comprimentos de filas e número de veículos equivalentes em fila.

Assim, capacidades de processamento para praça pequena e praça grande são, respectivamente, 133 VPEs/cabine/h e 138 VPEs/cabine/h. Estes valores são semelhantes àquele encontrado quando da simulação de praça com uma cabine e fluxo exclusivamente composto por veículos leves (140 veic./h), credenciando desta forma as análises para fluxos equivalentes dos cenários da pesquisa.

Estas capacidades foram verificadas em cenários da pesquisa que resultaram em classificação “D” para níveis de serviço. A identificação desta ocorrência é importante na medida em que vem apresentar padrão de julgamento de qualidade de tráfego diferente do observado no HCM-2000 para rodovias. Qualidades de fluxos próximos a capacidade de rodovias são julgadas pelo HCM-2000 como nível de serviço “E”.

Caso equivalentes veiculares obtidos através da análise operacional fossem aplicados no método para níveis de serviço proposto, análises mais rígidas a respeito de níveis de serviço seriam realizadas, significando uma distorção da percepção declarada pelos usuários entrevistados.

7.4 CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Trabalhos futuros sobre o tema poderiam ampliar o processo de pesquisa sobre a qualidade de tráfego percebida pelos usuários de praças. Uma ampliação da pesquisa está relacionada à incorporação de outros fatores intervenientes na percepção de qualidade do tráfego, diferentes daqueles estudados neste trabalho.

A escala de níveis de serviço proposta neste estudo representa a percepção de usuários sobre a qualidade do tráfego, e está limitada aos limites estipulados para os fatores considerados influentes sobre a qualidade do tráfego utilizados na pesquisa. Os limites, embora com valores mínimos e máximos justificados, podem ter representado barreira para a expressão de um maior incômodo percebido por parte dos usuários entrevistados. Pesquisa futura poderia ampliar limites dos fatores influentes na percepção da qualidade do tráfego, desta maneira verificando com maior abrangência as qualidades de serviço percebidas em praças de pedágio.

Os fatores de equivalência veicular propostos neste trabalho foram retirados de uma relação entre comprimentos de diferentes classes veiculares, já que o indicador de desempenho escolhido para estimar níveis de serviço foi o comprimento médio das filas nas cabines. Contudo, equivalências veiculares para estimar capacidades de processamento das cabines e atrasos em fila foram retiradas de análise operacional, através de simulação de cabine de pedágio com fluxos exclusivos. Trabalhos futuros poderiam ampliar a pesquisa relativa a fatores de equivalência em praças, pois o estudo deste tópico foi realizado com modelos agregadamente calibrados, que atendiam as exigências da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONCESSIONÁRIAS DE RODOVIAS. São Paulo: ABCR, 2008a. **Concessionárias Associadas**. Disponível em <<http://www.abcr.org.br/conc/index.php>>. Acessado em: 23 mai 2008.

_____. São Paulo: ABCR, 2008b. **Rodovias Pedagiadas Administradas pelo Governo**. Disponível em <http://www.abcr.org.br/etc/ser_pedagios.php>. Acessado em 22 mai 2008.

AL-DEEK, H. M.; RADWAN, A.E. A framework for evaluation level of service at electronic toll collection plazas. In: TRANSPORTATION CONGRESS: CIVIL ENGINEERS – KEY TO WORLD INFRASTRUCTURE, 1995, California. **Anais..** Califórnia, EUA: American Society of Civil Engineers - ASCE, v.2., p.1412-1422, 1995.

AL-DEEK, H.; RADWAN, A.E.; MOHAMED, A.; KLODZINSKI, J.G. Evaluation the Improvements in Traffic Operations at a Real-life Toll Plaza with Electronic Toll Collection. **ITS Journal**, v.3, n.3, p.205-223, 1996.

AL-DEEK, H.; MOHAMED, A.; RADWAN, A.E. Operational Benefits of Electronic Toll Collection: Case Study. **Transportation Engineering Journal**, v.6, n.123, p.467-477, 1997.

AL-DEEK, H.; MOHAMED, E.A. Simulation and Evaluation of the Orlando-Orange County Expressway Authority (OOCEA) Electronic Toll Collection Plazas Using TPSIM – Toll Plaza Simulator. Final Report. Transportation Systems Institute, University of Central Florida, 96 p., 2000.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES - ANTT. **Concessões de Rodovias Federais – Segunda Etapa** (fevereiro de 2006). Brasília: ANTT, 2008. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/relatorios/rodoviario/Novasconcessoes2.ppt>>. Acessado em: 23 mar. 2008.

_____. **Concessão Rodovia (3º Etapa – Fase 1)** (novembro de 2008). Disponível em: <http://www.antt.gov.br/avisolicitacao/MinasGerais/ap94/Apresentacao_BR040_116_381.ppt>. Acessado em: 13 fev. 2009.

ANDERSON, D.R.; SWEENEY, D.J.; WILLIAMS, T.A. **Essential of Statistics for Business and Economics**. 2 ed. Michigan, EUA: Thomson Learning Ed., 2002. 672p.

ARAÚJO, J. J. **Características Operacionais de Praças de Arrecadação de Pedágio**. 2001. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

ASTARITA, V.; FLORIAN, M.; MUSOLINO, G. A Microscopic Traffic Simulation Model for the Evaluation of Toll Station Systems. In: THE IEEE 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, 2001, California, EUA. **Anais..** EUA: 4th ICITS, p.694-699, 2001.

BORONICO, J.S.; SIEGEL, P.H. Capacity Planning for Toll Roadways Incorporating Consumer Wait Time Costs. **Transportation Research - A**, v. 32, n. 4, p. 297-310, 1998.

BURRIS, M. W.; HILDEBRAND, E. D. Using Microsimulation to Quantify the Impact of Electronic Toll Collection. **ITE Journal**, v. 66, n. 7, p. 21–24, 1996.

CHANG, C.J. **Analysis of Freeway Traffic Characteristics and Identification of Capacity of Basic Freeway Section**. Taipei, Taiwan: Report No.76-49-132. Institute of Transportation, Ministry of Transport and Communications, 1987.

DANKO, J.; GULEWICZ, V. Operational Planning for Electronic Toll Collection: A Unique Approach to Computer Modeling/Analysis. In: 1991 WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1991, Phoenix, EUA. **Anais..** EUA: 1991-WSC, 1991.

_____. Insight Through Innovation: A Dynamic Approach to Demand Based Toll Plaza Lane Staffing. In: 1994 WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1994, Nova Iorque, EUA. **Anais..** EUA: 1994-WSC, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Estudos de Tráfego – IPR723**. Brasília, D.F.: Ministério dos Transportes, 2006.

EDIE, L.C. Traffic Delays at Toll Booths. **Journal of the Operations Research Society of America**, v. 2, n. 2, p. 107-138, 1954.

ELEFTERIADOU, L.; TORBIC, D.; WEBSTER, N. Development of passenger car equivalents for freeways, two-lane highways, and arterials. **Transportation Research Record 1512**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, EUA, p. 51–58, 1997.

FAN, J.; SAITO, M.S. Application of Artificial Neural Network for Level of Service Analysis of Signalized Intersection. In: 77TH ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, Washington, EUA. **Anais..** EUA: 77th TRB, 1998. 1 CD-ROM.

FARIA, E. O. **Bases para um Programa de Educação para o Trânsito a partir do Estudo de Percepção de Crianças e Adolescentes**. 2002. 543f. Tese. (Doutorado em Engenharia de Transportes). Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.

GOMES, G.; MAY, A.; HOROWITZ, R. Calibration of VISSIM for a Congested Freeway. **California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2004-4**, ISSN 1055-1425, 46f., 2004.

GULEWICZ, V.; DANKO, J. Simulation-Based Approach to Evaluating Optimal Lane Staffing Requirements for Toll Plazas. **Transportation Research Record 1484**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, EUA, p. 33-39, 1995.

HORN, M. **Overview of WATSim Toll Plaza/Border Crossing Simulation Model**. Nova Iorque, EUA, 2003. Disponível em: <<http://www.kldassociates.com>>. Acessado em: 03 dez. 2003.

Junga, A. J. A Multi-Purpose Toll Collection Plaza Model. In: 1990 WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1990, New Orleans, EUA. **Anais..** EUA: 1990-WSC, p. 793-797, 1990.

Juran, J. M. **Juran na liderança pela qualidade (um guia para executivos)**. Ed. Pioneira. São Paulo, 1993.

Kittelson, W. K.; Roess, R. P. Highway Capacity Analysis after the HCM 2000. In: 80TH ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, Washington, EUA. **Anais..** EUA: 80th TRB, 2001. 1 CD-ROM.

Klodzinski, J; Al-Deek, H.M. New Methodology for Defining Level of Service at Toll Plazas. **Journal of Transportation Engineering**, v. 28, n. 2, p. 173-181, 2002.

Lin, f. A Delay Model for Planning Analysis of Main-Line Toll Plazas. In: 80TH ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, WASHINGTON, EUA. **Anais..** EUA: 80th TRB, 2001. 1 CD-ROM.

Lin, F.; Su, C. Level-of-Service Analysis of Toll Plazas on Freeway Main Lines. **Journal of Transportation Engineering**, v. 120, n. 2, p. 246-263, 1994.

Lownes, N.E.; Machemehl, R.B. Sensitivity of Simulated Capacity to VISSIM Driver Behavior Parameter Modification. In: 84TH ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, Washington, EUA. **Anais..** EUA: 84th TRB, 2006. 1 CD-ROM.

MCDONALD, D.R.; STAMMER, R.E. Contribution to the Development of Guidelines for Toll Plaza Design. **Journal of Transportation Engineering**, v. 127, n. 3, p. 215-222, 2001.

MOHAMED, A.; ABDEL-ATY, M.; KLODZINSKI, J. G. Safety Considerations in Designing Electronic Toll Plazas: Case Study. **ITE Journal**, Março 2001, p. 20-24, 2001.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 5th ed. Nova Iorque, EUA: John Wiley, 1997.

MORIN, J-M; LOUAH, G.; DAVIET, B. ANATOLL-Software for Simulation and Prediction of Queues at Toll Plazas: Characteristics and Evaluation. In: 3TH WORLD CONGRESS ON ITS, 1996, Orlando, EUA. **Anais..** EUA: 3TH WC-ITS, 1996.

MORTON, T.; LAM, W.K. The Effect of Automatic Vehicle Identification on Toll Capacity at The Dartford River Crossing. **Traffic Engineer and Control**, v. 35, n. 1, p. 298-303, 1994.

MÜLLER, C. **Gerenciamento de Processos e Indicadores de Desempenho. Apostila de aula**. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. 90p.

NIELSTEN, G. **Evaluation of the Traffic, Level of Service and Needs at the Hillsdale, Bergen, Essex, Union and Raritan Toll Plazas**. Memorando Técnico, Vollmer Associates, Nova Iorque, EUA, 1988.

OLIVEIRA, M.L.; NETO, J.M.R.; CYBIS, H.B.B. A Influência do Tamanho das Filas na Capacidade de Atendimento das Praças de Pedágio. In: XVII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2003, Rio de Janeiro. **Anais..** Rio de Janeiro: ANPET, 2003a. v. 2, p. 1264-1275.

OLIVEIRA, M.L.; MICHEL, F.D.; CYBIS, H.B.B. Cap.5 - Tecnologias para Cobrança de Pedágios, p.109-159. In: **A Experiência Brasileira de Concessões de Rodovias**, 168p., Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias - ABCR, 2003b.

OLIVEIRA, M.L. **Fatores Intervenientes na Capacidade de Atendimento de Praças de Pedágio**. 2004. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

OLIVEIRA, M.L.; CYBIS, H.B.B. Medidas de Eficiência e Níveis de Serviço para Praças de Pedágio na Percepção de seus Operadores. In: XIV CONGRESSO PANAMERICANO DE ENGENHARIA DE TRÂNSITO E TRANSPORTES, 2006, Las Palmas, Ilhas Canárias. **Anais..** Espanha: XIV PANAM, 2006. 1 CD-ROM.

ORTÚZAR, J.D.; WILLUMSEN, L.G. **Modelling Transport**. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, Reino Unido, 1990.

PARK, B.; QI, H. Microscopic Simulation Model Calibration and Validation for Freeway Work Zone Network – A Case Study of VISSIM. In: 2006 INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS CONFERENCE, 2006, Toronto, Canadá. **Anais..** Canadá: ITSC-06, 2006. 1 CD-ROM.

PESQUERA, C.I.; GONZÁLEZ, S.L.; CONTRERAS, C.M. Short-Term Improvements to Increase Capacity of Highly Congested Mainline Toll Plazas in Puerto Rico. **Transportation Research Record 1603**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, EUA, p. 41-48, 1997.

PIETRZYK, M.C.; MIERZEJEWSKI, E.A. **Electronic Toll and Traffic Management (ETTM) Systems**. Washington, Estados Unidos: Transportation Research Board. National Research Council, 1993. Relatório n. NCHRP 194.

POLUS, A. Methodology and Simulation for Toll Plaza Analysis. **Road & Transport Research**, vol. 1, n. 5, p. 11-18, 1996.

POLUS, A.; RESHETNIK, I. A New Concept and a Manual for Toll Plaza Planning. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 24, n. 4, p. 532-538, 1997.

PREVEDOUROS, P. D. Automated Tolls for Greece: Systems Review and Performance with AVC. **Internal Paper**, Havaí, EUA: University of Hawaii at Manoa, 2002.

PTV – PLANUNG TRANSPORT VERKEHR AG, **VISSIM v.4.30 User Manual**, 2006.

RIBEIRO, J.L.D. **Projeto de Experimentos na Otimização de Produtos e Processos**. Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 1999. 120f.

ROBINSON, M.; VAN AERDE, M. Examining the Delay and Environmental Impacts of Toll Plaza. In: 6th INTERNATIONAL VNIS - VEHICLE NAVIGATION & INFORMATION SYSTEMS CONFERENCE, 1995, Seattle, EUA. **Anais..** EUA: 6th VNIS, p. 259-266, 1995.

RUMMLER, G. A.; BRACHE, A. P. **Melhores Desempenhos das Empresas**. 1 Ed. São Paulo, Ed.Makron Books, 1994.

SCHAUFLEER, A.E. **Toll Plaza Design**. Washington, Estados Unidos: Transportation Research Board. National Research Council, 1997. Relatório n. NCHRP 240.

STATPOINT, INC. **The User's Guide to STATGRAPHICS Centurion XV**. Virginia, EUA: Statpoint, 2005. Disponível em: <<http://www.statgraphics.com>>. Acessado em: 4 dez. 2005.

TECHSMITH, INC. **User Manual for Camtasia Studio v.5.1.0**. Michigan, EUA: Techsmith, 2008. Disponível em: <<http://www.techsmith.com>>. Acessado em: 24 out. 2008.

TEN CATEN, C.S. **Método de Otimização de Produtos e Processos Medidos por Múltiplas Características de Qualidade**. 1995. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD – TRB. **Transportation Research Circular 319: Research Problem Statements – Highway Capacity**. Washington, Estados Unidos: Transportation Research Board. National Research Council, 1987.

_____. **Highway Capacity Manual - Special Report no.209**. Washington, Estados Unidos: Transportation Research Board. National Research Council, 2000.

_____. **Transit Capacity and Quality of Service Manual (2nd Edition)**. Washington, Estados Unidos: Transportation Research Board, 2003. Disponível em: <<http://www.trb.org>>. Acessado em: 10 mai. 2003.

VAN DIJK, N.M.; HERMANS, M.D.; TEUNISSE, M.J.G.; SHUURMAN, H. Designing the Westerscheldetunnel Toll Plaza Using a Combination of Queueing and Simulation. In: 1999 WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1999, Phoenix, EUA. **Anais..** EUA: Winter Conference on Simulation : simulation, a bridge to the future, vol. 2, p. 1262-1279, 1999.

WANISUBUT, S. **A Toll Plaza Simulation Model and Level-of-Service Criteria**. 1989. 514f. Ph.D. Thesis. Polytechnic University, University Microfilms International, Ann Arbor, Michigan, EUA, 1989.

WIEDEMANN, R. **Simulation dès Straßenverkehrsflusses**. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8, 1974.

_____. Modeling of RTI-Elements on Multi-Lane Roads. In: **Advanced Telematics in Road Transport**. Edited by Commission of the European Community, DB XIII, Brussels, 1991.

WOO, T.H.; HOEL, L. H. Toll Plaza Capacity and Level of Service. **Transportation Research Record 1320**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, EUA, p.119-127, 1991.

ZARRILLO, M.L. **Development and Applications of TPMODEL: A Queuing model describing Traffic Operations during Electronic Toll Collection (ETC)**. 1998. 286f. Ph.D. Thesis. University of Central Florida - UFC, Florida, EUA, 1998.

_____. Capacity Calculations for Two Toll Facilities: Two Experiences in ETC Implementation. In: In: 79TH ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, Washington, EUA. **Anais..** EUA: 79th TRB, 2000. 1 CD-ROM.

ZARRILLO, M.L., RADWAN, A.E., SCHMITT, E D. Modeling Traffic at Toll Facilities Applying Vehicle Properties, Driver Perception-Reaction Time and Stop-Time to the Basic Equations of Motion from Car-Following Theory. In: 83TH ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, Washington, EUA. **Anais..** EUA: 83th TRB, 2004. 1 CD-ROM.

ANEXO 1 – ALGORITMOS DO MICRO-SIMULADOR DE TRÁFEGO VISSIM

O Modelo de Simulação VISSIM e seus Algoritmos

O VISSIM é um modelo de simulação de tráfego microscópico estocástico, que no passado foi utilizado para dimensionar sistemas urbanos e de transporte público, e que também possuía capacidade para reproduzir o comportamento do tráfego em rodovias. Seus modelos de tráfego são baseados no trabalho de Wiedemann (Wiedemann, 1974 e 1991), o qual combina um modelo de percepção de motoristas com modelos de desempenho de veículos.

O modelo adotado para movimentos longitudinais de veículos (Car-following) apresenta características psicofísicas, enquanto o modelo para movimentos transversais (Lane-changing) é um algoritmo baseado em regras.

No VISSIM, tanto o modelo de car-following como de lane-changing utilizam uma ampla gama de parâmetros, e todos influenciam com maior ou menor intensidade o comportamento dos veículos na simulação do fluxo de tráfego.

O comportamento de motoristas está relacionado a cada tipo de link, e para cada classe de veículo pode-se definir diferentes parâmetros comportamentais – mesmo dentro de um mesmo link.

Modelo de Car-Following Psico-físico

Como já mencionado, o modelo adotado para movimentos longitudinais de veículos (Car-following) apresenta características psicofísicas, e é resultado do trabalho de Wiedemann (1974 e 1991).

O simulador VISSIM busca representar o fluxo de tráfego através dos movimentos das unidades veículos-motoristas dentro de uma rede. Cada motorista, com seus comportamentos únicos, são designados para veículos específicos. Como consequência, o comportamento de motoristas corresponde também as capacidades técnicas de seus veículos. Os atributos que caracterizam cada conjunto motorista-veículo podem ser separados em três categorias:

- Especificações técnicas de veículos

- a) Comprimento
 - b) Velocidade máxima
 - c) Aceleração potencial
 - d) Posição atual na rede
 - e) Velocidades e acelerações atuais na rede
 - f) Comportamento do conjunto veículo-motorista
- Limites de sensibilidade psico-físicas dos motoristas (habilidade de estimar, agressividade)
 - a) Memória do motorista
 - b) Acelerações baseadas nas velocidades atuais e desejadas
 - c) Interdependência das unidades veículo-motorista
 - d) Referências aos veículos à frente e atrás em sua faixa de tráfego e nas faixas adjacentes
 - e) Referência ao link atual e à próxima intersecção
 - f) Referência ao próximo semáforo

O modelo comportamental de car-following para motoristas envolve a classificação das reações em resposta às velocidades e distâncias relativas percebidas com relação a outro veículo a sua frente no fluxo de tráfego.

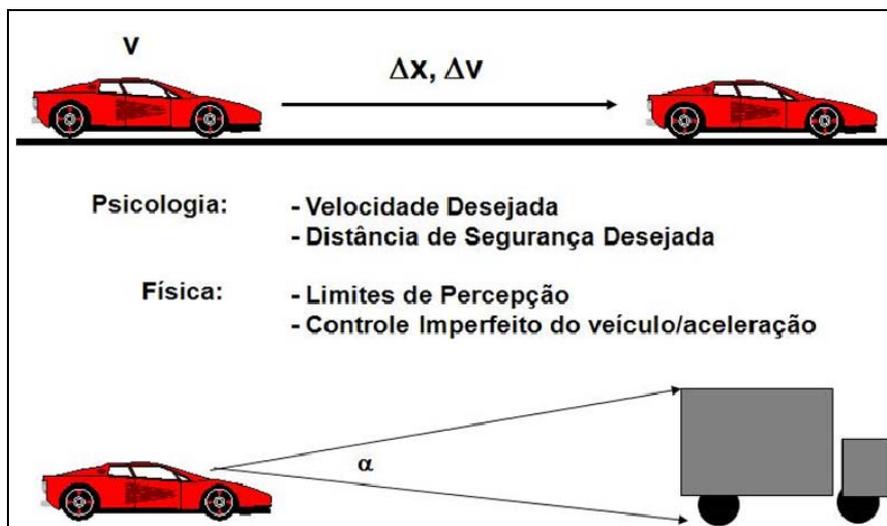


Figura 26: Representação das percepções Psicofísicas

A idéia básica dos modelos de Wiedemann é assumir que motoristas podem estar em um dos quatro estágios de formas de condução de veículos:

Condução Livre: Sem influências de veículos a sua frente. Neste modo de condução, o motorista busca atingir e manter certa velocidade, ou seja, sua velocidade desejada. Na realidade, a velocidade na condução livre não se mantém constante, variando em torno da velocidade desejada devido ao controle imperfeito do pedal do acelerador;

Condução de Aproximação: Corresponde ao processo de adaptação da velocidade de motoristas as velocidades menores impostas por veículos mais lentos à sua frente. Enquanto ocorre a aproximação, um motorista seguidor aplica uma desaceleração de forma a igualar sua velocidade a velocidade do veículo a sua frente no instante que atinge sua distância de segurança desejada;

Condução de Seguidor: O motorista segue o veículo a sua frente sem consciência de aceleração ou desaceleração, buscando manter relativamente constante uma distância considerada segura. Contudo, devido a imperfeições no controle do pedal do acelerador e em estimativas de posicionamento, a diferença de velocidades oscila em torno de zero;

Condução de frenagem: Ocorre se há imposição de taxas de desaceleração médias ou altas quando a distância ao veículo da frente fica muito abaixo da distância considerada segura pelo condutor. Isto pode acontecer quando o veículo líder altera sua velocidade abruptamente, ou quando outro veículo realiza uma troca de faixa ficando a frente do veículo observado, diminuindo assim a distância de segurança.

Para cada estágio, a aceleração é definida como resultado da velocidade, diferenças de velocidades e distâncias com relação a outros veículos e características individuais de motoristas e veículos. Motoristas passam de um estágio para outro assim que atingem certas condições, que podem ser expressas como combinações de diferenças de velocidades e distâncias. Por exemplo, uma pequena diferença de velocidades pode apenas ser percebida em pequenas distâncias, enquanto altas diferenças de velocidades forçam uma aproximação mais rápida, requerendo outro tipo de atitude por parte de condutores. A Figura 27 representa o comportamento de um conjunto motorista-veículo em cada um dos estágios apresentados acima quando da aproximação de outro veículo a sua frente.

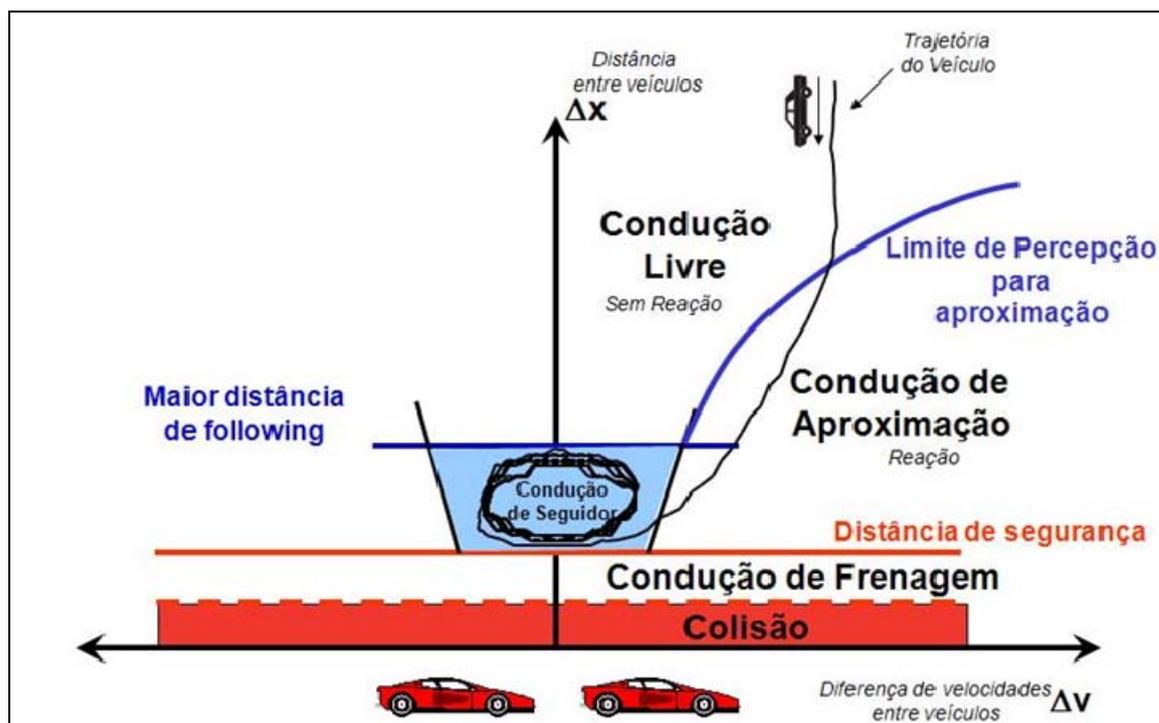


Figura 27: Representação da aproximação entre veículos e a reação psicofísica

Fonte: PTV, 2006

A habilidade de perceber diferenças de velocidades e estimar distâncias varia dentro da população de motoristas, assim como velocidades desejadas e distâncias de segurança.

O software VISSIM apresenta dois principais tipos de modelos psico-físicos de car-following, desenvolvidos por Wiedemann nos anos de 1974 e 1999.

Parâmetros comuns em ambos modelos são as distâncias de visibilidade de motoristas à frente (vide Figura 26), número de veículos ao qual o motorista pode observar e o período de falta de atenção temporária e sua probabilidade de ocorrência.

A distância de visibilidade à frente define a distância que motoristas podem enxergar tanto à frente como lateralmente (dentro de um mesmo link) de forma a encontrar outros veículos. O valor máximo para distância de visibilidade necessita ser alterado em raras ocasiões, como o caso de modelagens de linhas férreas e a presença de sinais ou estações que necessitam ser reconhecidas a tempo. O valor mínimo é importante quando da reprodução do comportamento lateral de veículos, especialmente quando veículos formam filas e ficam muito próximos uns aos outros, sendo necessário um aumento neste valor de entrada, e o valor dependerá da velocidade de aproximação. Sem aumentar a distância

mínima de visibilidade, quando da modelagem de movimentos laterais, veículos podem não parar em sinais vermelhos ou para outros veículos em intersecções.

O número de veículos ao qual o motorista pode observar afeta como veículos na rede podem prever os movimentos de outros veículos, e reagir a tais movimentos. Como alguns elementos de rede são internamente modelados, pode ser útil aumentar este valor de entrada se existirem várias intersecções com pequenas distâncias entre sí.

O período de falta de atenção temporária corresponde ao tempo em que veículos não irão reagir ao veículo à sua frente (exceto para frenagens de emergência). A duração define o período de falta de atenção, e a probabilidade define a frequência com que esta falta de atenção deve ocorrer. Quanto mais altos estes parâmetros, mais baixas serão as capacidades no respectivo link.

O modelo de Wiedemann-74 é mais indicado para a modelagem do tráfego urbano, enquanto Wiedemann-99 para o tráfego interurbano em rodovias (PTV, 2006).

Para o modelo de Car-Following de Wiedemann-74 os seguintes parâmetros estão disponíveis: (i) distância média de parada (ax) define a distância média desejada entre veículos parados, que possui uma variação fixa de ± 1 m; (ii) parte aditiva da distância desejada de segurança (bx_add) e a parte multiplicativa da distância desejada de segurança (bx_mult) afetam o cálculo da distância de segurança. A distância “ d ” entre dois veículos é obtida utilizando a seguinte fórmula:

$$d = ax + bx \tag{21}$$

onde ax é a distância média de parada, e bx é

$$bx = (bx_add + bx_mult * z) * \sqrt{v} \tag{22}$$

onde

v é a velocidade do veículo (m/s)

z é um valor que varia entre 0 e 1, normalmente distribuído em torno de 0,5, com desvio padrão de 0,15.

O modelo de Wiedemann-99 possui uma modelagem mais complexa, pois leva em consideração outros fatores além da distância desejada entre veículos. Considera a diferença

psico-física entre percepções de motoristas, como visibilidade, aceitabilidade de distâncias críticas, variações no controle do pedal de aceleração, etc.

Os parâmetros considerados no modelo de Wiedemann-99 são:

- a) CC0 (distância de parada) define a distância desejada de parada entre veículos parados. Não possui variação alguma.
- b) CC1 (tempo de headway) é o tempo (em segundos) que corresponde a um espaçamento que motoristas desejam manter de veículos a sua frente. Portanto, a uma dada velocidade (m/s), a distância de segurança dx_safe é obtida através de $(dx_safe = CC0 + CC1 * v)$. A distância de segurança é definida no modelo como a distância mínima que motoristas irão manter quando seguindo outro veículo. Para o caso de altos volumes, esta distância tornar-se-á o valor com maior influência na capacidade;
- c) CC2 (variação de “Following”) restringe a oscilação longitudinal, ou o quanto mais de distância além da distância desejada de segurança o motorista permite antes dele intencionalmente se aproximar do veículo à sua frente. Se este valor é definido como 10m, o processo de following resulta em distâncias entre dx_safe e $dx_safe + 10m$;
- d) CC3 (espaçamento para entrar em “following”) controla o começo do processo de desaceleração, isto é, quando o motorista reconhece um veículo mais lento à sua frente. Em outras palavras, define quantos segundos antes de atingir a distância de segurança o motorista necessita começar a desacelerar.
- e) CC4 e CC5 (limites do “following”) controlam a diferença de velocidades durante o estado de “following”. Menores valores resultam em reações mais sensíveis de motoristas à acelerações ou desacelerações de veículos líderes, isto é, os veículos trafegam mais próximos uns dos outros. CC4 e CC5 são utilizados para velocidades negativas e positivas, respectivamente;
- f) CC6 (Velocidade dependente da oscilação): Busca representar a influência da distância na oscilação da velocidade dos veículos enquanto no processo de “following”. Se determinado como nulo, a oscilação da velocidade é independente da distância com relação ao veículo líder. Valores altos para

este parâmetro levam a altas oscilações na velocidade para grandes distâncias;

- g) CC7 (Oscilação da Aceleração): Aceleração real durante o processo de oscilação;
- h) CC8 (Aceleração quando parado): Aceleração desejada de um veículo quando este estiver começando a se movimentar a partir da situação parada (limitada pela máxima aceleração definida nas curvas de aceleração);
- i) CC9 (Aceleração a 80 km/h): Aceleração desejada a 80 km/h (limitada pela máxima aceleração definida nas curvas de aceleração).

A revisão bibliográfica (Gomes *et al.*, 2004; Park e Qi, 2006; Lownes e Machemehl, 2006) indica alteração de somente alguns parâmetros para calibração do algoritmo de car-following psico-físico, como: CC0 (distância de parada), que define a distância desejada de parada entre veículos parados; CC1 (tempo de headway), que corresponde ao intervalo de tempo (em segundos) do espaçamento que motoristas desejam manter de veículos a sua frente, e; CC4 e CC5 (limites do “following”) controlam a diferença de velocidades durante o estado de “following”. Para os parâmetros, menores valores resultam em reações mais sensíveis de motoristas às acelerações ou desacelerações de veículos líderes, isto é, os veículos trafegam mais próximos uns aos outros, resultando em maiores capacidades viárias.

A partir das descrições dos modelos de car-following, possíveis de serem utilizados no software VISSIM, pôde-se ter idéia das diversas variáveis e suas interações. Deve-se ressaltar a aplicabilidade de cada um dos modelos.

O modelo de Wiedemann-74 possui aplicabilidade para ambientes urbanos, onde veículos trafegam a baixas velocidades e o efeito de fila (*stop-and-go*) é freqüente. Neste modelo é possível configurar a atitude de veículos quanto à proximidade de veículos líderes, o que representa parâmetro indispensável quando das situações de filas nas cabines de praças de pedágio.

O modelo de car-following de Wiedemann-99 possui aplicabilidade para secções de rodovias e para a parte inicial de entrada nas praças, onde o número de faixas passa a aumentar em decorrência da presença física da praça de pedágio no sistema. Neste modelo, mais complexo comparando-se o número de parâmetros envolvidos, deve-se salientar àqueles que alteram ou flexibilizam as acelerações e/ou desacelerações de acordo com o

posicionamento do veículo seguidor ao veículo líder. Outra importante consideração está na possibilidade de alteração do tempo de reação de motoristas quando verificado a presença de veículo líder mais lento.

Modelo de Lane-Changing

A modelagem de troca de faixas no simulador VISSIM representa dois tipos de comportamento:

- a) Troca de faixa necessária (buscando o próximo conector de uma rota pré-definida) e;
- b) Troca de faixa livre (buscando mais espaço ou maior velocidade de tráfego).

No caso de troca de faixa necessária, o parâmetro comportamental mais importante para os motoristas envolvidos é a máxima desaceleração aceitável, tanto para o veículo que está realizando a troca de faixa como para aquele veículo que está sendo afetado pela troca do anterior. As desacelerações dependerão das distâncias entre veículos e do espaçamento até o ponto de parada de emergência ao próximo conector de uma rota.

Para troca de faixa livre, o simulador verifica a distância desejada de segurança com relação a um veículo trafegando na faixa de destino. Esta distância de segurança depende das velocidades de ambos os veículos envolvidos, aquele que deseja realizar a troca de faixa e aquele que trafega na faixa desejada. Atualmente, o parâmetro de agressividade para as trocas de faixa não pode ser alterado no simulador, contudo alterando-se parâmetros de distâncias desejadas de segurança (os quais são utilizados para representar o comportamento de “following”) também afetará o comportamento de troca livre de faixas.

Para ambos os casos, quando o motorista busca uma troca de faixa, o primeiro passo é encontrar espaço (*gap* – tempo de *headway*) no fluxo de destino. O tamanho do espaço é dependente das velocidades dos veículos envolvidos, ou seja, da velocidades dos veículos que desejam realizar a troca de faixa e dos que trafegam no fluxo de destino. Para casos de trocas de faixa necessária, também há a influência de valores de desaceleração, ou seja, agressividade.

Os parâmetros envolvidos no algoritmo de troca de faixas são divididos em (i) comportamento geral, (ii) troca de faixa necessária (rotas) e (iii) outros parâmetros.

O parâmetro de comportamento geral define a forma de ultrapassagem, e há possibilidade de escolha entre duas opções: seleção de faixas livre ou a regra do lado direito. Na opção de seleção de faixas livre, veículos podem realizar ultrapassagens utilizando qualquer faixa de tráfego. A opção contendo a regra do lado direito somente permite ultrapassagens em faixas com velocidades maiores se nestas faixas a velocidade estiver acima de 60 km/h. Para velocidades mais baixas, veículos trafegando na faixa mais lenta somente podem realizar ultrapassagens acelerando de tal forma que sua diferença de velocidade seja de até 20 km/h.

Para trocas de faixa resultantes de escolha de rotas, pode-se definir a agressividade dos veículos envolvidos. Esta agressividade que pode ser alterada na medida em que é possível definir limites de desaceleração tanto para o veículo que deseja realizar a troca de faixa (*Own*), como para aquele que está na faixa de destino (*Trailing*). As desacelerações são definidas pelas “taxa de desaceleração máxima” e “taxa de desaceleração aceitável”. Ainda, uma taxa de redução (metros por 1 m/s^2) é utilizada para reduzir a desaceleração máxima, atuando de forma a incrementar a distância do ponto de parada de emergência.

Existem ainda outros parâmetros que podem ser alterados, como:

- a) *Tempo de Espera antes da Difusão*: define o tempo máximo de espera de um veículo no ponto de parada de emergência que estaria aguardando uma brecha para realizar a troca de faixa, de forma a manter sua rota pré-definida. Quando este tempo de espera é ultrapassado, o veículo é retirado da rede (difusão) e uma mensagem é inserida no arquivo de erros, denotando o tempo e local da remoção;
- b) *Headway Mínimo (frente do veículo à traseira do veículo líder)*: define a distância mínima disponível de um veículo a outro a sua frente, para uma troca de faixa, quando ambos estiverem parados (situação de fila e a disponibilidade de espaço para manobra);
- c) *Tempo de Colisão em Troca para Faixa mais Lenta*: este parâmetro somente é utilizado na simulação se o comportamento para troca de faixas está designado para “Regra do lado direito”, e descreve o tempo de

headway mínimo entre o veículo trafegando na faixa mais rápida, e que gostaria de realizar e troca de faixa para a faixa mais lenta, e outro veículo à sua frente trafegando na faixa mais lenta;

- d) *Fator de Redução para a Distância de Segurança*: durante as trocas de faixa, este fator de redução é considerado, alterando as distâncias:
- a) de segurança entre o veículo na faixa de destino e o veículo que deseja trocar de faixa,
 - b) de segurança do próprio veículo que deseja trocar de faixa,
 - c) até um veículo (mais lento), a frente do veículo de referência, e que está realizando a troca de faixas.

Durante qualquer troca de faixa, as menores distâncias de segurança resultantes são obtidas como segue: *distância de segurança original X fator de redução*. Por exemplo, um fator de 0,6 reduz para 40% a distância de segurança. Após a realização da troca de faixa, a distância de segurança original é restabelecida.

Máxima Desaceleração para Frenagens de Cooperação: define a taxa máxima de desaceleração que veículos utilizarão nos casos de frenagens de cooperação, quando outros veículos desejarem migrar para sua faixa de tráfego, permitindo esta migração. Frenagens de cooperação utilizam:

- a) até 50% da taxa desejada de desaceleração quando o veículo que deseja trocar de faixa começar a realizar a troca, e
- b) entre 50% da taxa desejada de desaceleração até a máxima taxa de desaceleração definida na simulação quando o veículo que deseja trocar de faixa estiver efetivamente realizando a manobra. Comumente, as desacelerações durante as trocas de faixa serão abaixo do que a máxima taxa de desaceleração, desde que a troca de faixa realizada não necessite de altas desacelerações.

Comportamento Lateral de Veículos

No VISSIM, por definição, um veículo ocupa a largura total de uma faixa. Os parâmetros de comportamento lateral habilitam os veículos a trafegar com diferentes comportamentos e posições relativas laterais, e também realizar ultrapassagens dentro de uma mesma faixa se esta for larga o suficiente.

Os parâmetros disponíveis que controlam o comportamento lateral de veículos são:

- a) *Posição desejada em fluxo livre*: define a posição desejada lateral de um veículo dentro de uma faixa enquanto em fluxo livre. As opções são (i) *Meio da faixa – Middle of Lane*, (ii) *Qualquer posição – Any* ou (iii) *Direita – Right*;
- b) *Observar veículo(s) na(s) faixa(s) adjacente(s)*: Veículos podem considerar a posição lateral de outros veículos trafegando em faixa(s) adjacente(s) na mesma corrente de fluxo – esta opção possui a característica de ativada ou desativada;
- c) *Formação de filas em formato de diamante*: Permite a formação de filas escalonadas de acordo com a forma realística do veículo (ex: ciclistas) – esta opção possui a característica de ativada ou desativada;
- d) *Ultrapassagens na mesma faixa*: Seleção de todas as classes de veículos sobre as quais são permitidas ultrapassagens, dentro da mesma faixa, por qualquer veículo da classe ao qual este parâmetro esteja atribuído. Podem-se definir inclusive quais os lados por onde estas ultrapassagens serão realizadas (pela esquerda, pela direita ou por ambos os lados dentro de uma mesma faixa);
- e) *Distância lateral mínima*: Pode-se definir distâncias mínimas entre veículos dentro de uma mesma faixa para cada classe de veículo sendo ultrapassada. Estas distâncias são definidas para situações paradas (0 km/h) assim como para 50 km/h. Para aquelas classes de veículos que não possuem valores definidos, serão aplicados os valores padrão do simulador.