

|

**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
CENTRO TECNOLÓGICO
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

MARCELO BARROS DE PAULA

**Modelo de Simulação de Eventos
Discretos aplicado ao Planejamento e
Operação de Rodovias**

**NITERÓI
2006**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

MARCELO BARROS DE PAULA

**Modelo de Simulação de Eventos Discretos aplicado ao Planejamento e
Operação de Rodovias**

Dissertação apresentada ao Mestrado de Engenharia de Produção da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção. Área de Concentração: Sistemas, Apoio à Decisão e Logística.

ORIENTADOR: PROFº. DRº. Marco Antonio Farah Caldas

NITERÓI

2006

MARCELO BARROS DE PAULA

**Modelo de Simulação de Eventos Discretos aplicado ao
Planejamento e Operação de Rodovias**

Dissertação apresentada ao Mestrado de Engenharia de Produção da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção. Área de Concentração: Sistemas, Apoio à Decisão e Logística.

Aprovada em _____ de 2006

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marco Antonio Farah Caldas - Orientador
Universidade Federal Fluminense

Prof. Dra Marta Monteiro da Costa Cruz
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Artur Alves Pessoa
Universidade Federal Fluminense

Niterói
2006

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Orly e Edgar, que mesmo de longe foram capazes de transmitir amor e força, em mais esta empreitada. Toda a minha admiração, amor e um obrigado pelo seu incentivo.

À Tatazinho e Denilda, que estiveram presentes em todos os momentos desta conquista, vocês foram verdadeiros “pais”!

Tatá e Pai, um especial agradecimento pela confiança de vocês em minhas decisões. Obrigado! E a Mamãe e ZéDenilda, por todas as rezas. E não parem não! Ainda tem muito por conquistar!!

Aos meus irmãos Cristiane e Rodrigo, que sempre torcem pelo meu sucesso.

Aos meus amigos, cunhados e compadres, que se não estiveram envolvidos diretamente com este estudo, ao menos não me deixaram esquecer da missão: “E aí? Já entregou a Tese?”

Ao meu orientador e companheiro, Marco Caldas, pela oportunidade do estudo e pela confiança em mim depositada no desenvolvimento deste projeto. Orientador é a palavra certa para mestres como você, capazes de ser “*ponte*” para o conhecimento de seus alunos!

Ao Artur por nossas mirabolantes idéias sobre como representar um tráfego. Obrigado pelo apoio!

A galera do *Logis*, Valéria, Renata, Mario, Felipe, e Uchoa por nossa convivência alegre e de amizade que tornaram o desenvolvimento deste projeto mais prazeroso. Existe um pouco de cada um de vocês nesta pesquisa.

A galera da Ponte SA, José Carlos, Alexandre, Rodrigo e Márcio, pela total disponibilidade e apoio nas informações cedidas para o bom desenvolvimento deste estudo.

Agradecimento Especial

A minha esposa, Viviane, pelo apoio, compreensão, carinho, paciência (MUITA PACIÊNCIA!), e por seu companheirismo durante toda a jornada, que vai além do mestrado.

Valeu a pena, né?

“Faço hoje tudo que posso,
pois caso o amanhã não exista
terei feito tudo que pude”

Riva

RESUMO

Este estudo propõe uma metodologia de qualificação do tráfego de rodovias, em termos de níveis de serviço, baseando numa combinação entre as técnicas do Highway Capacity Manual – HCM e Simulação. De acordo com os estudos sobre o tema, o modelo aqui proposto se enquadra como um modelo mesoscópico de simulação onde descreve os veículos individualmente, mas não suas interações. Trata-se de um modelo intermediário entre os modelos de simulação microscópico e macroscópico porque, embora os veículos sejam representados individualmente e suas velocidades individualmente mantidas, seus comportamentos não são modelados em detalhe.

Palavra Chave: Simulação, HCM, Teoria de Tráfego, Modelos Mesoscópico

ABSTRAT

This study proposes a methodology to classify highway network flow and service levels based on a combination of the basis of the Highway Capacity Manual – HCM and Simulation. According to these past studies the model proposed by this study lies into the mesoscopic traffic simulation where the model describes individuals vehicles but not their interactions. This is an intermediary level between microscopic and macroscopic traffic simulation because, although the vehicles are represented individually and theirs speeds are individually maintained, their behaviour is not modeled in detail.

Key Words: Simulation, HCM, Traffic Flow Theory, Mesoscopic Traffic Simulation

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO:	16
2 – PROPOSIÇÃO:	21
3 – DELINEAMENTO DO ESTUDO:	22
4 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:	24
4.1 – SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO:	25
4.2 - CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS:	27
4.2.1 – Operacionalização:	27
4.2.2 - <i>Nível de Detalhe</i> :	30
4.3 - MODELOS DE SIMULAÇÃO MICROSCÓPICOS:	31
4.3.1 - <i>Safe-distance Models (ou Modelos com Distância Segura)</i> :	32
4.3.2 - <i>Stimulus-response Models (ou Modelos de Reação a Estímulos)</i> :	33
4.3.3 - <i>Psycho-spacing Models</i> :	34
4.4 - MODELOS DE SIMULAÇÃO MACROSCÓPICOS:	35
4.4.1 – <i>LWR Models</i> :	35
4.4.2 - <i>Cell Transmission Model</i> :	37
4.4.3 – <i>Relações entre as Variáveis Macroscópicas</i> :	38
4.4.3.1 – <i>Relações Teóricas</i> :	39
4.4.3.2 – <i>Relações Empíricas</i> :	41
4.5 - MODELOS MESOSCÓPICOS:	43
4.5.1 - <i>Headway Distribution Models</i> :	44
4.5.2 - <i>Cluster Models</i> :	44
4.5.3 – <i>O modelo proposto – um modelo mesoscópico</i> :	45
5 – METODOLOGIA:	46
5.1 - ESTRUTURAÇÃO DAS LÓGICAS:	46
5.1.1 - <i>Lógica Central</i> :	47
5.1.2 - <i>Lógicas de Apoio</i> :	48
5.1.2.1 - <i>Lógica Demanda</i> :	49
5.1.2.2 - <i>Lógica Evento</i> :	50

5.1.2.3 - Lógica Engarrafamento:	51
5.1.2.4 - Lógica Velocidade:	52
5.1.2.5 - Lógica Estatística:	53
5.2 – REGIMES DE TRÁFEGO:	53
5.2.1 – <i>Velocidade Básica (ou “Ideal”) do Segmento:</i>	55
5.2.1.1 - Condições Básicas:	55
5.2.1.2 - Condições Específicas do Segmento:	55
5.2.1.3 - Determinação do Free-Flow Speed do Segmento (FFS):	57
5.2.2 – <i>Regimes Básicos:</i>	59
5.2.3 - <i>Limites e Relações dos Regimes Básicos:</i>	62
5.2.4 – <i>Regimes Especiais (com Obstrução):</i>	72
5.3 - NÍVEIS DE SERVIÇO:	77
5.4 – EVENTOS (OBSTRUÇÃO DE PISTAS):	82
5.4.1 – <i>Tempo de Obstrução de Via:</i>	83
5.4.2 – <i>Probabilidade de Ocorrência:</i>	84
5.5 – DEMANDAS:	86
5.5.1 – <i>Determinação das Demandas:</i>	91
5.5.2 – <i>Comportamento da Demanda:</i>	94
5.5.3 – <i>Intervalo entre chegadas:</i>	95
5.5.4 – <i>Demanda Extra:</i>	96
5.6 – VEÍCULOS PESADOS:	97
6 – ESTUDO DE CASO:	100
6.1 – SOBRE A RODOVIA EM ESTUDO:	100
6.2 – DIMENSIONAMENTO DO NÍVEL DE SERVIÇO:	102
6.3 - ESCOLHA DO SEGMENTO A SER ESTUDADO:	103
6.4 – CARACTERÍSTICAS DO SEGMENTO:	104
6.5 - FREE-FLOW SPEED DO SEGMENTO:	106
6.6 - LIMITES ENTRE REGIMES DE TRÁFEGO	107
6.6.1 - <i>Regime FFS:</i>	108
6.6.2 - <i>Regime Under</i>	109
6.6.3 - <i>Regime Over</i>	112

6.6.4 - Regime Under_com Obstrução.....	114
6.6.5 - Regime Over_com Obstrução.....	118
6.6.6 – Eventos no Segmento e Tempos em Obstrução.....	120
6.7 - IDENTIFICAÇÃO DAS DEMANDAS	125
6.7.1 – Sentido Norte	125
6.7.2 – Sentido Sul.....	129
6.8 - DEMANDAS EXTRAS (ADVINDAS DA VIA ALTERNATIVA)	133
6.9 - EQUIVALÊNCIA DOS VEÍCULOS PESADOS	135
6.10 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	136
6.10.1 – Nível de Serviço (Densidade Média).....	137
6.10.2 – Performance junto aos Usuários	143
6.10.3 – Congestionamentos	147
7 – CONCLUSÕES:	150
8 - BIBLIOGRAFIA:	155
9 – ANEXOS:	158

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Greenshields - Relação Velocidade x Densidade	39
Figura 2: HCM - Relação Fluxo x Densidade	42
Figura 3: Esquema das Lógicas do Modelo	49
Figura 4: Regimes FFS e Under - Relação Velocidade x Fluxo (genérica)	59
Figura 5: Regime Over - Relação Fluxo versus Densidade (genérica)	60
Figura 6: Regime Under - Tabela Velocidade x Densidade (básica).....	64
Figura 7: Regime Under – Relação Velocidade x Densidade (básica).....	65
Figura 8 – Regime Over - Relação Fluxo x Densidade (básica).....	67
Figura 9 – Regime Under - Relação Velocidade x Fluxos (especiais).....	73
Figura 10 – Regime Over - Relação Fluxos x Densidades (especiais)	76
Figura 11 – Nível de Serviço A.....	79
Figura 12 – Nível de Serviço B.....	79
Figura 13 – Nível de Serviço C.....	80
Figura 14 – Nível de Serviço D.....	80
Figura 15 – Nível de Serviço E.....	81
Figura 16 – Nível de Serviço F (Over)	81
Figura 17 - Variação Mensal da Demanda - via de acesso a uma região turística...	87
Figura 18 - Variação Mensal da Demanda - via com duplo propósito	88
Figura 19 - Variação Semanal da Demanda	89
Figura 20 - Variação Diária da Demanda - via de acesso a uma região turística.....	90
Figura 21 - Variação Diária da Demanda - via urbana	90
Figura 22 - Curva característica - estudo de caso	93
Figura 23 – Esquema do Segmento – Características Geométricas.....	104
Figura 24: Regime FFS - Relação Velocidade x Fluxo (específica do segmento) ..	109
Figura 25: Regime Under - Relação Velocidade x Fluxo (específica do segmento)	111
Figura 26: Regime Over - Relação Fluxo x Densidade (específica do segmento. ..	114
Figura 27 – Regime Under_com Obstrução - Relação Velocidade x Fluxos.....	117

Figura 28 – Regime Over_com Obstrução - Relação Fluxo x Densidade	119
Figura 29 – Região de Interesse das Ocorrências	121
Figura 30: Distribuição Horária da Demanda – Segunda – Norte	127
Figura 31: Distribuição Horária da Demanda – Terça – Norte	127
Figura 32: Distribuição Horária da Demanda – Quarta – Norte.....	127
Figura 33: Distribuição Horária da Demanda – Quinta – Norte	128
Figura 34: Distribuição Horária da Demanda – Sexta – Norte	128
Figura 35: Distribuição Horária da Demanda – Sábado – Norte	128
Figura 36: Distribuição Horária da Demanda – Domingo – Norte	129
Figura 37: Distribuição Horária da Demanda – Segunda - Sul.....	131
Figura 38: Distribuição Horária da Demanda – Terça – Sul.....	131
Figura 39: Distribuição Horária da Demanda – Quarta – Sul	131
Figura 40: Distribuição Horária da Demanda – Quinta – Sul.....	132
Figura 41: Distribuição Horária da Demanda – Sexta – Sul	132
Figura 42: Distribuição Horária da Demanda – Sábado – Sul.....	132
Figura 43: Distribuição Horária da Demanda – Domingo - Sul.....	133
Figura 44 – Sentido Norte – Densidade Média (Cenário Atual).....	137
Figura 45 – Sentido Sul – Densidade Média (Cenário Atual)	137
Figura 46 – Sentido Norte x Sul – Densidade Média (Cenário Atual).....	138
Figura 47 – Sentido Norte – Densidade Média (Cenário Atual x Janela Tarde)	139
Figura 48 – Sentido Sul – Densidade Média (Cenário Atual x Janela Tarde)	140
Figura 49 – Sentido Norte – Densidade Média (Cenário Atual x Jan das Pontas) ..	141
Figura 50 – Sentido Sul – Densidade Média (Cenário Atual x Janela das Pontas) .	142
Figura 51 – Sentido Norte – Performance – (Cenário Atual x Janela da Tarde)	144
Figura 52 – Sentido Sul – Performance – (Cenário Atual x Janela da Tarde).....	144
Figura 53 – Sentido Norte – Performance – (Cenário Atual x Janela das Pontas) ..	145
Figura 54 – Sentido Sul – Performance – (Cenário Atual x Janela das Pontas)	146
Figura 55 – Sentido Norte – Congestionamento – (Cenário Atual x Jan. da Tarde)	148
Figura 56 – Sentido Sul – Congestionamento – (Cenário Atual x Jan. da Tarde) ...	148
Figura 57 – Sentido Norte – Congestionamento – (Cenário Atual x Jan. Pontas)...	149
Figura 58 – Sentido Sul – Congestionamento – (Cenário Atual x Jan. das Pontas)	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ajuste da Largura Média das Faixas – $f_{LaneWidth}$	57
Tabela 2: Ajuste da Largura do Acostamento – $f_{LateralClearance}$	58
Tabela 3: Ajuste do Número de Faixas – $f_{NumberofLanes}$	58
Tabela 4: Ajuste da Densidade de Acessos – $f_{InterchangeDensity}$	59
Tabela 5 – Proporção da Capacidade Disponível x Tipo de Obstrução (HCM)	73
Tabela 6 – Limites entre Níveis de Serviço (HCM).....	78
Tabela 7 - Demanda Média Diária - estudo de caso.	93
Tabela 8 – Demanda Extra – estudo de caso (Faculdade de Economia da UFF).....	96
Tabela 9 – Equivalência de veículos pesados (HCM)	98
Tabela 10 – Proporção da Capacidade Disponível x Tipo de Obstrução	115
Tabela 11 – Tabela de Ocorrências de Eventos (Fonte: Concessionária)	120
Tabela 12 – Demandas Diárias – Sentido Norte (Fonte: Pedágio).....	126
Tabela 13 – Demandas Diárias – Sentido Sul.....	130
Tabela 14 – Demanda Extras (Fonte: Faculdade de Economia da UFF).....	134
Tabela 15 – Equivalência de veículos pesados (do Segmento).....	135

1 - Introdução:

Tráfego e transporte são sempre essenciais para todas as economias do mundo, dado a sua responsabilidade de levar pessoas e produtos para todas as partes necessárias. Logo, trata-se de um sistema que tem grande impacto na maioria das atividades econômicas, e na vida das pessoas, o que justifica o interesse cada vez maior sobre esse tema.

Esses impactos muitas das vezes são problemas, os quais são denominados como externalidades negativas. Muitas podem ser as externalidades negativas provocadas pelo transporte, tal como, congestionamentos, acidentes, consumo excessivo de combustíveis, poluição do ar, ruídos e outros.

Problemas como os congestionamentos freqüentes (que tende a piorar) nas principais vias dos grandes centros urbanos, é um dos que mais se destaca. Onde, a maioria das pessoas tem que conviver diariamente com enormes atrasos, ao ir ou vir de seus empregos, e onde as empresas acumulam cada vez mais prejuízos e menor produtividade.

Segundo pesquisa IPEA/ANTP (1999), que considera o horário de pico da tarde de 10 grandes cidades brasileiras, os congestionamentos são responsáveis por um excesso de 240.000 horas em percurso, por um consumo a mais de combustível na ordem de 190.000 litros de gasolina e 5.000 litros de diesel, e ainda, por um excesso de emissão de 90 toneladas de CO pelos veículos. Pela mesma pesquisa, estimou-se que estas três externalidades em conjunto, equivalem a uma deseconomia de aproximadamente 378 milhões de reais por ano.

Outro problema do trânsito que merece destaque é o número de acidentes. O Brasil é reconhecidamente um dos recordistas mundiais de acidentes de trânsito. E estes também significam custos, deseconomias. Segundo relatório IPEA (2003), estes custos chegam a 5,3 bilhões de reais por ano, somente considerando as aglomerações urbanas brasileiras.

Dado a importância do tema, um entendimento claro das conseqüências de determinadas mudanças em características operacionais destas vias congestionadas é necessário para gerenciamento correto do tráfego, e conseqüentemente, diminuição destes impactos, e maior satisfação dos cidadãos.

Assim, conhecimento sobre o que causa estes congestionamentos, o que determina o tempo e local de uma retenção do fluxo, o quanto estes congestionamentos se propagam, ou como as características de uma via influenciam estes congestionamentos, são determinantes para a tomada de decisões.

No entanto, embora em muitos países as aplicações de modelos que descrevem a dinâmica do fluxo de veículos, já sejam bastante comuns entre os agentes deste campo, no Brasil ainda não temos uma vasta pesquisa que nos permita criar e utilizar características (dos veículos e dos motoristas) próprias em nossos modelos e análises.

São diversos os pontos e considerações que podem ser citados como ainda ineficazes para os estudos do tráfego de típicas vias brasileiras. Abaixo são destacados dois destes:

a) A falta de bancos de dados que disponibilizem dados históricos de tráfego de vias nacionais é um deles. Este poderia contribuir para um melhor entendimento das características e fenômenos de nosso tráfego, tal como a probabilidade de acidentes. Embora não seja objetivo desse estudo identificar metodologias de previsão de acidentes, ou mesmo de quantificação dos custos provocados por estes (Ex. devido a perdas materiais, devido a perda de vidas, etc.), os acidentes são de suma importância na modelagem aqui proposta. Isso porque, estes são considerados eventos, que ao ocorrer, provocam diminuição da capacidade da via. Uma das variáveis mais importantes dos modelos de tráfego.

b) O efeito dos veículos pesados típicos da frota nacional sobre a corrente de tráfego, é um outro ponto. A entrada de veículos pesados (Ex. caminhões, ônibus, etc.) em uma corrente de tráfego afeta diretamente o número de veículos que essa pode absorver.

Estes veículos afetam adversamente o tráfego por diversos motivos: São mais largos que os leves (Ex. automóveis, utilitários, etc.), ocupando mais espaço na via. Têm menos capacidade operacional, particularmente com respeito à aceleração, desaceleração e a capacidade de manter a velocidade em subidas. E ainda, o impacto sobre as condições de fluxo dado um evento envolvendo um veículo pesado é bem maior. Isto porque estes obstruem um número maior de vias e, em média, levam mais tempo para liberar estas do que os veículos leves.

No entanto, mesmo com estas limitações citadas, pretende-se com o estudo contribuir para as pesquisas neste campo, tomando-se como base, metodologias,

que se não foram criadas especificamente para análises das rodovias nacionais, ao menos têm grande aceitação internacional, como é o caso das metodologias do HCM (Highway Capacity Manual).

A metodologia HCM se baseia em teorias do fluxo de tráfego e em estudos empíricos desenvolvidos nas últimas décadas, e fornece subsídios para estudos analíticos e determinísticos sobre vias, qualificando-as em termos de nível de serviço.

Tal enfoque, no entanto, não permite uma visão mais aprofundada do dinamismo que o tráfego possui. O tráfego é uma resultante de um conjunto variáveis que se interagem e se alteram sob diversas condições e a todo instante, muitas destas com alta aleatoriedade.

Logo, um modelo que busque representar tal sistema, considerando as mais diversas interações se apresenta altamente complexo, o que faz com que a simulação passe a ser a técnica mais indicada.

Além disso, a simulação tem uma outra grande vantagem, que é a capacidade de avaliar, antecipadamente, e com relativa rapidez, os efeitos de alterações operacionais, evitando assim, incorrer em tomadas de decisões que se mostrem ineficientes na resolução de um dado “problema” com o tráfego.

A possibilidade de uma análise antecipada evita expor os usuários a situações adversas (Ex. maiores congestionamentos, maiores riscos de acidentes, etc.) advindos dessas mudanças que se mostrariam ineficientes.

Esta antecipação da análise e dos resultados das alternativas contribui muito também no planejamento do tráfego para cenários futuros a partir da expectativa de demandas.

Dado as considerações expostas acima, o estudo busca contribuir para as pesquisas neste campo, através da elaboração de um modelo de simulação de eventos discretos, usando-se um software de simulação como plataforma e baseando-se na teoria do fluxo de tráfego e em estudos empíricos desenvolvidos nas últimas décadas, e descritos em metodologias do Highway Capacity Manual (HCM 2000).

Mais especificamente, o estudo tem por objetivo avaliar se o modelo desenvolvido é capaz de diagnosticar alterações nas condições do tráfego de um dado segmento de via, em termos de nível de serviço, em função de mudanças das variáveis que determinam estas.

2 – Proposição:

O modelo desenvolvido foi aplicado em um estudo de caso, mais especificamente, em um segmento de uma via de alta performance (freeways), tendo como premissas suas características geométricas e o tipo de tráfego que por ela passa (demandas). Nesse estudo buscou-se identificar:

- ✓ Os níveis de serviços prestados por essa via.
- ✓ Os níveis de serviços após alterações das demandas, mais especificamente pelo aumento do número de veículos pesados, em determinadas horas do dia (janelas).
- ✓ E por fim, se o modelo desenvolvido é capaz de diagnosticar alterações nas condições do tráfego de um segmento de via, em termos de nível de serviço, em função de mudanças das variáveis que determinam estas condições, tal como a demanda.

3 – Delineamento do Estudo:

O estudo está delineado da seguinte forma:

- ✓ Na introdução busca-se apresentar uma visão sobre o tema, a importância do estudo e como esse pode contribuir para o tema.
- ✓ Na revisão de literatura, busca-se identificar os principais modelos existentes, aplicados à análise e simulação de tráfego, e classificá-los através de suas características.
- ✓ Na metodologia são apresentados todas técnicas e estudos considerados na elaboração da lógica e na criação do modelo de simulação. Tem-se nesta parte, uma visão genérica de como o modelo está estruturado.
- ✓ No estudo de caso, o modelo é aplicado em um segmento específico, onde são simulados alguns cenários contemplando diversas situações, e onde se busca verificar a aplicabilidade do modelo.

- ✓ Nos resultados e discussão são apresentados os dados obtidos neste estudo, discutido os pontos de maior relevância do modelo e sugestões para novos estudos.
- ✓ E, por fim são apresentadas as conclusões do estudo.

4 – Revisão Bibliográfica:

Nas últimas décadas, particularmente a partir dos estudos de Lighthill and Whitham (1955), onde foi apresentado um modelo baseado na analogia entre os veículos de um fluxo de tráfego e as partículas de um fluido, muito se tem pesquisado sobre modelos de fluxo de tráfego. Neste período inúmeras descrições matemáticas sobre o fluxo de tráfego foram pesquisadas e discutidas por estudiosos da área de engenharia de tráfego, resultando em um grande conjunto de modelos que buscam descrever a dinâmica do tráfego. Para uma revisão mais completa das pesquisas sobre o tema, ver May, A.D. (1990), Daganzo, C. (1997) ou Gartner, N.H. et al. (1997).

Estes modelos, conforme será visto a seguir, podem ser classificados de acordo com suas características, deixando claro que não existe apenas uma metodologia para se representar um fluxo de tráfego, mas várias, e que estas são determinadas de acordo com a abordagem que se queira.

Outro ponto que fica claro é a importância da utilização da simulação nos modelos de fluxo de tráfego que buscam refletir as características e comportamentos

de um sistema altamente complexo, onde métodos analíticos podem não gerar os resultados desejados.

4.1 – Simulação de Tráfego:

A modelagem por simulação tem se tornado cada vez mais popular como a ferramenta adequada à análise de uma grande variedade de problemas dinâmicos, tal como o tráfego. Isso porque, esses problemas geralmente envolvem uma complexa interação entre muitos componentes e entidades do sistema representado, que não podem ser prontamente descritos em termos analíticos.

Para Lieberman (1997), modelos de simulação são desenvolvidos para imitar o comportamento de um dado sistema e que, se propriamente desenvolvidos, integram o comportamento das entidades e suas interações para produzir uma detalhada descrição quantitativa da performance desse sistema.

Especificamente, modelos de simulação são representações lógicas e matemáticas do sistema real, que toma forma de um software executado em computador de uma maneira experimental.

Um modelo de simulação de tráfego bem desenvolvido pode, através dos resultados obtidos após a simulação de um dado cenário, informar “o que” provavelmente aconteceria no sistema real “se” as entradas deste cenário se repetissem (“What If”).

Logo, estes modelos de simulação de tráfego podem satisfazer um grande número de requerimentos, tais como:

- ✓ Avaliação de Alternativas de Estruturas Físicas – é possível experimentar as várias opções de mudanças operacionais de um dado local em estudo, antes de uma decisão (Ex. O aumento do número de faixas de uma pista ou a alteração do número de cabines de pedágio, etc);
- ✓ Avaliação de Prováveis Cenários – é possível avaliar previamente os efeitos de alterações da demanda (Ex. Aumento do numero de veículos em um dado horário, etc), ou da composição dos veículos (Ex. Percentual maior de veículos pesados, etc), ajudando a identificar futuros gargalos;
- ✓ Testar Novos Designs – investir em reforma ou construção de rodovias é altamente custoso, logo quantificar a performance esperada de um novo design de uma rodovia antes é primordial e pode ser feito através da simulação;
- ✓ Treinamento de Pessoal – pode-se usar simulações de cenários representativos de situações do mundo real no treinamento de operadores de tráfego;
- ✓ Análise de Segurança – a simulação pode recriar cenários de acidentes a fim de ajudar identificação de melhorias operacionais ou físicas que diminuam ou eliminem tais eventos.

Esses exemplos indicam apenas um pouco da variedade de aplicações e escopo que os modelos de simulação de tráfego podem atuar.

4.2 - Classificação dos Modelos:

Segundo Hoogendoorn e Bovy (2001), os modelos podem ser classificados de diversas formas:

- ✓ Nível de Detalhe - microscópica, mesoscópica e macroscópica;
- ✓ Tipo das Variáveis Independentes - contínua e discreta;
- ✓ Representação do Processo - determinístico e estocástico;
- ✓ Operacionalização - analítica e simulação;
- ✓ Escala da Aplicação - conjunto de vias, freeway e cruzamentos.

No entanto, este estudo estará preocupado apenas, em classificá-los em função do nível de detalhe que estes descrevem o sistema de tráfego e o modo como se operacionalizam para a produção das respostas.

4.2.1 – Operacionalização:

A operacionalização dos modelos pode ser classificada como analítica ou simulação. Nos modelos analíticos, onde as soluções do conjunto de equações que descrevem o sistema de tráfego são obtidas analiticamente, via cálculos, busca-se

de forma mais direta os resultados de um dado problema de tráfego, através de métodos numéricos. Já na simulação, sucessivas trocas do estado do sistema de tráfego no decorrer do tempo são reproduzidas no modelo, seguindo assim, a dinâmica deste e dando-nos uma visão continuada do estado do sistema no decorrer do tempo. Essa característica dos simuladores é tida como uma vantagem sobre os modelos analíticos, uma vez que nos dá mais informações sobre o que está acontecendo no sistema no decorrer do estudo.

Cabe salientar que até pouco tempo, os custos computacionais para se simular sistemas mais complexos impediam tal uso, no entanto, com o tamanho avanço do potencial dos computadores nos últimos anos, estes custos já não são mais o grande inibidor destes estudos via simulação.

>> A importância de captar a dinâmica do tráfego (simulação):

Quando se pretende estudar ou planejar um sistema de tráfego compatível com as necessidades de um determinado local, a relação *oferta e demanda* e as *interações* entre estas devem ser consideradas. Tal como a análise da maioria dos produtos ou serviços em qualquer outro tipo de mercado.

Logo, num modelo que pretende refletir (simular) um determinado sistema de tráfego, as características desta “mercado” também devem ser consideradas e representadas. Neste caso, é necessário incluir as interações existentes entre o lado da oferta, representados pelas rodovias e ruas, com suas respectivas características físicas (Ex número de pistas, a largura destas, etc) e de controle (Ex. limites de velocidade, pedágios, etc), e o lado da demanda, representados pelos veículos de categorias diversas (Ex. veículos de passeio, caminhões, etc) e seus motoristas e

suas características comportamentais específicas (Ex. estilo de direção). Estas interações refletem as reações dos motoristas (demanda) diante das condições encontradas nas rodovias (oferta).

Os modelos analíticos geralmente refletem essa relação entre a demanda (veículos querendo usar uma via) e a oferta (a performance da via) de um modo estático, ou seja, o fluxo e as condições da via se mantêm estáveis durante cada período estudado.

Embora essa abordagem lhes permita encontrar um equilíbrio (supondo este como ideal) de forma rápida, a mesma não considera as variações do estado do tráfego no decorrer do tempo (dinâmico). O problema deste tipo de abordagem não é apenas que a demanda varia muito no decorrer do tempo, mas também o fato de que a performance da via também sofre grandes flutuações, seja por retenções provocadas por uma variação de demanda brusca momentânea ou pela redução da capacidade da via em função de eventos (ex. acidentes, etc). Além disso, tem a questão da instantaneidade com que essa abordagem assume uma alteração da demanda, não levando em conta que esta alteração (um aumento, por exemplo), toma-se um certo tempo até que inicie seus efeitos sobre uma dada via por completa.

Enfim, desta forma o dinamismo inerente ao tráfego, é pouco percebido por estes modelos analíticos (estáticos), o que leva a uma análise enfraquecida da performance de um dado sistema de tráfego, principalmente em momentos de congestionamentos. Como exemplo de modelos dinâmicos, podem-se citar os modelos como o CONTRAM (Leonard, D.R. et al. 1989), DYNASMART (Jayakrishnan, R. et al. 1994) e o DYNAMIT (Ben-Akiva, M. et al. 1997).

4.2.2 - Nível de Detalhe:

Quanto ao nível de detalhe os modelos podem ser classificados desde modelos **macroscópicos**, passando por **mesoscópicos**, até **microscópicos**. Os modelos macroscópicos tratam o tráfego de forma agregada tal como um fluido (no caso o fluxo de veículos), sem distinguir o comportamento de suas partes constituintes (veículos), enquanto que os modelos microscópicos descrevem o comportamento de cada entidade de um sistema (veículos) assim como a relação entre estas em um alto nível de detalhe (individualmente). Já os modelos mesoscópicos têm um nível de detalhe intermediário, onde descrevem as entidades individualmente, mas não suas interações.

Para alguns autores, existe ainda um quarto grupo, denominados modelos **sub-microscópicos**, que são modelos similares aos microscópicos, no entanto com um ainda maior nível de detalhe, levando em conta neste caso, também à relação motorista e veículo (ex. troca de marchas).

Abaixo é descrito um resumo de alguns modelos elaborados e discutidos nas últimas décadas e estes estão divididos de acordo com as suas classificações quanto ao nível de detalhe. Inicialmente citam-se alguns tipos de modelos microscópicos, pois embora não sejam estes as referências diretas para o modelo por hora proposto aqui, estes têm grande importância para o tema e poderão servir na continuidade de estudos futuros.

4.3 - Modelos de Simulação Microscópicos:

Com o desenvolvimento de computadores cada vez mais rápidos, modelos cada vez mais complexos foram possíveis de serem desenvolvidos. Estes têm capacidade de tratar inúmeras regras de decisão e cálculos que representam o comportamento de cada motorista, de seu veículo, sua posição, sua velocidade e sua aceleração, em instantes. Com isso, verdadeiros micro-simuladores surgiram, incluindo nestes, todas as regras dos modelos de perseguição (car-following), que veremos a seguir, e ainda regras de decisão sobre a troca de pistas (lane-changing behavior) para cada veículo em um fluxo de tráfego. Quanto a estas regras de troca de pista, os critérios utilizados nos modelos geralmente são de forma geral:

- ✓ Decisão de trocar
- ✓ Escolha de uma pista alternativa
- ✓ Se há espaço na pista alternativa.

>> Car-following Models (ou Modelos de Perseguição):

Estes surgiram a partir de experimentos realizados nos fins dos anos 50 (Herman, 1961) e são modelos baseados em mecanismos que descrevem um processo em que um veículo segue um outro, buscando traduzir a reação de um veículo (o seguidor), em termos de velocidade, dado os estímulos recebidos a partir da relação entre a velocidade deste e a do veículo a sua frente (o líder). Para este tipo de modelos temos algumas variações:

4.3.1 - Safe-distance Models (ou Modelos com Distância Segura):

Estes modelos buscam descrever os movimentos de um dado veículo em relação ao seu predecessor utilizando-se como regra uma distância segura que faça com que evite colisões entre os dois. Como referência pode-se citar a regra de Pipes (Pipes, 1953) para estes casos: *“A good rule for following another vehicle at a safe distance is to allow yourself at least the length of a car between you and the vehicle ahead for every ten miles an hour (16.1km/hr) of speed at which you are travelling”*. Com esta regra pode-se determinar a distância entre carros (headway) mínima, para cada velocidade em que o seguidor trafega:

$$D_n(v) = L_n \left(1 + \frac{v}{16,1}\right) \quad (4.1)$$

Onde L_n é igual ao tamanho do veículo em questão e v é a velocidade deste. Neste modelo fica claro que a distância mínima segura cresce linearmente com o aumento da velocidade do veículo.

Outros autores foram além sobre estes modelos, e determinaram novas características. Leutzbach (1988) afirmou que em tráfegos congestionados, a distância segura que um motorista deve assumir está em função de um tempo (T) suficiente, que lhe permita frear até parar sem colidir com o veículo da frente, dado uma parada instantânea deste último. Para a definição deste tempo de reação, este considera três variáveis:

- ✓ Tempo de Percepção - tempo necessário para que o motorista perceba que existe um obstáculo

- ✓ Tempo de Decisão - tempo necessário para decidir desacelerar
- ✓ Tempo de Frenagem - tempo necessário para parar (derrapagem), envolvendo neste caso, questões como atrito da pista (μ) e gravidade (g)

A partir destas variáveis definidas é possível chegar a uma distância mínima segura através da expressão:

$$D_n(v) = L_n + Tv + \frac{v^2}{2\mu g} \quad (4.2)$$

Já Jepsen (1998) assume que a distância segura mínima entre dois veículos em movimento, deve considerar, além do tamanho do veículo e do tempo de reação, um fator de risco (F) que aumenta linearmente com a velocidade, e ainda uma distância mínima (d_{min}) que descreve o mínimo espaço entre dois veículos quando parados em situação de engarrafamento (*jam density*).

$$D_n(v) = (L_n + d_{min}) + v(T + vF) \quad (4.3)$$

4.3.2 - Stimulus-response Models (ou Modelos de Reação a Estímulos):

Estes tipos de modelos assumem que os motoristas seguidores se comportam, reagem, de acordo com os estímulos advindos do veículo líder e com o grau de sensibilidade para perceber estes.

$$\text{reação} = \text{sensibilidade} \times \text{estímulo}$$

Através da expressão (Chandler et al. (1958)),

$$a_n(t+T) = y(v_{n-1} - v_n(t)) \quad (4.4)$$

onde a_n representa a aceleração ou frenagem, e y é o grau de sensibilidade, pode-se verificar que a decisão de um motorista de frear ou acelerar, após um tempo de reação T , está ligado diretamente a diferença entre a velocidade do líder (V_{n-1}) e a sua (V_n) e o grau de sensibilidade no momento. Por exemplo, quando há um aumento da velocidade do líder em relação ao seguidor, este último reage acelerando em intensidade que está em função de sua sensibilidade em perceber isto. Este grau de sensibilidade está ligado diretamente à distância entre os veículos (Gazis et al. (1961)). Ou seja, quanto mais próximo os veículos, mais sensível está o seguidor a mudanças de velocidade.

4.3.3 - Psycho-spacing Models:

Estes modelos surgiram na tentativa de aprimorar o modelo de reação a estímulos visto anteriormente, uma vez que aquele apresenta dificuldades em duas situações principalmente: a primeira é que pelo modelo, presume-se que o motorista seguidor reage a qualquer mudança na velocidade relativa ao líder, mesmo quando à distância entre os dois é muito grande, e a segunda é que o modelo assume que não há reação alguma quando não há mais diferença de velocidade entre o líder e o seguidor.

A fim de corrigir isto, e usando-se insights da psicologia perceptiva, mostrou-se que os motoristas estão sujeitos a limites de percepção a estímulos (Todosiev e Barbosa (1964)).

4.4 - Modelos de Simulação Macroscópicos:

4.4.1 – LWR Models:

Os modelos macroscópicos têm suas origens, basicamente, a partir dos estudos desenvolvidos por Lighthill e Whitham, (1955) e Richards (1956), daí o nome LWR models. Estes descrevem a evolução do fluxo de tráfego através do tempo e espaço usando um conjunto de equações diferenciais que têm como base a analogia que existe entre o fluxo veicular e o fluxo de um fluido contínuo. Assim, estes modelos assumem que os veículos se comportam de forma agregada, que estes comportamentos são influenciados diretamente pelas condições da via em que estes estão estes veículos estão inseridos, e que estas condições são descritas a partir de três variáveis, fluxo, velocidade e densidade (**variáveis de interesse**), e pelas relações que existe entre elas.

A partir da analogia mencionada, o fluxo de tráfego é tratado como um fluido compressível unidimensional, o que leva a assumir duas **características básicas**: o fluxo de tráfego é conservado e, existe uma relação direta entre velocidade e densidade e entre a densidade e o fluxo.

>> Características Básicas:

- ✓ O fluxo de tráfego é conservado – esta característica significa, basicamente, que não existem perdas para o sistema, o fluxo é contínuo. Ou seja, assume-se que em qualquer sistema de tráfego, em um dado instante, o fluxo de entrada de veículos é igual ao fluxo de saída de veículos mais o estoque (número de veículos no sistema).
- ✓ Existe uma relação direta entre velocidade, densidade e fluxo – esta relação pode ser representada diretamente pela equação fundamental:

$$Densidade = \frac{Fluxo}{Velocidade} \quad (4.5)$$

>> Variáveis de Interesse:

São as variáveis que se busca quantificar, a fim de que a partir delas e de suas relações, se possa diagnosticar e qualificar um sistema de tráfego. Por exemplo, o nível de serviço do tráfego, é dado pela densidade, ou a capacidade de uma via, é dada pelo fluxo máximo possível, ou ainda, o atraso médio (perda de tempo em congestionamentos), pode ser encontrado pela velocidade média dos veículos. Enfim, são variáveis essenciais (de interesse), e são melhores definidas abaixo:

- ✓ **Fluxo** – Geralmente representado por V (volume), define o número de veículos que cruzam uma determinada seção (ou um segmento de via) em

um determinado intervalo de tempo (t), logo uma variável temporal que tem como unidade veículos por hora (veículos/hora). Em analogia a hidrodinâmica, esta variável representaria a vazão de um fluxo.

- ✓ **Densidade (ou Concentração)** – Geralmente representada por D , indica o número de veículos em um determinado trecho (ou segmento), logo uma variável espacial e que tem como unidade veículos por quilômetro (veículos/km).
- ✓ **Velocidade** - Geralmente representada por S (speed), indica a velocidade média de todos os veículos em um determinado trecho (segmento) de uma via, em um dado instante, e tem como unidade quilômetros por hora (km/h).

4.4.2 - Cell Transmission Model:

Este é outro modelo importante classificado como macroscópico. O mesmo segue a linha do modelo LWR (modelo de fluxo contínuo), porém Daganzo (1994), dividiu este em células, o que gerou uma estrutura lógica bastante simples e eficiente.

A via em estudo é representada por pequenas células, que representam seções de uma mesma via. Assim, a simulação segue verificando o número de veículos em cada célula e a cada intervalo de tempo (este definido antecipadamente), calcula-se o número de veículos que atravessaram de uma célula para a outra. Este fluxo entre células depende de quanto uma célula antecessora (“upstream”) pode enviar e de quanto à sucessora (“downstream”) pode receber.

Esta quantidade, que podem ser enviadas ou recebidas, é determinada pela densidade existente em cada uma destas células adjacentes.

4.4.3 – Relações entre as Variáveis Macroscópicas:

Nas últimas décadas de estudos, muitos teóricos e pesquisadores vem sugerindo modelos e curvas que descrevam, o relacionamento das variáveis macroscópicas fundamentais (fluxo, velocidade e densidade). No entanto, embora alguns destes modelos representem bem determinadas situações de tráfego, ainda não se tem um modelo teórico, devidamente constatado por pesquisas e experimentos, que reflita bem todas as situações possíveis.

Neste estudo, conforme será visto mais adiante, optou-se por utilizar curvas e funções derivadas de estudos empíricos, amplamente testadas pela comunidade internacional, e que apresentam boa consistência com a realidade (vide Hall, 1997).

Porém antes, é instrutivo descrever alguns destes modelos teóricos mais conhecidos, a começar pelo seminal trabalho de Greenshields (1935), que por décadas foi aceito como o mais apropriado.

4.4.3.1 – Relações Teóricas:

Greenshields propôs um modelo linear entre a velocidade e a concentração (ou densidade), e que pode ser representado conforme abaixo:

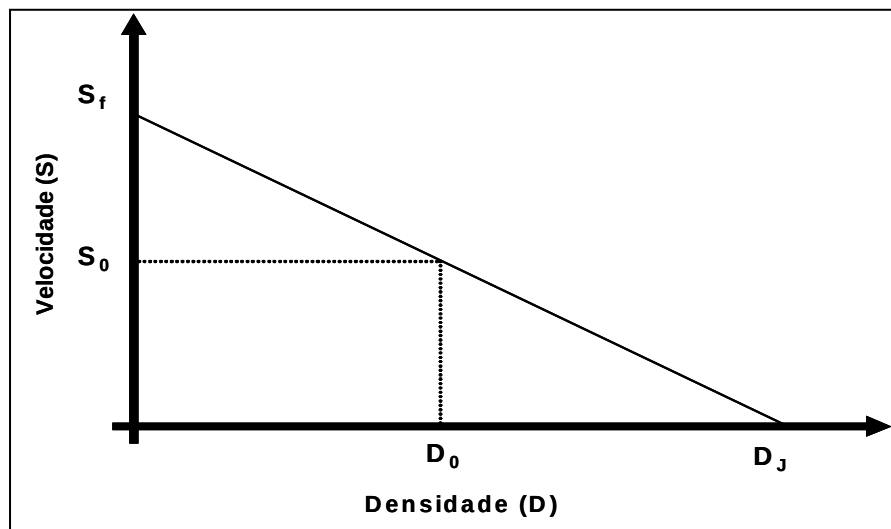


Figura 1: Greenshields - Relação Velocidade x Densidade

Ou pela fórmula:

$$S = S_f \left(1 - \frac{D}{D_j}\right) \quad (4.6)$$

Onde:

S_f – Velocidade média dos veículos quando o fluxo é livre (o índice “f” advém do termo *free flow speed*).

S_0 – Velocidade ótima e representa a velocidade no ponto em que o fluxo é máximo.

D_j – Densidade máxima e corresponde ao congestionamento máximo (o índice “j” advém do termo *density jam*)

D_0 – Densidade ótima e representa a densidade quando o fluxo é máximo.

Assume-se ainda neste modelo, dois regimes de tráfego: O regime de tráfego congestionado, como sendo as situações em que a densidade é maior que a densidade ótima, e o regime de tráfego não congestionado, onde a densidade é menor que a densidade ótima.

Embora este modelo tenha a vantagem da fácil utilização, devido a sua simplicidade, seu comportamento linear, tal comportamento não ocorre em toda a curva, mais precisamente nas situações com alta densidade ou baixa densidade, conforme foi constatado em estudos de campo. Dado estas limitações, alguns estudiosos sugeriram novos modelos a fim de superá-las.

Greenberg (1959) sugere um modelo que teve boa aderência para as situações com altas densidades, mas o mesmo resultado não procede para as situações de baixas densidades.

$$S = S_o * \ln\left(\frac{D_I}{D}\right) \quad (4.7)$$

Já Underwood (1961) propõe outro que, ao contrário do modelo de Greenberg, tem boa aderência em situações de baixas densidades, mas não para altas.

$$S = S_f * e^{-\left(\frac{D}{D_o}\right)} \quad (4.8)$$

Já Edie (1961), propõe um modelo classificado como multi-regime, uma vez que utiliza o modelo de Underwood para situações com baixas densidades e o modelo de Greenberg, para as situações com altas densidades.

4.4.3.2 – Relações Empíricas:

Dado a dificuldade de se obter uma relação teórica que defina a relação das variáveis fundamentais do tráfego em todas as situações, foram desenvolvidas relações derivadas de inúmeros estudos empíricos, e contempladas no HCM. Estas buscam servir de base para estudos neste campo, e de onde, serão obtidas as principais relações para o desenvolvimento do modelo proposto por este estudo, como será visto mais à frente.

>> Highway Manual Capacity (HCM):

Esse manual tem sido desenvolvido através de décadas de extensas pesquisas coordenadas pelo Transportation Research Board (TRB) Committee on Highway Capacity and Quality of Service. Ele é aceito internacionalmente como referência para órgãos reguladores, operadores e gerenciadores de rodovias. O HCM contém um conjunto de técnicas para a avaliação da qualidade de serviço em diversos tipos de vias.

A primeira edição do manual foi publicada em 1950 pelo U.S. Bureau of Public Roads, tendo como objetivo servir de guia para projeto e análise de rodovias. Em 1965, foi publicada a segunda edição pelo Transportation Research Bureau e coordenada pelo seu Highway Capacity Committee. A terceira publicação foi em 1985, nesta foi considerado mais de duas décadas de extensas pesquisas conduzidas por várias agências sob o patrocínio de diversas organizações, destacando o National Cooperative Highway Research Program e o Federal Highway Administration e seu desenvolvimento foi coordenado pelo TRB Committee

on Highway Capacity and Quality of Service. Em 1994 e 1997 novas atualizações foram contempladas a terceira edição. Atualmente, tem-se a quarta edição (HCM 2000), já contemplando resultados de diversas pesquisas, incluindo uma nova metodologia para análise de freeways e novos valores equivalentes para caminhões.

>> Relação Fluxo versus Densidade – HCM:

O modelo proposto por este estudo trata de vias de alta performance (freeways), e para esse tipo de via, o HCM fornece algumas relações básicas entre as variáveis macroscópicas, das quais é possível derivar diversas funções que servem de base para as análises do modelo.

Abaixo se tem uma representação, sem muito detalhamento, de uma dessas relações, no caso, entre as variáveis Fluxo e Densidade.

✓ Relação entre Fluxo e Velocidade Média

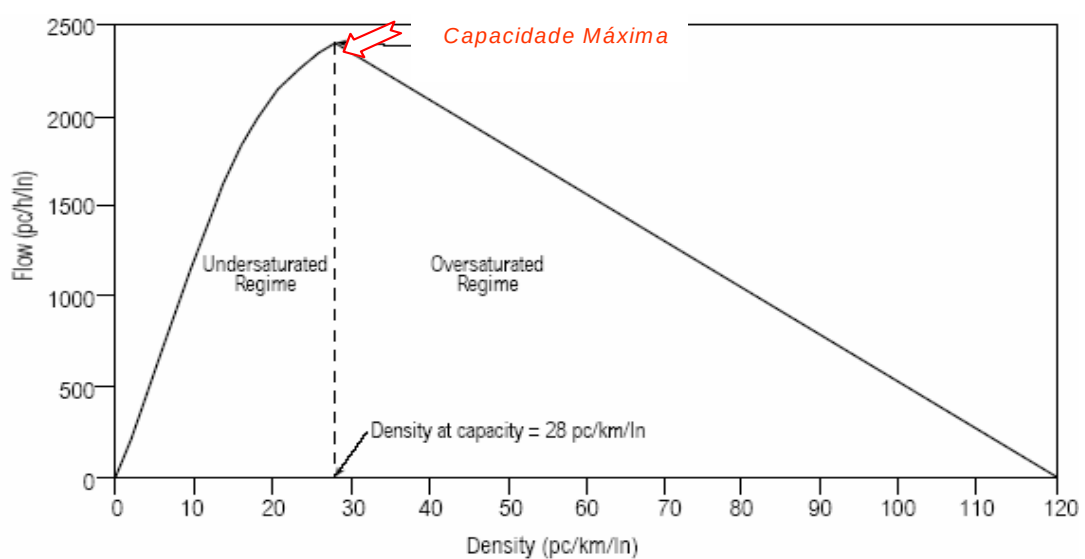


Figura 2: HCM - Relação Fluxo x Densidade

Onde Undersaturated Regime representa situações de tráfego com densidade de 0 a 28, que seriam situações sem congestionamentos, e Oversaturated Regime, situações com congestionamentos.

Como será visto mais adiante, no modelo proposto algumas derivações destes regimes serão elaboradas.

A partir dessas relações básicas, da relação fundamental (fluxo igual à velocidade multiplicado pela densidade) e de diversas técnicas e considerações, é possível encontrar e fornecer ao modelo todas as funções necessárias a sua operacionalização. Estes processos de identificação das funções serão vistos com maior detalhe na metodologia.

4.5 - Modelos Mesoscópicos:

Embora, existam algumas formas de descrever um modelo como mesoscópico, para este estudo estes se classificam como sendo aquele que, em relação ao seu nível de detalhe, está entre os modelos microscópicos e os modelos macroscópicos, apenas. Isso porque, como será visto a partir de alguns exemplos abaixo, inclusive o modelo proposto, estes podem ser descritos de formas diferentes, mas todos eles se comportam entre estes dois modelos extremos, o microscópico e o macroscópico.

Estes modelos descrevem o fluxo de tráfego com menor detalhe do que os modelos microscópicos, no sentido em que, embora sejam gerados os veículos individualmente, seus respectivos comportamentos não são descritos para cada veículo e motorista individualmente, mas sim a partir de valores mais agregados, daí

a importância da teoria de fluxo contínuo para estes modelos também, tal como para os modelos macroscópicos.

Como modelos classificados como mesoscópicos conhecidos, pode-se citar:

4.5.1 - Headway Distribution Models:

Estes modelos assumem que os veículos estão distribuídos entre si a partir de um headway médio (intervalo de tempo entre dois veículos). Não discriminando um headway para cada veículo. Alguns destes modelos foram elaborados por Buckley (1968) ou Branston (1976), no entanto sofreram críticas por não levarem em consideração regras da dinâmica do tráfego, no sentido em que considera todos os veículos como idênticos, ou seja, as funções de probabilidades utilizadas para definir os headways são independentes do tipo de motorista, tipo de veículo, objetivo da viagem, etc. Alguns autores como Hoogendoorn e Bovy (1998a) desenvolveram modelos para tentar remediar estas falhas, considerando nestes várias classes de veículos e faixas de idade dos motoristas.

4.5.2 - Cluster Models:

Estes tratam um grupo de veículos, como tendo características idênticas, ou seja, dentro de um determinado cluster (grupo de veículos) headways ou diferenças entre velocidades não são detalhadas, o cluster é homogêneo. Dois pontos importantes considerados em relação ao cluster é que esses podem crescer ou diminuir (ex. a proibição de ultrapassagem pode aumentar o número de veículos

agrupados), e que sua velocidade pode se alterar (ex. condições do clima). Para estes estudos tem-se Botma (1978).

4.5.3 – O modelo proposto – um modelo mesoscópico:

O modelo proposto neste estudo, também é classificado como mesoscópico, uma vez que no mesmo, observam-se características das duas outras classes de modelo (micro e macroscópicos). No caso, tem-se a geração dos veículos individualmente, o que é uma característica de modelos microscópicos, no entanto, o comportamento de cada veículo, é definido não a partir de ações e reações de outros veículos, mas sim a partir das condições do tráfego como um todo, ou seja, a partir de parâmetros e relações de variáveis macroscópicas. Mais especificamente, os veículos são gerados individualmente, seu comportamento é descrito por sua velocidade média, que é ditada pelas condições da via e representado pela variável densidade.

5 – Metodologia:

Para elaboração do modelo, diversas metodologias foram consideradas. Estas estão identificadas e explicitadas nesta seção, e serão referenciadas em seções seguintes.

De maneira geral, a metodologia busca relacionar características geométricas e de tráfego da via em estudo e buscar como resultantes desta relação, as velocidades médias, fluxos de saída, densidades e assim, baseado nessas variáveis resultantes, qualificar os níveis de serviço para cada cenário proposto.

Para tal, foi preciso estruturar lógicas que representassem estas relações.

5.1 - Estruturação das Lógicas

Neste modelo, buscou-se através de inúmeras lógicas e interações, representar um sistema altamente dinâmico, ou seja, o tráfego. Dado esse dinamismo, seu estado se altera a cada instante, a cada alteração das variáveis que definem este. Assim, antes de tudo, foi necessário definir uma variável que representasse este estado de uma forma geral, no caso, a variável densidade (D), e

uma lógica, denominada como lógica central, que tem o papel de identificar, a cada evento (ex. entrada de veículos, saída, etc), a nova densidade do sistema, ou seja, o novo estado do sistema. O estado do sistema pode ser aqui entendido como uma foto instantânea deste.

A escolha da densidade como variável principal, se pautou em alguns pontos: a) Pode-se aplicar de forma direta as tabelas de qualificação dos níveis de serviço, estabelecidos pelo HCM e balizadora internacional da performance de vias, b) A relativa facilidade de captação desta a cada instante no modelo proposto, e c) Esta é única em todos os regimes, ou seja, cada valor da variável densidade representa um estado específico do tráfego, diferentemente das outras variáveis fundamentais (velocidade e fluxo), como pode ser verificado com o auxílio da figura 2, onde um mesmo nível de fluxo pode estar em um regime não congestionado (Undersaturated) ou congestionado (Oversaturated). O mesmo ocorre no caso da velocidade.

5.1.1 - Lógica Central:

A cada veículo que chega ao segmento analisado, ou seja, a cada entidade gerada que visa acessar o sistema, é preciso checar a variável densidade prevalecente neste instante. Isso porque, é a partir da mesma que será verificado se este veículo poderá acessar este segmento, de acordo com a sua capacidade no momento, e caso sim, com que velocidade este trafegará pelo segmento. Essa velocidade é definida a partir de diversas funções de acordo com o estado do sistema (de acordo com o regime vigente), como veremos mais à frente.

Assim, a partir do dinamismo entre as diferentes taxas de entradas no decorrer do tempo e das diferentes taxa de saída resultante das velocidades dos

veículos, têm-se acúmulos ou esvaziamento da via ao longo do tempo, logo, aumento ou diminuição da densidade, respectivamente. A partir das novas densidades e das relações densidade versus velocidades estabelecidas, obtém-se as novas velocidades, com que os novos veículos trafegarão, e assim, nessa seqüência, segue a modelagem.

5.1.2 - Lógicas de Apoio:

Outras diversas lógicas específicas são necessárias no modelo. Cada uma tem seu papel e sua influência, direta ou indiretamente, na lógica central e conseqüentemente, na variável densidade. A estas, denominou-se como lógicas de apoio.

Cada uma destas lógicas utiliza-se de operações matemáticas e representações gráficas, buscando representar situações específicas diversas, e em conjunto, estas direcionam as seqüências de cálculos a serem feitas.

Estas, como será visto abaixo, indicam, por exemplo, qual o regime de tráfego no momento em que um veículo acessa a via; se existe um evento ocorrendo, o que restringe a capacidade da via; se existe um congestionamento, e outras situações que influenciam nos cálculos da lógica central.

O esquema abaixo procura dar uma visão agregada das lógicas principais envolvidas no modelo.

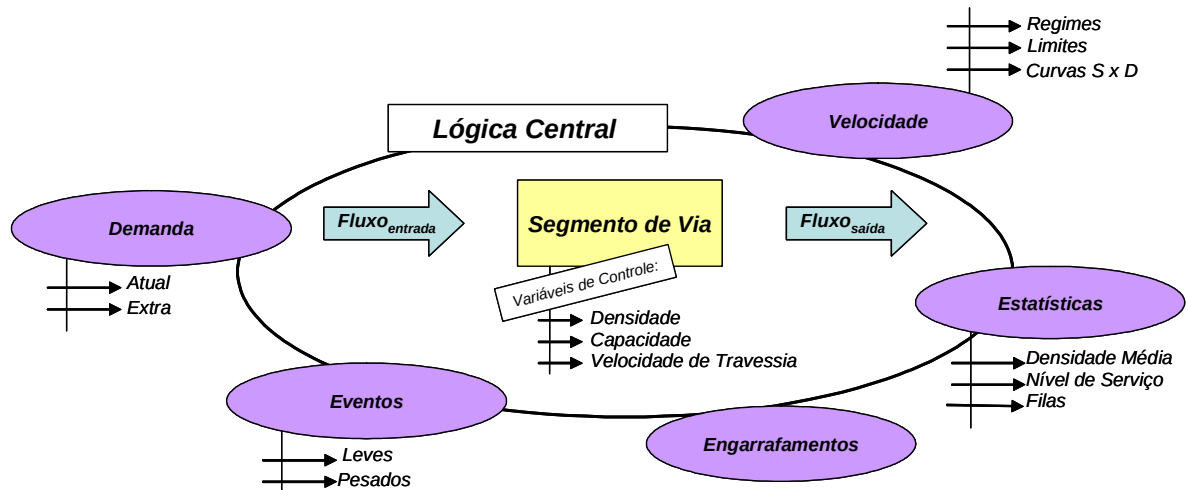


Figura 3: Esquema das Lógicas do Modelo

5.1.2.1 - Lógica Demanda:

Esta lógica é responsável pela geração dos veículos que tráfegarão pela via em estudo. O número de veículos, por tipo, a ser gerado a cada hora vai depender das demandas estabelecidas previamente.

Uma vez identificadas estas demandas, seja através do histórico da via, seja através de previsões, estas são inseridas no modelo através de schedules (ou planilhas), para que possam ser utilizadas na geração dos veículos.

Estas demandas horárias então, são distribuídas no decorrer desta hora a partir de uma distribuição exponencial que tem como média, o intervalo médio entre chegadas dos veículos. Este intervalo é definido para cada hora, dividindo-se o

período de referência (1 hora) pelo número de veículos previsto para esta (demanda horária).

5.1.2.2 - Lógica Evento:

Um evento neste estudo representa situações em que há um veículo com algum tipo de problema (ex. acidentes, quebra mecânica, etc.) que venha a interromper uma ou mais pistas da via.

Para representar tais situações segue-se uma lógica da seguinte forma: a partir de probabilidades de ocorrência destes eventos, definidas para cada tipo de veículo (leves ou pesados), identifica-se, a cada veículo gerado, se este provocará um evento ou não.

Caso não, este segue pelo fluxo central do modelo sem causar nenhum efeito. Caso sim, este é um veículo evento, que segue para o sub-modelo evento, onde é verificado o tipo de evento, se leve ou pesado. A partir desta definição o veículo segue para um módulo de espera, onde permanecerá por um período igual ao tempo de recuperação definido para o mesmo.

Enquanto este estiver em espera, logo sob condição de evento, todos os veículos que acessarem a via, trafegarão por esta, com velocidade definida a partir de relações definidas para os regimes especiais, ou seja, regimes que têm capacidades reduzidas em função de pistas obstruídas por este evento.

5.1.2.3 - Lógica Engarrafamento:

Toda via tem sua capacidade definida pelo fluxo horário máximo possível a partir de características geométricas específicas desta.

Uma vez atingida essa capacidade, onde a demanda (número de veículos visando acessar a via) começa a ser superior a essa, inicia-se uma redução das taxas de fluxos possíveis, ou seja, a capacidade de absorção da via vai diminuindo, conseqüentemente, a velocidade.

Mantendo-se esta condição, a velocidade tende a zero, onde se tem tráfego nulo e densidade jam (densidade máxima).

No modelo, assume-se uma velocidade limite, denominada como velocidade no limite do regime Over, de 20 km / h, que busca representar uma situação de “anda e para”.

Uma vez atingida esta velocidade, e o limite de densidade a partir da mesma, os veículos que visam acessar a via, são direcionados para o sub-modelo engarrafamento, onde este é alocado em uma fila.

Esta fila segue uma política FIFO (first in first out), e sua capacidade de dissipação vai depender das taxas de saída e entrada, dada pela dinâmica da simulação em curso.

>> Representação da dinâmica do engarrafamento (regime “anda e para”): Uma vez que se atinge a densidade máxima (limite Over), ou seja, uma vez que não caiba nenhum outro veículo sem que o tráfego pare, inicia-se um processo de hysteresis que visa representar este sistema.

Neste ponto inicial, onde se tem densidade máxima e velocidade 20 km / h, bloqueia-se a entrada de veículos no segmento, que de acordo com a taxa de entrada e saída, tem-se um aumento na fila e a diminuição da densidade no segmento da via. Este estágio se mantém até que seja atingido o outro ponto limite do regime Over, ou seja, até que a densidade no segmento seja de 28 veículos por quilômetro. Neste ponto, tem-se a liberação de acesso ao segmento a partir da fila.

Este processo se mantém até que seja dissipada toda a fila.

5.1.2.4 - Lógica Velocidade:

Os veículos gerados no modelo trafegam pela via com velocidades definidas por relações específicas de cada regime (básicos ou especiais), definidos a partir das condições que esta via se encontra no momento em que este veículo acessa a mesma.

Assim, para cada veículo gerado, é preciso antes de tudo, identificar o regime. Estes regimes, como será visto em detalhes na metodologia, podem ser vários, e são definidos diretamente pela variável densidade e seus limites.

Uma vez identificado o regime no momento do acesso, o veículo é direcionado para o módulo que define as velocidades, específico deste regime.

Neste módulo é que se determina a velocidade com que o veículo trafegará. Através da relação desta velocidade, definida através de relações densidade versus velocidade, com o percurso a ser trafegado (comprimento do segmento), tem-se o tempo de travessia necessário para este veículo.

Esta dinâmica entre diversos tempos de travessia e taxas de chegada variadas é que formam a variação das densidades e conseqüentemente, dos fluxos de saída, ou seja, a capacidade da via a cada instante.

5.1.2.5 - Lógica Estatística:

Neste sub-modelo busca-se captar as diversas variáveis que alimentam os gráficos e relatórios que determinam as condições de serviço da via em estudo, dado as premissas consideradas: demandas, perfil da demanda horária, eventos, geometria da via, e outras.

Estas variáveis buscam quantificar e qualificar as condições da via de forma distribuída pelas horas do dia, a fim de se detalhar mais os diversos momentos do dia.

5.2 – Regimes de Tráfego:

Os estudos de tráfego geralmente consideram dois regimes básicos: não congestionado e congestionados. Estes têm características bastante distintas, e conforme já discutido na revisão bibliográfica, não existe um modelo matemático único que descreva todas as situações, todos os regimes de tráfego, porém se têm funções específicas que retratam relativamente bem cada um destes em separado.

Desta forma, o estudo propõe um modelo que analise os diversos regimes diferentes, considerando funções específicas para cada um destes no cálculo das velocidades. Ou seja, quando um veículo acessa a via, antes do cálculo da

velocidade com que este trafegará por esta via, é preciso checar o regime vigente, pois cada regime tem suas relações específicas para a determinação destas velocidades.

Estas funções específicas utilizadas foram derivadas de relações descritas no HCM, como será exposto a seguir.

Estes regimes são identificados a partir da variável densidade, onde para cada regime se têm densidades limites definidas por premissas e funções específicas. Logo, dado a densidade, pode-se determinar o regime, conseqüentemente, a relação (densidade x velocidade) específica deste regime, e então, a velocidade.

Neste estudo em especial são consideradas mais derivações dos regimes comumente utilizados (congestionados e não congestionados).

Foram identificados regimes que podem ser agrupados em regimes básicos e especiais:

Regimes Básicos – os regimes, que em conjunto, retratam situações não congestionadas e congestionadas, sob condições normais de tráfego, ou seja, sem obstrução na via por ocorrência de algum tipo de evento (ex. acidente, quebra de veículos, etc.);

Regimes Especiais – regimes que também representam as situações de tráfego congestionado e não congestionado, tal como os regimes básicos, porém sob condições especiais, onde retratam situações em que ocorrem obstruções.

Os diversos regimes serão explicitados com mais detalhes a frente, assim como serão identificados os diversos métodos e considerações para o cálculo das densidades que limitam cada um destes.

No entanto, é preciso identificar antes, a metodologia de cálculo da velocidade básica da via e FFS, parâmetro chave para a maioria destas densidades limites.

5.2.1 – Velocidade Básica (ou “Ideal”) do Segmento:

Velocidade Básica do segmento é a velocidade média máxima que uma via freeway tem caso essa atenda todas condições ideais de dirigibilidade. Estas condições são agrupadas em básicas e específicas do segmento, conforme abaixo:

5.2.1.1 - Condições Básicas:

- ✓ **Clima Bom** – pistas secas, com boa segurança para desenvolver velocidades mais elevadas.
- ✓ **Boa Visibilidade** – iluminação adequada e boa sinalização permitem maiores velocidades com segurança.
- ✓ **Sem Acidentes** – os acidentes restringem a capacidade da via pela ocupação de pistas e pela redução das velocidades dos outros veículos que trafegam, seja por questões de segurança, seja por curiosidade.

5.2.1.2 - Condições Específicas do Segmento:

Estas estão relacionadas as suas características geométricas e seu tipo de tráfego. O HCM considera as seguintes condições de vias como ideais:

- ✓ Largura mínima das faixas de 3,6 m
- ✓ Largura mínima do acostamento de 1,8 m
- ✓ Largura mínima do “acostamento central” de 0,6 m
- ✓ Tráfego composto somente de veículos leves
- ✓ Cinco ou mais faixas
- ✓ Distância entre acessos maior que 3 km
- ✓ Aclives não maiores que 2%
- ✓ Motoristas usuais do trecho

Uma vez que na grande maioria das vias freeways, todas estas condições dificilmente estão presentes, principalmente as condições específicas da via, esta velocidade básica funciona apenas como um ponto inicial de onde são descontados fatores que buscam representar o efeito que o não atendimento de cada condição tem sobre a velocidade média.

A velocidade resultante destes descontos é o que se denomina Free-Flow Speed (ou velocidade FFS), que representa a média das velocidades dos veículos medidos em situações com fluxos considerados baixos. Ou seja, em um dado seguimento, e sob dadas condições, a velocidade FFS é a velocidade média máxima que os veículos trafegam.

Conforme metodologia do HCM, para que uma via urbana tem-se como velocidade média básica (ou velocidade básica), 110 km / h.

Logo, a identificação da velocidade FFS (Free-Flow Speed) de um segmento pode ser identificada a partir de uma velocidade básica e de suas características geométricas específicas.

5.2.1.3 - Determinação do Free-Flow Speed do Segmento (FFS):

Dois métodos podem ser utilizados para obtenção do FFS de um dado segmento: medições em campo, ou de forma indireta, tomando-se como base características físicas do segmento em estudo, tal como descrito abaixo:

$$FFS = BFFS - f_{LW} - f_{LC} - f_N - f_{ID} \quad (5.1)$$

Onde:

BFFS *BaseFreeFlowSpeed* – define a velocidade média básica de uma dada via, a partir da qual se fazem os ajustes necessários a se obter os FFS específicos do segmento. No caso de rodovias urbanas o HCM recomenda 110 km/h.

$f_{LaneWidth}$ - fator de ajuste em função da largura média das faixas. A largura básica é de 3,6m, e de acordo com a largura média das faixas do segmento analisado, tem-se, através da tabela abaixo, o valor a ser reduzido do BFFS (velocidade média básica).

Largura Média	Lane Width (m)	Reduction in Free-Flow Speed, f_{LW} (km/h)	Fator de Ajuste
	3.6	0.0	
	3.5	1.0	
	3.4	2.1	
	3.3	3.1	
	3.2	5.6	
	3.1	8.1	
	3.0	10.6	

Tabela 1: Ajuste da Largura Média das Faixas – $f_{LaneWidth}$

$f_{LateralClearance}$ - fator de ajuste em função da largura dos acostamentos. A largura básica é 1,8 m. A partir da largura do acostamento, do número de faixas do segmento analisado e da tabela abaixo se encontra o valor a ser descontado do BFFS.

Largura do Acostamento Right-Shoulder Lateral Clearance (m)	Reduction in Free-Flow Speed, f_{LC} (km/h)			
	Lanes in One Direction			
	2	3	4	≥ 5
≥ 1.8	0.0	0.0	0.0	0.0
1.5	1.0	0.7	0.3	0.2
1.2	1.9	1.3	0.7	0.4
0.9	2.9	1.9	1.0	0.6
0.6	3.9	2.6	1.3	0.8
0.3	4.8	3.2	1.6	1.1
0.0	5.8	3.9	1.9	1.3

Fator de Ajuste

Tabela 2: Ajuste da Largura do Acostamento – $f_{LateralClearance}$

$f_{NumberofLanes}$ - fator de ajuste em função do numero de faixas. A condição básica é ter cinco ou mais faixas em cada direção. A partir do número de faixas do segmento analisado e da tabela abaixo, encontra-se o valor a ser descontado do BFFS.

Number of Lanes (One Direction)	Reduction in Free-Flow Speed, f_N (km/h)
≥ 5	0.0
4	2.4
3	4.8
2	7.3

Fator de Ajuste

Tabela 3: Ajuste do Número de Faixas – $f_{NumberofLanes}$

$f_{InterchangeDensity}$ - fator de ajuste em função da densidade de acessos. De acordo com a densidade de acessos, ou seja, de acordo com o número de

acessos por quilômetro e através da tabela abaixo, chega-se ao valor a ser descontado do BFFS.

Interchanges per Kilometer	Reduction in Free-Flow Speed, f_{ID} (km/h)
≤ 0.3	0.0
0.4	1.1
0.5	2.1
0.6	3.9
0.7	5.0
0.8	6.0
0.9	8.1
1.0	9.2
1.1	10.2
1.2	12.1

Tabela 4: Ajuste da Densidade de Acessos – $f_{InterchangeDensity}$

5.2.2 – Regimes Básicos:

As curvas abaixo são a base para as relações utilizadas no modelo. A partir destas é possível identificar os três regimes básicos e seus limites.

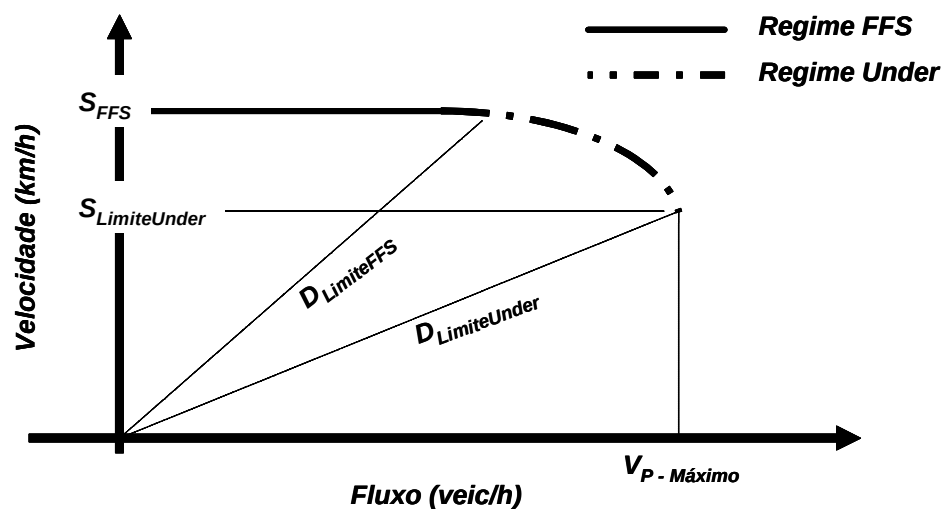


Figura 4: Regimes FFS e Under - Relação Velocidade x Fluxo (genérica)

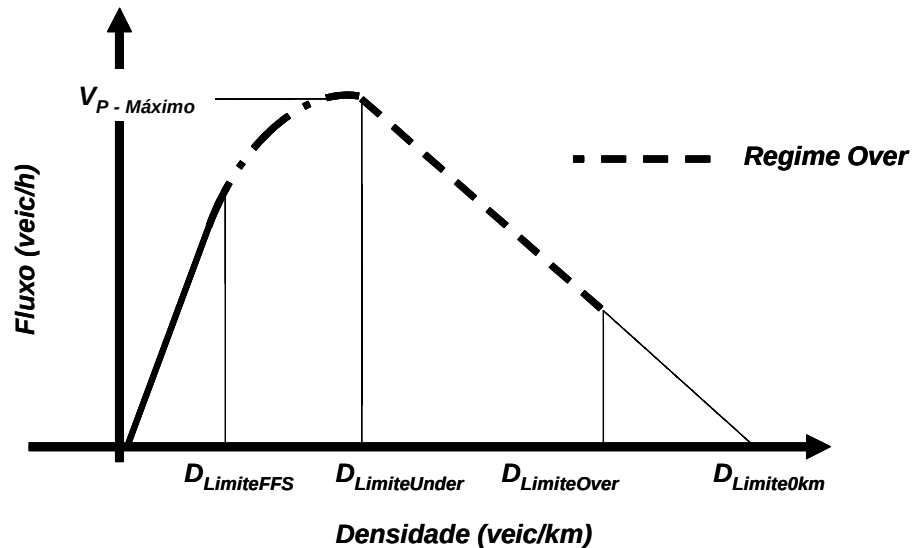


Figura 5: Regime Over - Relação Fluxo versus Densidade (genérica)

Como pode se observar nas figuras 3 e 4, já mencionado acima, são três os regimes básicos considerados:

- ✓ **Regime FFS (ou Regime de Fluxo Livre)** – corresponde a situações não congestionadas, onde as densidades são baixas e médias. Vai desde a densidade zero até a densidade limite FFS. FFS vem de *free-flow speed*, e representa a velocidade em fluxo livre, ou ainda, a velocidade máxima média do segmento. Esta é identificada, conforme será visto mais à frente, de acordo com as características da via. Assim, densidade limite FFS, representa a densidade até a qual um veículo consegue trafegar à velocidade FFS. Ou seja, um veículo ao acessar o segmento com densidades entre estes limites, trafegará a via com velocidade média correspondentes ao FFS.

- ✓ **Regime Under (ou Regime Sub-Saturado)** – representa uma situação em que, as densidades começam a influenciar na velocidade dos veículos,

fazendo com que estas diminuam. Esta situação ainda pode ser considerada um regime não congestionado, porém já se começa a perder o conforto na direção, tem-se uma menor flexibilidade para ultrapassagens, enfim, como será visto mais à frente, tem-se níveis de serviços menos adequados. Este regime está compreendido entre a densidade limite FFS ($D_{\text{LimiteFFS}}$), onde se tem a velocidade FFS, até a densidade limite Under ($D_{\text{LimiteUnder}}$), onde se tem a velocidade no limite Under. A densidade limite Under, é definido pelo HCM (28 veic/km), e tem papel importante nas análises, pois indica o ponto em que o fluxo é máximo (V_P - Máximo), ou seja, a capacidade do segmento. A velocidade no limite Under, também é uma resultante do FFS estabelecido, como poderá ser visto mais à frente.

- ✓ **Regime Over (ou Regime Sobre-Saturado)** – este regime compreende a situação em que as densidades extrapolam a capacidade da via, que é dada pela densidade no limite Under. Acima desta densidade, tem-se uma queda da capacidade de fluxo na via, com grande desconforto dos motoristas, pouquíssima mobilidade para troca de pistas, gerando uma queda mais acentuada da velocidade média. Conforme sugere o HCM (figura 4), o fluxo tem uma queda linear em função do aumento da densidade, desde a densidade limite Under até a densidade limite 0 km ($D_{\text{Limite0km}}$), ou *Jam Density* (D_J), como os autores costumam denominá-la. Esta densidade limite 0 km, corresponde à densidade quando o fluxo é nulo, uma situação de total congestionamento e velocidade igual a zero. Porém, no estudo em questão, assume-se uma velocidade mínima que corresponde a uma situação tida como “anda e para”, aqui dada por aproximadamente 20 km / h. Para esta

situação, tem-se um fluxo pequeno, porém maior que zero. Isso permite um maior realismo ao modelo e evita um bloqueio da simulação. Dado esta premissa, acha-se a densidade limite Over ($D_{\text{LimiteOver}}$) em função desta velocidade mínima, conforme será visto mais à frente.

5.2.3 - Limites e Relações dos Regimes Básicos:

Para se chegar a estes limites foram utilizadas diversas funções já definidas pelo HCM, porém estas têm geralmente como parâmetro principal os fluxos (V_p). Dessa forma, como será visto abaixo, algumas adaptações são necessárias, para se chegar aos limites de interesse em função da densidade, parâmetro que direciona toda a lógica do modelo.

- Regime FFS - No regime FFS a densidade varia de zero (0), até a densidade limite FFS e, esta pode ser identificada a partir da expressão indicada pelo HCM abaixo:

$$V_p = (3100 - 15 FFS) \quad (5.2)$$

Como, mencionado acima, é preciso derivar uma função a partir desta, onde se tenha a densidade como variável em função do FFS. Isso se dá substituindo o variável fluxo (V_p) pela relação fundamental (4.5).

$$V_p = D * S$$

E como neste ponto, tem-se:

$$S = FFS \quad (5.3)$$

A densidade no Limite do Regime FFS pode ser identificada pela função

$$D_{LimiteFFS} = (3100 / FFS) - 15 \quad (5.4)$$

- Regime Under - O regime Under vai desde o limite FFS definido acima até a densidade de 28 veic / faixa. Logo os limites de densidade para este regime já estão definidos.

O que cabe definir para este regime é a função que relaciona velocidade, agora não mais uma constante (FFS), e a densidade, os limites de velocidade e o fluxo máximo do regime Under (capacidade do segmento).

Neste intervalo se tem uma redução gradativa da velocidade, ainda de forma relativamente estável, dado o aumento do fluxo. Esta redução dá-se em função do aumento da densidade.

Conforme o HCM, essa relação pode ser definida através da expressão:

$$S = FFS - \left[(1/28) * (23 * FFS - 1300) * \left(\frac{V_p + 15 * FFS - 3100}{20 * FFS - 1300} \right)^{2,6} \right] \quad (5.5)$$

No estudo foi necessária inicialmente, a substituição do V_p pela relação 4.5 e alguns rearranjos, chegando-se à expressão:

$$D = \frac{\left[\left(\frac{FFS - S}{(1/28) * (23 * FFS - 1800)} \right)^{1/2,6} \right] * (20 * FFS - 1300) - 15 * FFS + 3100}{S} \quad (5.6)$$

Porém devido à impossibilidade de se chegar a uma expressão analítica para o valor de S (velocidade) em função de D (densidade), um artifício foi utilizado:

Criou-se uma tabela no Excel, tendo em uma das colunas a variável independente velocidade (S), e em outra a variável densidade (D) atrelada à primeira pela expressão 5.6.

Velocidade (S)	Densidade (D)
81,49	28,00
82	27,72
83	27,19
84	26,65
85	26,12
86	25,59
87	25,05
88	24,51
89	23,97
90	23,41
91	22,84
92	22,24
93	21,59
94	20,89
95	20,04
96	18,78
96,35	17,17

Densidade no limite Unvder

Velocidade no limite Under

FFS

Densidade no limite FFS

$$D = \frac{\left[\left(\frac{FFS - S}{(1/28) * (23 * FFS - 1800)} \right)^{1/2,6} \right] * (20 * FFS - 1300) - 15 * FFS + 3100}{S}$$

Figura 6: Regime Under - Tabela Velocidade x Densidade (básica)

Uma faixa de velocidades possíveis é definida na coluna velocidade, partindo-se da velocidade máxima que este regime pode ter, o FFS, decrescendo até que

seja atingida na coluna densidade, a densidade limite do regime, ou seja, 28 veic / km.

A partir desta tabela é possível, através de recursos gráficos da planilha de cálculos (Excel), identificar uma função característica para este intervalo, tendo como variável independente agora, a densidade e não mais a velocidade.

As figuras abaixo procuram mostrar um exemplo dessa tabela e gráfico, porém é importante observar que os valores das densidades se dão também em função do FFS específico da via, logo as tabelas e expressões geradas a partir delas, são específicas de cada segmento em estudo.

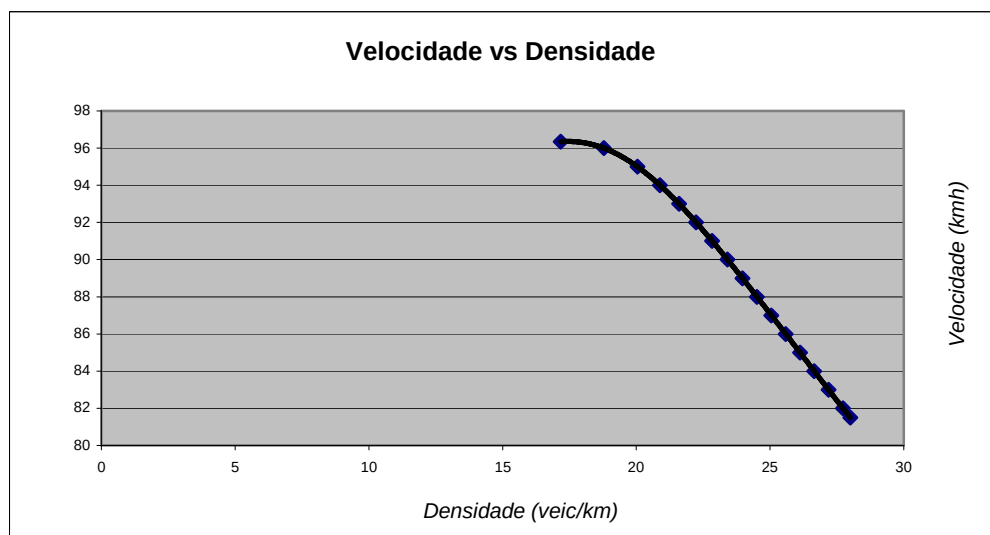


Figura 7: Regime Under – Relação Velocidade x Densidade (básica)

Para o segmento em estudo, representado pelas figuras 6 e 7, chega-se a um Polinômio de sexto grau, conforme descrito abaixo:

$$S = 1,081E-05 * D^6 - 1,548E-03 * D^5 + 9,151E-02 * D^4 - 2,849E+00 * D^3 + 4,901E+01 * D^2 - 4,399E+02 * D + 1,701E+03 \quad (5.7)$$

Logo, a expressão acima representa a relação velocidade versus densidade no regime Under do segmento. Assim, para cada valor de densidade nesta faixa, que vai desde a densidade limite do regime FFS até a densidade limite do regime Under (28 veic/km), a velocidade pode ser identificada pela expressão acima. A velocidade no limite Under, pode então ser identificada substituindo a densidade limite Under (28 veic/km) na expressão 5.7.

Neste ponto, limite Under, identifica-se ainda o fluxo máximo do segmento (V_p (Máximo)), ou seja, sua capacidade, substituindo as variáveis, velocidade no limite Under e densidade no limite Under na relação fundamental 4.5.

$$V_{p_{Máximo}} = S_{LimiteUnder} * D_{LimiteUnder} \quad (5.8)$$

- Regime Over - O regime compreende a faixa que vai da densidade no limite Under até a densidade no limite Over.

A melhor forma de tratar esta fase ainda não é consenso entre os pesquisadores e carece ainda de muita pesquisa. No entanto seguindo o HCM, é sugerida a utilização de uma simplificada relação linear entre fluxo e densidade para o regime Over, que liga o par de variáveis, fluxo máximo (e densidade no limite Under ($V_{p(LimUnder)}$ e $D_{(LimUnder)}$) ao par, fluxo e densidade a velocidade zero km/h ($V_{p(Lim0km/h)}$ e $D_{(Lim0km/h)}$).

Ou seja, do ponto onde o fluxo é máximo, ao ponto onde o fluxo é nulo (situação de máximo congestionamento), conforme exposto na figura abaixo:

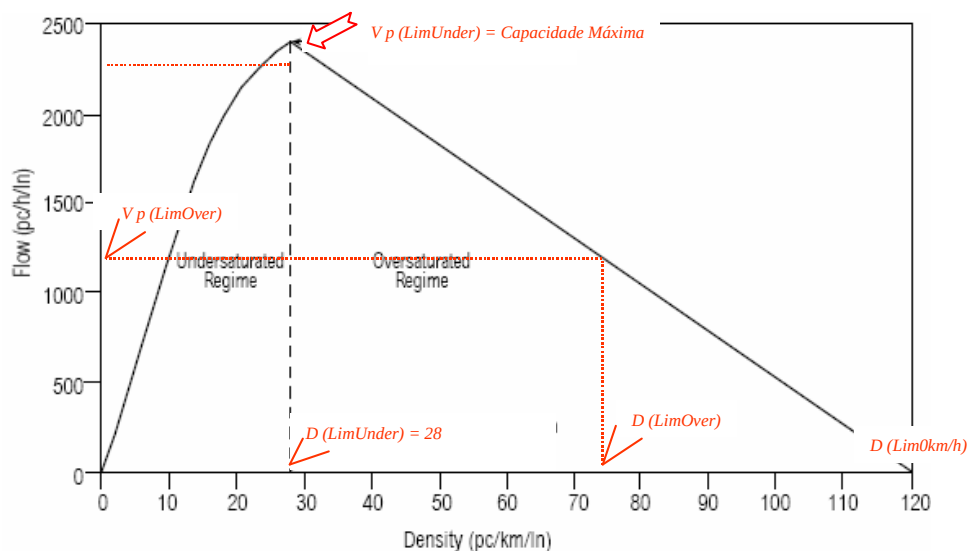


Figura 8 – Regime Over - Relação Fluxo x Densidade (básica)

Como já mencionado, à densidade a velocidade 0 km / h, representa uma situação de total congestionamento, onde, como o próprio nome sugere, tem-se velocidade média de 0 km / h e fluxo nulo. No entanto, para o estudo em questão, assumir esta como limite do regime, levaria a situações não coerentes com as premissas assumidas. Isso porque, assume-se no estudo, que não existam situações de total paralisação da via, ou seja, mesmo em situações com restrição de fluxo (restrição de pistas em função de algum evento) ainda se tem alguma movimentação, ainda se tem um certo fluxo, e este com velocidades diferente de zero.

Dessa forma, optou-se por convencionar como limite do regime Over, a densidade quando a velocidade média é de 20 km / h. Esta velocidade corresponde a situações altamente congestionadas, porém ainda fluindo, tidas como regime

“anda e para”. Para se chegar a esta densidade alguns passos foram necessários, conforme descrito abaixo.

Como já mencionado, pode-se identificar uma relação linear entre os pontos em que o fluxo é máximo no segmento (densidade no limite Under) e o ponto em que este é nulo (densidade a 0 km / h). Neste caso, já se conhece o fluxo máximo no segmento, a densidade no limite Under (28 veic/km), porém, no ponto em que o fluxo é nulo, não se tem a densidade, denominada no estudo como densidade no limite a 0 km / h. Para se chegar a essa foi utilizado um artifício.

Foram levantadas amostras que contemplam o número médio de veículos em fila de sinais de trânsito (semáforo) em um dado espaço físico definido previamente. Com estes dados e alguns pequenos cálculos, é possível se obter o espaço médio ocupado por cada veículo. Este então, representa a ocupação média por veículo quando estes estão parados, quando a velocidade média é igual a 0 km / h.

Com isso, basta encontrar a inversa do mesmo para se ter a densidade no limite a 0 km / h.

$$D_{0km} = 1 / Ocup.médiaVeic. \quad (5.9)$$

Esta pesquisa foi feita na principal via de acesso ao segmento em estudo a fim de captar características específicas dos veículos que trafegam no mesmo.

Foram ainda coletados dados de filas que somente tivessem veículos leves, já que o modelo usa estes como referência.

Dessa forma, chegou-se a:

$$Ocup.Média = 6,3m \quad (5.10)$$

$$D_{0km} = 1/0,0063 \quad (5.11)$$

$$D_{0km} = 158,73 \text{veic/km} \quad (5.12)$$

Tem-se identificado então, os pares de variáveis do regime.

No limite onde o fluxo é máximo:

$$V_{P_{Maximo}} = FluxoMaximo$$

$$D_{LimUnder} = 28 \text{veic/km}$$

E no limite onde o fluxo é nulo:

$$V_{P_{Lim0km/h}} = 0 \text{veic/h}$$

$$D_{Lim0km/h} = 158,73 \text{veic/km} \quad (5.13)$$

Com estas variáveis definidas é possível chegar a uma função linear ($Y=A*X + B$) que relacione o fluxo à densidade através de uma reta, tendo como pontos de origem os pares (densidade e fluxo nos limites) mencionados. Logo, através da função:

$$V_p(D) = A*D + B \quad (5.14)$$

Onde:

A e B são constantes a serem definidas

Substituindo o par: densidade no limite Under e fluxo no limite Under (fluxo máximo) na expressão 5.14, tem-se:

$$V_{P_{LimUnder}} = A * D_{LimUnder} + B \quad (5.15)$$

E, substituindo o par: densidade a 0 km / h e fluxo no limite a 0 km / h também na expressão 5.14, tem-se:

$$V_{P_{Lim.0km/h}} = A * D_{Lim0km/h} + B \quad (5.16)$$

Relacionando-se as expressões 5.15 e 5.16, chega-se as constantes A e B:

$$A = \frac{V_{P_{LimUnder}}}{D_{LimUnder} - D_{Lim0km/h}} \quad (5.17)$$

$$B = \left(\frac{V_{P_{LimUnder}}}{D_{LimUnder} - D_{Lim0km/h}} \right) * D_{Lim0km/h} \quad (5.18)$$

Substituindo as expressões 5.17 e 5.18 na expressão da reta 5.14, chega-se expressão que define a relação fluxo em função da densidade:

$$V_p = \left[\frac{V_{pLimUnder}}{D_{LimUnder} - D_{Lim0km/h}} \right] * (D - D_{Lim0km/h}) \quad (5.19)$$

Para se chegar a expressão que relaciona velocidade (S) em função da densidade (D) então, substitui-se a variável fluxo (V_p) pela relação fundamental 4.5, chegando a expressão abaixo :

$$S = \left[\frac{V_{pLimUnder}}{D_{LimUnder} - D_{Lim0km/h}} \right] * \left(1 - \frac{D_{Lim0km/h}}{D} \right) \quad (5.20)$$

Através desta relação são definidas as velocidades com que tráfegarão os veículos que acessarem o segmento quando este estiver sob o regime Over.

Como o regime Over neste estudo está compreendido entre as densidades limites Under e Over, é preciso identificar estas. A densidade limite Under já é estabelecida como 28 veic / km, porém a densidade limite Over precisa ainda ser identificada.

Neste estudo, esta é definida como sendo a densidade quando a velocidade média é de 20 km / h e pode ser identificada a partir de uma expressão abaixo, que é derivada da expressão 5.20:

$$D_{LimOver} = \frac{\frac{V_{pLimUnder}}{D_{LimUnder} - D_{Lim0km/h}} * D_{Lim0km/h}}{\frac{V_{pLimUnder}}{D_{LimUnder} - D_{Lim0km/h}} - S_{LimOver}} \quad (5.21)$$

Com a densidade limite Over e a velocidade Over estabelecida (20 km / h), pode-se ainda chegar ao fluxo no limite Over:

$$V_{P_{LimOver}} = D_{LimOver}^* S_{LimOver} \quad (5.22)$$

5.2.4 – Regimes Especiais (com Obstrução):

Estes regimes descrevem situações em que alguma obstrução é imposta ao fluxo normal de uma via. Estas podem surgir por diversas razões, tais como, clima adverso, operações de manutenção ou construção, quebras de veículos ou acidentes. Para o estudo em questão foram consideradas duas razões: eventos envolvendo veículos leves e eventos envolvendo veículos pesados. Um evento aqui pode ser qualquer tipo de ocorrência (problema mecânico, pane-seca, acidente, etc) com um dado veículo em que seja necessário atendimento. Logo, tem-se uma redução do número de faixas disponíveis por certo período de tempo e conseqüentemente uma redução da capacidade máxima do segmento.

A metodologia para estes regimes assume algumas características que diferem dos regimes sem obstrução descritos acima:

- ✓ Passa-se a operar com uma capacidade de fluxo máxima reduzida.
- ✓ Não se tem mais o regime FFS.

Logo, têm-se então como regimes especiais: o regime Under_com obstrução e o regime Over_com obstrução, que ainda podem ser subdividido em outros, em função do número de obstruções que se queira considerar. O quanto se reduz na capacidade máxima depende do tipo de obstrução em questão.

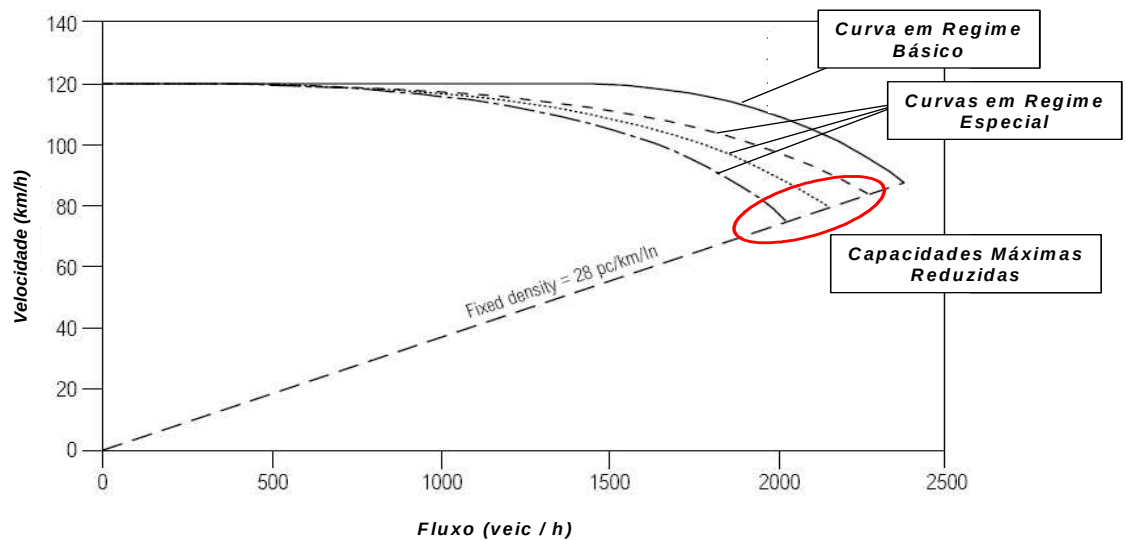


Figura 9 – Regime Under - Relação Velocidade x Fluxos (especiais)

A figura acima procura ilustrar tal situação relacionando velocidade média versus fluxo. Que pode ser expressa analiticamente conforme abaixo:

$$S = FFS + \left[1 - e^{\ln(FFS + 1 - \frac{V_{PLimUnder} * R}{D_{LimUnder}}) * \frac{V_P}{V_{PLimUnder} * R}} \right] \quad (5.23)$$

Onde:

H - é a proporção da capacidade disponível enquanto ocorre uma obstrução (evento) e é estabelecido conforme tabela abaixo de acordo com o impacto assumido para cada tipo de evento estudado:

Number of Freeway Lanes by Direction	Shoulder Disablement	Shoulder Accident	One Lane Blocked	Two Lanes Blocked	Three Lanes Blocked
2	0.95	0.81	0.35	0.00	N/A
3	0.99	0.83	0.49	0.17	0.00
4	0.99	0.85	0.58	0.25	0.13
5	0.99	0.87	0.65	0.40	0.20
6	0.99	0.89	0.71	0.50	0.26
7	0.99	0.91	0.75	0.57	0.36
8	0.99	0.93	0.78	0.63	0.41

Number of lanes of the segment (Número de faixas do segmento)

Blocked Lanes (Faixas Obstruídas)

R - Available Capacity (R - Capacidade Disponível)

Tabela 5 – Proporção da Capacidade Disponível x Tipo de Obstrução (HCM)

Como ocorrido nos regimes sem obstrução, é necessário chegar a uma função que relacione velocidade e densidade, e não mais a velocidade com fluxo (V_p).

Assim, substituindo-se V_p na expressão 5.23 pela relação fundamental 4.5, e fazendo alguns rearranjos, chega-se a expressão abaixo:

$$D = \frac{\ln(FFS - S + 1) * V_{p_{LimUnder}} * R}{S * \ln\left(FFS + 1 - \frac{V_{p_{LimUnder}} * R}{D_{LimUnder}}\right)} \quad (5.24)$$

Logo, existindo algum evento em que pistas estejam obstruídas, a definição das velocidades com que um veículo trafegará pelo segmento deve ser estabelecida a partir das relações específicas dos regimes com obstruções, conforme serão descritas a abaixo:

- Regime Under_com obstrução – O regime compreende a faixa que vai da densidade zero (0 veic / km) até a densidade limite Under. Está última continua sendo de 28 veic / km, tal como nos regimes básicos.

Como no estudo, foram considerados dois tipos de eventos, tem-se dois tipos de obstrução e efeitos sobre a capacidade da via. Dessa forma, é necessário se obter duas funções velocidades versus densidade.

Assim como no regime Under básico (sem obstrução), utilizou-se de uma planilha de cálculo (Excel), para se chegar a estas funções. Isso porque, como ocorrido anteriormente, não foi possível chegar a uma expressão analítica que

evidenciasse a variável velocidade em função da densidade, a partir da expressão 5.24. Chegou-se então, a dois polinômios conforme abaixo:

$$S_{UnderLeve} = 6,650E-07 * D^6 - 6,678E-05 * D^5 + 2,478E-03 * D^4 - 3,811E-02 * D^3 + 1,403E-01 * D^2 - 6,159E-01 * D + 9,642E+01 \quad (5.25)$$

Que representa a relação velocidade versus densidade no regime Under, quando se tem uma restrição do tipo leve (ex. envolvendo carros de passeio apenas).

$$S_{UnderPesado} = -2,045E-07 * D^6 + 1,86E-05 * D^5 - 5,784E-04 * D^4 + 3,641E-03 * D^3 + ,21 * D^2 - 6,238 * D + 84,277 \quad (5.26)$$

Que representa a relação velocidade versus densidade no regime Under, quando se tem uma restrição do tipo pesado (ex. envolvendo caminhões).

É importante salientar que, estas expressões são específicas do segmento em estudo. Isso porque, para se chegar as mesmas é preciso assumir premissas como FFS e fatores de redução da capacidade, que são características do desta via.

- Regime Over_com obstrução – O regime compreende a faixa que vai da densidade limite do regime Under_com obstrução (28 veic / km) até a densidade limite Over.

Para se chegar as relações velocidade versus densidade regime Over_com obstrução, para os dois tipos de eventos assumidos, segue-se o mesmo raciocínio

aplicado no Regime Over (sem obstrução), no entanto, utilizando-se agora, das capacidades reduzidas, ou seja, o fluxo no limite Under multiplicado por R. Dessa forma, chega-se as expressões que determinam a velocidade que um veículo trafegará pela via, quando em regime Over_com obstrução.

$$S = \left[\frac{V_{P_{LimUnder}} \cdot R}{D_{LimUnder} - D_{Lim0km/h}} \right] \cdot \left(1 - \frac{D_{Lim0km/h}}{D} \right) \quad (5.27)$$

E ainda são definidas as densidades limites no regime Over_com obstrução, pela expressão abaixo, quando a velocidade (S) é 20 km / h (velocidade “anda e para”).

$$D_{LimOver}(20km/h) = \frac{\frac{V_{P_{LimUnder}} \cdot R}{D_{LimUnder} - D_{Lim0km/h}} \cdot D_{Lim0km/h}}{\frac{V_{P_{LimUnder}} \cdot R}{D_{LimUnder} - D_{Lim0km/h}} - S_{LimOver}} \quad (5.28)$$

A figura abaixo ilustra o regime Over para os dois tipos de obstruções assumidos no estudo.

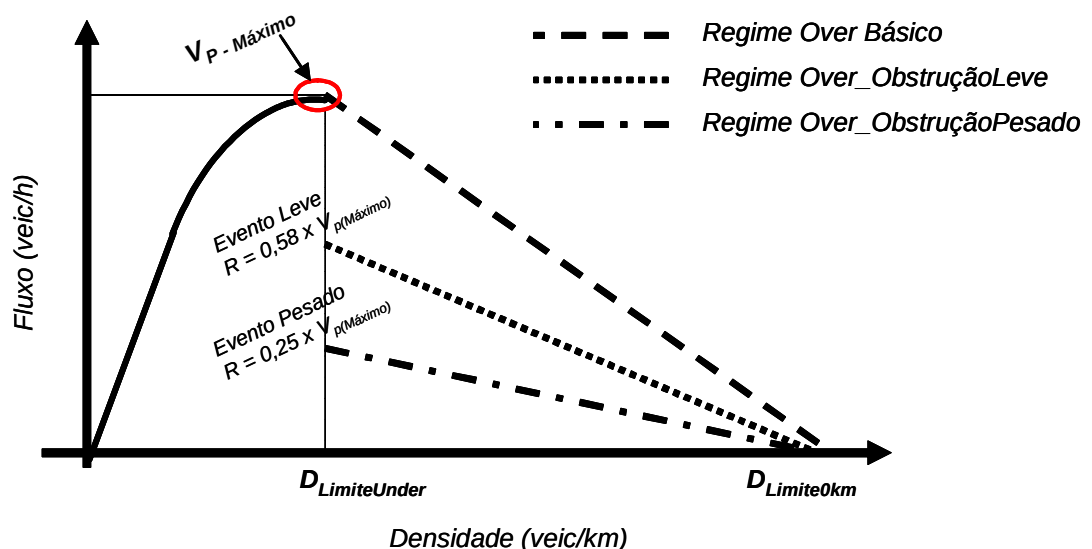


Figura 10 – Regime Over - Relação Fluxos x Densidades (especiais)

É importante notar que, as taxas de redução da capacidade da via, não são proporcionais as reduções dos números de faixas. Como pode ser visto pela figura, as obstruções de uma (evento leve) e duas (eventos pesados) das quatro faixas existentes da via, não resultam em capacidades máximas reduzidas para 75% e 50%, respectivamente, como se poderia esperar. Mas, reduções de impactos ainda maiores, levando a uma redução de 42% na capacidade quando da ocorrência de um evento do tipo leve, e de 75%, quando da ocorrência de um evento do tipo pesado.

Essa perda maior de capacidade ocorre porque os motoristas diminuem a velocidade para ver o ocorrido (ex. acidentes) quando estão lado a lado a este, e reagem mais devagar para a possibilidade de acelerar e sair da área de ocorrência.

Estas ocorrências, inclusive, afetam a capacidade da via no sentido oposto também. Embora nenhum estudo sobre o quanto se reduz exatamente tenha ainda sido publicado, sugere-se que esta redução dependa da magnitude do evento, podendo ir de 5% para eventos envolvendo apenas um veículo, até 25%, quando envolvendo vários veículos e com vários veículos de emergência socorrendo (HCM, 2000).

No estudo em questão foram considerados apenas os efeitos no sentido principal considerado, não levando em conta os efeitos no sentido oposto.

5.3 - Níveis de Serviço:

A performance de um segmento pode ser medida a partir de diversas variáveis, tais como: pela velocidade média que os veículos trafegam pela via, pelo

tempo médio de travessia deste segmento, pela relação volume sobre capacidade do trecho (V/C), ou ainda pela densidade média.

Embora todas estas variáveis estejam relacionadas e, sejam possíveis de serem identificadas, neste estudo, como já mencionado anteriormente, foi utilizada a densidade média como principal parâmetro identificador da performance da via. Através dela, pode-se identificar o nível de serviço da via, dado suas características geométricas e operacionais e dada a demanda de veículos que por esta trafega.

O nível de serviço pode ser entendido como uma medida que busca qualificar as condições de tráfego de uma via. Este, embora seja identificado pela densidade diretamente, indica também, o grau de liberdade para manobras (troca de pistas), o grau de proximidade entre veículos, assim como, as velocidades médias empregadas pelos veículos.

Conforme HCM, estes níveis variam conforme tabela abaixo:

<i>Nível de Serviço</i>	<i>Densidade (veic/km)</i>
<i>A</i>	<i>0 a 7</i>
<i>B</i>	<i>7 a 11</i>
<i>C</i>	<i>11 a 16</i>
<i>D</i>	<i>16 a 22</i>
<i>E</i>	<i>22 a 28</i>
<i>F – ou “Over”</i>	<i>Acima de 28</i>

Tabela 6 – Limites entre Níveis de Serviço (HCM)

Abaixo, procura-se caracterizar os diversos níveis:

Nível A – Descreve operações de tráfego livre (free-flow). A velocidade FFS prevalece. Os veículos têm total liberdade para manobras / troca de faixas. Os efeitos de incidentes ou quebras do ritmo da corrente de tráfego são facilmente absorvidos.



Figura 11 – Nível de Serviço A

Nível B – Mantém-se a condição de tráfego livre, assim como a velocidade FFS. A liberdade para manobras se mantém alta, e apenas um pouco de desconforto é provocado aos motoristas. Os efeitos de incidentes ou quebras do ritmo da corrente de tráfego ainda são facilmente absorvidos.

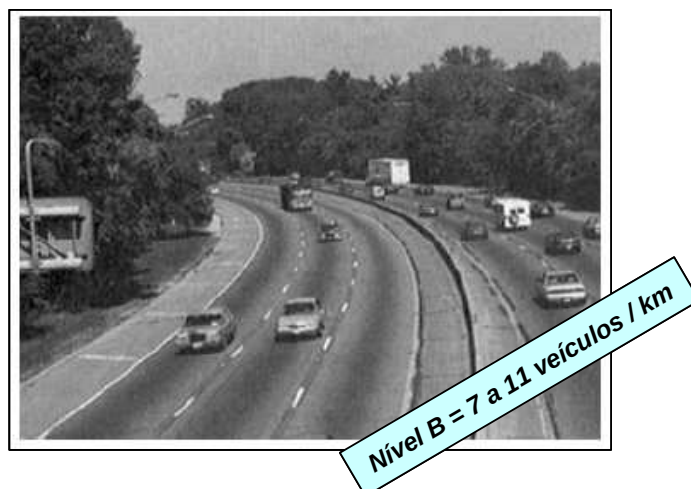


Figura 12 – Nível de Serviço B

Nível C – Mantém-se a condição de tráfego livre, com velocidades iguais ou próximas FFS. A liberdade para manobras requer mais cuidados e quaisquer incidentes ou quebras do ritmo da corrente de tráfego podem gerar pequenas filas.

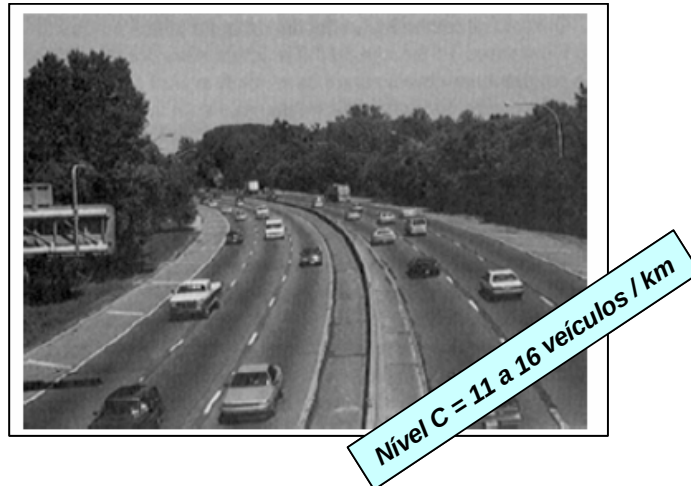


Figura 13 – Nível de Serviço C

Nível D – As velocidades começam a cair. A densidade aumenta com maior rapidez. A liberdade para manobras é limitada e já se tem certo desconforto dos motoristas. Quaisquer pequenos incidentes ou quebras do ritmo da corrente de tráfego geram filas.



Figura 14 – Nível de Serviço D

Nível E - Tem-se um fluxo altamente instável com poucas opções de escolha da velocidade. Qualquer incidente pode provocar congestionamentos significativos. Nenhuma liberdade para manobras e conforto psicológico dos motoristas muito baixo.



Figura 15 – Nível de Serviço E

Nível F (Over) - Tem-se o colapso do fluxo. Demanda está acima da capacidade da via. Podem provocar congestionamentos expressivos e condições de retorno ao fluxo descongestionado são indeterminadas.



Figura 16 – Nível de Serviço F (Over)

5.4 – Eventos (Obstrução de Pistas):

Evento neste estudo pode ser entendido como alguma ocorrência com algum veículo, fazendo com que este pare, e dessa forma, obstrua uma ou mais faixas (pistas) do segmento de via em estudo, a depender do tipo de veículo. Como exemplos, podem-se citar acidentes, defeitos mecânicos, pane-seca (falta de combustível), pneu, e outros.

A obstrução de parte da via, como já mencionado anteriormente, tem efeitos sobre a capacidade desta, o que faz com que a mesma opere ineficientemente durante todo o período em que este veículo esteja sendo recuperado (na própria pista), ou, se for o caso, sendo retirado (rebocado).

Outro ponto crítico do evento em relação à capacidade do segmento, é que quando este ocorre em situações de alta demanda (em horários de pico ou próximos a estes), geralmente se tem à formação de congestionamentos (filas), que se acumulam a montante do segmento, e estes acúmulos demoram a se dissipar, mesmo após o término da recuperação das faixas obstruídas. Isso ocorre porque, leva-se um tempo até que os veículos retornem às velocidades maiores, dado o alto volume de veículos existentes dentro do segmento (alta densidade) ao final do evento, que provocam fluxos de saída bastante restritos.

Este acúmulo, como mencionado, depende da demanda no momento do evento, porém também depende da duração e do impacto deste evento (número de pistas obstruídas). Ou seja, estas características estão diretamente relacionadas, e em conjunto identificam os efeitos de um evento sobre o nível de serviço da via.

Por existirem diversos tipos de eventos, cada um com suas características específicas, diversas podem ser também, as formas de estimar durações e impactos. Este estudo propõe o agrupamento por porte do veículo envolvido, tomando-se como premissa o fato de que, embora os eventos possam ser muito diversificados, o porte do veículo envolvido diz muito sobre o tempo de recuperação esperado (é mais fácil rebocar um carro do que um caminhão). Dessa forma, consideraram-se dois grupos de eventos:

- ✓ **Eventos do Tipo Leve** – este considera todas as ocorrências que envolvam veículos leves, mais especificamente, que envolva veículos de passeio e utilitários. Para este tipo de evento, assume-se a obstrução de uma faixa.

- ✓ **Eventos do Tipo Pesado** – este considera todas as ocorrências que envolvam veículos pesados, mais especificamente, que envolva caminhões e ônibus. E para este tipo de evento, assume-se a obstrução de duas faixas.

Uma vez definido os tipos de eventos, é necessário identificar as variáveis: probabilidade de ocorrência e tempo de obstrução de cada tipo.

5.4.1 – Tempo de Obstrução de Via:

Os tempos de obstrução definem quanto tempo uma via ficará sob o efeito de um determinado evento, ou seja, por quanto tempo esta ficará sob condições onde a capacidade é reduzida em proporções dadas pelo tipo deste evento.

Estes tempos podem ser definidos a partir de dados históricos sobre os eventos ocorridos no segmento de via em estudo.

Como neste estudo definiu-se tipos de eventos por tipo de veículo envolvido, é preciso discriminar neste histórico os tipos e a partir destes obter uma expressão que indique o tempo de obstrução para eventos do tipo leve e outra para obstruções do tipo pesado.

Estas expressões são geralmente dadas por funções probabilísticas que indicam um tempo médio de obstrução, e um desvio, que indique o quanto este pode variar.

5.4.2 – Probabilidade de Ocorrência:

As probabilidades de ocorrência dos eventos buscam identificar as expectativas de ocorrência dos tipos de eventos, e conseqüentemente, de ocorrência dos efeitos da obstrução das pistas.

Os melhores métodos para se chegar a estas probabilidades ainda são muito discutidos entre os pesquisadores deste campo. Isso porque, são inúmeras as variáveis, e combinações destas, que podem influenciar estas probabilidades. Variáveis como a idade do motorista, tipo de veículo, horário da ocorrência, tipo de pista e as condições do tráfego no momento da ocorrência, são apenas alguns exemplos do que pode ser considerado para se justificar um evento. No caso da relação das condições de tráfego com a probabilidade de evento, têm-se alguns estudos que indicam probabilidades a partir de variáveis como: a densidade, a velocidade média, ou ainda, o índice V / C (volume versus capacidade), tal como em

Lord (2005). No entanto, embora esta metodologia tenha um enfoque bastante coerente e que tende a se firmar, ainda não se tem condições de aplicá-las sem que demandem uma massa de dados muito grande. O que acaba por limitar a aplicação e validação destas.

Outra forma de se chegar as estas probabilidades, e utilizada por este estudo, é através do histórico de ocorrências da via em analisada.

Esta metodologia, embora não consiga considerar o dinamismo das combinações das variáveis citadas acima e assim ter probabilidades em função das condições do tráfego a cada instante, esta consegue uma certa coerência com a realidade dada sua total aleatoriedade, uma vez que, por mais que se busquem variáveis e condições para justificar um evento, este tem sempre um grau de acaso que não se é possível determinar por estas.

Assim, as probabilidades de ocorrência dos eventos podem ser determinadas a partir da expressão abaixo:

$$: Probabilidade = \frac{Num. \text{Eventos}}{Volume \text{ Trafegado}} \quad (5.29)$$

Podendo ser utilizada para se identificar as probabilidades de ocorrência de eventos por tipo de veículo, por exemplo.

- ✓ Para estudos futuros, sugere-se a aplicação das metodologias que envolvam condições de tráfego na probabilidade de ocorrência de eventos, uma vez que as variáveis consideradas (ex. densidade,

velocidade médias), são parâmetros facilmente captado pelo modelo desenvolvido e proposto neste estudo.

5.5 – Demandas:

A demanda de tráfego representa o número de veículos que visa trafegar por uma dada via em um determinado período de tempo definido.

Antes de tudo, é importante destacar que demanda de veículos é diferente de fluxo de veículos. Este último representa o número de veículos que efetivamente trafegam pela via, ou seja, em função da capacidade de fluxo da via em estudo, tem-se o quanto da demanda a via pode absorver em um dado momento.

Logo, a demanda pode ser maior que o fluxo, e em tais situações, ainda influenciam na redução destes.

Estes casos caracterizam situações de congestionamentos, onde, mantido essa demanda superior por um período, tem-se uma diferença entre esta (veículos visando acessar) e o fluxo (veículos absorvidos), que se intensifica a cada instante devido a queda progressiva da capacidade, e logicamente, do fluxo.

Tais situações podem levar à condições que podem durar horas para se dissiparem. Logo, as vias devem estar aptas a absorver todas estas demandas, inclusive suas variações (picos), para serem consideradas de boa qualidade, ou seja, com um bom nível de serviço.

As demandas podem variar muito em relação ao período de tempo analisado, podendo considerar desde o período de uma hora até um ano, por exemplo.

Variação Mensal - A demanda pode variar muito mês a mês, de acordo com a atividade social e econômica que uma dada via serve. Vias de acesso a regiões turísticas, por exemplo, têm durante os meses de verão, demanda muito superior aos outros meses. Já em vias mais urbanas, por exemplo, que são mais utilizadas para negócios, ou seja, mais para tráfego de trabalhadores indo e vindo de seus trabalhos, e para transporte comercial de cargas ou de passageiros, identifica-se uma menor variação entre suas demandas mensais.

Abaixo, têm-se duas figuras que visam ilustrar essa idéia, porém cabe destacar que estas caracterizam vias específicas, logo com demandas próprias, porém mostram bem as características descritas acima.

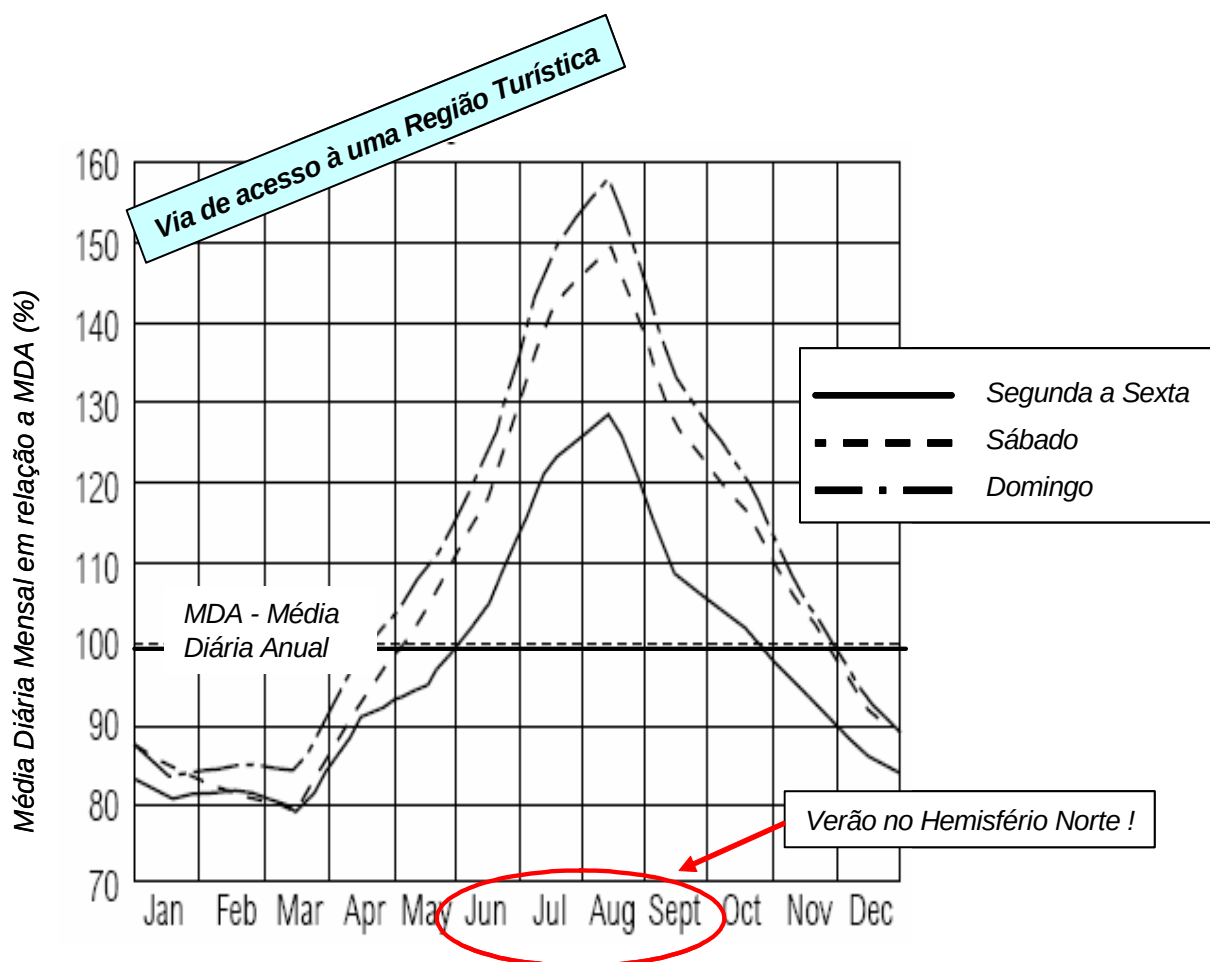


Figura 17 - Variação Mensal da Demanda - via de acesso a uma região turística

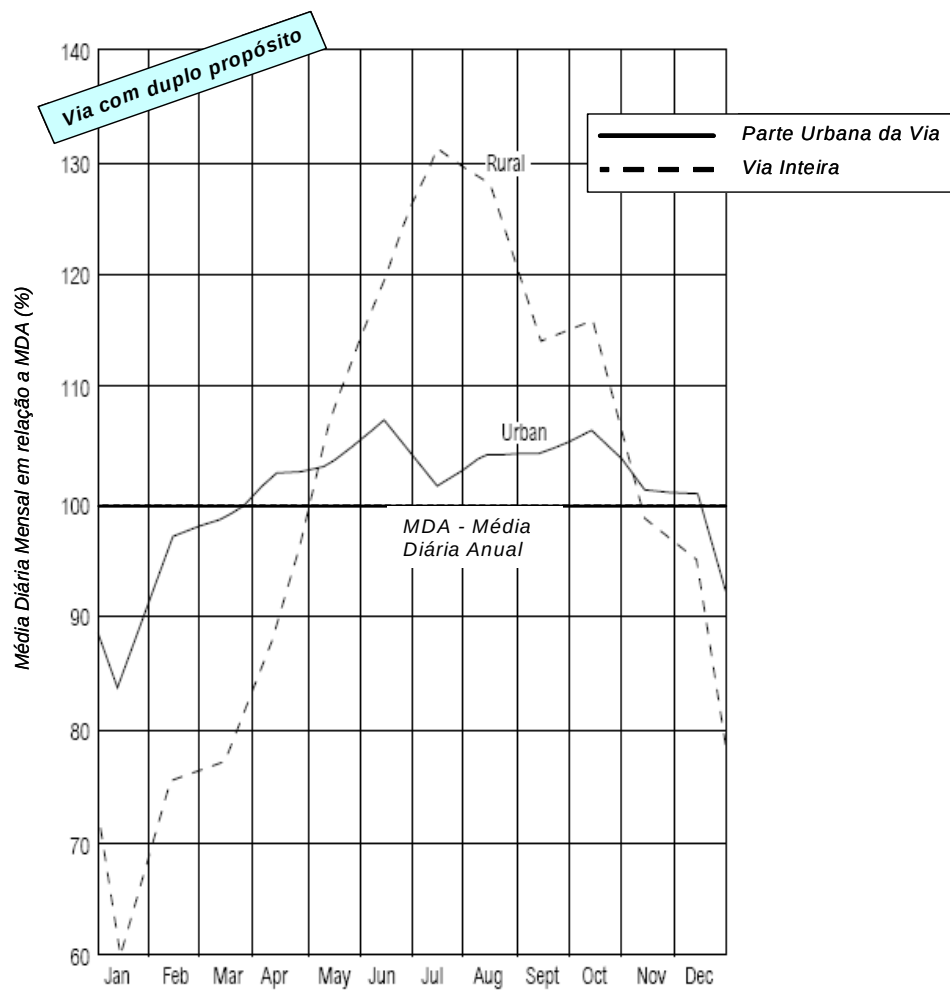


Figura 18 - Variação Mensal da Demanda - via com duplo propósito

É importante perceber na figura 18, que vias com duplo propósito devem estar dimensionadas para considerar sazonalidade de toda ordem, ou seja, o fato de um segmento da via (um trecho), ter características urbanas na maior parte do ano, logo com pouca variação de demanda no decorrer deste, esta está sujeita as variações da demanda da via como um todo, uma vez que essa pode fazer parte deste todo.

Variação Diária – Assim como a demanda mensal, a variação da demanda no decorrer dos dias da semana, também está muito ligado aos propósitos das vias. No caso das vias urbanas, o período tido como comercial, logo de Segunda-Feira a Sexta-Feira, justifica a grande demanda diária nestes dias, enquanto que nos finais

de semana (Sábado e Domingo), estas caem muito. Já nas vias com propósitos turísticos e rurais, estas características se invertem. A figura busca refletir essa idéia.

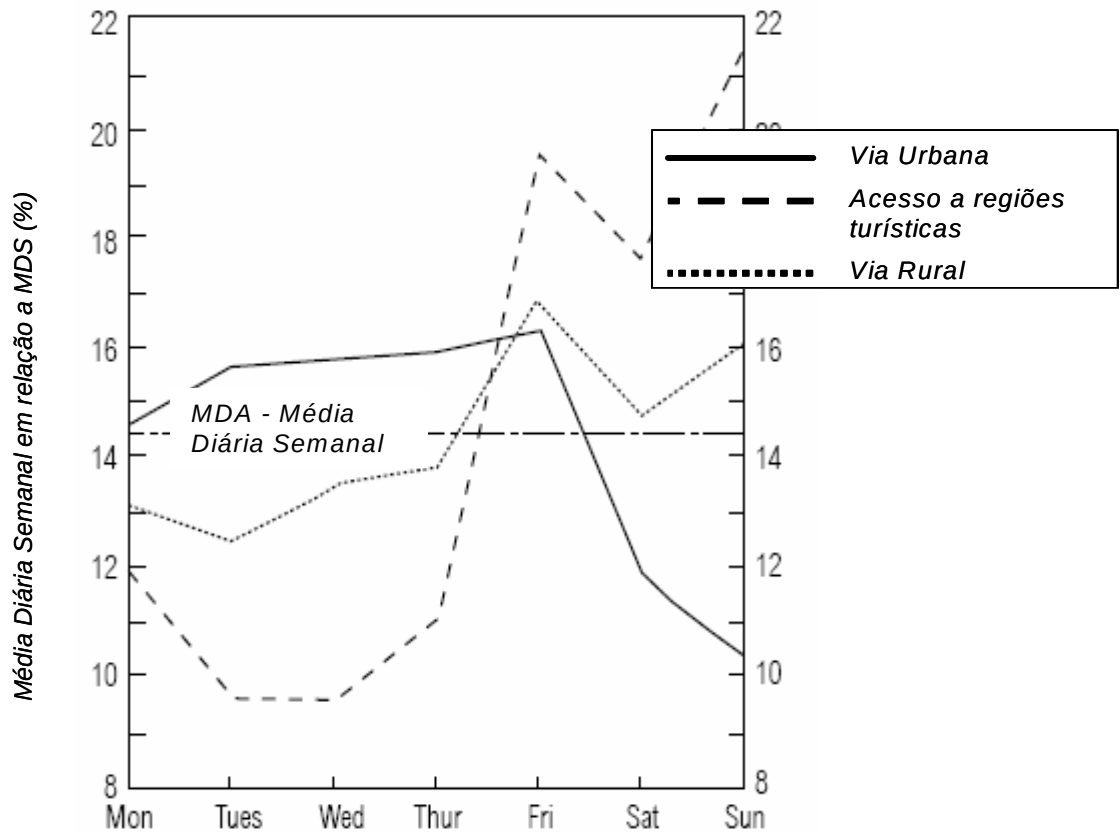


Figura 19 - Variação Semanal da Demanda

Variação Horária - A demanda também varia no decorrer das horas do dia, formando concentrações maiores em determinados horários (horários de pico) e menores em outros (“vales”). A depender do propósito da via, estas apresentam características específicas, as quais estão ilustradas nas figuras abaixo.

Porém, mais uma vez cabe salientar que, estas figuras estão baseadas em dados de vias específicas, que, embora representem curvas características de alguns tipos de vias (urbana ou de acesso a locais turísticos), não substituem as curvas obtidas de dados do local específico em estudo.

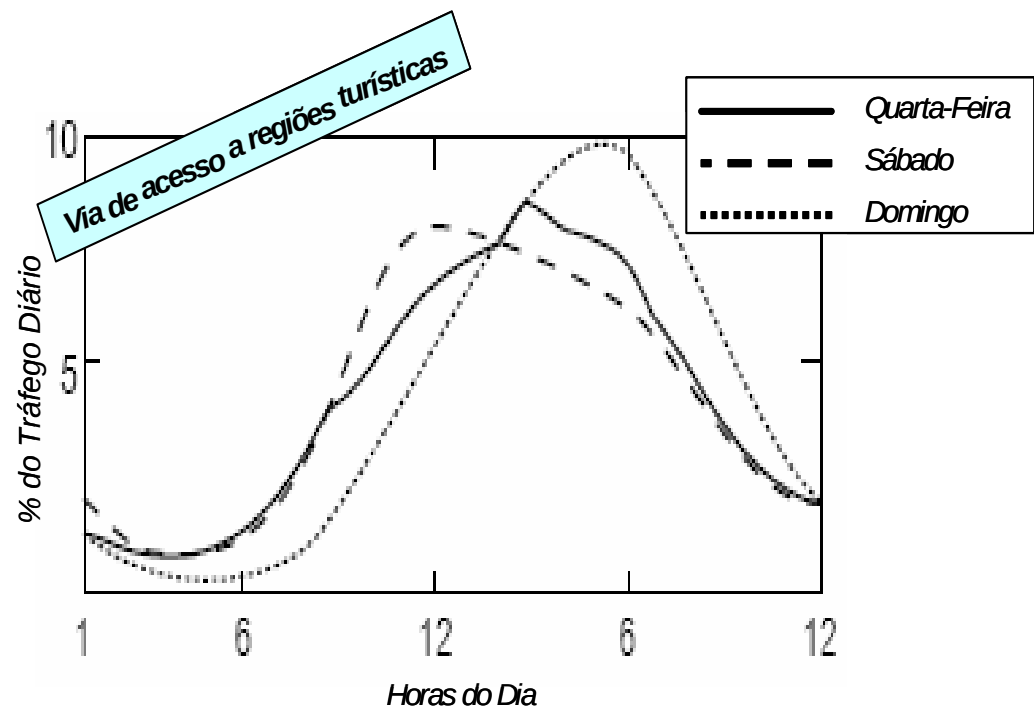


Figura 20 - Variação Diária da Demanda - via de acesso a uma região turística

É interessante perceber os picos acentuados nas curvas: Sábado, por volta das 11 horas, e Domingo, por volta das 17 horas. Isso se justifica por serem estes os horários em as pessoas vão e retornam de regiões turísticas, respectivamente.

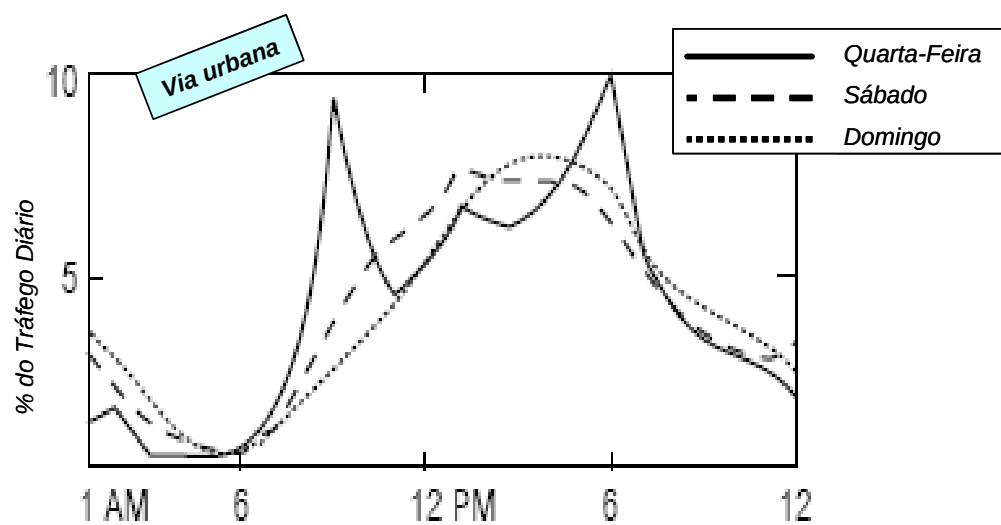


Figura 21 - Variação Diária da Demanda - via urbana

Nesta figura com curvas características de vias urbanas, o que se destaca, são os picos das 8 horas e 18 horas, que claramente mostram as idas e retornos das pessoas a seus respectivos locais de trabalho em um dia comercial (quarta-feira), enquanto que estes não ocorrem nos dias de final de semana.

5.5.1 – Determinação das Demandas:

A forma de se determinar demandas e suas variações depende dos propósitos do estudo. Basicamente dois podem ser estes propósitos ou objetivos do estudo.

O primeiro é quando se tem o objetivo de dimensionar uma nova infra-estrutura, uma nova via.

Nesse caso, uma vez que esta ainda não existe, é preciso gerar expectativas de demandas e comportamentos desta. Isto pode dar-se através de diversas técnicas, geralmente pesquisas e estudos de mercado para o levantamento das demandas, e para os comportamentos, usam-se geralmente técnicas estabelecidas em manuais, tal como o HCM, onde é identificado o que comumente acontece nos diversos tipos de via com relação ao tráfego.

Considerações sobre geometria ideal para atender as demandas em horários de picos, a identificação das distribuições destas no decorrer dos dias, das horas, as implicações do mix de veículos previsto para esta via sobre a capacidade desejada, são alguns dos pontos que podem ser esclarecidos por estes manuais.

O outro principal propósito de estudo de tráfego de uma via é quando esta já existe, e pretende-se avaliar os níveis de serviço desta, mediante ao tráfego existente, ou ainda, simular novas situações.

Neste caso, os dados sobre as demandas a serem utilizadas podem ser obtidos de históricos da própria via, o que oferece uma maior coerência com a realidade, onde fica implícito qualquer característica peculiar que possa existir nesta via ou dos motoristas e veículos que trafegam por ela.

Assim, a partir destas demandas, busca-se inserir técnicas de distribuição destas demandas visando refletir o comportamento das mesmas. Ou seja, uma vez que se tem o número de veículos diário ou horário, por tipo, que pretende trafegar por uma dada via (sua demanda), é preciso determinar como estes acessarão esta via (distribuição de chegada).

Este estudo em especial, se enquadra, basicamente, no segundo propósito, uma vez que a via analisada já existe, logo podem ser coletados ou observados os dados sobre demanda de tráfego.

Porém no mesmo estudo sugere-se, como veremos, um potencial de aumento em sua demanda em função do desvio de rota de parte dos veículos que passam hoje por uma via alternativa, para esta em estudo. E para esta parte, as demandas são baseadas em pesquisas, ou seja, em expectativas.

Para obter as distribuições das demandas diárias existentes no decorrer das horas na via em estudo, podem-se utilizar sistemas de detecção via filmagem (DAV), localizados em pontos específicos da via, que captam o fluxo por hora, ou ainda através de dados coletados em cabines de pedágio da via, quando existente.

Neste estudo optou-se por utilizar os dados do pedágio preferencialmente, onde foram analisados dados relativos a um período próximo de um ano.

Estes dados advindos de pedágio, por serem bastante discriminados por tipo de veículo (ex. veículos de passeio, caminhões, etc.) e ainda, com os horários de acesso destes às cabines, pode-se chegar às demandas médias diárias e as curvas

características diárias, que indicam como esta demanda normalmente se comporta, se distribui durante o dia. Assim, as médias diárias passam a ser representada por expressões probabilísticas, com média e desvio definidos para cada dia da semana, e as curvas características por percentuais da demanda diária para cada hora.

Nas figuras abaixo, tem-se uma amostra destes levantamentos para o estudo de caso que será apresentado neste estudo.

<i>Demanda Diária (veículos)</i>		
<i>Dia</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
Domingo	45.306	9.806
Segunda-feira	61.629	9.632
Terça-feira	62.803	11.083
Quarta-feira	66.163	10.668
Quinta-feira	67.786	10.748
Sexta-feira	72.780	12.124
Sábado	63.884	13.974

Tabela 7 - Demanda Média Diária - estudo de caso.

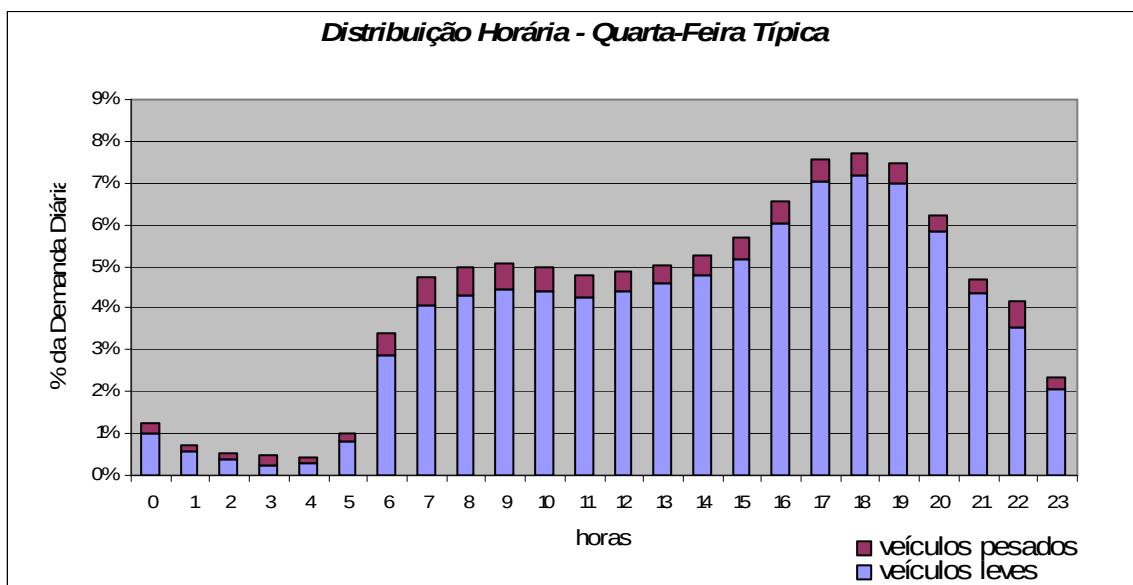


Figura 22 - Curva característica - estudo de caso

5.5.2 – Comportamento da Demanda:

Uma vez que se tem o volume médio para cada hora, determinam-se como estes se distribuem no decorrer destas horas. Como forma de representar esse comportamento busca-se uma função probabilística que faça este papel.

Para identificar essa função, optou-se por fazer medições diretamente no campo.

Para tal, foram coletadas várias amostras com intervalos de tempo entre as chegadas dos veículos em uma rodovia, contemplando dias e sentidos diferentes. Com estes dados em mãos se identificou uma curva adequada a representar o comportamento apresentado nas amostras.

A função exponencial apresentou uma melhor consistência com o que se pretende representar.

Através da função exponencial, busca-se representar a aleatoriedade com que chegam os veículos em uma dada via, ou seja, esta função gera as entidades (veículos) com diversos intervalos de tempo diferentes no decorrer de um período, baseando-se em um intervalo médio de tempo entre chegadas estabelecido para este mesmo período.

Como veremos, o período considerado é de uma hora, e para cada uma destas então, é definido um intervalo médio entre chegadas.

Este tipo de função, por sua total aleatoriedade, permite no decorrer de uma hora, por exemplo, gerar veículos em maiores quantidades em alguns pontos desta hora e menores em outras. Isto faz com que se tenha fluxo mais intenso que a média prevista em determinados momentos, muito comum no tráfego real.

Este fenômeno, que nas metodologias analíticas, procura-se representar através de fatores (peak-hour factors) que intensificam a demanda horária a fim de considerar estas variações dentro de cada hora, tem efeito direto sobre o nível de serviço de uma via. Isso porque, mesmo que por um breve período de tempo (ex. 5 minutos), se tenha uma demanda que venha a ser maior que a capacidade máxima da via, tem-se uma queda do fluxo (queda da capacidade de absorção da via), o que pode provocar restrições na via, que por si só, não permita esta restabelecer sua capacidade ideal, mesmo já tendo terminado este pico.

5.5.3 – Intervalo entre chegadas:

O intervalo médio entre chegadas dos veículos deve ser definido para cada hora do dia. Isso pode ser feito para cada hora através da expressão abaixo:

$$IntervaloMedio = \frac{\Delta t}{Demanda} \quad (5.30)$$

Logo, para cada demanda estabelecida por período, no caso a hora, chega-se a uma fração deste, podendo ser representado em segundos, por exemplo. Estes então, serão os intervalos médios entre chegadas a serem utilizados na função exponencial descrita acima.

5.5.4 – Demanda Extra:

No estudo de caso, como veremos, buscou-se identificar os impactos do aumento do tráfego de veículos pesados, em determinadas janelas de tempo, ou seja, em alguns horários definidos do dia, na via estudada.

Este potencial aumento (demanda extra), foi identificado através de questionários (vide anexo I), que foram aplicados junto aos caminhoneiros que trafegam por uma rodovia alternativa a via em estudo, por uma equipe da Faculdade de Economia da UFF, buscando identificar a intenção dos mesmos, que hoje não passam na rodovia em estudo, passarem a utilizá-la nos horários de abertura propostos (janelas).

Através destas amostras de intenções então, inferiu-se para toda a população de caminhoneiros, quantos deles viriam a trafegar na via em estudo.

Esta quantidade então passa a ser tratado como uma demanda extra, que deve ser agregada a demandas atuais da via, seguindo todos as lógicas e cálculos já discutidos acima. A figura abaixo mostra os resultados obtidos na pesquisa para o estudo em questão.

		<i>Média</i>	
<i>Janelas</i>	<i>Hora</i>	<i>Norte</i>	<i>Sul</i>
	<i>21:00</i>	<i>984</i>	<i>711</i>
	<i>04:00</i>	<i>984</i>	<i>711</i>
	<i>12:00</i>	<i>904</i>	<i>667</i>
	<i>13:00</i>	<i>904</i>	<i>667</i>

Tabela 8 – Demanda Extra – estudo de caso (Faculdade de Economia da UFF)

5.6 – Veículos Pesados:

A entrada de veículos pesados em uma corrente de tráfego afeta diretamente o número de veículos que essa pode absorver. Os veículos pesados considerados são os veículos com mais de dois eixos, basicamente caminhões e ônibus.

Estes veículos afetam adversamente o tráfego por diversos motivos. Abaixo são citados alguns:

- ✓ Eles são mais largos que os carros, ocupando mais espaço na via;
- ✓ Eles têm menos capacidade operacional que os leves, particularmente com respeito à aceleração, desaceleração e a capacidade de manter a velocidade em subidas.

A incapacidade desses tipos de veículos em manterem o mesmo ritmo que os veículos leves em muitas situações pode criar grandes espaçamentos entre os veículos na corrente de tráfego. Esses espaçamentos são difíceis de serem preenchidos através de manobras. Esse efeito resulta em ineficiências no uso do espaço da rodovia. Essa situação é prejudicial, particularmente acentuado em subidas onde a diferença das capacidades entre veículos leves e pesados é clara.

Outro motivo que contribui para estes espaçamentos maiores é o fato de que, motoristas de veículos leves evitam se aproximar de veículos pesados, tanto quando trafegam na mesma pista, tanto quando na pista ao lado da qual o veículo pesado está trafegando. Este efeito costuma ser referenciado como “efeito parede”.

- ✓ O impacto sobre as condições de fluxo dado um evento envolvendo um veículo pesado é bem maior. Isto se comprova através de aspectos como: a

obstrução de um número maior de vias e o tempo de recuperação destas ser maior.

Ainda existe um outro ponto que não foi contemplado por este estudo que é a forte tendência a aumentar a probabilidade de ocorrência de eventos, dado um aumento da proporção de pesados.

>> Equivalência de veículos pesados:

Como a metodologia utilizada neste estudo é fundamentada para veículos leves, e a fim de refletir os efeitos dos veículos pesados sobre o tráfego, optou-se também por uma metodologia HCM.

Através desta se atribuem valores equivalentes aos veículos pesados. Ou seja, basicamente e operacionalmente falando, o modelo identifica o quanto vale cada veículo pesado comparado ao leve no tráfego.

Upgrade (%)	Length (km)	E_T						
		Percentage of Trucks and Buses						
		2	4	5	6	8	10	15
< 2	All	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
≥ 2–3	0.0–0.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 0.4–0.8	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 0.8–1.2	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 1.2–1.6	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5
	> 1.6–2.4	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
	> 2.4	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
> 3–4	0.0–0.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 0.4–0.8	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5
	> 0.8–1.2	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	> 1.2–1.6	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0

Tabela 9 – Equivalência de veículos pesados (HCM)

Através da tabela acima (HCM), é possível identificar estes valores (E_t) tendo-se como referência os parâmetros: proporção de veículos pesados no tráfego, o grau de aclave da via e o comprimento do segmento analisado.

Assim, para cada veículo pesado que acessa o segmento em estudo, é avaliado estes parâmetros, e então identificado o seu valor em termos de veículos leves. Ou seja, quantos veículos leves valem o veículo pesado neste instante.

Cabe salientar que, a metodologia recomenda que, para estudos em aclave, deve-se considerar no comprimento do segmento em estudo, um acréscimo no trecho equivalente a 25% do comprimento real, no início e no final desse segmento.

Com estes valores equivalentes dos veículos pesados é possível encontrar o volume equivalente (V_p), o qual se considera nas análises que envolvem o fluxo e densidade. Este pode ser calculado através da expressão abaixo:

$$V_p = V_{eic_{leve}} + V_{eic_{pesado}} * E_T \quad (5.31)$$

6 – Estudo de Caso:

Com o intuito de aplicar e validar o modelo proposto foi utilizado um estudo de caso desenvolvido para a Agência Nacional de Transporte Terrestre (ANTT), onde se tinha como objetivo específico: dimensionar os efeitos sobre os níveis de serviço prestados por uma via após a abertura de “janelas de horário” para a passagem de veículos pesados. Atualmente, nas janelas propostas, estes veículos pesados não têm a permissão de trafegar por esta via.

6.1 – Sobre a Rodovia em estudo:

Atualmente sob concessão, esta via de 13,9 km de extensão total, tem especificidades importantes a serem consideradas em estudos de tráfego:

- ✓ Inaugurada em 1974, e prevendo volume diário de aproximadamente 16.000 veículos, esta rodovia atualmente absorve cerca de 135.000 veículos / dia.

- ✓ Trata-se de uma ponte que, e como tal, apresenta grandes dificuldades em expandir sua infra-estrutura (ex. aumento do número de pistas) para atender estes expressivos aumentos de demanda;
- ✓ Também por ser uma ponte, com grande extensão e volume de tráfego alto, esta apresenta pouca flexibilidade para desobstrução de suas pistas com rapidez, dado a ocorrência de algum evento (ex. acidentes);
- ✓ Trata-se de uma via responsável pela ligação de dois grandes centros urbanos, o que caracteristicamente apresenta uma distribuição pendular das demandas no decorrer do dia, ou seja, todo volume que trafega em um sentido no início do dia, retorna ao fim deste. Tal característica provoca grandes concentrações em determinados horários (picos da manhã e da tarde);
- ✓ Outra característica da via que afeta a sazonalidade da demanda é o fato desta via dar acesso a regiões turísticas também. Isto faz com que, nas sextas-feiras e feriados, esta tenha sua demanda intensificada ainda mais;
- ✓ Possui um trecho de aproximadamente 2 km em aclive, e sem acostamentos. Tal característica como será visto, tem efeitos negativos sobre o desempenho normal dos veículos. Principalmente, sobre os veículos pesados;
- ✓ Atualmente os caminhões com mais de dois eixos somente são permitidos no período entre 22:00 h e 4:00 h, nos dois sentidos. Há ainda uma restrição suplementar para os caminhões de dois eixos que só

podem acessar esta via, no sentido Norte-Sul, após as 10 horas da manhã.

6.2 – Dimensionamento do Nível de Serviço:

Embora existam diversos outros parâmetros que qualificam o serviço prestado por uma via, tais como a qualidade do pavimento, a sinalização, o serviço de assistência ao usuário e o tempo de atendimento das ocorrências, estão na fluidez do tráfego e nos congestionamentos, os elementos principais através dos quais os usuários relacionam suas satisfações ou insatisfações em relação à rodovia.

A fim de captar como estão estes elementos atualmente (cenário atual), buscou-se identificar para cada hora do dia, as densidades médias, classificando-as em termos de nível de serviço (ex. Nível A, Nível B, etc), assim como, os congestionamentos médios. Este então pode ser denominado como:

- ✓ Cenário Atual - Permissão de passagem de veículos com mais de dois eixos, apenas entre 22 e 4 horas.

Em seguida, dois novos cenários, sugerindo mudanças no tráfego atual, relativas a entrada de caminhões com mais de dois eixos, são propostos:

- ✓ Situação 1 (“janela das pontas”) - Permissão de passagem de veículos com mais de dois eixos a partir das 21:00 h até as 5:00 h. Ou seja

abertura de janelas de uma hora de duração em cada ponta da janela atual (de 21 as 22 horas, e de 4 as 5 horas);

- ✓ Situação 2 (“janela da tarde”) - Permissão de passagem de veículos com mais de dois eixos no intervalo de 12 as 14 horas.

A partir da simulação do cenário atual e dos cenários propostos sugeridos, ou seja, cenários com as janelas (situações 1 e 2), espera-se responder perguntas sobre os seguintes impactos relativos às novas janelas para caminhões:

- Aumentos de Densidade de Tráfego;
- Redução de Níveis de Serviço;
- Formação de congestionamentos.

6.3 - Escolha do Segmento a ser estudado:

A metodologia permite que analise diversos segmentos em separado, de acordo com suas características específicas. Neste estudo, buscou-se identificar e analisar o segmento da via tido como o mais crítico.

O segmento crítico foi selecionado em função de relatos e dados históricos dos administradores desta via, que o consideram como o trecho de maiores impactos sobre o fluxo.

Estes impactos estão diretamente ligados às suas características geométricas, tais como, estreitamento do tamanho médio das faixas, a inexistência de acostamento, um aclave considerável, e um maior número de ocorrências de eventos.

6.4 – Características do Segmento:

O segmento estudado possui características geométricas específicas, que devem ser considerados. Como já visto na metodologia, as características geométricas do segmento têm papel determinante no desempenho deste, uma vez que estas definem o FFS, de onde são derivadas as relações velocidade versus densidade para os diversos regimes.

O esquema abaixo procura dar uma visão do segmento crítico analisado:

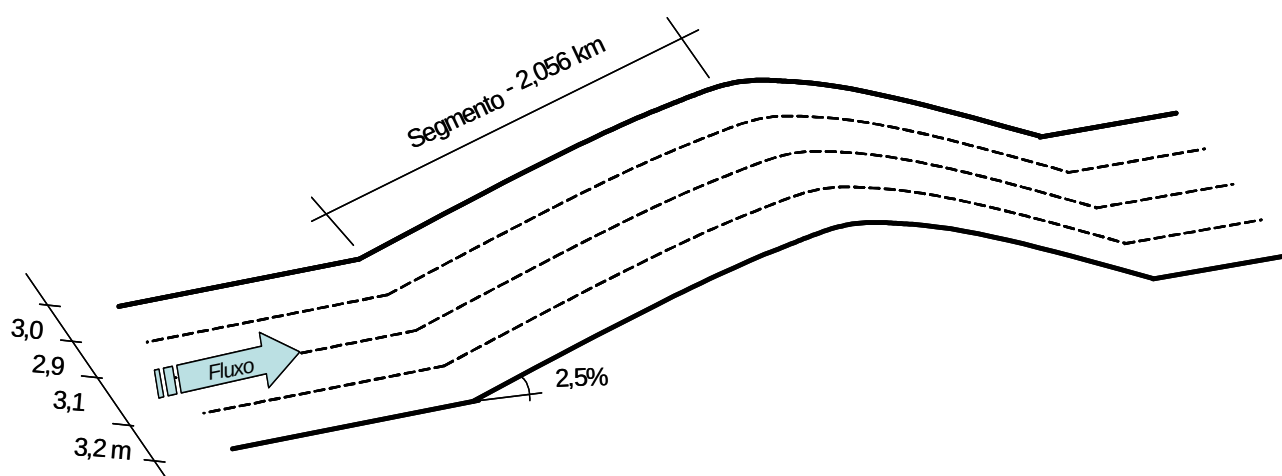


Figura 23 – Esquema do Segmento – Características Geométricas

Trata-se de um segmento com aproximadamente dois quilômetros (2,056 km) em aclave. Este aclave em dada extensão tem efeito sobre o desempenho dos veículos, particularmente sobre os veículos pesados, causando reduções nas velocidades destes, e em consequência, nas velocidades dos veículos leves também.

Outro ponto crítico do segmento é o fato de não se ter no mesmo a existência do acostamento. A falta deste também tem efeito sobre a capacidade do segmento por dois motivos principalmente: a) O primeiro é que os motoristas têm receio de trafegar muito próximos às margens da via, onde se encontram obstáculos, no caso, muretas de contenção. Isso faz com que estes, ao procurarem distanciar-se destas muretas, se aproximem da pista ao lado, o que faz com que o motorista desta pista ao lado proceda da mesma forma, e aí por diante. Essa sequência, que leva a uma má utilização do espaço disponível do segmento, gera perdas na capacidade do segmento, e b) é que em caso de ocorrer um evento neste segmento, não se tem um espaço disponível para recuperação do veículo sem que ocupe pistas e interfira no fluxo.

A não existência do acostamento é dada pelo fato da concessionária que administra a via, ter optado por um maior número de pistas neste trecho, objetivando uma maior capacidade no mesmo. Tal opção, que leva em conta também, o fato de não ser permitido o tráfego dos veículos pesados (cenário atual), levou a uma configuração de quatro pistas, diferentemente das outras partes da mesma via, onde se têm três pistas mais acostamento.

O número maior de pistas é um fator de melhoria do desempenho da via, porém a largura média destas também influencia, e neste caso, com a nova

configuração, tem-se largura de pistas menores que o recomendado pelo HCM (3,6 m), o que também representa uma influência negativa sobre o desempenho da via.

Dessa forma, o segmento apresenta diversas características específicas, cada uma com seus efeitos sobre o tráfego, e que devem ser consideradas no modelo.

6.5 - Free-Flow Speed do Segmento:

A partir das características do segmento e das expressões e tabelas do HCM, mencionadas na metodologia, foi possível chegar ao FFS específico para o segmento em estudo, conforme descrito abaixo:

BFSS *BaseFreeFlowSpeed* – Uma vez que se trata de uma via urbana, assumiu-se 110 km / h.

f *LaneWidth* - No segmento em estudo se tem largura média de 3,05 m. Interpolando na tabela 1, chega-se ao fator que equivale a uma redução de 9,35 km / h.

f *LateralClearance* - No segmento em estudo não se tem acostamento, e conforme tabela 2, isto equivale a uma redução 1,9 km / h.

$f_{NumberofLanes}$ - O segmento em estudo tem, nas duas direções, quatro faixas, o que corresponde a uma redução de 2,4 km / h conforme tabela 3.

$f_{InterchangeDensity}$ - Como no segmento em estudo não se tem acessos, este fator não tem influência na determinação do FFS deste segmento.

Com os fatores definidos, substituem-se estes na expressão 5.1, chegando-se ao FFS do segmento, conforme abaixo:

$$FFS = BFFS - f_{LVZ} - f_{LG} - f_{N} - f_{ED,4} \quad (6.1)$$

(Note: In the original image, the term $f_{ED,4}$ is crossed out with a diagonal line and a '0' is written above it, indicating it is zero.)

$$FFS_{Segmento} = 96,35 \text{ k/h} \quad (6.2)$$

6.6 - Limites entre Regimes de Tráfego

O modelo está preparado para operar em diversas situações, que representam diversos regimes cada um com suas características e funções específicas.

Dessa forma, foi necessário identificar os limites entre estes regimes, conforme abaixo.

6.6.1 - Regime FFS:

Conforme HCM, neste regime a velocidade média é igual ao FFS, desde o fluxo nulo, até o fluxo definido pela expressão 5.2, conforme abaixo:

$$V_p = (3100 - 15 * FFS)$$

Logo, substituindo-se o FFS do segmento na expressão acima, chega-se ao fluxo no limite FFS.

$$V_{p_{LimFFS}} = 3100 - 15 * 96,35 \quad (6.3)$$

$$V_{p_{LimFFS}} = 1654,75 \text{ veic/h/faixa} \quad (6.4)$$

No fluxo nulo, ou seja, quando nenhum veículo trafega pela via, temos densidade 0. Porém para o fluxo máximo do regime é preciso chegar a densidade que corresponda a este fluxo. Este pode ser identificado através da expressão 5.4, conforme abaixo:

$$D_{LimiteFFS} = (3100 / \overset{96,35}{\cancel{FFS}}) - 15$$

$$D_{LimiteFFS} = 17,17 \text{ veic/faixa} \quad (6.5)$$

Assim, entre os limites que definem este regime, densidade nula e densidade no limite FFS (17,17 veic / km), a velocidade é sempre a mesma, dada pelo FFS específico da via, e o V_p , uma resultante das relações entre as variáveis FFS e Densidade.

A figura abaixo procura representar este regime:

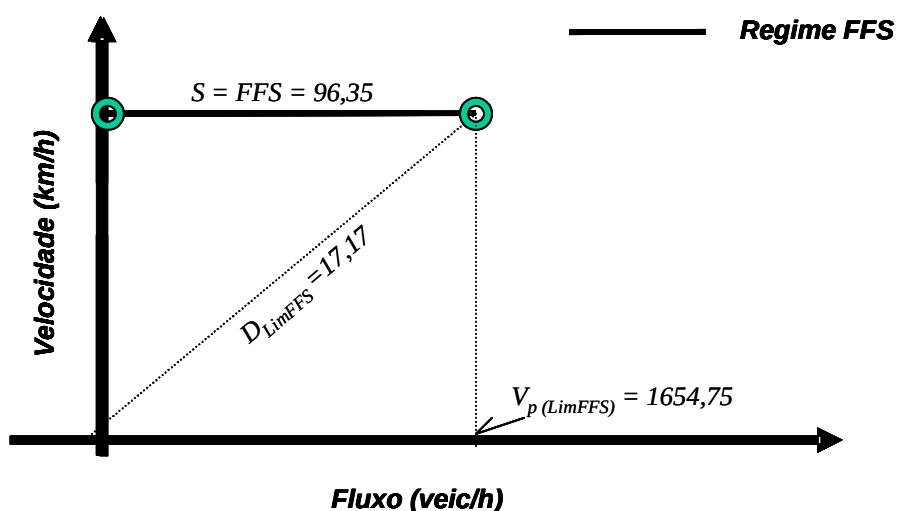


Figura 24: Regime FFS - Relação Velocidade x Fluxo (específica do segmento)

6.6.2 - Regime Under

O regime Under vai desde o limite FFS definido acima até a densidade de 28 veic / faixa. Logo os limites de densidade já estão definidos.

O que cabe agora definir para este regime é: a função que relaciona velocidade e a densidade; as velocidades nos limites; e o fluxo máximo no regime Under (capacidade máxima do segmento).

Neste intervalo se tem uma redução gradativa da velocidade dado o aumento da densidade, a partir de uma relação definida. Para se chegar a essa relação, inicialmente, substitui-se o FFS definido na expressão 5.6, conforme abaixo:

$$D = \frac{\left[\left(\frac{96,35 - S}{(1/28) * (23 * 96,35 - 1800)} \right)^{1/2,6} \right] * (20 * 96,35 - 1300) - 15 * 96,35 + 3100}{S}$$

$$D = \frac{\left[\left(\frac{96,35 - S}{14,85} \right)^{1/2,6} \right] * (627) - 1654,75}{S} \quad (6.6)$$

Com esta definida, e através de recursos gráficos de uma planilha de cálculos (ex. Excel), conforme exposto na metodologia, identificou-se a relação característica para o intervalo, tendo como variável independente a densidade.

Assim, a expressão que define a relação velocidade (S) versus densidade (D), dentro dos limites do regime Under, para o segmento em estudo, fica sendo a expressão 5.7, já mencionado na metodologia e, novamente descrito abaixo:

$$S = 1,081E-05 * D^6 - 1,548E-03 * D^5 + 9,151E-02 * D^4 - 2,849E+00 * D^3 + 4,901E+01 * D^2 - 4,399E+02 * D + 1,701E+03$$

Logo, para cada valor de densidade nesta faixa, que vai desde a densidade limite do regime FFS até a densidade limite do regime Under (28 veic / km), a velocidade é dada via expressão acima.

Através desta expressão, pode-se então, identificar a velocidade no limite Under. Bastando substituir nesta, a variável D pela densidade no limite Under.

Para o segmento em estudo chega-se a:

$$S_{LimiteUnder} = 81,49 \text{ km/h} \quad (6.7)$$

Uma vez identificados a velocidade e a densidade no limite Under é possível encontrar, através da expressão 5.8, o fluxo no limite Under, o qual representa a Capacidade Máxima do segmento em estudo. Logo para o segmento, tem-se:

$$V_{P_{Maximo}} = S_{LimiteUnder} * D_{LimiteUnder}$$

$$V_{P_{Maximo}} = 2281,72 \text{ veic/h/faixa} \quad (6.8)$$

Assim, entre os limites de densidade, limite do Regime FFS e limite do regime Under (ou, 28 veic / km), a expressão que define as velocidades com que cada veículo trafegará pela via é dado pela expressão 7.7, e os fluxos a cada instante, dado pela relação fundamental (6.5). A figura abaixo procura representar o regime e limites para o segmento estudado.

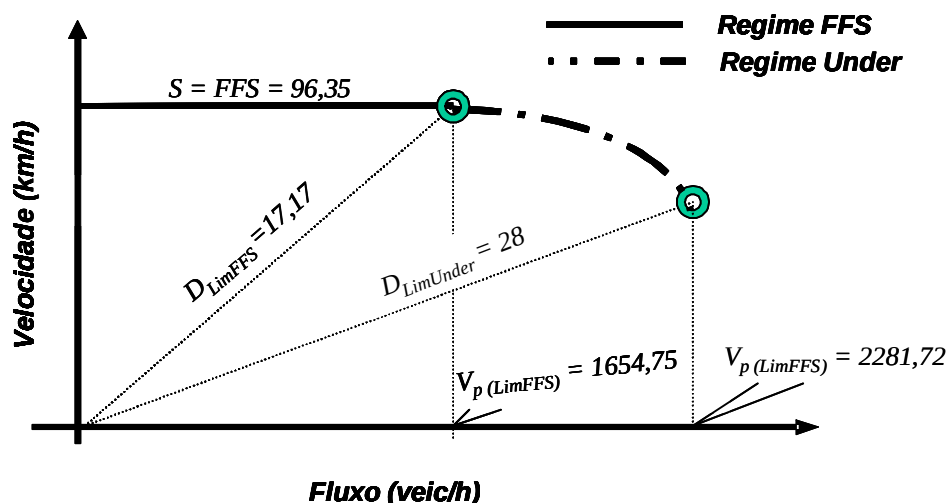


Figura 25: Regime Under - Relação Velocidade x Fluxo (específica do segmento)

6.6.3 - Regime Over

Este regime vai desde a densidade no limite Under até a densidade no limite Over, que é diferente, de densidade máxima de engarrafamento (ou jam density), neste estudo.

Isso porque, no estudo assumiu-se como densidade limite para o regime, a densidade em que os veículos trafegam a 20 km/h, e não a 0 km/h, como seria teoricamente a velocidade na densidade de engarrafamento.

Assim, a densidade limite no regime Over, é menor que a densidade jam, ou densidade a 0 km/h ($D_{0km/h}$), e representa no modelo, a situação de máximo congestionamento, porém ainda com algum movimento (movimento “anda e para”).

Para se chegar à densidade no limite Over específica para o segmento em estudo, foi necessário antes, chegar a densidade a 0 Km/h, que conforme já exposto, deu-se através de pesquisas em semáforos (sinais de trânsito), e chegando-se a:

$$D_{0km} = 158,73 \text{ veic/km}$$

Em seguida, as variáveis e relações necessárias, foram também identificadas, conforme metodologia já exposta.

- Fluxo no Limite a 0 km/h

$$Vp_{Lim.0km/h} = 0$$

- Relação velocidade versus densidade, através da expressão 5.20

$$S = \left[\frac{V_{p_{LimUnder}}}{D_{LimUnder} - D_{Lim0km/h}} \right] * \left(1 - \frac{D_{Lim0km/h}}{D} \right)$$

$\begin{matrix} & \nearrow 2281,72 \\ & \nwarrow 28 \\ & \searrow 158,73 \end{matrix}$
 $\begin{matrix} \nearrow 158,73 \\ \nwarrow 158,73 \end{matrix}$

$$S = -17,45 + \frac{2769,83}{D} \quad (6.9)$$

- Pela expressão acima, chega-se a Densidade no Limite Over, ou seja, a densidade quando a velocidade é 20 km/h. Substituindo então 20 km/h na expressão 6.9, tem-se:

$$D_{LimOver} = 73,9 \text{ veic/km} \quad (6.10)$$

- Fluxo no Limite Over pela relação 5.22, conforme abaixo.

$$V_{p_{LimOver}} = D_{LimOver} * S_{LimOver}$$

$\begin{matrix} \nearrow 73,9 \\ \nwarrow 20 \end{matrix}$

$$V_{p_{LimOver}} = 1479,21 \text{ veic/h/faixa} \quad (6.11)$$

A figura abaixo procura representar o regime através dos limites e variáveis descritos.

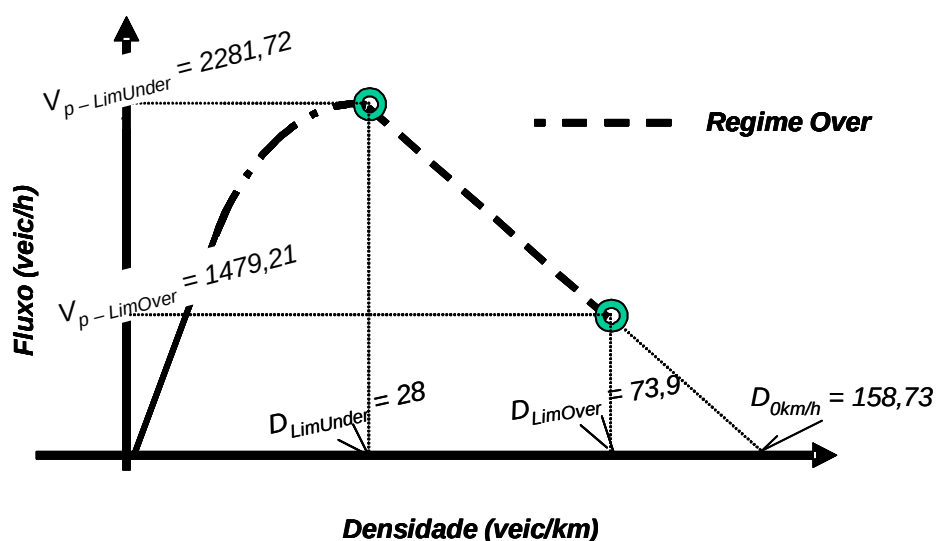


Figura 26: Regime Over - Relação Fluxo x Densidade (específica do segmento).

6.6.4 - Regime Under_com Obstrução

Este regime descreve situações em que alguma obstrução é imposta ao fluxo natural de uma via, que no estudo em questão podem ser de dois tipos, que foram denominados como: Obstrução do Tipo Leve (ou Eventos Leves), que busca representar eventos com envolvimento de veículos leves (carros e utilitários), e Obstrução do Tipo Pesado (ou Eventos Pesados), que busca representar eventos envolvendo veículos pesados (caminhões e ônibus).

Conforme descrito na metodologia, para captar o impacto de cada tipo de evento, aplica-se um redutor (R) sobre a capacidade máxima estabelecida para os regimes básicos, ou seja, sem obstrução.

Este redutor é definido pela tabela 5, de acordo com a premissa utilizada para o tipo de obstrução.

Neste estudo, e com base em relatos dos administradores da via, assumiu-se que, para um evento leve, existe a obstrução de uma faixa, e no caso de eventos pesados, duas faixas são obstruídas.

Como o segmento em questão, tem quatro faixas e não tem acostamento, pela tabela foi possível identificar os fatores (R) redutores da capacidade para cada um dos tipos de obstrução estudado.

Number of Freeway Lanes by Direction	Shoulder Disablement	Shoulder Accident	One Lane Blocked	Two Lanes Blocked	Three Lanes Blocked	
2	0.95	0.81	0.35	0.00	N/A	
3	0.99	0.83	0.49	0.17	0.00	
4	0.99	0.85	0.58	0.25	0.13	
5	0.99	Eventos Leves		0.40	Eventos Pesados	
6	0.99	0.89	0.71	0.50	0.26	
7	0.99	0.91	0.75	0.57	0.36	
8	0.99	0.93	0.78	0.63	0.41	

Tabela 10 – Proporção da Capacidade Disponível x Tipo de Obstrução

Com estes redutores definidos para cada tipo de evento, e utilizando-se da expressão 5.24, chegou-se através de planilhas de cálculos, conforme exposto na metodologia, as expressões polinomiais (5.25 e 5.26) que definem a relação

densidade versus velocidade no regime under para os dois tipos de eventos, conforme descrito abaixo:

$$S_{UnderLeve} = 6,650E-07 * D^6 - 6,678E-05 * D^5 + 2,478E-03 * D^4 - 3,811E-02 * D^3 + 1,403E-01 * D^2 - 6,159E-01 * D + 9,642E+01$$

$$S_{UnderPesado} = -2,045E-07 * D^6 + 1,86E-05 * D^5 - 5,784E-04 * D^4 + 3,641E-03 * D^3 + 21 * D^2 - 6,238 * D + 84,277$$

Através destas expressões e da relação fundamental 4.5, chega-se as variáveis fundamentais no limite Under_com obstrução para os dois tipos de eventos, conforme descrito abaixo:

- ✓ Eventos do Tipo Leve (obstrução de uma pista)

$$D_{LimUnderLeve} = 28 \text{veic/km}$$

$$S_{LimUnderLeve} = 47,26 \text{km/h} \quad (6.12)$$

$$Vp_{LimUnderLeve} = 1323,42 \text{veic/h/faixa} \quad (6.13)$$

- ✓ Eventos do Tipo Pesado (obstrução de duas pistas):

$$D_{LimUnderPesado} = 28 \text{ veic/km}$$

$$S_{LimUnderPesado} = 20,37 \text{ km/h} \quad (6.14)$$

$$V_{P_{LimUnderPesado}} = 570,44 \text{ veic/h/faixa} \quad (6.15)$$

A figura abaixo procura representar o regime e seus limites e variáveis:

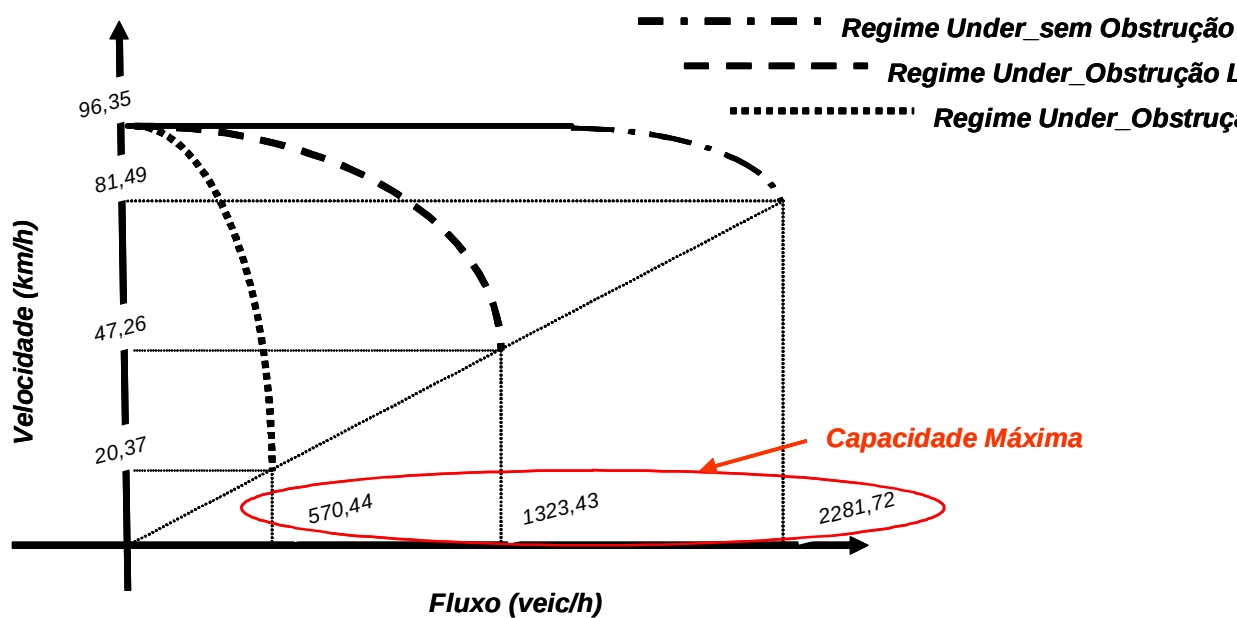


Figura 27 – Regime Under_com Obstrução - Relação Velocidade x Fluxos

6.6.5 - Regime Over_com Obstrução

Para se chegar às relações velocidade versus densidade e variáveis limites deste regime, para os dois tipos de eventos assumidos, segue-se o mesmo raciocínio aplicado no Regime Over (sem obstrução), no entanto, utilizando-se agora, das capacidades reduzidas, ou seja, o fluxo máximo no regime sem obstrução multiplicado pelo fator de redução R específico para cada tipo de evento (leve ou pesado).

Dessa forma, são estabelecidas então as relações velocidade versus densidade a partir da expressão 5.20, conforme abaixo.

$$S = \left[\frac{V_{LimUnder} * R}{D_{LimUnder} - D_{Lim0km/h}} \right] * \left(1 - \frac{D_{Lim0km/h}}{D} \right)$$

Diagrama de anotações para a equação acima:

- $V_{LimUnder}$: 2281,72
- R : 0,58 (leves), 0,25 (pesados)
- $D_{LimUnder}$: 28
- $D_{Lim0km/h}$: 158,73
- $D_{Lim0km/h}$ (no denominador da segunda fração): 158,73

$$S_{OverLeve} = -10,12 + \frac{1506,87}{D} \quad (6.16)$$

$$S_{OverPesado} = -4,35 + \frac{692,31}{D} \quad (6.17)$$

Com estas relações definidas, chega-se então as demais variáveis e limites do regime.

✓ Eventos do Tipo Leve:

$$S_{LimOverLeve} = 20 km/h$$

$$D_{LimOverLeve} = 53,34 veic / faixa \quad (6.18)$$

$$Vp_{LimOverLeve} = 1066,8 veic / h / faixa \quad (6.19)$$

✓ Eventos do Tipo Pesado:

$$S_{LimOverPesado} = 20 km/h$$

$$D_{LimOverPesado} = 28,43 veic / faixa \quad (6.20)$$

$$Vp_{LimOverPesado} = 568,69 veic / h / faixa \quad (6.21)$$

A figura abaixo procura representar o regime Over do segmento, em seus diversos tipos

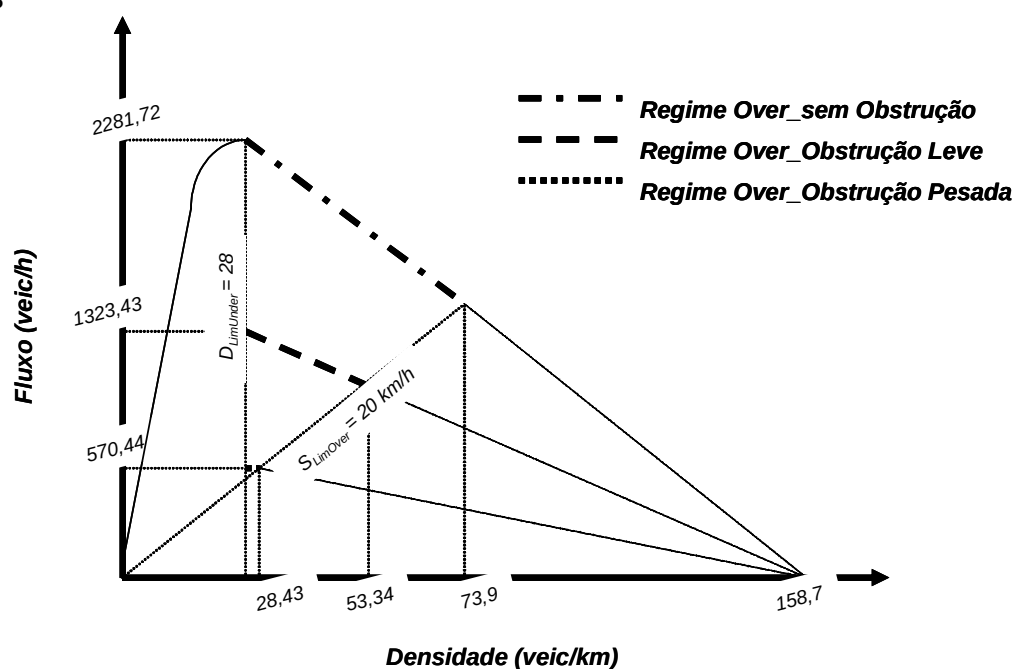


Figura 28 – Regime Over_com Obstrução - Relação Fluxo x Densidade

6.6.6 – Eventos no Segmento e Tempos em Obstrução

A probabilidade de ocorrência e o tempo de obstrução do segmento para cada tipo de evento, leve ou pesado, foram obtidos através de um histórico, fornecido pela concessionária que administra a via, com dados sobre todo tipo de eventos ocorridos, contemplando o período de 10 meses (01/10/2004 a 31/07/2005). Com este histórico foi possível identificar o número de ocorrências de eventos no período e no segmento estudado, assim como o tempo de obstrução médio e variâncias para cada tipo de veículos.

A tabela abaixo mostra uma pequena parte deste histórico.

<i>DATA</i>	<i>SENIDO</i>	<i>MONITORADO</i>	<i>PISTA LIBERADA</i>	<i>Tempo em Obstrução</i>	<i>PROBLEMA</i>	<i>Tipo de Veículo</i>	<i>MODELO</i>	<i>Pista</i>
1/10/2004	Norte	00:33:24	00:58:06	00:24:42	pneu	leve	Monza	Faixa 5
1/10/2004	Norte	00:36:24	01:15:09	00:38:45	pneu	leve	Meriva	Faixa 4
1/10/2004	Norte	00:41:01	00:49:56	00:08:55	pneu	leve	Palio	Faixa 5
1/10/2004	Norte	01:01:14	01:08:23	00:07:09	mecânico	pesado	Volvo	Faixa B
1/10/2004	Sul	01:11:44	01:47:29	00:35:45	aquec	leve	Pampa	Faixa 3
1/10/2004	Sul	02:16:49	02:30:00	00:13:11	mecânico	pesado	MB 1113	Faixa 1
1/10/2004	Sul	04:34:40	05:04:13	00:29:33	mecânico	leve	Kombi	Faixa 5
1/10/2004	Norte	04:36:38	04:40:00	00:03:22	outros	leve	Fusca	Faixa 2

Tabela 11 – Tabela de Ocorrências de Eventos (Fonte: Concessionária)

Para se chegar as expressões específicas para o estudo, foram assumidas algumas premissas conforme abaixo:

- ✓ Foi classificado como eventos do tipo leve, todo evento envolvendo veículos de passeio e utilitários, e como eventos do tipo pesado, aqueles que envolvem ônibus ou caminhão.
- ✓ Não há tratamento diferenciado para cada tipo de problema (mecânico, elétrico, pneu, pane-seca, aquecimento, acidente, abandono, e incêndio). Assumiu-se como sendo um evento, qualquer tipo de problema relatado.
- ✓ Consideraram-se eventos dos trechos e faixas respectivos ao segmento em estudo apenas, e nos dois sentidos. Logo, no sentido Norte, foram considerados eventos nas faixas 4, 5, 6 e B no trecho corresponde ao segmento em estudo, e no sentido Sul, os eventos ocorridos nas faixas A, 1, 2 e 3 no mesmo trecho, conforme figura abaixo:

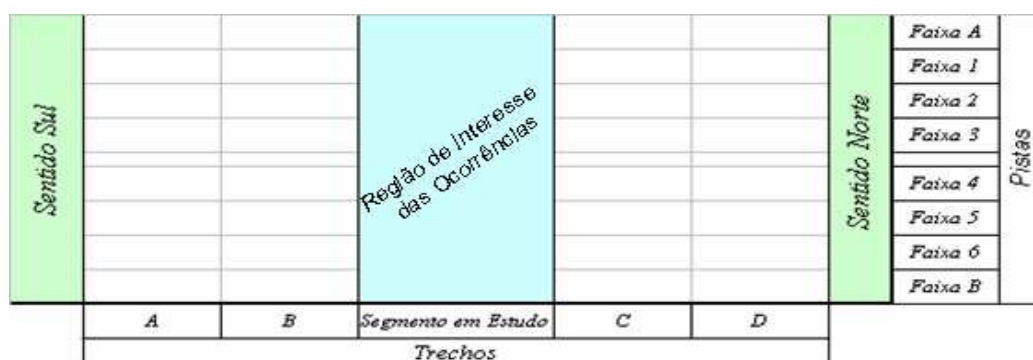


Figura 29 – Região de Interesse das Ocorrências

✓ Não foi aplicado nenhum fator de acréscimo às probabilidades em função de qualquer tipo de expectativa. No caso, considera-se que estas se manterão.

✓ Foi considerado como tempo de recorrência, ou o tempo em que um dado evento obstrui uma via, a diferença entre o momento em que evento é monitorado e o momento em que a via é liberada.

✓ Foram considerados tempos de obstrução médios diferentes para cada tipo de evento, leve e pesado, e estes então, como válidos para os dois sentidos.

✓ Não foram discriminados tempos de recorrência diferentes por tipo de ocorrência (ex.pane-seca, acidente, etc.) ou mesmo por horário. No entanto, foi identificado desvios, que de certa forma contemplam estas variações.

Com base no exposto acima, foram identificadas as funções que definem os tempos de obstrução médios para cada tipo de evento usando-se recursos estatísticos de uma planilha de cálculo.

✓ Tempo de Obstrução para Eventos do Tipo Leve:

$$T_{RecorLeve} = -1,44 + \text{Logn}(26,35;29,08) \text{ minutos} \quad (6.22)$$

- ✓ Tempo de Obstrução para Eventos do Tipo Pesado:

$$T_{ReconPesado} = Expo(41,90) \quad (6.23)$$

Para a identificação das probabilidades de ocorrência de cada tipo de evento, além do número total de eventos, foi necessário identificar o número de veículos que trafegaram pelo segmento em estudo, no mesmo período das ocorrências dos eventos.

Para a identificação do volume trafegado de cada tipo, veículos leves e pesados, foram utilizados dados fornecidos pela concessionária, para o mesmo período dos eventos de 01/Outubro/2004 a 31/Julho/2005.

Com posse destes, foi feita uma relação direta entre as variáveis, eventos e volume trafegado, para cada tipo de evento, a fim de identificar as Probabilidades de Ocorrência a partir da expressão 5.29.

Abaixo é demonstrada a sequência utilizada para o cálculo da probabilidade de eventos do tipo leve:

- ✓ Passo 1: Número de eventos registrados no Período (todos os tipos e locais)
= 39.949 (A)
- ✓ Passo 2: Número de eventos considerados no Sentido Norte = 21.332 (B)

- ✓ Passo 3: Número de eventos do Tipo Leve no Segmento em Estudo = 1.495
(C)
- ✓ Passo 4: Número de Veículos do Tipo Leve Trafegado no Período =
17.155.686 (D)
- ✓ Passo 5: Substituição na Relação 5.29 (ou C / D)

$$Probabilidade = \frac{\text{Num. Eventos}}{\text{Volume Trafegado}}$$

1495
17.155.686

$$Prob(Leve) = 0,0087\% \quad (6.24)$$

A mesma sequência é feita para os eventos do tipo pesado, chegando-se a:

$$Prob(Pesados) = 0,0099\% \quad (6.25)$$

6.7 - Identificação das Demandas

Devido a algumas características que serão vistas a frente, optou-se por levantar as demandas para cada sentido de forma diferente. Assim, inicialmente será exposta a metodologia para um sentido, no caso o sentido Norte, e em seguida, a metodologia para o sentido Sul.

6.7.1 – Sentido Norte

Neste sentido da via em estudo, existe o pedágio, que possibilita o levantamento de dados com relativo detalhamento. Desta forma, através da concessionária administradora da rodovia, foi obtido um histórico contemplando um período de 13 meses (01/07/2004 a 31/07/2005).

Esse traz o número de veículos que passaram pelas cabines de pedágio, discriminado por tipo de veículos, por hora e por dia, no decorrer do referido período.

Esses valores foram utilizados na obtenção das demandas médias diárias e seus desvios existentes atualmente (antes da abertura das janelas).

A tabela a seguir traz os volumes diários totais de veículos para o sentido. Neste ponto ainda não se tem a distribuição dessa demanda no decorrer das horas do dia, nem se tem a discriminado quanto ao tipo de veículos, e conseqüentemente, não se considera ainda, os veículos equivalentes referentes aos veículos pesados.

<i>Sentido Norte</i>		
<i>Dias</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
<i>Domingo</i>	45.306	9.807
<i>Segunda-feira</i>	61.629	9.632
<i>Terça-feira</i>	62.803	11.083
<i>Quarta-feira</i>	66.163	10.668
<i>Quinta-feira</i>	67.786	10.748
<i>Sexta-feira</i>	72.779	12.123
<i>Sábado</i>	63.884	13.974

Tabela 12 – Demandas Diárias – Sentido Norte (Fonte: Pedágio)

Para obter as distribuições das demandas diárias existentes no decorrer das horas, foram utilizados estudos prévios da concessionária, onde se têm as curvas características específicas para cada dia da semana.

O intuito de se utilizar estas curvas já estabelecidas e não levantá-las através dos dados do pedágio, é que a capacidade de atendimento do pedágio pode provocar um “achatamento” nas curvas de distribuição nos horários de maior volume, empurrando volumes de veículos para os horários seguintes ao que realmente estes demandaram. Outro fator que pode distorcer esta distribuição entre as horas, é a própria capacidade de absorção da via em alguns segmentos que antecede o pedágio, como é o caso do segmento em estudo. A capacidade máxima do segmento pode atuar como uma válvula, limitando o fluxo e assim, subdimencionando a real demanda no momento.

No caso dos estudos feitos previamente pela concessionária, foram utilizados sistemas de detecção via filmagem (DAV), localizados em pontos específicos da via, eliminando dessa forma esses efeitos.

Abaixo, têm-se as curvas características de cada dia no sentido Norte.

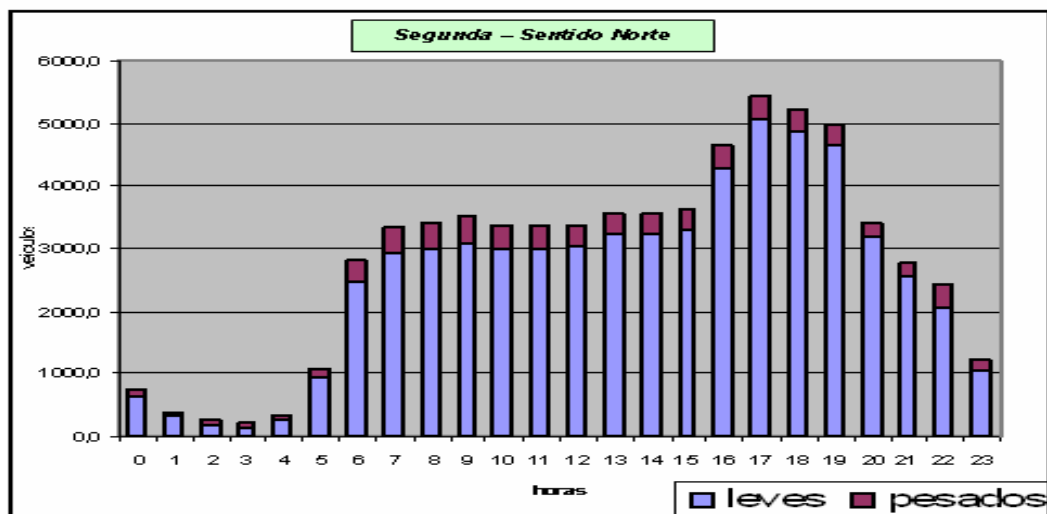


Figura 30: Distribuição Horária da Demanda – Segunda – Norte

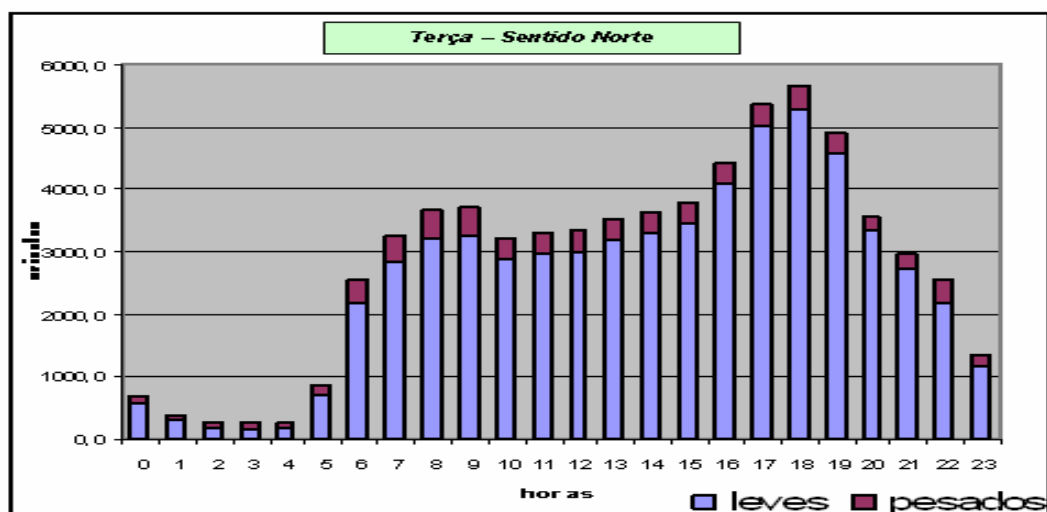


Figura 31: Distribuição Horária da Demanda – Terça – Norte

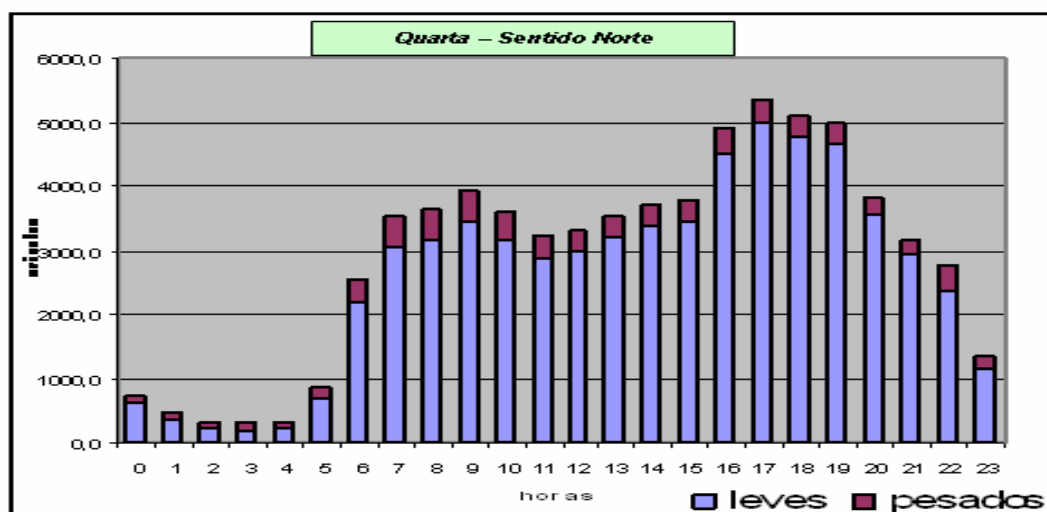


Figura 32: Distribuição Horária da Demanda – Quarta – Norte

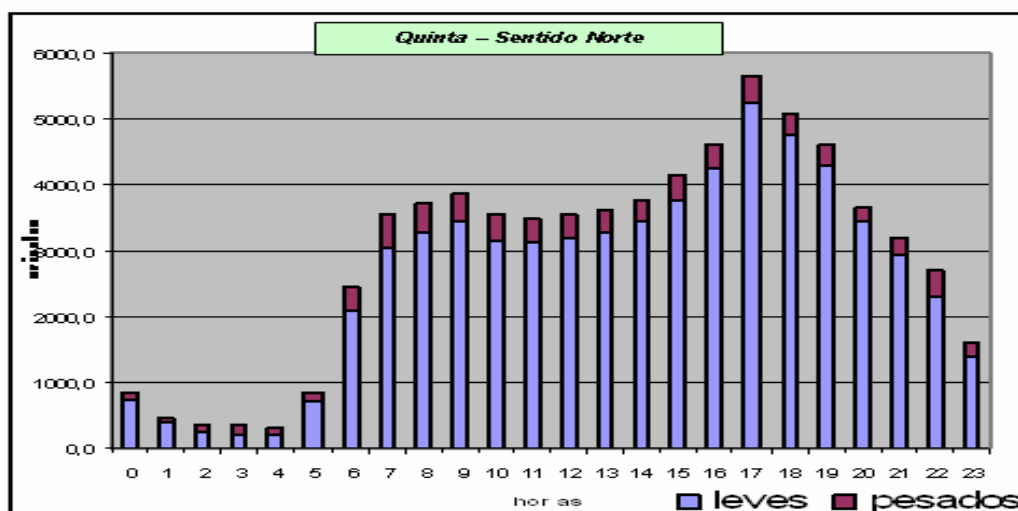


Figura 33: Distribuição Horária da Demanda – Quinta – Norte

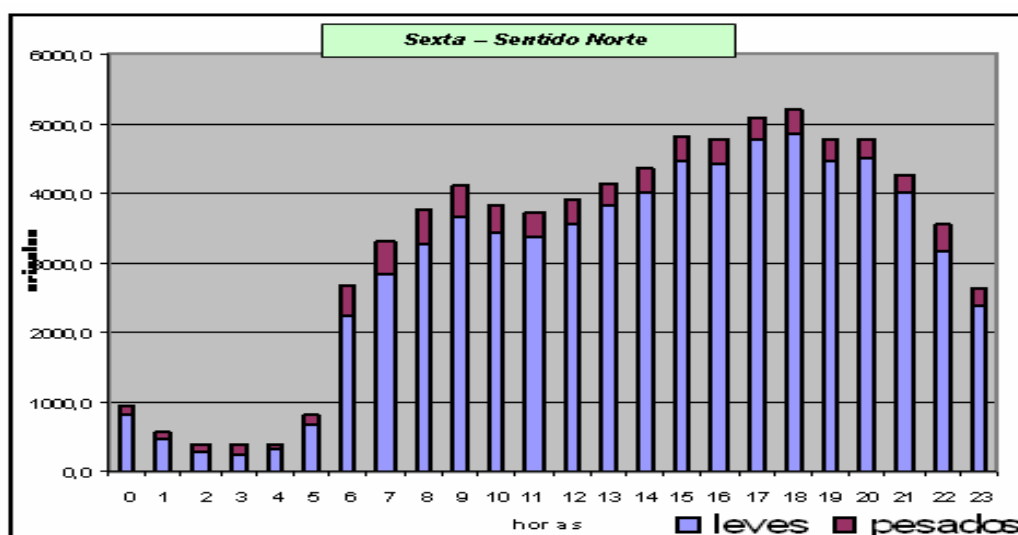


Figura 34: Distribuição Horária da Demanda – Sexta – Norte

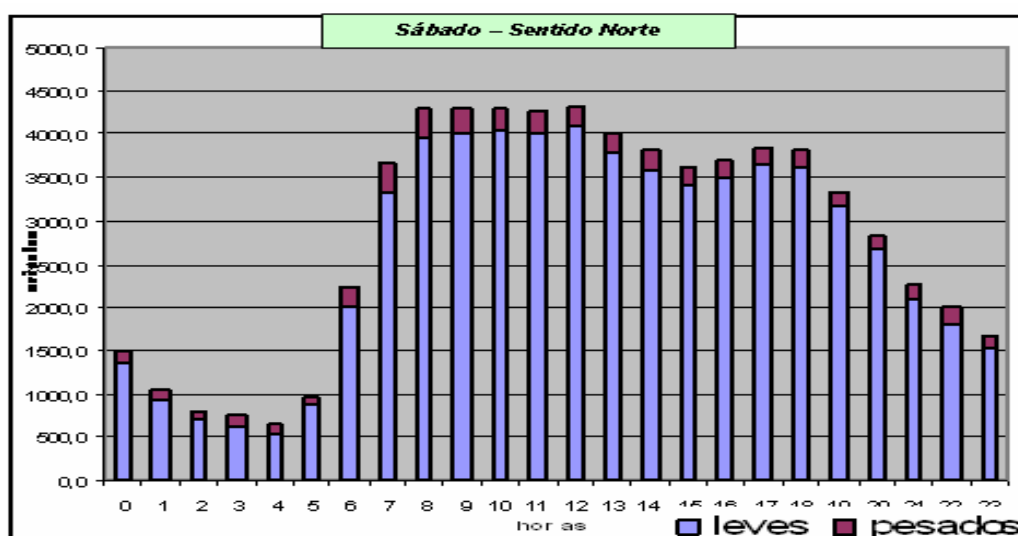


Figura 35: Distribuição Horária da Demanda – Sábado – Norte

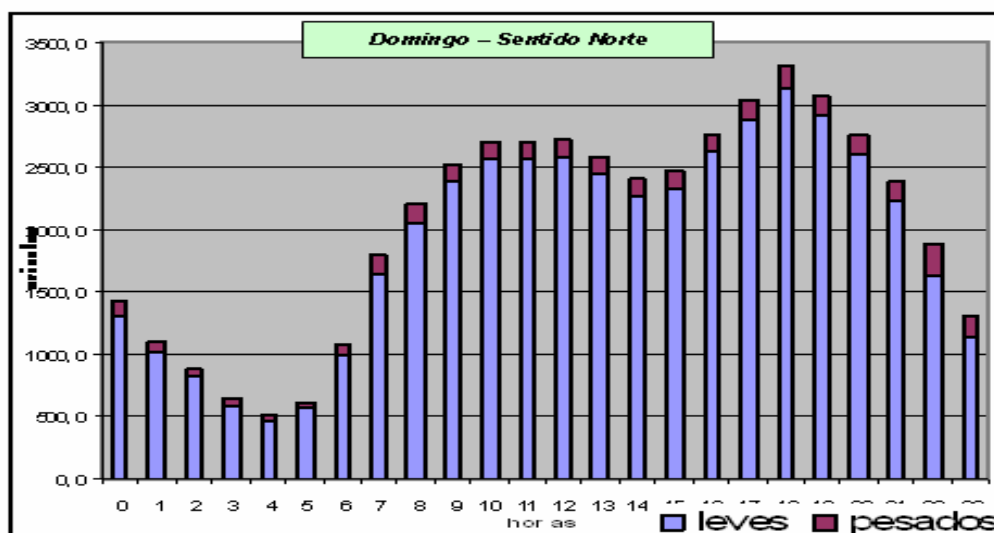


Figura 36: Distribuição Horária da Demanda – Domingo – Norte

6.7.2 – Sentido Sul

Para o levantamento das demandas no sentido Sul, como não existe pedágio neste sentido, foram utilizados volumes diários médios já pré-estabelecidos e cedidos pela concessionária. Porém estes não trazem discriminados, os desvios e as demandas por tipo de veículo. Tais características são indispensáveis, uma vez que o modelo simula a variabilidade do volume diário através desses desvios, e o tipo de veículo tem influência direta sobre o desempenho da via.

Assim foi necessário assumir algumas premissas para se chegar a estes, conforme descrito abaixo. No caso dos desvios, optou-se por tomar como base a variabilidade (desvios) do sentido Norte, assumindo que, por ser uma via com característica pendular, o tráfego em um sentido tende a ser o mesmo para outro, para o mesmo período analisado. Assim, assume-se que, se em um determinado dia se tem um grande volume em um sentido, este será igualmente grande no outro.

Dessa forma, chegou-se aos seguintes resultados para as demandas diárias:

	<i>Sentido Norte</i>		<i>Variação (%)</i>	<i>Sentido Sul</i>	
<i>Dias</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>		<i>Média</i>	<i>Desvio</i>
<i>Domingo</i>	45.306	9.807	21,6%	46.820	10.134
<i>Segunda-feira</i>	61.629	9.632	15,6%	57.150	8.932
<i>Terça-feira</i>	62.803	11.083	17,6%	54.413	9.603
<i>Quarta-feira</i>	66.163	10.668	16,1%	55.328	8.921
<i>Quinta-feira</i>	67.786	10.748	15,9%	56.193	8.910
<i>Sexta-feira</i>	72.779	12.123	16,7%	59.022	9.832
<i>Sábado</i>	63.884	13.974	21,9%	47.594	10.411

A - Variação da Média no Sentido Norte
 B - Volumes Médios (fonte: Concessionária)
 Volumes Médio x Variação (A x B)

Tabela 13 – Demandas Diárias – Sentido Sul

No caso da distribuição por tipo de veículo, não se pode assumir que as proporções horárias de cada veículo para cada hora, sejam semelhantes nos dois sentidos em função da característica pendular. Dessa forma, como saída, assumiu-se uma proporção média de veículos pesados utilizada pela concessionária, que é constante para todas as horas do dia. Porém cabe salientar que, embora esta proporção, no caso 15%, seja baseada na média de veículos pesados que trafegam pela via diariamente, esta, por não variar, prejudica as análises, uma vez que superdimensiona o volume de tráfego em períodos que a proporção real seria menor, assim como, subdimensiona em momentos em que esta seria maior. Assumindo-se esta proporção constante de veículos pesados, e tomando-se as distribuições horárias dos veículos (leves + pesados) utilizadas pela concessionária, chegou-se as seguintes curvas para o sentido Sul:

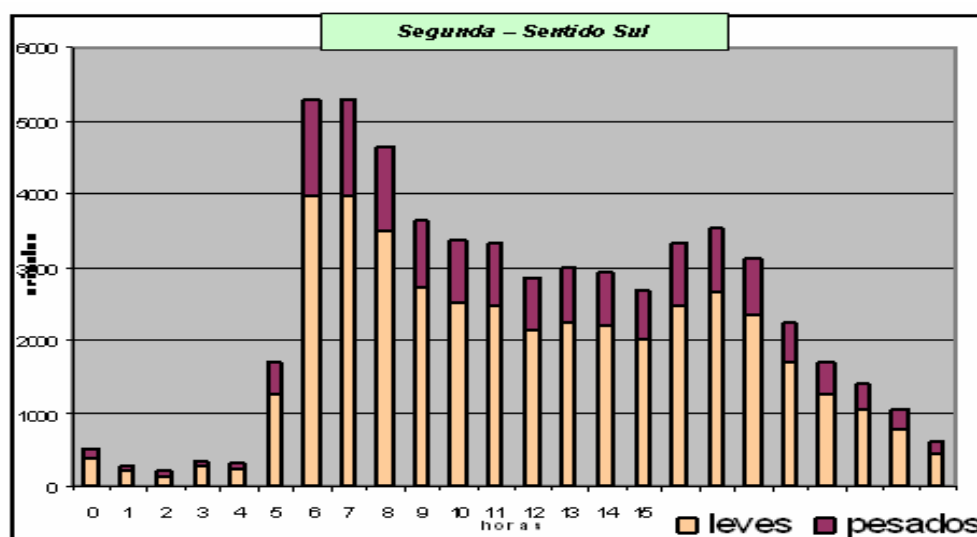


Figura 37: Distribuição Horária da Demanda – Segunda – Sul

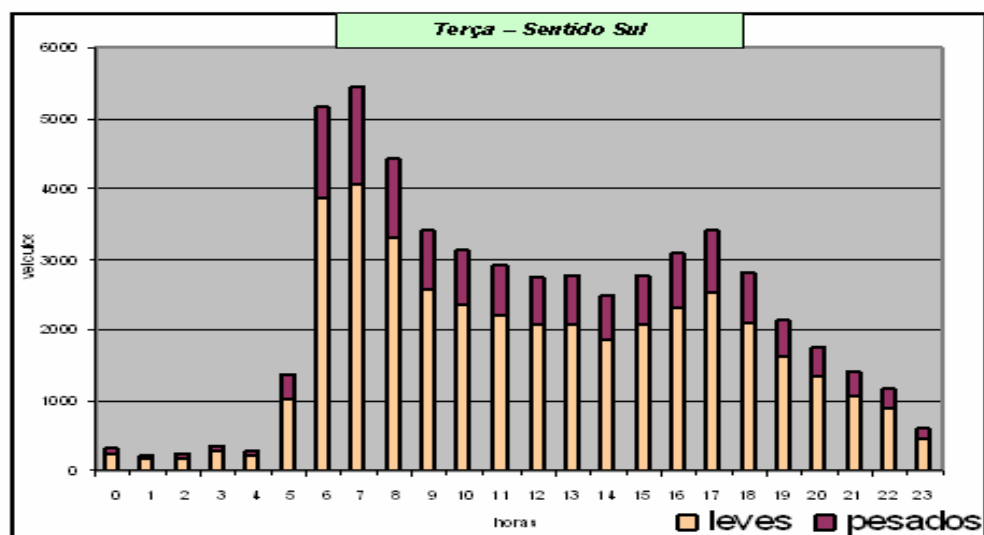


Figura 38: Distribuição Horária da Demanda – Terça – Sul

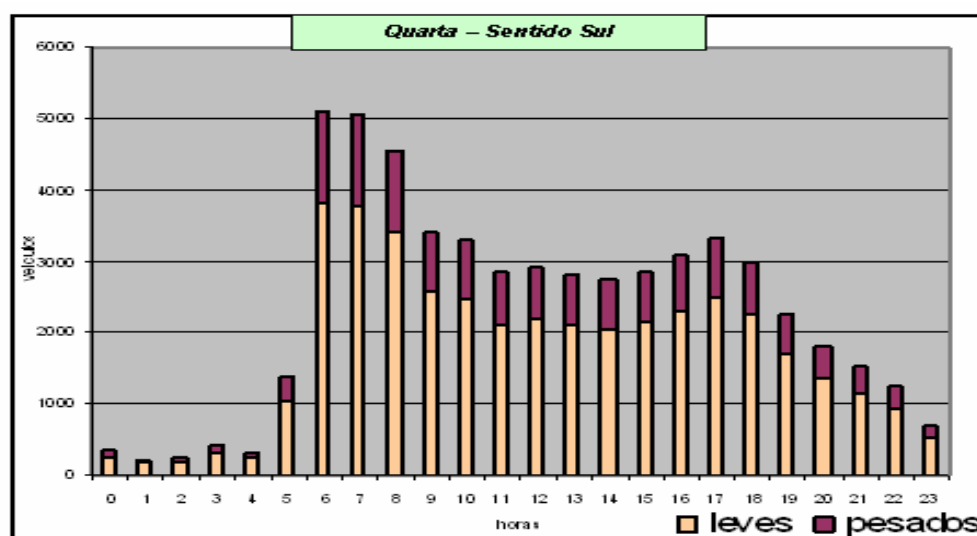


Figura 39: Distribuição Horária da Demanda – Quarta – Sul

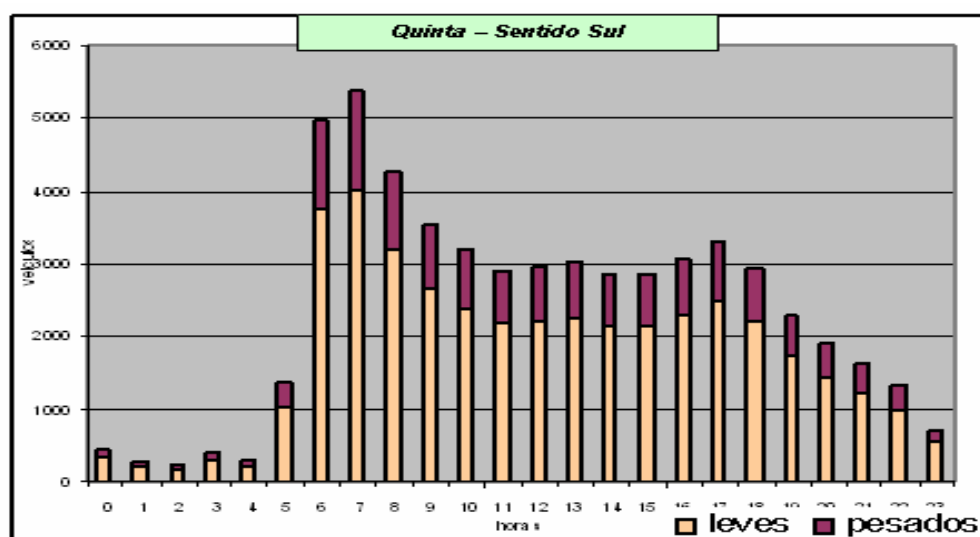


Figura 40: Distribuição Horária da Demanda – Quinta– Sul

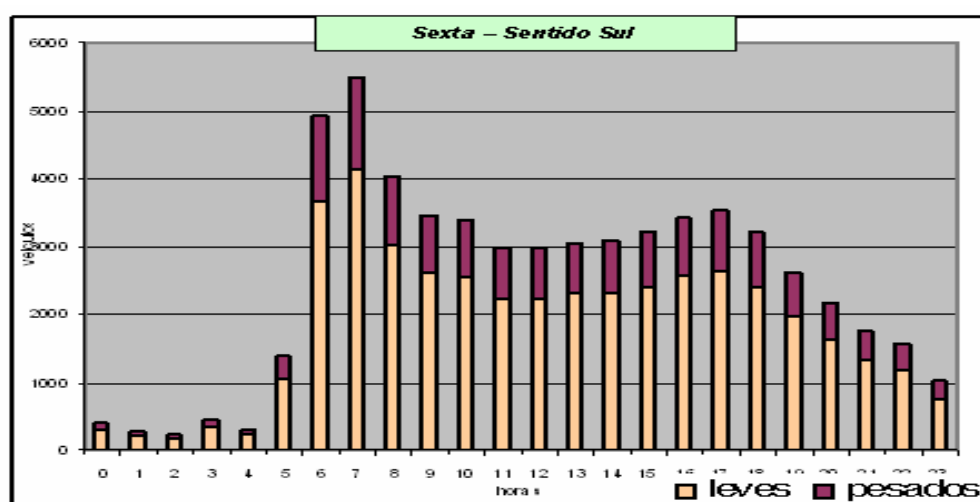


Figura 41: Distribuição Horária da Demanda – Sexta – Sul

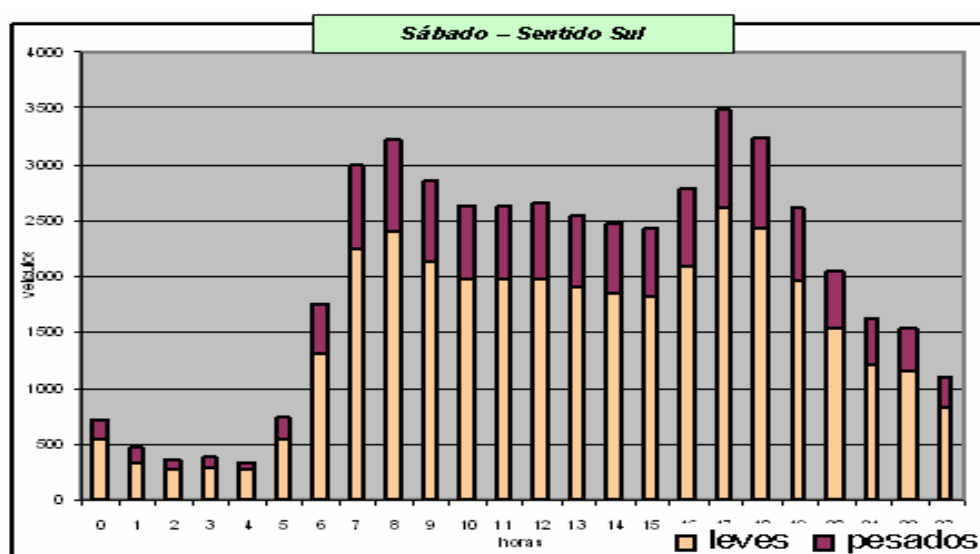


Figura 42: Distribuição Horária da Demanda – Sábado – Sul

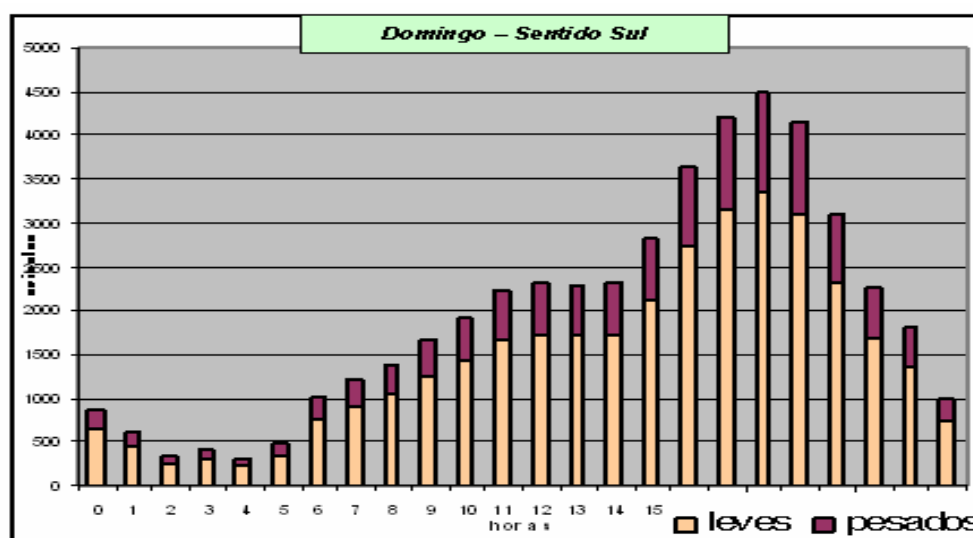


Figura 43: Distribuição Horária da Demanda – Domingo - Sul

6.8 - Demandas Extras (advindas da via alternativa)

Como estudo visava avaliar os efeitos da entrada de veículos pesados em janelas de horas específicas, foi preciso identificar estas demandas, denominadas aqui de demanda extra.

Para tal, e como já mencionado na metodologia, utilizou-se de questionários, que foram aplicados junto aos caminhoneiros que trafegam por uma rodovia alternativa à via em estudo (vide o anexo para o modelo do questionário).

Através destes questionários, foi possível identificar a intenção dos caminhoneiros, que hoje não passam na rodovia em estudo, passarem a utilizá-la nos horários de abertura propostos. Têm-se com isso então, os acréscimos de demanda para os horários das janelas.

Essa pesquisa foi realizada pela Faculdade de Economia da UFF, chegando-se aos seguintes resultados relativos a esta demanda potencial (ou extra).

		<i>Média</i>	
<i>Janelas</i>	<i>Hora</i>	<i>Norte</i>	<i>Sul</i>
	<i>21:00</i>	<i>984</i>	<i>711</i>
	<i>04:00</i>	<i>984</i>	<i>711</i>
	<i>12:00</i>	<i>904</i>	<i>667</i>
	<i>13:00</i>	<i>904</i>	<i>667</i>

Tabela 14 – Demanda Extras (Fonte: Faculdade de Economia da UFF)

Dessa forma, estas serão as médias e desvios utilizados pelo modelo ao representar as demandas extras nas janelas propostas pelos cenários que estão sendo avaliados.

No caso do cenário “sem janelas”, estas não influenciam, ou seja, não são geradas pelo modelo. Para este cenário (situação atual), apenas as demandas atuais (já identificadas anteriormente) são consideradas.

Já no caso dos cenários “com janelas”, as demandas atuais continuam sendo consideradas e geradas, porém nas janelas específicas de cada cenário (tarde (12 e 13 horas) e pontas (21 e 4 horas)), estas demandas extras também são consideradas.

A partir desse aumento de demanda, e conseqüentemente, dos efeitos destes, é que se dá a avaliação do impacto da abertura de cada uma destas janelas no tráfego do segmento estudado.

6.9 - Equivalência dos veículos pesados

Como a metodologia utilizada neste estudo é fundamentada para veículos leves, tornou-se necessário, ao se identificar os volumes de entrada do modelo, encontrar valores correspondentes à equivalência dos veículos pesados. Encontrou-se então o quanto vale cada veículo pesado comparado ao leve no tráfego.

Através de uma tabela do HCM, é possível identificar estes valores (E_T) tendo-se como referência os parâmetros: proporção de veículos pesados no tráfego, o grau de afluência e o comprimento do segmento. Como já identificado anteriormente, o grau de afluência do segmento é 2,5% e o comprimento do segmento 2,056 km.

Já com relação a variável proporção de veículos pesados no tráfego, não se tem um valor fixo para a mesma, uma vez que esta se altera a todo instante no decorrer da simulação, tal como ocorre no tráfego real. Dessa forma, o modelo tem como base a tabela abaixo e as variáveis fixas (afluência e comprimento), e está preparado para captar a cada instante, de acordo com a proporção de pesados, o valor equivalente dos veículos pesados (E_T) que trafegam pelo segmento.

Upgrade (%)	Length (km)	E_T						
		Percentage of Trucks and Buses						
		2	4	5	6	8	10	15
< 2	All	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
≥ 2–3	0.0–0.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 0.4–0.8	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 0.8–1.2	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 1.2–1.6	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5
	> 1.6–2.4	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
	> 2.4	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
> 3–4	0.0–0.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 0.4–0.8	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5
	> 0.8–1.2	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	> 1.2–1.6	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0

Tabela 15 – Equivalência de veículos pesados (do Segmento)

Cabe salientar que embora o comprimento do segmento em estudo seja de 2,056 km, a metodologia recomenda considerar um trecho antes e após o aclave, perfazendo mais do que 2,4 km.

6.10 – Resultados e Discussões

Foram simulados os três cenários propostos (atual, janela da tarde e janela das pontas), e nos dois sentidos (Norte e Sul).

Para cada simulação, considerou-se um período equivalente a 52 semanas (aproximadamente um ano), contemplando apenas os dias úteis (dias mais críticos do fluxo).

Os resultados destas simulações serão apresentados abaixo, e comentários e avaliações relevantes sobre as variáveis que identificam as condições do fluxo que complementam estes.

O primeiro grupo de gráficos busca diagnosticar o nível de serviço para cada hora do dia, através da variável densidade média. Esta variável é uma resultante das densidades em que cada veículo encontrou o segmento ao acessar o mesmo, e é tida como uma das principais características qualificadora de uma via. No estudo em questão através da variável densidade, busca-se perceber os impactos do aumento do número de caminhões nas janelas estudadas. Estes aumentam a densidade, e desta forma, tende a deteriorar o nível de serviço.

6.10.1 – Nível de Serviço (Densidade Média)

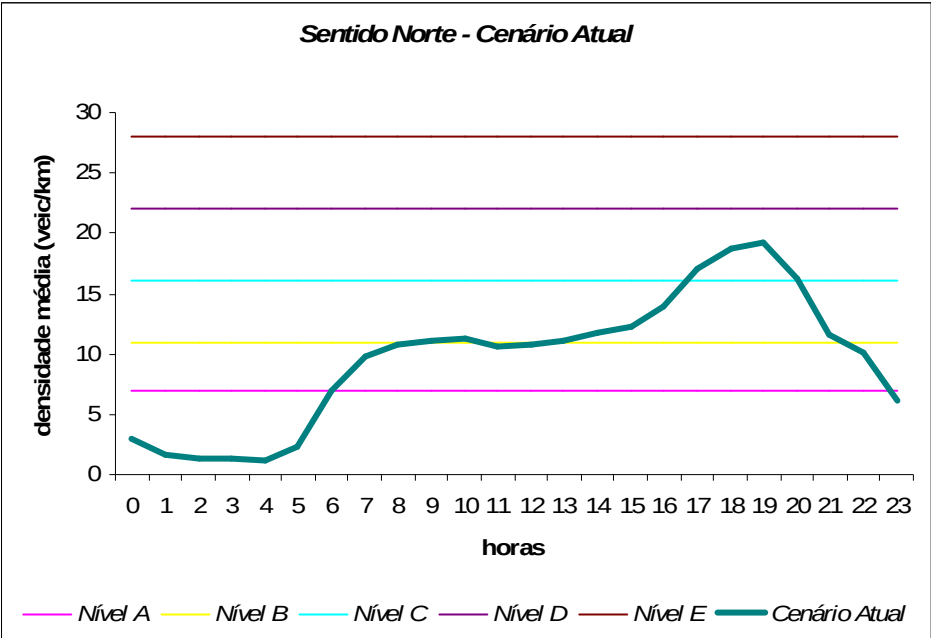


Figura 44 – Sentido Norte – Densidade Média (Cenário Atual)

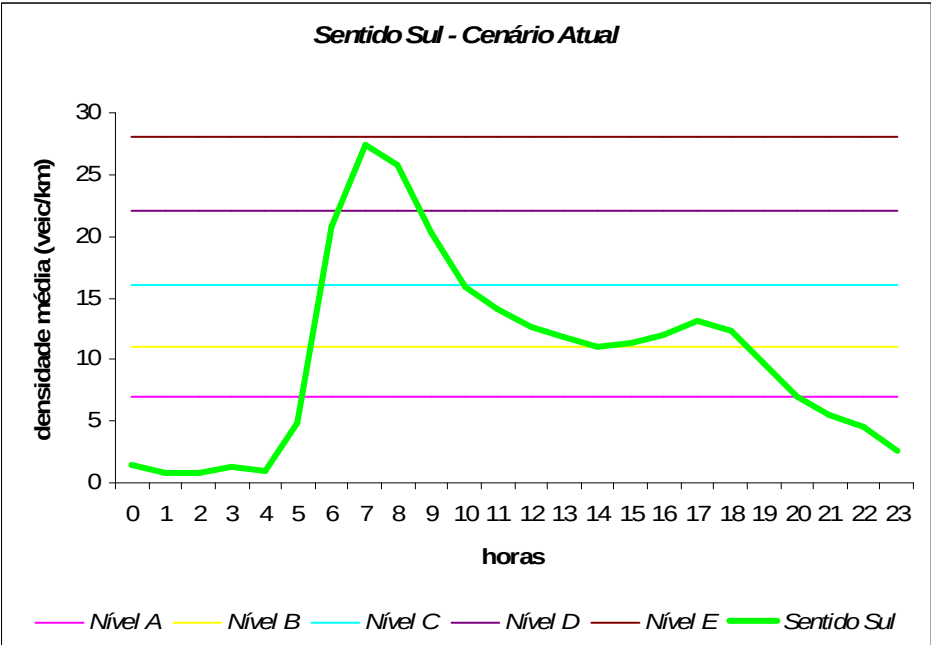


Figura 45 – Sentido Sul – Densidade Média (Cenário Atual)

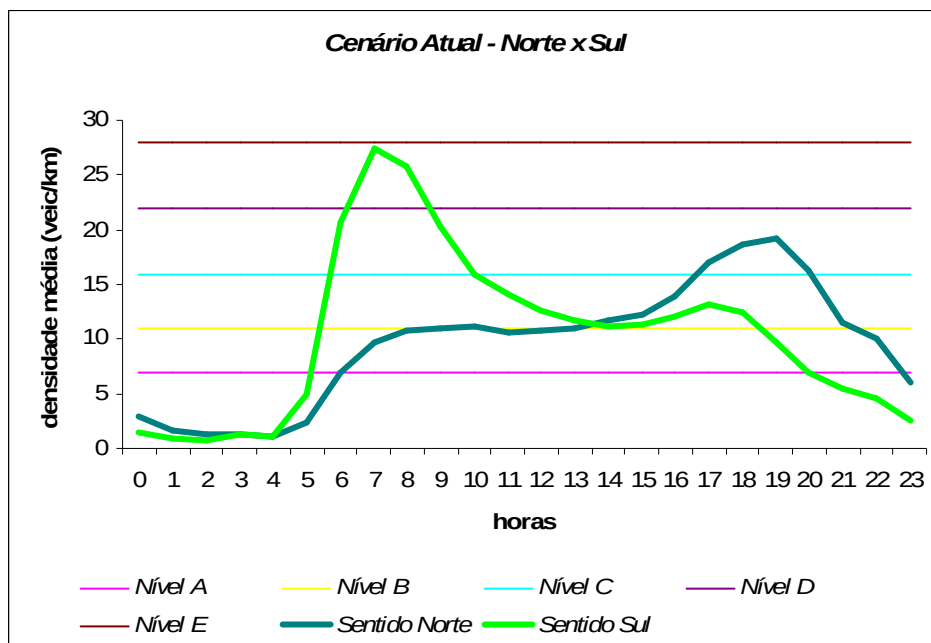


Figura 46 – Sentido Norte x Sul – Densidade Média (Cenário Atual)

Através dos gráficos acima é possível perceber de forma clara, a sazonalidade horária das demandas da via. Onde se tem um pico acentuado na parte da manhã, no sentido Sul, quando as pessoas seguem para os seus respectivos locais de trabalho, e ao final da tarde, no sentido Norte, dado pelo retorno das pessoas a suas residências.

Tal característica foi utilizada como premissa para a escolha dos horários de janela a serem analisados. Como a abertura de janelas de horas, significa um aumento concentrado do volume de veículos nas mesmas, e conseqüentemente, um aumento da densidade, buscaram-se momentos do dia de densidade média já existente menores, a fim de que estes novos volumes tivessem menor efeito. Lembrando-se que, os volumes a mais que adentrariam a via nestas janelas são de veículos pesados, e que como já exposto, têm mais influência sobre a variável densidade, devido a seus tamanhos equivalentes.

Logo, optou-se pela janela da tarde, 12 às 14 horas, por ser um período de vale nos dois sentidos, e ser ainda um horário comercial, e pela janela das pontas, entre 21 e 22 horas e entre 4 e 5 horas, porque além de serem períodos de vale, são próximos a janelas já existente, entre 22 e 4 horas, o que facilita a operacionalização e controle do acesso destes veículos pesados.

✓ **Cenário: Janela da Tarde**

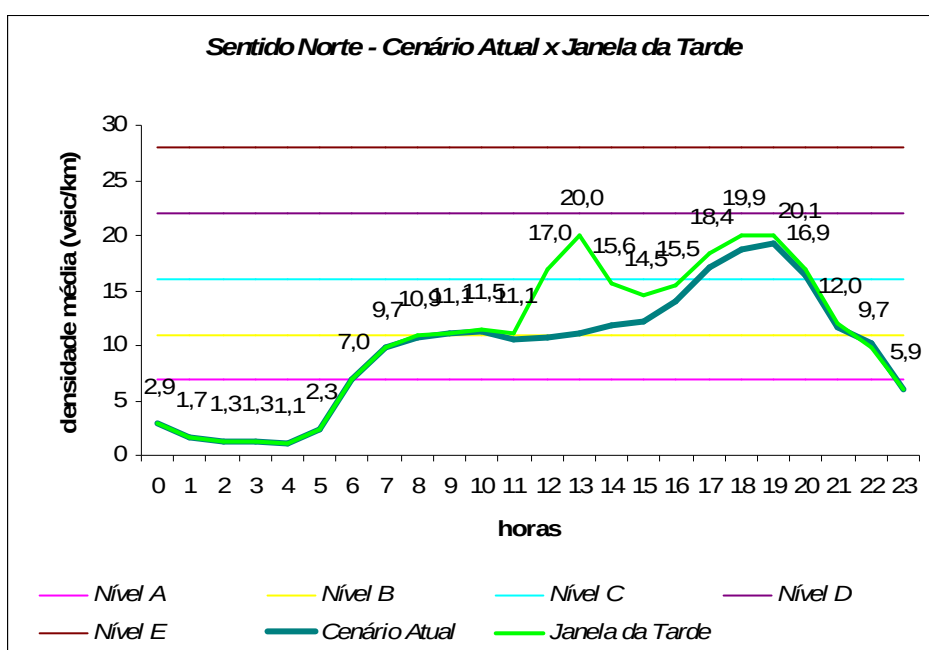


Figura 47 – Sentido Norte – Densidade Média (Cenário Atual x Janela Tarde)

É possível perceber claramente a influência da entrada dos veículos mais pesados nas janelas.

No sentido Norte, chega-se a densidades próximas as densidades do pico do final do dia.

Em tais densidades médias, a capacidade de recuperação do segmento a distúrbios no fluxo é mais limitada, deixando o segmento mais vulnerável a formação de filas e congestionamentos.

Outro ponto a ser considerado, é que com a entrada deste volume extra, tem-se um novo pico, e este tem relativa proximidade com o pico do final do dia. Tal característica pode levar a grandes congestionamentos em determinadas situações, tais como: dias de elevados fluxos (ex. vésperas de feriado), onde o fluxo elevadíssimo por si só se encarrega de congestionar todo o período; e quando da ocorrência de eventos (ex. acidente envolvendo um caminhão) ao final do primeiro pico (14 horas). Neste caso, dado que a densidade média no momento é relativamente elevada, possivelmente tem-se a formação de congestionamento, e este por suas características, tem um tempo de recuperação das condições normais de fluxo bastante limitado. Tal tempo pode atingir o pico mais à frente, o que intensifica ainda mais o congestionamento, podendo chegar a congestionamentos bastante intensos.

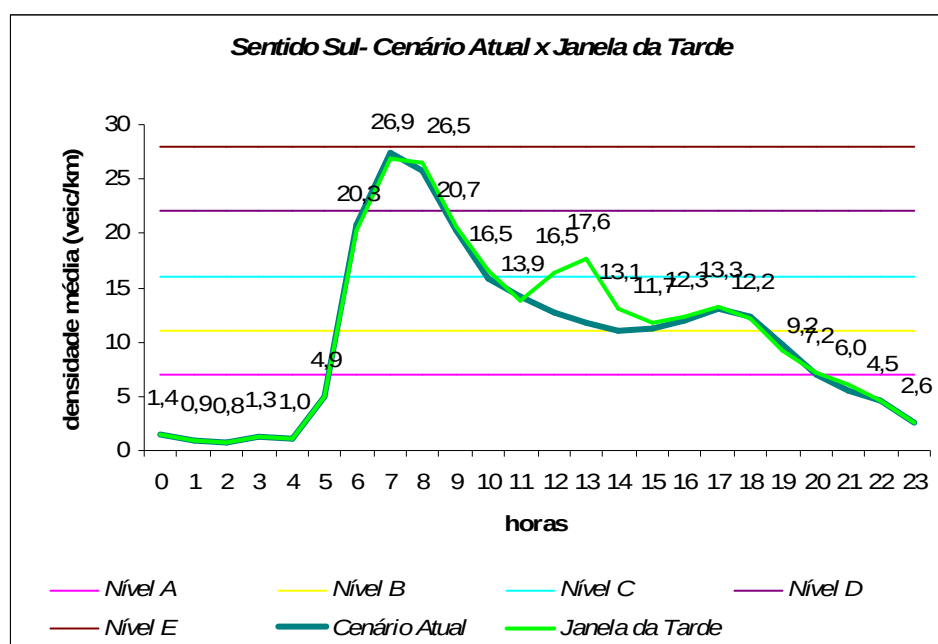


Figura 48 – Sentido Sul – Densidade Média (Cenário Atual x Janela Tarde)

No sentido Sul também fica clara a influência da entrada dos veículos pesados na janela, porém a criticidade neste sentido, está no fato desta janela vir a seguir ao pico atual (da manhã), e este último, já ter atualmente uma elevadíssima densidade média (aproximadamente 27 veíc/km).

Tal densidade, como exposto anteriormente, já apresenta níveis de serviço inadequados, e está no limiar do regime congestionado (Over). Isso implica que, nestes horários tem-se pouca capacidade de recuperação, e que até mesmo pequenos distúrbios, provocados pela própria variabilidade do intervalo entre chegada dos veículos, que dentro de uma única hora, por exemplo, podem chegar em intervalos de tempos menores (“peak hour”), ou maiores, podem iniciar congestionamentos. Além desta alta densidade, este horário ainda está sujeita aos eventos. Tal ocorrência tende a levar o congestionamento até o período da janela, intensificando ainda mais o mesmo.

✓ **Cenário: Janela das Pontas**

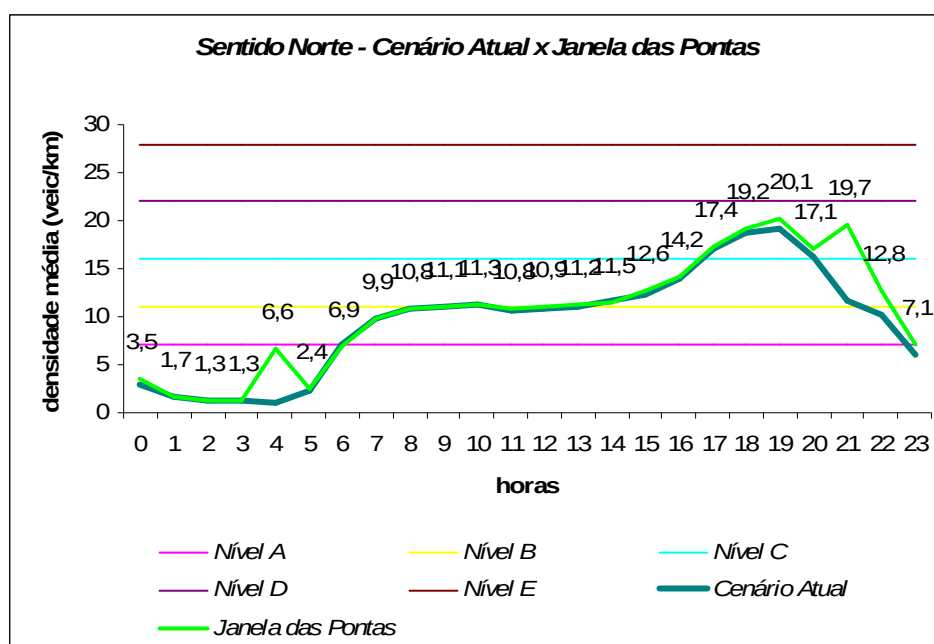


Figura 49 – Sentido Norte – Densidade Média (Cenário Atual x Janela das Pontas)

No sentido Norte, como se percebe pelo gráfico, a permissão de entrada dos caminhões a partir das 21 horas, provoca o prolongamento do pico do final do dia. Embora neste período se tenha, densidades próximas do limite tido como aceitável, ou seja, densidade de 22 veic/km (limite do Nível D), não se pode afirmar que viria a ter grandes impactos neste horário com essa janela, nesse sentido.

No período entre 4 horas e 5 horas, não se percebe nenhuma criticidade, uma vez que, mesmo com a entrada dos veículos a mais, não se atinge densidades médias altas no horário.

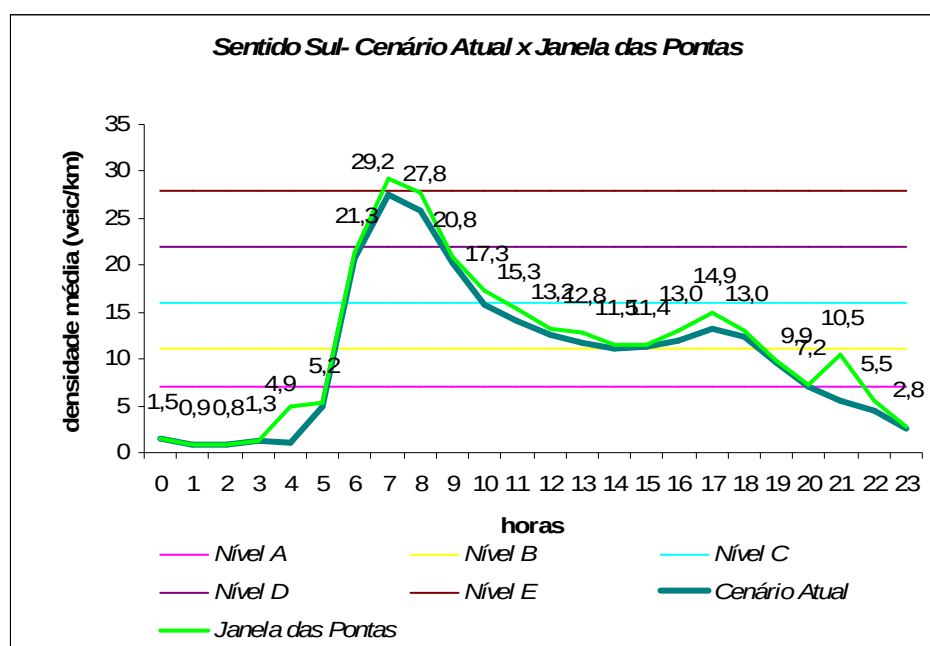


Figura 50 – Sentido Sul – Densidade Média (Cenário Atual x Janela das Pontas)

Já no sentido Sul, a permissão de que caminhões de maior porte trafeguem até as 5 horas, leva a um aumento da densidade média no pico da manhã também.

Tomando-se em conta que este pico da manhã já apresenta densidades elevadas, a janela se torna bastante crítica.

Um ponto que cabe notar, é que mesmo a janela sendo entre 4 horas e 5 horas, seus efeitos ocorrem em horários à frente. Isso se deve em grande parte, pelo fato da maior ocorrência de eventos com veículos pesados no período. Estes têm tempos médios de obstrução maiores, chegando a atingir o pico da manhã. Ocorrendo esse encontro, e em função da alta densidade do momento do pico, iniciam-se congestionamentos de alta intensidade.

Já o período entre 21 horas e 22 horas, neste sentido, não apresenta nenhuma criticidade.

6.10.2 – Performance junto aos Usuários

Nos gráficos abaixo, busca-se avaliar a performance da via junto aos usuários, quantificando o percentual de veículos que trafegaram com um nível considerado adequado, ou seja, com um nível que permita ao motorista trafegar a uma velocidade média boa (próxima ao FFS), e ainda, com adequada segurança. A teoria considera estar dentro deste grupo as vias com prestação de serviço até o Nível D (ou 22 veículos por quilômetro). Neste caso, o modelo verifica, não se a densidade média é menor ou igual a 22, mas sim quantos veículos trafegaram em situações com densidades até 22. Esta metodologia capta de forma indireta a variabilidade do nível de serviço, ou seja, mesmo tendo densidade média aceitável em determinada hora, não significa que todos veículos que trafegaram pela mesma hora tenham feito isto em nível adequado.

✓ **Cenário: Janela da Tarde**

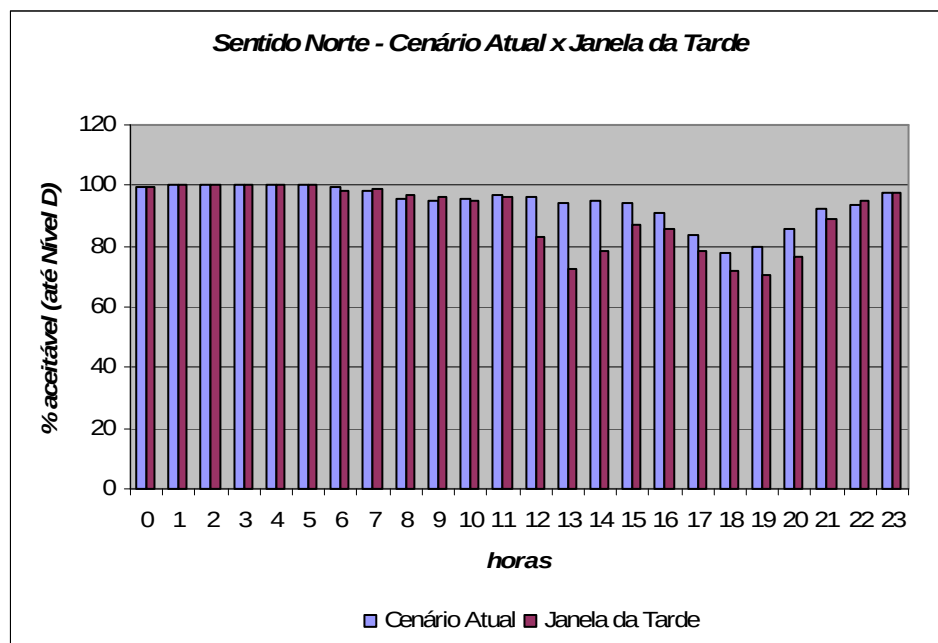


Figura 51 – Sentido Norte – Performance – (Cenário Atual x Janela da Tarde)

No sentido Norte, fica clara a deterioração do nível de serviço junto aos usuários atuais em função da entrada dos veículos mais pesados. Inclusive podendo se observar efeitos nas horas subsequentes.

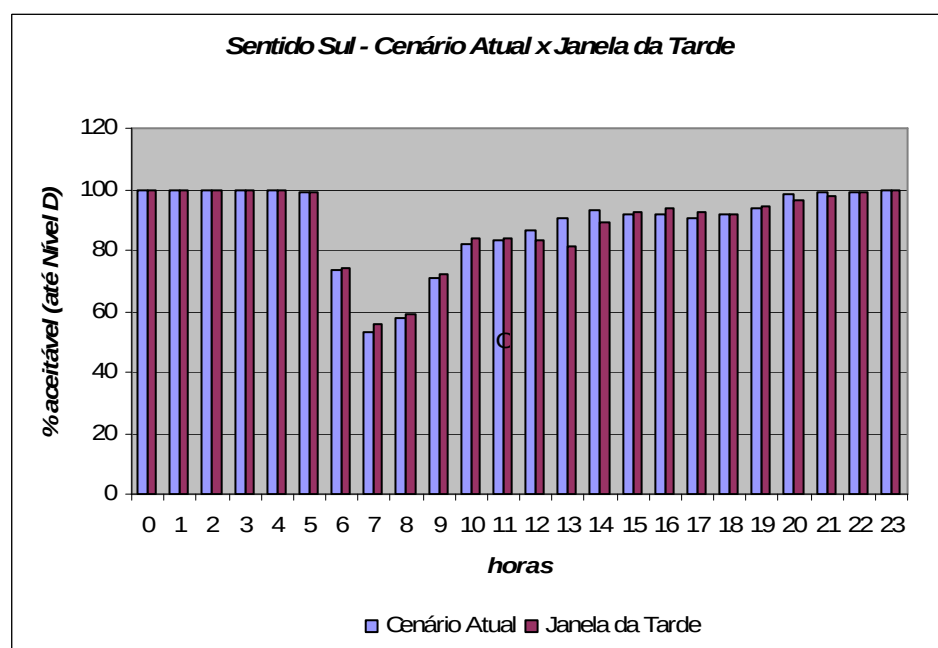


Figura 52 – Sentido Sul – Performance – (Cenário Atual x Janela da Tarde)

No sentido Sul, também podem ser percebidos os efeitos da entrada dos veículos pesados a mais na janela. Porém o que se destaca neste gráfico é o percentual de deterioração já existente atualmente no pico da manhã, principalmente as 7 horas, onde cerca de 44% dos veículos trafegam em níveis inadequados. Isso significa, que dos 65.000 veículos que trafegam por este segmento diariamente, aproximadamente 29.000 deles trafegam sob condições de fluxo intenso, com constantes perdas de tempo, maior consumo combustível e maior desconforto (stress).

Esse índice se deve, basicamente, por esse horário apresentar altos níveis de densidade muito próximos ao ponto considerado como o de início do congestionamento (“breakdown”). Tal nível leva o horário a características bastante instáveis em termos de fluxo, onde a todo instante inicia-se pequenos congestionamentos, que podem eventualmente se intensificar e não mais dissiparem.

✓ **Cenário: Janela das Pontas**

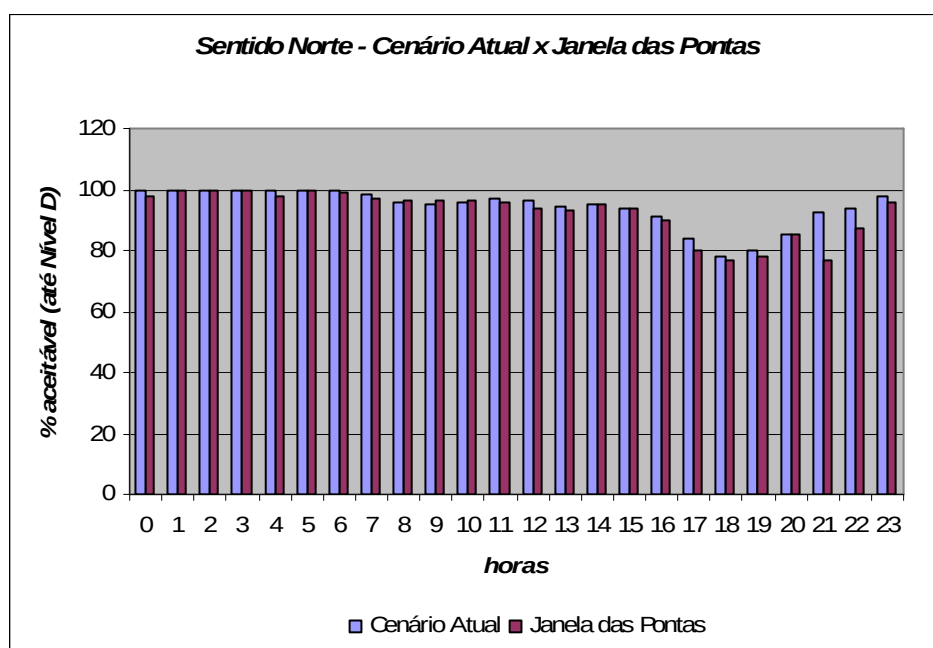


Figura 53 – Sentido Norte – Performance – (Cenário Atual x Janela das Pontas)

No sentido Norte, os efeitos sobre a performance do segmento são razoáveis em termos percentuais, porém localizados em um período específico (entre 21 e 22 horas).

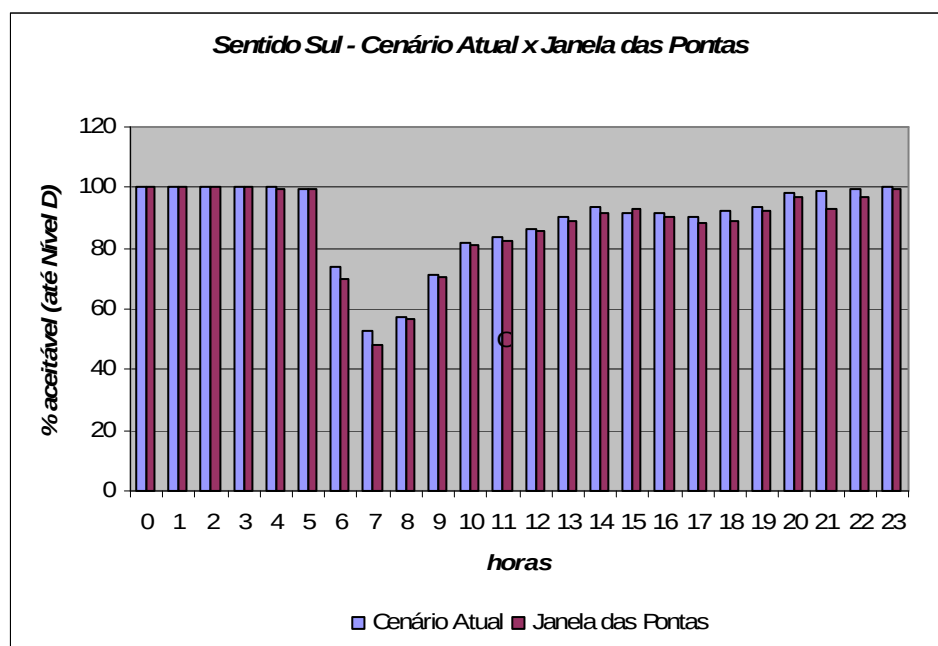


Figura 54 – Sentido Sul – Performance – (Cenário Atual x Janela das Pontas)

No sentido Sul, pode-se mais uma vez perceber o efeito retardado dos veículos pesados a mais na janela entre 4 horas e 5 horas.

Estes efeitos, como já mencionados no caso das densidades médias, estão ligados à ocorrência de eventos envolvendo os veículos pesados no período da janela, que no caso do cenário em estudo, são em maior número do que no cenário atual, onde estes muitas das vezes mantêm as pistas obstruídas até o início do pico da manhã.

6.10.3 – Congestionamentos

Os gráficos abaixo buscam representar os efeitos da abertura das janelas em termos de congestionamento. No levantamento destes gráficos foram considerados como veículo em congestionamento, todo aquele que tenha trafegado o segmento com densidade acima de 28 veículos por quilômetro, ou seja, sob regime Over.

Em alguns destes gráficos, poderá ser percebido como a variável congestionamento é mais sensível ao aumento do tráfego do que a densidade média, por exemplo. Isto se dá pelo fato do comprimento de um congestionamento não ser limitado, tal como acontece no caso da densidade, para a qual existe um limite físico considerado. Ou seja, existe um limite de densidade (limite Over), o qual impede a entrada de veículos no segmento em estudo. Isso cria um teto para a variável densidade.

Já no caso dos congestionamentos, estes podem ser de todos tamanhos a depender do período em que durar o déficit entre a capacidade de absorção da via e a demanda existente.

Ao analisar estes, é preciso ter em mente antes de tudo, que está se falando dos efeitos de apenas um segmento, logo outros segmentos podem provocar também congestionamentos que se agregariam a estes, caso se analisasse a via como um todo.

E ainda, que se trata de uma média, o que significa que existem dias com congestionamentos no segmento de muito maior porte.

✓ Cenário: Janela da Tarde

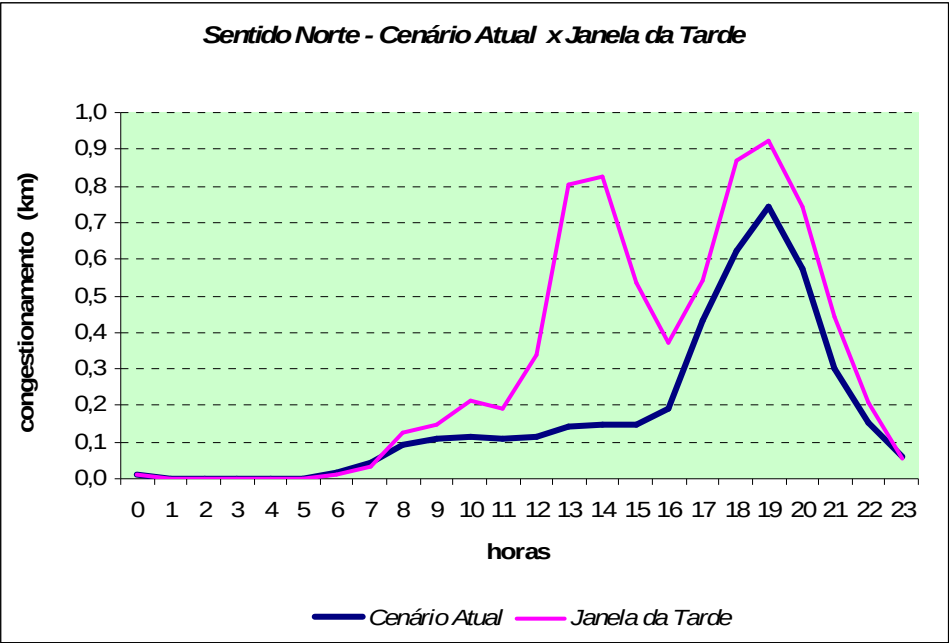


Figura 55 – Sentido Norte – Congestionamento – (Cenário Atual x Jan. da Tarde)

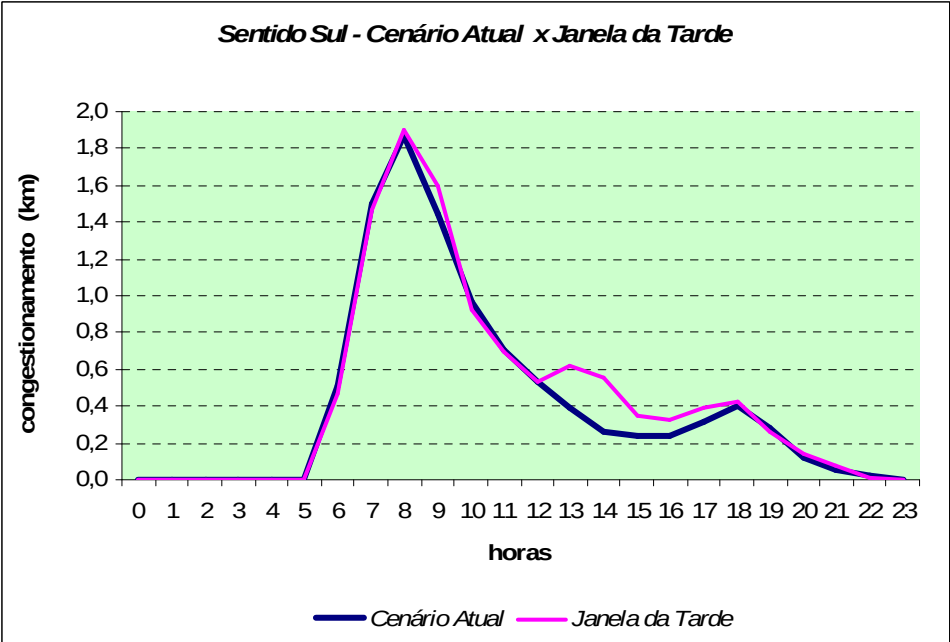


Figura 56 – Sentido Sul – Congestionamento – (Cenário Atual x Jan. da Tarde)

✓ **Cenário: Janela das Pontas**

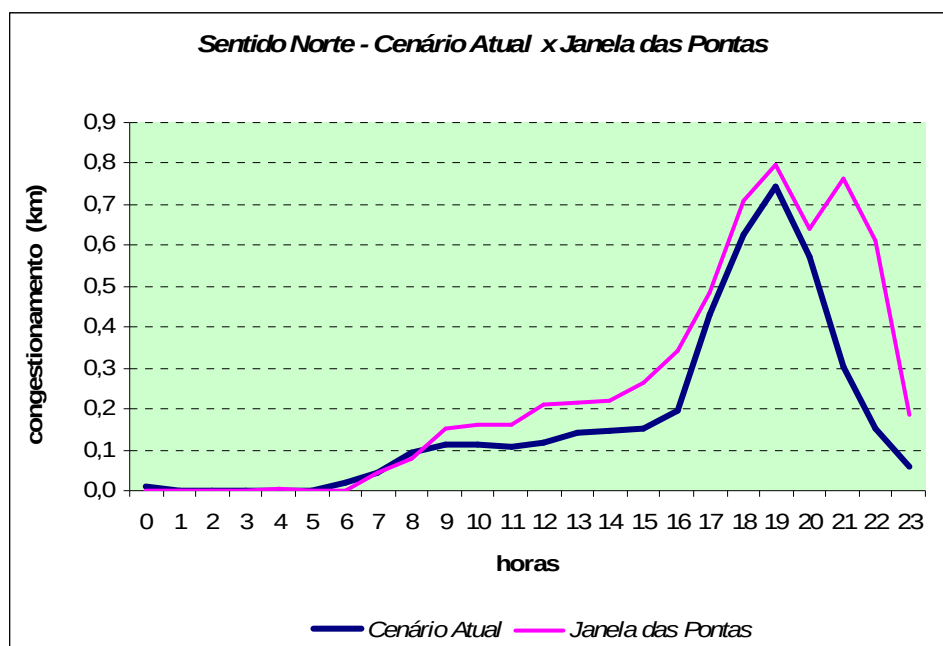


Figura 57 – Sentido Norte – Congestionamento – (Cenário Atual x Jan. das Pontas)

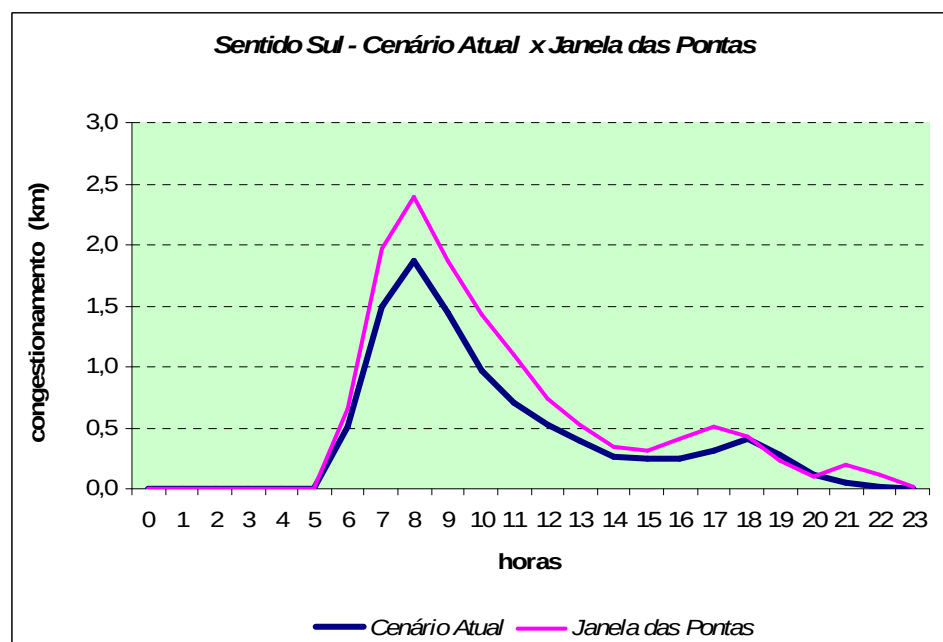


Figura 58 – Sentido Sul – Congestionamento – (Cenário Atual x Jan. das Pontas)

7 – Conclusões:

Pelos resultados acima expostos, é possível afirmar que o modelo apresentou bom desempenho em diagnosticar as condições do segmento de via em estudo, antes e depois das alterações propostas, principalmente, em termos de densidade médias horárias, que é a variável que qualifica o nível de serviço de uma via.

É preciso, contudo, ter em mente que este é apenas um estudo específico, e que ainda se requer novas aplicações do modelo, levando-se em conta novos contextos e premissas, a fim de validá-lo com maiores critérios.

Por hora este pode ser considerado um primeiro passo em se ter um modelo mais robusto, mas que desde já, é suficientemente capaz, de prever sobre as condições do tráfego de um dado segmento de via, caso venha existir alterações operacionais neste.

Além de ter respondido bem ao que lhe foi proposto diagnosticar, o modelo apresenta algumas características que devem ser destacadas.

- ✓ O modelo está estruturado para interagir com diversas lógicas específicas, as quais influenciam diretamente no tráfego, tais como: a variabilidade da demanda, a probabilidade da ocorrência de eventos, e a consideração de

- ✓ regimes congestionados, que normalmente, não são considerados em análises de rodovias do tipo freeway. Esse conjunto de considerações confere uma maior robustez de seus resultados.
- ✓ Outra característica interessante do modelo é o fato do mesmo ter sido desenvolvido com um enfoque mesoscópico. Dessa forma, os veículos foram representados individualmente, podendo-se atribuir características distintas a cada um, o que ainda permite, um melhor detalhamento dos resultados. Isso pode ser identificado no caso da variável performance, onde devido a essa individualização, pode-se verificar a variabilidade do nível de serviço.
- ✓ Essa individualização das entidades (veículos) traz ainda outras vantagens a serem exploradas. Tal como, a possibilidade de migrar o modelo para um enfoque microscópico, ou mesmo, integrar o modelo aqui desenvolvido (Mesoscópico) a um microscópico. Os modelos microscópicos também têm suas entidades representadas de forma individualizada, porém considera também interações diretas entre elas.
- ✓ Outra vantagem da individualização das entidades é a sua fácil interface com estruturas do tipo pedágio, onde requer decisão individualizada sobre a escolha da cabine. Como referência de simulação de uma estrutura de pedágio, ver (Coeli, C.C., Pereira, L.F., Saliby, E. (2000)).

No decorrer do estudo, também foram identificadas melhorias a serem feitas com relação ao modelo e a metodologia utilizada no estudo, e que servem como sugestões para novos estudos.

- ✓ O cálculo do FFS foi baseado na metodologia HCM, no entanto, essa metodologia parte de padrões básicos que estão de acordo com as condições das rodovias e veículos típicos dos EUA e do Canadá basicamente. Isso porque, estes padrões foram obtidos através de estudos empíricos feitos nesses países. Logo assumir um FFS específico do segmento, baseado nesta metodologia, pode deixar de captar características específicas do segmento em análise. O mais adequado então, seria verificar em campo, através de medidores, o real FFS do segmento. Este FFS então, estaria contemplando implicitamente, características dos veículos e motoristas que por esse segmento trafegam.
- ✓ O modelo não considera a interface com outros segmentos. Optou-se por analisar apenas um segmento, o mais crítico. Embora fosse suficiente para o estudo em questão, isso impede que se identifiquem influências de segmentos a downstream sobre o segmento avaliado, e deste sobre os segmentos a upstream.
- ✓ A extensão do segmento é outro ponto a ser melhorado. É possível que quanto menor a extensão do segmento mais acurado se torne o modelo. Esta característica tem efeito sobre três aspectos:

a) Influencia na capacidade de absorção do segmento, ou seja, quanto maior for a extensão, menor a sensibilidade a congestionamentos gerados por variações espontâneas da demanda. Por exemplo, uma concentração maior da chegada de veículos em determinado instante, pode ser suficiente para se atingir o limite de densidade de um dado segmento, se este for relativamente pequeno. Provocando com isso, distúrbios na corrente de tráfego. O mesmo vale para a dispersão destes.

b) Superdimensiona os efeitos dos eventos. Isso porque, considera-se que na ocorrência de um evento, todo o segmento tem suas pistas obstruídas, logo, assume que a ocorrência de um evento no início de um segmento de 2 km, por exemplo, vai bloquear pistas do segmento por inteiro. Caso este mesmo segmento fosse dividido em dois, este mesmo evento só bloquearia as pistas do primeiro, deixando o segundo com sua capacidade normal.

c) O modelo trata a velocidade média de travessia dessa extensão como constante, ou seja, ao acessar o segmento, tem-se uma foto das condições desse, e então é dada uma velocidade a este veículo, que a mantém durante todo o percurso. Dessa forma, quanto menor o percurso, mais dinâmico se torna o modelo, reagindo como maior rapidez às variações existentes.

- ✓ A metodologia utilizada para a simulação dos eventos ainda não é a mais indicada. Utilizou-se no estudo uma probabilidade de eventos, baseada no histórico de ocorrências do segmento em estudo. Embora este método leve a gerar um número médio de eventos coerente com o que ocorre na prática, este é totalmente aleatório, podendo ocorrer a qualquer tempo. Neste caso,

não se consideram as condições do tráfego, a cada instante, como influenciadoras desta ocorrência.

- ✓ Alguns autores buscam identificar correlações entre variáveis do tráfego (ex. densidade, velocidade, composição do tráfego, etc.) e a probabilidade da ocorrência de um evento, porém até no momento, pouco se pôde constatar.

8 - Bibliografia:

Ben-Akiva, M., H.N. Koutsopoulos, R. Mishalani & Q. Yang, (1997), ***Simulation Laboratory for Evaluating Dynamic Traffic Management Systems***. ASCE Journal of Transportation Engineering 123 (4).

Branston, D. (1976), ***Models of Single Lane Time Headway Distributions***. Transportation Science 10, 125-148;

Botma, H. (1978), ***State-of-the-Art report "Traffic Flow Models"*** (in Dutch). Research Report R-78-40, SWOV;

Buckley, D.J. (1968), ***A Semi-Poisson Model of Traffic Flow***. Transportation Science 2(2), 107-132;

Chandler, R.E., R. Herman, E.W. Montroll, (1958) ***Traffic Dynamics: Studies in car following***, Operations Research 6, pp. 165-184;

Coeli, C.C., Pereira, L.F., Saliby, E. (2000) ***Uso de Simulação na Análise da Utilização dos Recursos em uma Praça de Pedágio***. Monografia Final, Curso de Engenharia de Produção, UFRJ.

Daganzo, C., (1997), ***Fundamentals of Transportation and Traffic Operations***, Pergamon;

Daganzo, C., (1994), ***The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory***. Transportation Research B 28B (4);

Edie, L. C. (1961), ***Car Following and Steady-State Theory for Non-Congested Traffic***. Operations Research, 9, pp. 66-76;

IPEA/ANTP (1999) ***Redução das deseconomias urbanas com a melhoria do transporte público***. Revista dos Transportes Públicos - ANTP, 1o trimestre-1999, pp. 34-92;

IPEA (2003) **Impactos Sociais e Econômicos dos Acidentes de Trânsito nas Aglomerações Urbanas**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília, D.F;

Jepsen, M., (1998), **On the Speed-Flow Relationships in Road Traffic: A Model of Driver Behaviour.Proceedings**, Third International Symposium on Highway Capacity, 297-319, Copenhagen,Denmark;

Gazis, D.C., R, Herman, R.W. Rothery, (1961), **Nonlinear Follow the Leader Models of Traffic Flow**, Operations Research 9, 545-567;

Gartner, N.H., A.K. Rathi & C. Messer, Eds., (1997), **Monograph on Traffic Flow Theory**, Oak Ridge National Laboratory;

Greenshields, B. D. (1935), **A Study of Traffic Capacity**. Highway Research Board Proceedings 14, pp. 448-447;

Greenberg, H. (1959), **An Analysis of Traffic Flow**. Operations Research, Vol 7, pp. 78-85;

Hall, F. (1997), **Traffic Stream Characteristics**. In: Gartner, N.; Messer, C.; Rathi, H.K. (eds). Traffic Flow Theory: A State-of-the-Art-Report, cap 2. Transportation Research Board, Washington, DC;

Hoogendoorn, S.P., Bovy, P.H.L., (2001) **State-of-the-art of Vehicular Traffic Flow Modelling**, Journal of Systems and Control Engineering, vol 215, n. 4;

Hoogendoorn, S.P., P.H.L. Bovy (1998a), **A New Estimation Technique For Vehicle-Type Specific Headway Distributions**. Transportation Research Record 1646, 18-28;

Herman, R., (1961), **Traffic Flow Theory**, Elsevier, Amsterdam, Holanda;

Jayakrishnan, R., H.S. Mahmassani & T.Y. Hu, (1994), **An Evaluation Tool for Advanced Traffic Information and Management Systems in Urban Networks** Transportation Research C 2C (3): 129-147;

Kelton, W.D.; Sadowski, R.P.; Sadowski, D.A. (2002), **Simulation with Arena**. McGrawHill;

Law, A.M; Kelton, W.D. (2000), **Simulation Modeling and Analysis**. McGrawHill;

Lord, D.;Manar, A.;Vizioli, (2005), **A Modeling Crash-Flow-Density and Crash-Flow-V/C Ratio Relationships for Rural and Urban Freeway Segments**. Accident Analysis and Prevention, vol 37, p 185-199.

Leonard, D.R., P. Power & N.B. Taylor, (1989), **CONTRAM: structure of the model**, Transportation Research Laboratory, Crowthorn;

Leutzbach, W. (1988), **An introduction to the theory of traffic flow**, Springer-Verlag, Berlin;

Lieberman, E., A.K. Rathi (1997), ***Traffic Simulation: in Traffic Flow Theory: A State-of-the-Art-Report*** Transportation Research Board, Washington, DC;

Lighthill, M.H., and Whitham, G.B. (1955), ***On kinematic waves II: a theory of traffic flow on long, crowded roads***, Proceedings of the Royal Society of London, series A, 229, 317-345;

May, A.D., (1990), ***Traffic Flow Fundamentals***. Englewood Cliffs, NJ;

Pipes, L.A., (1953), ***An Operational Analysis of Traffic Dynamics***, Journal of Applied Physics, vol. 24, no.1, 274-287;

Richards, P.I., (1956), ***Shockwaves on the Highway***. Operations Research 4: 42-51;

Todosiev, E.P., L.C. Barbosa, (1964), ***A Proposed Model for the Driver-Vehicle System***, Traffic Engineering 34, 17-20;

TRB (2000), ***Highway Capacity Manual***. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, DC, EUA, 4 ed.

Underwood, R. T. (1961), ***Speed, Volume and Density Relationships: Quality and Theory of Traffic Flow***. Yale Bureau of Highway Traffic, pp. 141-188;

9 – Anexos:

Anexo 1:**Questionário para levantamento da Demanda Extra**

Entrevistador: _____

Horário da Entrevista: _____

Local da Entrevista: _____

1. Tipo de Veículo:

☐ Caminhão Leve ou Médio (3 ou 4 eixos)☐ Caminhão Pesado (5 a 9 eixos)

2. Origem da Viagem:

Município: _____ Estado: _____

3. Destino da Viagem:

Município: _____ Estado: _____

4. Frequência do uso da rodovia: _____ vezes

☐ Dia ☐ Semana ☐ Mês ☐ Ano ☐ Raramente ☐ Nunca maisVocê tem a Ponte Rio - Niterói como opção (alternativa de rota)? ☐ Sim ☐ Não

5. Tipo da carga:

Origem da carga: _____ Estado: _____

Destino da carga: _____ Estado: _____

Indique a carga:

a) _____ Valor Aprox. R\$: _____

b) _____ Valor Aprox. R\$: _____

Valor Aproximado do frete R\$: _____

6. Tipo de Serviço:

☐ Autônomo ☐ Operador Logístico ☐ Transportador ☐ Frota PrópriaQuem decide a sua rota? ☐ Você mesmo ☐ Empresa Contratante

Nome da empresa contratante: _____

Nome para contato (responsável pela decisão): _____ Telefone: _____

7. Tipo de Rota:

☐ Rota Fixa☐ Rota Não Fixa

8. Se você tivesse duas horas a mais para passar pela Ponte (além do atual - 22h às 04h), quais das opções você escolheria?

☐ 21h às 05h (aumento nas pontas)☐ 12h às 14hCaso seja escolhida a outra opção (ou seja, não sendo a sua), você usaria esta (a escolhida)? ☐ Sim ☐ Não

Se nenhuma dessas lhe atende, sugira uma janela de 2 horas que melhor lhe atenderia: (ex: de 11h às 13h)

Das _____ às _____

9. Observações:

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)