



SECRETARIA DOS TRANSPORTES
DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM

INSTRUÇÃO DE PROJETO

| | | | |
|--------|---------------|-------|---------|
| CÓDIGO | IP-DE-J00/001 | REV. | A |
| EMIÇÃO | maio/2005 | FOLHA | 1 de 33 |

TÍTULO

ELABORAÇÃO DE ESTUDOS DE TRÁFEGO

ÓRGÃO

DIRETORIA DE ENGENHARIA

PALAVRAS-CHAVE

Elaboração. Estudos de Tráfego. Nível de Serviço

APROVAÇÃO

PROCESSO

PR 007476/18/DE/2006

DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

Transportation Research Board. Highway Capacity Manual. Washington DC, 2000.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. **Diretrizes Básicas para Elaboração de Estudos e Projetos Rodoviários.** Rio de Janeiro, 1999, 375 p.

OBSERVAÇÕES

| REV. | DATA | DISCRIMINAÇÃO |
|------|------|---------------|
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |



ÍNDICE

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | RESUMO | 3 |
| 2 | OBJETIVO | 3 |
| 3 | DEFINIÇÕES | 3 |
| 3.1 | Capacidade | 3 |
| 3.2 | Nível de Serviço..... | 3 |
| 3.3 | Tráfego ou Trânsito..... | 3 |
| 3.4 | Condições Predominantes | 4 |
| 3.5 | Volume Horário de Projeto – VHP | 4 |
| 3.6 | Volume Diário Médio – VDM..... | 4 |
| 4 | ETAPAS DO PROJETO..... | 4 |
| 5 | ELABORAÇÃO DO PROJETO | 4 |
| 5.1 | Coleta de Dados | 4 |
| 5.2 | Determinação do Volume Diário Médio..... | 5 |
| 5.3 | Determinação do Volume Horário de Projeto | 8 |
| 5.4 | Análise de Capacidade e do Nível de Serviço | 9 |
| 5.5 | Proposição de Melhorias em Rodovias Existentes | 31 |
| 5.6 | Cálculo do Número “N” | 32 |
| 6 | APRESENTAÇÃO | 32 |
| 6.1 | Estudos Preliminares..... | 32 |
| 6.2 | Projeto Básico ou Executivo..... | 32 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 32 |



| | | | |
|---------|---------------|-------|---------|
| CÓDIGO | IP-DE-J00/001 | REV. | A |
| EMISSÃO | maio/2005 | FOLHA | 3 de 33 |

1 RESUMO

Esta Instrução de Projeto apresenta as diretrizes para elaboração de estudos de tráfego e níveis de serviço em rodovias para o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo – DER/SP.

2 OBJETIVO

Definir e padronizar os procedimentos a serem adotados para elaboração de estudos de tráfego no âmbito do DER/SP. A presente instrução será aplicável aos casos relacionados na seqüência, conforme descrito nos itens a seguir.

- estudos de viabilidade técnico-econômica;
- estudos preliminares de traçado e estudos funcionais;
- projeto de engenharia para implantação de rodovias;
- projeto de engenharia para recuperação de rodovias;
- projeto de engenharia para duplicação de rodovias;
- projeto de engenharia para implantação de rodovias vicinais;
- projeto de engenharia para perenização de rodovias vicinais.

No caso de estudos de viabilidade técnico-econômica, deve-se observar as recomendações referentes aos projetos de engenharia para implantação, recuperação ou duplicação de rodovias, conforme o caso em questão.

3 DEFINIÇÕES

Para efeitos desta instrução de projeto são adotadas as seguintes definições:

3.1 Capacidade

Consiste no número máximo de veículos esperado que se supõe irá passar por um determinado trecho de uma faixa ou pista durante um período de tempo determinado, sob as condições predominantes na rodovia e no tráfego.

3.2 Nível de Serviço

Consiste na medida qualitativa do efeito de numerosos fatores, que incluem a velocidade e tempo de viagem, interrupções de tráfego, facilidade de manobras, segurança, conforto e conveniência no dirigir e custos operacionais.

3.3 Tráfego ou Trânsito

Movimentação e imobilização de veículos, pessoas e animais nas vias terrestres.



| | | | |
|---------|---------------|-------|---------|
| CÓDIGO | IP-DE-J00/001 | REV. | A |
| EMISSÃO | maio/2005 | FOLHA | 4 de 33 |

3.4 Condições Predominantes

Consistem em fatores tais como composição do tráfego, alinhamento da pista, número e largura das faixas, os quais afetam a capacidade da via.

3.5 Volume Horário de Projeto – VHP

Volume de tráfego com base no qual é dimensionado o número de faixas de tráfego da via. Este volume é resultante de estudos de tráfego.

3.6 Volume Diário Médio – VDM

Número médio de veículos que percorre uma seção ou trecho de uma rodovia, por dia, durante um certo período de tempo. Quando não se especifica o período considerado, pressupõe-se que se trata de um ano.

4 ETAPAS DO PROJETO

O estudo de tráfego deve ser elaborado em duas etapas:

- estudos preliminares;
- projeto básico ou executivo.

5 ELABORAÇÃO DO PROJETO

5.1 Coleta de Dados

5.1.1 Projeto de Engenharia para Implantação de Rodovias

Para a elaboração dos estudos deve-se coletar dados de:

- praça de pedágio próxima ao local de estudo, abrangendo volume horário por tipo de veículo, durante o período mínimo de um ano;
- Plano Diretor de Desenvolvimento de Transportes (PDDT) para determinação das taxas de crescimento para a via a ser implantada;
- Anuários estatísticos de tráfego do DER/SP, para determinação da evolução histórica do tráfego de rodovias próximas;
- contagens volumétricas classificadas para atualizar as informações de tráfego;
- pesquisas de origem e destino, contemplando as ligações entre zonas de tráfego;
- dados sócio-econômicos da região, para determinação das taxas de crescimento.

5.1.2 Projeto de Engenharia para Recuperação ou Duplicação de Rodovias

Para a elaboração dos estudos deve-se coletar dados de:

- praça de pedágio, próxima ao local de estudo, abrangendo volume horário por tipo de veículo, durante o período mínimo de um ano;



| | | | |
|---------|---------------|-------|---------|
| CÓDIGO | IP-DE-J00/001 | REV. | A |
| EMISSÃO | maio/2005 | FOLHA | 5 de 33 |

- Plano Diretor de Desenvolvimento de Transportes (PDDT) para determinação das taxas de crescimento;
- Anuários estatísticos de tráfego do DER/SP, para determinação da evolução histórica do tráfego;
- levantamento do alinhamento vertical, onde devem ser determinadas as rampas com suas extensão e inclinação;
- contagens volumétricas classificadas para atualizar as informações de tráfego;
- levantamento da seção transversal, para determinação das larguras de faixas de rolamento, refúgio e acostamento;
- dados sócio-econômicos da região, para determinação das taxas de crescimento.

5.2 Determinação do Volume Diário Médio

5.2.1 Projeto de Engenharia para Implantação de Rodovias e Seleção de Alternativas

5.2.1.1 Estabelecimento das zonas de tráfego

A região de influência direta da rodovia, abrangendo os municípios por ela cortados e aqueles que dela dependem para seu acesso, deve ser dividida em zonas internas de tráfego. Para aproveitamento dos dados sócio-econômicos existentes, estas zonas normalmente devem corresponder aos limites municipais, embora se torne necessário subdividir os municípios por mais de um centro de geração de tráfego.

Os grandes centros econômicos, longe da região de influência direta, devem ser representados por zonas externas de tráfego.

5.2.1.2 Elaboração das matrizes de geração de viagens

Nesta etapa deve-se avaliar a capacidade de gerar viagens para cada zona de tráfego, em função do investimento previsto no sistema viário. Para tanto, alguns aspectos devem ser considerados, tais como características físicas e operacionais da rede, dados sócio-econômicos da população da região, variações diárias e fatores sazonais.

O resultado desta etapa contempla a quantidade de viagens atraídas e geradas a partir de cada zona. Deve-se utilizar pelo menos um dos diversos aplicativos existentes, de acordo com recomendação do DER/SP, de modo a obter precisão e confiabilidade nos resultados.

5.2.1.3 Elaboração das matrizes de distribuição de viagens

Esta etapa compreende a determinação da matriz de distribuição de viagens na malha viária, isto é, o relacionamento entre os vários pares de zonas em termos de quantidade de viagens. Existem vários métodos, e a escolha sobre o mais apropriado depende dos objetivos e da precisão do estudo. Alguns mais complexos levam em consideração os custos da rede durante o processo de distribuição de viagens. O mais conhecido e utilizado é o método gravitacional, que necessita ser bem calibrado, de modo a melhor caracterizar os padrões de viagens para o ano base.



| | | | |
|---------|---------------|-------|---------|
| CÓDIGO | IP-DE-J00/001 | REV. | A |
| EMISSÃO | maio/2005 | FOLHA | 6 de 33 |

5.2.1.4 Alocação das viagens na malha

Esta etapa consiste na alocação do tráfego na malha viária, considerando as rotas alternativas existentes na rede.

Deve-se procurar o ponto de equilíbrio entre demanda e oferta, ou seja, o número de viagens nas diversas ligações deve ser adequado à respectiva capacidade de escoamento, considerando os aspectos de fluidez, tais como tempo de viagens, custos de deslocamento, entre outros, e a segurança, considerando que quanto piores as condições de operação, maior a probabilidade de ocorrência de acidentes. Deve-se considerar também os custos para o usuário, como tempo de viagens, consumo de combustível, praças de pedágio, entre outros.

Esta etapa deve mostrar as deficiências do sistema de transporte ou suas necessidade em função da demanda. Deve-se utilizar pelo menos um dos diversos aplicativos existentes, de acordo com recomendação do DER/SP, de modo a obter precisão e confiabilidade nos resultados.

5.2.1.5 Determinação dos fluxos de tráfego no ano de referência

Uma vez conhecidas as quantidades de viagens nas diversas ligações, deve-se, então, obter os fluxos de veículos correspondentes no ano de referência, bem como a composição da frota de cada um deles.

5.2.1.6 Determinação das taxas de crescimento

Com base nas projeções já existentes, nas séries históricas, nas taxas de crescimento adotadas no PDDT e em quaisquer indicadores sócio-econômicos considerados necessários, deve-se estimar as taxas de crescimento, ao longo do horizonte de estudo.

Pode ser necessário determinar, para cada uma das diversas zonas de tráfego, taxas diferenciadas por tipo de veículo, acarretando crescimento diferenciado entre as ligações que compõem a rede de estudo.

Pode também, ser necessário analisar cenários distintos, com o intuito de prever o comportamento das taxas de crescimento, durante o período de estudo.

5.2.1.7 Determinação das projeções de tráfego

As projeções de tráfego devem ser realizadas por intermédio de taxas de crescimento obtidas com base em dados históricos coletados em estudos econômicos consistentes, tais como planos multimodais de transportes etc. No caso de não existirem tais informações, a metodologia a ser adotada deve ser discutida com o setor competente do órgão. Somente devem ser adotadas taxas de crescimento acima de 3% em casos de fronteiras agrícolas comprovadas pelos estudos econômicos.

Nesta etapa devem ser preparadas projeções de viagens interzonais por automóveis, ônibus e caminhões, para o horizonte de projeto, para os anos intermediários e para cada alternativa da rede de tráfego em estudo.



| | | | |
|---------|---------------|-------|---------|
| CÓDIGO | IP-DE-J00/001 | REV. | A |
| EMISSÃO | maio/2005 | FOLHA | 7 de 33 |

5.2.2 Projeto de Engenharia para Recuperação ou Duplicação de Rodovias

5.2.2.1 Determinação dos fatores de correção da sazonalidade

Para a realização do ajuste aos volumes deve-se calcular os fatores de flutuação mensal e semanal.

Para o cálculo dos fatores de flutuações mensais devem ser utilizadas contagens volumétricas realizadas no período de um ano, sendo calculada a soma, ao longo de todo o ano, dos volumes de veículos para cada um dos doze meses e, a partir daí, o volume médio diário para cada mês e para todo o ano.

Os fatores de flutuações mensais devem ser calculados através do quociente entre o volume diário médio para cada mês e o volume diário médio para todo o ano.

Para o cálculo dos fatores de flutuações diárias, deve-se calcular a soma ao longo de todo o ano dos volumes de veículos para cada um dos dias da semana: domingo, segunda, terça, quarta, quinta, sexta e sábado. O resultado, para cada um dos dias, deve ser dividido pelo número total de cada um dos dias da semana ao longo do ano de domingo a sábado, obtendo-se assim, um volume diário médio específico para domingos, segundas, terças, quartas, quintas, sextas e sábados.

Os fatores de flutuações diárias devem ser calculados através do quociente entre o volume diário médio para cada dia da semana e o volume diário médio.

5.2.2.2 Determinação do tráfego atual

Para determinação dos volumes de tráfego para cada segmento homogêneo, devem ser utilizadas contagens volumétricas efetuadas nas pesquisas de tráfego, devidamente corrigidas pelos fatores de sazonalidade.

5.2.2.3 Determinação das taxas de crescimento

Com base nas projeções já existentes, presentes nas séries históricas, ou nas taxas de crescimento adotadas no PDDT, ou em quaisquer indicadores sócio-econômicos considerados necessários, deve-se estimar as taxas de crescimento ao longo do horizonte de estudo.

Pode ser necessário determinar, para cada uma das diversas zonas de tráfego, taxas diferenciadas por tipo de veículo, acarretando crescimento diferenciado entre as ligações que compõem a rede de estudo.

Pode também ser necessário analisar cenários distintos, com intuito de prever o comportamento das taxas de crescimento, durante o período de estudo.

5.2.2.4 Determinação das projeções de tráfego

As projeções de tráfego devem ser realizadas por intermédio de taxas de crescimento obtidas com base em dados históricos coletados em estudos econômicos consistentes, tais como planos multimodais de transportes etc. No caso de não existirem tais informações, a metodologia a ser adotada deve ser discutida com o setor competente do órgão.



Nesta etapa devem ser preparadas projeções de viagens interzonais por automóveis, ônibus e caminhões, para o horizonte de projeto, para os anos intermediários e para cada alternativa da rede de tráfego em estudo.

5.3 Determinação do Volume Horário de Projeto

5.3.1 Determinação do Fator da Enésima Hora

Para a determinação da hora de projeto relativa à enésima hora e o correspondente coeficiente K_n , usualmente, calculam-se os correspondentes fatores para as 8760 horas ao longo do ano, conforme equação a seguir.

$$K_n = \frac{V_n}{VDM};$$

Onde:

K_n : coeficiente K da enésima hora;

V_n : volume na enésima hora em veículos/hora.

Classificando em ordem decrescente as horas mais carregadas do ano, tem-se o gráfico para determinação do fator da enésima hora, conforme o exemplo a seguir:

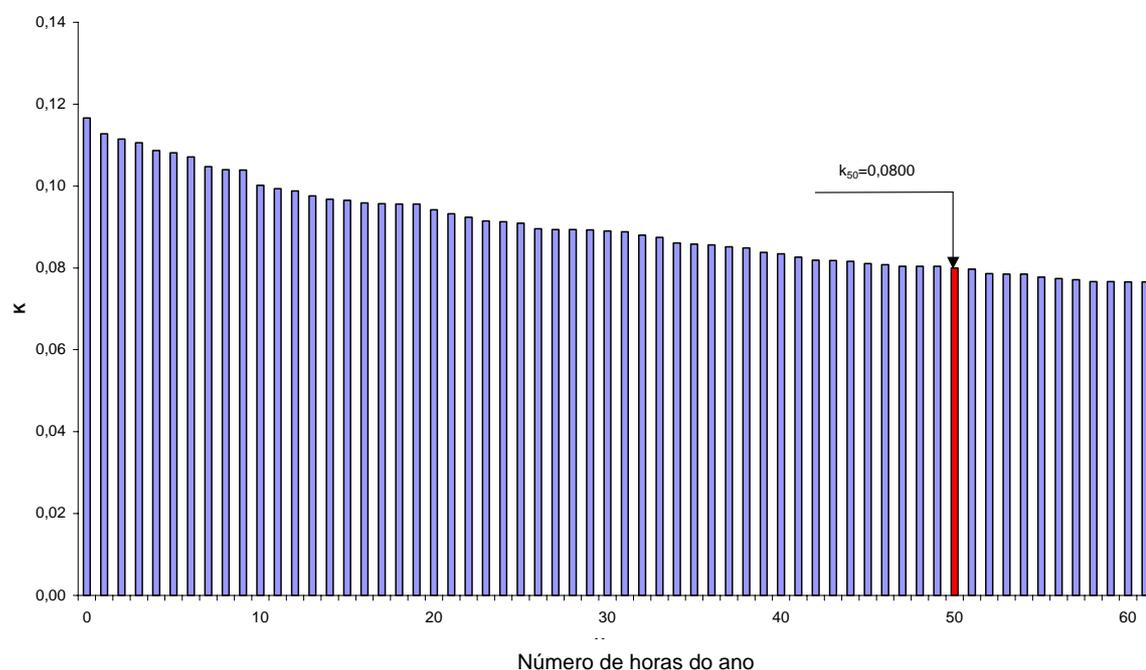


Figura 1 - Exemplo da Determinação do Coeficiente de Enésima Hora

Para a análise de capacidade, impede-se que qualquer trecho das vias do sistema venha a superar o nível de serviço D em mais de 50 horas no ano de acordo com os critérios estabelecidos pelo *Highway Capacity Manual - HCM*⁽¹⁾.



5.3.2 Determinação do Fator de Hora Pico

Para o cálculo do fator de hora pico (FPH), devem ser considerados os quatro intervalos de tempo consecutivos com duração de quinze minutos, totalizando de uma hora, com maior soma (S), ou seja, a hora de pico. Dentro da hora de pico deve-se selecionar o intervalo de quinze minutos com maior volume (V_{15}). A partir daí, o FPH deve ser calculado através da seguinte fórmula:

$$FPH = \frac{S}{4 \times V_{15}};$$

Onde:

FPH: fator de hora pico;

S: volume da hora de pico em veículos/hora;

V_{15} : volume do intervalo de 15 minutos com maior volume dentro da hora de pico.

5.3.3 Determinação do Volume Horário

O volume horário de projeto (VHP) deve ser calculado por meio da seguinte equação:

$$VHP = \frac{VDM \times K_{50}}{FPH};$$

Onde:

VDM: volume diário médio;

VHP: volume horário de projeto em veículos/hora;

K_{50} : coeficiente da quinquagésima hora;

FPH: fator de hora pico;

S: volume da hora pico.

5.4 Análise de Capacidade e do Nível de Serviço

Para a realização da análise de capacidade e nível de serviço devem ser empregadas as metodologias descritas nos capítulos do *Highway Capacity Manual*⁽¹⁾ publicado pelo *Transportation Research Board*, na sua versão mais atual.

5.4.1 Dimensionamento do Número de Faixas de Tráfego da Via

Para dimensionamento de vias a serem implantadas, deve-se avaliar o nível de serviço a ser adotado para fins de dimensionamento, com base na tabela a seguir.



Tabela 1 – Seleção do Nível de Serviço no Projeto de Rodovias a Serem Implantadas

| Classificação Funcional | Combinação de relevo e área de inserção | | | |
|-------------------------|---|---------------------------|-----------------------------|--------------------|
| | Rural com relevo plano | Rural com relevo ondulado | Rural com relevo montanhoso | Urbana e suburbana |
| Via expressa | B | B | C | C |
| Via arterial | B | B | C | C |
| Coletora | C | C | D | D |
| Local | D | D | D | D |

Fonte: *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets* ⁽²⁾

5.4.2 Análise de Rodovia de Pista Simples

Rodovias de pistas simples bidirecionais são vias com uma faixa de tráfego por sentido, que podem apresentar faixas adicionais ao longo de determinados trechos. Para a realização da análise de rodovia de pista simples, deve-se empregar a metodologia descrita no capítulo – “Rodovias de Pista Simples” do *Highway Capacity Manual*⁽¹⁾ publicado pelo *Transportation Research Board*.

5.4.2.1 Parâmetros utilizados para análise

Para o estudo são necessários os seguintes parâmetros:

- motorista padrão;
- volume horário de projeto;
- velocidade da rodovia;
- largura das faixas de rolamento e acostamento;
- densidade de acessos à rodovia, em número de acessos por quilometro;
- trecho com proibição de ultrapassagem;
- distribuição direcional do fluxo;
- porcentagem de veículos comerciais;
- declividade e extensão das rampas;
- tipos de rodovia.

5.4.2.2 Tipos de análise

A metodologia é aplicada nos seguintes tipos de análise:

- análise bidirecional em trechos genéricos;
- análise direcional em trechos com faixa adicional já implantada;
- análise direcional em trechos em aclave, ou seja, rampas com inclinação superior a 3% e extensão superior a 1000 metros.



5.4.2.3 Classificação da rodovia, capacidade e critérios para avaliação do nível de serviço

Para a análise de capacidade de rodovias de pista simples, o HCM define duas classes de rodovias:

- Classe I: rodovias de pista simples nas quais os motoristas têm expectativa de viajarem a velocidades relativamente altas. São consideradas como de tal tipo as ligações principais entre cidades e vias arteriais conectando pólos de tráfego. Frequentemente destinam-se a viagens longas.
- Classe II: neste tipo de rodovia os motoristas não têm necessariamente a expectativa de trafegarem em velocidades elevadas. As principais funções deste tipo de rodovia são: servir de ligação a rodovias de classe I, atuar como rotas de turismo que não sejam vias arteriais primárias e atravessar regiões de relevo acidentado. Em geral são utilizadas para viagens curtas ou no início ou fim de viagens mais longas.

Para a avaliação das rodovias de classe I, o nível de serviço ofertado é definido de acordo com a velocidade média de viagem e o tempo de atraso. Para as rodovias de classe II, onde a acessibilidade é o principal parâmetro, o nível de serviço é definido em função apenas do tempo de atraso.

Tabela 2 - Definição do Nível de Serviço para Rodovias de Classe I

| Nível de Serviço | Tempo gasto seguindo em espera (%) | Velocidade média de viagem (km/h) |
|------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| A | < 35 | > 90 |
| B | > 35 – 50 | > 80 – 90 |
| C | > 50 – 65 | > 70 – 80 |
| D | > 65 – 80 | > 60 – 70 |
| E | > 80 | < 60 |

Fonte: HCM⁽¹⁾

Tabela 3 - Definição do Nível de Serviço para Rodovias de Classe II

| Nível de | Tempo gasto seguindo em espera (%) |
|----------|------------------------------------|
| A | < 40 |
| B | > 40 – 55 |
| C | > 55 – 70 |
| D | > 70 – 85 |
| E | > 85 |

Fonte: HCM⁽¹⁾

A capacidade é definida em 1700 veículos de passeio por hora para a análise direcional em faixas adicionais e aclives específicos e 3200 veículos de passeio por hora para a análise bidirecional de segmentos genéricos. Caso o fluxo horário ultrapasse a capacidade, deve-se considerar nível de serviço F.



5.4.2.4 Análise bidirecional de segmentos genéricos

Tal tipo de análise deve ser realizado para trechos de rodovia com inclinação de rampa inferior a 3%.

O volume horário de projeto (VHP) é calculado por meio da seguinte equação:

$$VHP = VDM \times K_{50};$$

Onde:

VDM: volume diário médio;

K50: coeficiente da quinquagésima hora.

O volume horário equivalente em veículos de passeio é calculado por meio da seguinte fórmula:

$$VHP_{eq} = \frac{VHP}{FPH \times f_g \times f_{hv}};$$

Onde:

VHP: volume horário de projeto;

FPH: fator de pico horário;

f_g : fator de ajuste devido ao greide longitudinal da rodovia no segmento em análise;

f_{hv} : fator de ajuste devido à presença de veículos pesados no fluxo de tráfego.

O fator de ajuste devido à presença de veículos pesados no fluxo de tráfego é assim definido:

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T \times (E_T - 1)};$$

Onde:

P_T : porcentagem de veículos pesados no fluxo de tráfego;

E_T : fatores de equivalência para os veículos pesados em relação aos veículos de passeio.

Através de consulta ao HCM⁽¹⁾, tabelas 20-7 até 20-10 da versão de 2000, os fatores de ajuste para greide e equivalentes para veículos pesados são determinados a partir do fluxo expresso em veículos equivalentes por hora.

Apesar do fluxo em veículos equivalentes não ser conhecido no início da interação, deve ser feita a primeira aproximação, com o valor do fluxo igual a V/FPH, para contemplar os fatores de ajuste para greide e equivalentes para veículos comerciais. Desta forma, determina-se o fluxo em veículos de passeio por hora. Caso o valor seja menor que o limite inferior do intervalo dos valores de ajuste, o fluxo pode ser adotado para os próximos cálculos. Porém, se o valor ultrapassar o limite superior, devem ser adotados os fatores de ajuste deste intervalo, calculando-se novamente o valor do volume horário equivalente e assim sucessivamente.



| | | | |
|--------|---------------|-------|----------|
| CÓDIGO | IP-DE-J00/001 | REV. | A |
| EMIÇÃO | maio/2005 | FOLHA | 13 de 33 |

A velocidade de fluxo livre (FFS) pode ser estimada a partir da velocidade regulamentada da via (BFFS), através da seguinte equação:

$$FFS = BFFS - F_{LS} - F_A$$

Onde:

FFS: velocidade de fluxo livre em km/h;

BFFS: velocidade básica de fluxo livre em km/h;

F_{LS} : fator de ajuste para largura de faixa e acostamento, conforme tabela 20-5 no HCM 2000⁽¹⁾;

F_A : fator de ajuste para densidade de acessos, conforme tabela 20-6 no HCM 2000⁽¹⁾.

A velocidade média de viagem é obtida através da expressão:

$$ATS = FFS - 0,0125 \times VHP_{eq} - f_{NP};$$

Onde:

ATS: velocidade média de viagem em km/h;

VHP_{eq} : volume equivalente de veículos na seção em ucp/h;

f_{NP} : fator de ajuste devido à ocorrência de trechos com ultrapassagem não permitida, conforme tabela 20-11 do HCM 2000⁽¹⁾.

A porcentagem de tempo gasto seguindo em espera é calculada pela seguinte expressão:

$$PTSF = BPTSF + f_{D/NP};$$

Onde:

PTSF: porcentagem de tempo gasto seguindo outro veículo;

BPTSF: valor base para o tempo gasto seguindo outro veículo;

$f_{D/NP}$: fator de ajuste devido ao efeito combinado da distribuição direcional dos fluxos de tráfego e da proporção de trechos com manobra de ultrapassagem não permitida, conforme tabela 20-12 do HCM 2000⁽¹⁾.

Sendo:

$$BPTSF = 100 \times \left(1 - e^{-0,000897 \times VHP_{eq}}\right)$$

A partir da velocidade média de viagem e da proporção de tempo gasto seguindo em espera determina-se o nível de serviço ofertado.

5.4.2.5 Análise direcional de segmentos em aclive específico

Tal tipo de análise deve ser realizada para segmentos com inclinação de rampa superior a 3% e



| | | | |
|--------|---------------|-------|----------|
| CÓDIGO | IP-DE-J00/001 | REV. | A |
| EMIÇÃO | maio/2005 | FOLHA | 14 de 33 |

extensão maior que 1000 metros. No caso de ocorrência de sucessão de aclives, pode ser calculada a inclinação média, considerando-se a divisão do desnível total pela extensão do segmento, conforme orientação contida no HCM⁽¹⁾.

A partir dos volumes diários médios para ambos sentidos de viagem, são calculados os volumes de pico horário por sentido (V_d e V_o) e os volumes de pico horário equivalentes (v_d e v_o) tanto para o sentido em análise como para o sentido oposto.

$$V_d = VDM_d \times K_{50} / V_o = VDM_o \times K_{50}$$

e:

$$v_d = \frac{V_d}{FPH \times f_g \times f_{hv}} / v_o = \frac{V_o}{FPH \times f_g \times f_{hv}}$$

Com FPH, f_g e f_{HV} definidos conforme o item 5.4.2.4.

Os fatores de equivalência de caminhões e ônibus (ET), em unidades de veículos padrão, para aclives específicos, são obtidos por meio de consulta ao HCM, mais especificamente às tabelas 20-15 e 20-16 na versão de 2000 do HCM⁽¹⁾. Da mesma forma, os fatores de ajuste devido ao greide longitudinal da rodovia no segmento em análise (f_g) por meio de consulta às tabelas 20-13 e 20-14 do HCM 2000⁽¹⁾.

A velocidade média de viagem é dada pela seguinte expressão:

$$ATS_d = FFS_d - 0,0125 \times (v_d + v_o) - f_{np};$$

Onde:

ATS_d : velocidade média de viagem na direção em análise em km/h;

FFS_d : velocidade de fluxo livre na direção em análise em km/h;

v_d e v_o : volume equivalente em veículos de passeio na direção em análise e na oposta em vph;

f_{np} : fator de ajuste devido à ocorrência de trechos com ultrapassagem não permitida, conforme tabela 20-19 do HCM 2000⁽¹⁾.

A porcentagem de tempo gasto seguindo em espera é definida pela seguinte expressão:

$$PTSF_d = BPTSF_d + f_{np}$$

Onde:

$PTSF_d$: porcentagem de tempo gasto seguindo em espera na direção em análise;

$BPTSF_d$: valor base para a proporção de tempo gasto seguindo em espera na direção em análise;



fnp: fator de ajuste devido à ocorrência de trechos com restrição à realização de manobras de ultrapassagem, conforme tabela 20-20 do HCM 2000⁽¹⁾.

Com:

$$BPTSF_d = 100 \times \left(1 - e^{-av_d^b}\right)$$

Os parâmetros a e b da equação são definidos por meio de consulta à tabela 20.21 em função do fluxo horário equivalente em veículos de passeio no sentido oposto.

A partir da velocidade média de viagem e da proporção de tempo gasto seguindo em espera determina-se o nível de serviço ofertado pela rodovia no segmento em análise.

5.4.2.6 Análise direcional de segmentos com faixa adicional em active

A análise de capacidade para segmentos deste tipo deve ser realizada de maneira similar aos trechos em active específico, com alguns cálculos adicionais para a velocidade média de viagem e do tempo gasto em espera seguindo na faixa adicional em questão.

A porcentagem de tempo gasto seguindo em espera na faixa de ultrapassagem é calculada pela expressão:

$$PTSF_{pl} = \frac{PTSF_d \times \left[L_u + f_{pl} \times L_{pl} + f_{pl} \times L'_{de} + \left(\frac{1 - f_{pl}}{2} \right) \times \left(\frac{L_{de}^2}{L_{de}} \right) \right]}{L_t};$$

Onde:

$PTSF_{pl}$: proporção de tempo gasto seguindo em espera na faixa adicional;

$PTSF_d$: proporção de tempo gasto seguindo em espera na direção análise sem faixa adicional, calculada de acordo com o exposto no item 5.2.4.2;

f_{pl} : fator de consideração do efeito da faixa adicional sobre o tempo gasto seguindo em espera, conforme tabela 20-27 do HCM 2000⁽¹⁾;

L_{pl} : comprimento da faixa adicional em km, incluindo os *tapers*;

L_{de} : comprimento efetivo da faixa adicional, no qual os seus efeitos ainda são sentidos mesmo após o seu encerramento. É contado a partir do seu término até o final do trecho em análise em km, conforme tabela 20-23 do HCM 2000⁽¹⁾;

L'_{de} : comprimento real contado entre o final da faixa adicional e o final do segmento em análise em km;

L_t : comprimento total do trecho em análise onde está contida a faixa adicional em km;

L_u : comprimento à montante da faixa adicional, entre o seu início e o início do trecho.

A velocidade média de viagem na faixa adicional é calculada por meio da seguinte expressão:



$$ATS_{pl} = \frac{ATS_d \times L_t}{L_u + \frac{L_{pl}}{f_{pl}} + \frac{2 \times L'_{de}}{\left[1 + f_{pl} + (f_{pl} - 1) \times \left(\frac{L_{de} - L'_{de}}{L_{de}} \right) \right]}};$$

Onde:

ATS_{pl} : velocidade média de viagem no segmento com faixa adicional em km/h;

ATS_d : velocidade média de viagem no segmento sem faixa adicional em km/h.

O procedimento para a determinação do nível de serviço ofertado no segmento com faixa adicional é análogo ao descrito no item 5.4.2.5, salientando-se que é necessário considerar os parâmetros proporção do tempo gasto seguindo em espera na faixa adicional e velocidade média no segmento com faixa adicional.

5.4.3 Análise de rodovias de múltiplas faixas

Para o desenvolvimento do trabalho deve ser considerada a metodologia apresentada na versão mais atual do HCM⁽¹⁾, no capítulo referente a *Multilane Highways*, Rodovias de Múltiplas Faixas.

Rodovias de múltiplas faixas têm controle parcial de acesso, como por exemplo a via Anhanguera, SP-330, rodovias Washington Luiz, SP-310, e Luiz de Queiroz, SP-304. Tais rodovias podem ou não apresentar canteiro ou muro separando pistas.

Os principais parâmetros associados ao nível de serviço são a velocidade, a liberdade de movimentação do veículo no fluxo de tráfego e a proximidade entre os veículos ou densidade. A tabela a seguir apresenta os níveis de serviço de acordo com a velocidade de fluxo livre, densidade máxima de tráfego na via e a relação volume/capacidade.

Tabela 4 - Níveis de Serviço para Rodovias de Múltiplas Faixas

| Velocidade de fluxo livre | Critério | Nível de Serviço | | | | |
|---------------------------|--|------------------|-------|------|------|------|
| | | A | B | C | D | E |
| 100 km/h | Densidade máxima (veículos/km/faixa) | 7 | 11 | 16 | 22 | 25 |
| | Velocidade média (km/h) | 100,0 | 100,0 | 98,4 | 91,5 | 88 |
| | Taxa máxima volume / capacidade (v/c) | 0,32 | 0,50 | 0,72 | 0,92 | 1,00 |
| | Taxa máxima de fluxo de serviço (veículos/h/faixa) | 700 | 1100 | 1575 | 2015 | 2200 |

continua/



/conclusão

| Velocidade de fluxo livre | Critério | Nível de Serviço | | | | |
|---------------------------|--|------------------|------|------|------|------|
| | | A | B | C | D | E |
| 90 km/h | Densidade máxima (veículos/km/faixa) | 7 | 11 | 16 | 22 | 26 |
| | Velocidade média (km/h) | 90,0 | 90,0 | 89,8 | 84,7 | 80,8 |
| | Taxa máxima volume / capacidade (v/c) | 0,30 | 0,47 | 0,68 | 0,89 | 1,00 |
| | Taxa máxima de fluxo de serviço (veículos/h/faixa) | 630 | 990 | 1435 | 1860 | 2100 |
| 80 km/h | Densidade máxima (veículos/km/faixa) | 7 | 11 | 16 | 22 | 27 |
| | Velocidade média (km/h) | 80,0 | 80 | 80 | 77,6 | 74,1 |
| | Taxa máxima volume / capacidade (v/c) | 0,28 | 0,44 | 0,64 | 0,85 | 1,00 |
| | Taxa máxima de fluxo de serviço (veículos/h/faixa) | 560 | 880 | 1280 | 1705 | 2000 |
| 70 km/h | Densidade máxima (veículos/km/faixa) | 7 | 11 | 16 | 22 | 28 |
| | Velocidade média (km/h) | 70,0 | 70,0 | 70,0 | 69,6 | 67,9 |
| | Taxa máxima volume / capacidade (v/c) | 0,26 | 0,41 | 0,59 | 0,81 | 1,00 |
| | Taxa máxima de fluxo de serviço (veículos/h/faixa) | 490 | 770 | 1120 | 1530 | 1900 |

A velocidade de fluxo livre (FFS) pode ser estimada a partir da velocidade regulamentada da via (BFFS), através da seguinte equação:

$$FFS = BFFS - F_{LW} - F_{LC} - F_M - F_A;$$

Onde:

FFS: velocidade de fluxo livre em km/h;

BFFS: velocidade básica de fluxo livre em km/h;

F_{LW} : fator de ajuste para largura de faixa, conforme tabela 21-4 do HCM 2000⁽¹⁾;

F_{LC} : fator de ajuste para largura de acostamento, conforme tabela 21-5 do HCM 2000⁽¹⁾;

F_M : fator de ajuste para tipo de canteiro central, conforme tabela 21-6 do HCM 2000⁽¹⁾;

F_A : fator de ajuste para densidade de acessos, conforme tabela 21-7 do HCM 2000⁽¹⁾.

O volume horário equivalente em veículos de passeio é calculado por meio da seguinte fórmula:

$$VHP_{eq} = \frac{VHP}{FPH \times N \times f_{hv} \times f_p};$$



| | | | |
|---------|---------------|-------|----------|
| CÓDIGO | IP-DE-J00/001 | REV. | A |
| EMISSÃO | maio/2005 | FOLHA | 18 de 33 |

Onde:

VHP: volume horário de projeto em veic/h;

FPH: fator de pico horário;

N: número de faixas de rolamento por sentido;

f_{HV} : fator de ajuste devido à presença de veículos pesados no fluxo de tráfego;

f_p : fator de ajuste devido ao tipo de motorista.

O fator de ajuste devido à presença de veículos pesados no fluxo de tráfego é assim definido:

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T \times (E_T - 1) + P_R \times (E_R - 1)};$$

Onde:

P_T : porcentagem de veículos pesados no fluxo de tráfego;

E_T : fatores de equivalência para os veículos pesados em relação aos veículos de passeio;

P_R : porcentagem de veículos recreacionais no fluxo de tráfego;

E_R : fatores de equivalência para os veículos recreacionais em relação aos veículos de passeio.

Devido à presença de caminhões, ônibus e veículos recreacionais, é necessário efetuar ajustes nos volumes de veículos. O HCM 2000⁽¹⁾ recomenda a utilização dos mesmos fatores de equivalência para ônibus e caminhões, uma vez que não há evidências de que as suas características operacionais apresentem diferenças significativas.

Na presente análise, o equivalente de veículos pesados pode ser determinado a partir da classificação do terreno em plano, ondulado e montanhoso, de acordo com a tabela 21.8 do HCM 2000⁽¹⁾.

Os segmentos com rampas com inclinação superior a 3% e extensão superior a 800 metros, ou inclinação inferior a 3% e extensão superior a 1600 metros, são analisados separadamente pelo efeito no fluxo de tráfego da via. Para tanto, nas rampas ascendentes são utilizadas os equivalentes de veículos comerciais e recreacionais conforme as tabela 21.9 e 21.10 respectivamente. Nas rampas descendentes têm-se os equivalentes de veículos comerciais na tabela 21.11 e para veículos recreacionais adota-se os equivalentes de terreno plano.

O fator de ajuste devido ao tipo de motorista é determinado em função da utilização da via, variando de 1,00 para vias de uso direto até 0,80 para vias recreacionais.

Para determinar o nível de serviço, deve-se determinar a densidade de tráfego na via, conforme demonstrado a seguir:

$$D = \frac{VHP_{eq}}{S}$$



Onde:

D: densidade de tráfego na via, em veículos/km/faixa;

VHP_{eq}: volume horário de projeto, em veículos/h/faixa;

S: velocidade média, em km/h.

A velocidade média dos veículos deve ser calculada a partir da determinação do fluxo de tráfego. Para volume de tráfego até 1400 veículos/hora/faixa, a velocidade média é igual a velocidade de fluxo livre, e para volumes maiores utiliza-se as seguintes equações:

Tabela 5 – Cálculo de Velocidades Médias em Função da Velocidade de Fluxo Livre

| Velocidade de fluxo livre (km/h) | Velocidade média (km/h) |
|----------------------------------|--|
| $90 < FFS \leq 100$ | $S = FFS - \left[\left(\frac{9,3}{25} FFS - \frac{630}{25} \right) \times \left(\frac{VHP_{eq} - 1400}{15,7 FFS - 770} \right)^{1,31} \right]$ |
| $80 < FFS \leq 90$ | $S = FFS - \left[\left(\frac{10,4}{26} FFS - \frac{696}{26} \right) \times \left(\frac{VHP_{eq} - 1400}{15,6 FFS - 704} \right)^{1,31} \right]$ |
| $70 < FFS \leq 80$ | $S = FFS - \left[\left(\frac{11,1}{27} FFS - \frac{728}{27} \right) \times \left(\frac{VHP_{eq} - 1400}{15,9 FFS - 672} \right)^{1,31} \right]$ |
| $FFS = 70$ | $S = FFS - \left[\left(\frac{3}{28} FFS - \frac{75}{14} \right) \times \left(\frac{VHP_{eq} - 1400}{25 FFS - 1250} \right)^{1,31} \right]$ |

5.4.4 Análise de Pista Expressa

Para o desenvolvimento do trabalho deve ser considerada a metodologia apresentada na versão mais atual do *Highway Capacity Manual* publicado pelo *Transportation Research Board*, no capítulo referente a pistas expressas ou *Basic Freeway Segments*.

Rodovia expressa tem controle total de acessos, como por exemplos as rodovias dos Bandeirantes, SP-348, Imigrantes, SP-160, e Carvalho Pinto, SP-70.

Esta análise não se aplica para faixas exclusivas, túneis e viadutos extensos, e velocidade de fluxo livre inferior a 90 km/h ou superior a 120 km/h.

Os principais parâmetros associados ao nível de serviço são a velocidade, a liberdade de movimentação do veículo no fluxo de tráfego e a proximidade entre os veículos. A tabela a seguir apresenta os níveis de serviço de acordo com a velocidade de fluxo livre, densidade máxima de tráfego na via e a relação volume/capacidade.



Tabela 6 - Níveis de Serviço para Pista Expressa

| Velocidade de fluxo livre | Critério | Nível de Serviço | | | | |
|---------------------------|--|------------------|-------|-------|------|------|
| | | A | B | C | D | E |
| 120 km/h | Densidade máxima (veículos/km/faixa) | 7 | 11 | 16 | 22 | 28 |
| | Velocidade média (km/h) | 120,0 | 120,0 | 114,6 | 99,6 | 85,7 |
| | Taxa máxima volume / capacidade (v/c) | 0,35 | 0,55 | 0,77 | 0,92 | 1,00 |
| | Taxa máxima de fluxo de serviço (veículos/h/faixa) | 840 | 1320 | 1840 | 2200 | 2400 |
| 110 km/h | Densidade máxima (veículos/km/faixa) | 7 | 11 | 16 | 22 | 28 |
| | Velocidade média (km/h) | 110,0 | 110,0 | 108,5 | 97,2 | 83,9 |
| | Taxa máxima volume / capacidade (v/c) | 0,33 | 0,51 | 0,74 | 0,91 | 1,00 |
| | Taxa máxima de fluxo de serviço (veículos/h/faixa) | 770 | 1210 | 1740 | 2135 | 2350 |
| 100 km/h | Densidade máxima (veículos/km/faixa) | 7 | 11 | 16 | 22 | 28 |
| | Velocidade média (km/h) | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 93,8 | 82,1 |
| | Taxa máxima volume / capacidade (v/c) | 0,30 | 0,48 | 0,70 | 0,90 | 1,00 |
| | Taxa máxima de fluxo de serviço (veículos/h/faixa) | 700 | 1100 | 1600 | 2065 | 2300 |
| 90 km/h | Densidade máxima (veículos/km/faixa) | 7 | 11 | 16 | 22 | 28 |
| | Velocidade média (km/h) | 90,0 | 90,0 | 90,0 | 89,1 | 80,4 |
| | Taxa máxima volume / capacidade (v/c) | 0,28 | 0,44 | 0,64 | 0,87 | 1,00 |
| | Taxa máxima de fluxo de serviço (veículos/h/faixa) | 630 | 990 | 1440 | 1955 | 2250 |

A velocidade de fluxo livre (FFS) pode ser estimada a partir da velocidade regulamentada da via (BFFS), através da seguinte equação:

$$FFS = BFBS - F_{LW} - F_{LC} - F_N - F_{ID};$$

Onde:

FFS: velocidade de fluxo livre em km/h;

BFBS: velocidade básica de fluxo livre, adotada como 110 km/h em via urbana e 120 km/h para via rural;

F_{LW} : fator de ajuste para largura de faixa, conforme tabela 23-4 do HCM 2000⁽¹⁾;

F_{LC} : fator de ajuste para largura de acostamento, conforme tabela 23-5 do HCM 2000⁽¹⁾;



F_N : fator de ajuste para número de faixas, conforme tabela 23-6 do HCM 2000⁽¹⁾;

F_{ID} : fator de ajuste para densidade de interseções, conforme tabela 23-7 do HCM 2000⁽¹⁾.

O volume horário equivalente em veículos de passeio é calculado por meio da seguinte fórmula:

$$VHP_{eq} = \frac{VHP}{FPH \times N \times f_{hv} \times f_p};$$

Onde:

VHP: volume horário de projeto;

FPH: fator de pico horário;

N: número de faixas de rolamento por sentido;

f_{HV} : fator de ajuste devido à presença de veículos pesados no fluxo de tráfego.

f_p : fator de ajuste devido ao tipo de motorista.

O fator de ajuste devido à presença de veículos pesados no fluxo de tráfego é assim definido:

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T \times (E_T - 1) + P_R \times (E_R - 1)};$$

Onde:

P_T : porcentagem de veículos pesados no fluxo de tráfego;

E_T : fatores de equivalência para os veículos pesados em relação aos veículos de passeio.

P_R : porcentagem de veículos recreacionais no fluxo de tráfego;

E_R : fatores de equivalência para os veículos recreacionais em relação aos veículos de passeio.

Devido à presença de caminhões, ônibus e veículos recreacionais, deve-se efetuar ajustes nos volumes de veículos.

O HCM 2000⁽¹⁾ recomenda a utilização dos mesmos fatores de equivalência para ônibus e caminhões, uma vez que não há evidências de que as suas características operacionais apresentem diferenças significativas.

Na presente análise, o equivalente para veículos pesados (E_T) pode ser determinado a partir da classificação do terreno em plano, ondulado e montanhoso, de acordo com a tabela 23.8 do HCM 2000⁽¹⁾.

Os segmentos com rampas com inclinação superior a 3% e extensão superior a 500 metros, ou inclinação inferior a 3% e extensão superior a 1000 metros, são analisados separadamente pelo efeito no fluxo de tráfego da via. Para tanto, nas rampas ascendentes são utilizadas os equivalentes de veículos comerciais e recreacionais conforme as tabelas 23.9 e 23.10 respectivamente. Nas rampas descendentes têm-se os equivalentes de veículos comerciais na



tabela 23.11 e para veículos recreacionais adota-se os equivalentes de terreno plano.

O fator de ajuste devido ao tipo de motorista é determinado em função da utilização da via, variando de 1,00 para vias de uso direto até 0,80 para vias recreacionais.

Para determinar o nível de serviço é determinada a densidade de tráfego na via, conforme demonstrado a seguir:

$$D = \frac{VHP_{eq}}{S}$$

Onde:

D: densidade de tráfego na via, em veículos/km/faixa;

VHP_{eq}: volume horário de projeto, em veículos/h/faixa;

S: velocidade média, em km/h.

A velocidade média dos veículos é calculada a partir da determinação do fluxo de tráfego e velocidade de fluxo livre, conforme as equações a seguir:

Tabela 7 - Cálculo de Velocidades Médias em Função da Velocidade de Fluxo Livre

| Condição de operação | Velocidade média (km/h) |
|--|---|
| $(3100 - 15FFS) < VHP_{eq} \leq (1800 + 5FFS)$ | $S = FFS - \left[\frac{1}{28} (23FFS - 1800) \times \left(\frac{VHP_{eq} + 15FFS - 3100}{20FFS - 1300} \right)^{2,6} \right]$ |
| $VHP_{eq} \leq (3100 - 15FFS)$ | $S = FFS$ |

5.4.5 Análise de Ramos de Entrada e Saída

Para a análise dos ramos de ligação, deve ser utilizada a metodologia contida na versão mais atual do *Highway Capacity Manual*, publicado pelo *Transportation Research Board*, no capítulo referente a ramos de ligação ou *Ramps and Ramp Junction*.

A partir dos volumes diários médios (VDM) é possível obter os volumes horários de projeto por meio da seguinte equação:

$$VHP = VDM \times K_{50};$$

Onde:

VDM: volume diário médio;

K₅₀: coeficiente da quinquagésima hora.

A partir do volume horário de projeto (VHP) é calculado o volume equivalente ao pico de 15



| | | | |
|---------|---------------|-------|----------|
| CÓDIGO | IP-DE-J00/001 | REV. | A |
| EMISSÃO | maio/2005 | FOLHA | 23 de 33 |

minutos (VHP_{eq}), através da seguinte fórmula:

$$VHP_{eq} = \frac{VHP}{FPH \times f_p \times f_{hv}} ;$$

Onde:

VHP: volume de veículos para a hora pico, obtido por extrapolação dos quinze minutos mais carregados;

FPH: fator de hora pico;

f_p: fator de ajuste populacional relativo aos motoristas que se utilizam da rodovia;

f_{hv}: fator de ajuste devido à presença de veículos pesados no fluxo de tráfego.

O fator de ajuste devido à presença de veículos pesados no fluxo de tráfego é calculado através da seguinte fórmula:

$$f_{hv} = \frac{1}{1 + p_{hv} \times E_T} ;$$

Onde:

p_{hv}: porcentagem de veículos pesados;

E_T: fatores de equivalência para veículos pesados em relação aos veículos de passeio.

Os fatores de equivalência para veículos pesados, tais como: caminhões e ônibus, expressos em unidades de veículo de passeio utilizados são extraídos da tabela 21-8 do capítulo Rodovias de Múltiplas Faixas ou *Multilane Highways* do HCM⁽¹⁾.

Os principais parâmetros considerados para análise são os seguintes:

- VF: fluxo total equivalente de veículos da via principal que se aproxima da rampa de saída ou de entrada, em veq/h;
- VR: fluxo total equivalente na rampa, em veq/h;
- V₁₂: fluxo de veículos que se utiliza das duas faixas da direita da rodovia, faixas 1 e 2, em veq/h;
- LA / LD: comprimento total da faixa de aceleração ou desaceleração, em m;
- SFR: velocidade média na rampa no ponto de convergência ou divergência, em km/h.

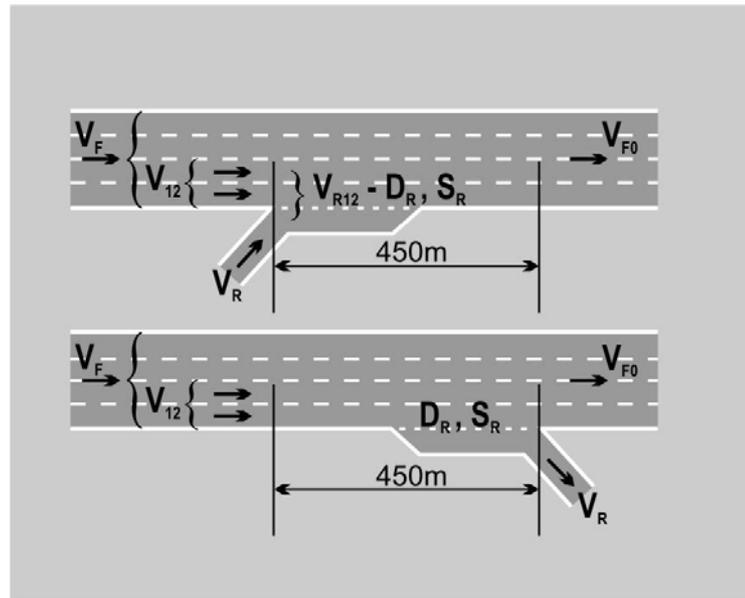


Figura 2 – Valores de rampa críticos

O volume V_{12} é calculado através de uma das seguintes fórmulas:

$$V_{12} = \text{PFM} \times V_F, \text{ para ramos de entrada à rodovia, isto é, convergência}$$

ou

$$V_{12} = V_R + (V_F - V_R) \times \text{PFD}, \text{ para ramos de saída da rodovia, isto é, divergência}$$

PFM e PFD são fatores que indicam a proporção do fluxo total de veículos que se utiliza da rodovia que permanece nas duas faixas da direita, apesar da existência à jusante de ramo de ligação, de entrada ou de saída.

5.4.5.1 Ramos de convergência ou entrada à rodovia

Para os ramos de entrada à rodovia, PFM pode ser calculado através das equações apresentadas no HCM⁽¹⁾, tabela 25-5 da edição de 2000. De acordo com o HCM, tabela 25-6 da edição de 2000, na hipótese de que a rodovia em questão tenha três faixas por sentido, deve-se utilizar a equação 1, 2 ou 3 (caso 2).

Para escolher entre a equação 1 ou 2 é necessário calcular o seguinte parâmetro:

$$LEQ = 0,0675 (V_F + V_R) + 0,46 L_A + 10,24 S_{FR} - 757$$

Onde LEQ é a distância de equilíbrio obtida quando a equação 1 é igualada à equação 2.

Se $LUP \geq LEQ$ utiliza-se a equação 1; caso contrário, utiliza-se a equação 2 para o cálculo de PFM.

Quando necessário escolher entre a equação 1 e a equação 3, calcula-se o parâmetro LEQ de acordo com a seguinte fórmula:



$$L_{EQ} = \frac{V_D}{0,3596 + 0,001149 L_A}$$

Onde L_{EQ} é a distância de equilíbrio obtida quando a equação 1 é igualada à equação 3.

Se $L_{DOWN} \geq L_{EQ}$ utiliza-se a equação 1; caso contrário, utiliza-se a equação 3 para o cálculo de PFM.

Deve ser feita a verificação da capacidade na seção imediatamente à jusante do ramo de entrada na sua área de influência. O fluxo total nessa área é dado pela seguinte fórmula:

$$V_{R12} = V_{12} + V_R$$

Para a verificação da capacidade da área de influência do ramo de acesso, deve-se utilizar a tabela 25-7 considerando velocidade de fluxo livre na via e o número de faixas de rolamento.

Também deve ser feita a verificação da capacidade do ramo de entrada por meio da utilização da tabela 25-3, considerando-se a velocidade nos ramos e o número de faixas de rolamento.

Em seguida, calcula-se a densidade na área de influência da convergência, dada pela seguinte fórmula:

$$D_R = 3,402 + 0,00456 V_R + 0,0048 V_{12} - 0,01278 L_A ,$$

Onde:

L_A : comprimento da faixa de aceleração, em metros.

Para determinar o nível de serviço, basta consultar a seguinte tabela, que corresponde à tabela 25-4 do HCM 2000⁽¹⁾:

Tabela 8 - Níveis de Serviço para Ramos de Ligação

| Densidade (D_R) | Nível de serviço |
|---------------------|------------------|
| $D_R \leq 6$ | A |
| $6 < D_R \leq 12$ | B |
| $12 < D_R \leq 17$ | C |
| $17 < D_R \leq 22$ | D |
| $D_R > 22$ | E |



5.4.5.2 Ramos de divergência ou saída da rodovia

Para os ramos de saída da rodovia o parâmetro PFD pode ser calculado através das equações demonstradas na tabela 25-5.

Para escolher entre a equação 5 ou 6 é necessário calcular o seguinte parâmetro:

$$LEQ = \frac{V_U}{0,2337 + 0,000076 V_F - 0,00025 V_R}$$

Onde LEQ é a distância de equilíbrio obtida quando a equação 5 é igualada à equação 6.

Se $LUP \geq LEQ$, utiliza-se a equação 5; caso contrário, utiliza-se a equação 6 para o cálculo de PFD.

Deve ser feita a verificação da capacidade na seção imediatamente à montante do ramo de saída, utilizando-se para isso a tabela 25-14, considerando-se a velocidade e o número de faixas de rolamento da rodovia principal por sentido de tráfego.

Em seguida verifica-se a capacidade do ramo de saída, através da tabela 25-3, considerando-se a velocidade e o número de faixas de rolamento.

Também deve ser verificada a máxima taxa de fluxo para as faixas da direita por meio de consulta à tabela 25-14.

Em seguida calcula-se a densidade de tráfego na área de influência da divergência, dada pela seguinte fórmula:

$$D_R = 2,642 + 0,0053 V_{12} - 0,0183 L_D$$

Onde:

L_D : comprimento da faixa de desaceleração (em metros).

Para determinar o nível de serviço, basta consultar a tabela 25-4 do HCM 2000⁽¹⁾.

5.4.6 Análise de Entrelaçamento

Para a análise do entrelaçamento dos volumes de tráfego de acesso ou de saída com os volumes de passagem da rodovia deve ser utilizada a metodologia contida no capítulo Entrelaçamento em Vias Expressas, ou *Freeway Weaving*, da versão mais recente do *Highway Capacity Manual*.

A partir dos Volumes Diários Médios (VDM) é possível obter os volumes horários de projeto por meio da seguinte equação:

$$VHP = VDM \times K_{50};$$



| | | | |
|---------|---------------|-------|----------|
| CÓDIGO | IP-DE-J00/001 | REV. | A |
| EMISSÃO | maio/2005 | FOLHA | 27 de 33 |

Onde:

VDM: volume diário médio;

K_{50} : coeficiente da quinquagésima hora.

A partir do volume horário de projeto, deve-se calcular o volume equivalente ao pico de 15 minutos (v), através da seguinte fórmula:

$$v = \frac{VHP}{FPH \times f_p \times f_{hv}};$$

Onde:

VHP: volume de veículos para a hora pico, obtido por extrapolação dos quinze minutos mais carregados;

FPH: fator de pico hora pico;

f_p : fator de ajuste populacional relativo aos motoristas que se utilizam da rodovia;

f_{hv} : fator de ajuste devido à presença de veículos pesados no fluxo de tráfego.

O fator de ajuste devido à presença de veículos pesados no fluxo de tráfego é calculado através da seguinte fórmula:

$$f_{hv} = \frac{1}{1 + p_{hv} \times E_T};$$

Onde:

p_{hv} : porcentagem de veículos pesados;

E_T : fatores de equivalência para veículos pesados em relação aos veículos de passeio.

Os fatores de equivalência para veículos pesados expressos em unidades de veículo de passeio utilizados são apresentados na tabela 21-8 do capítulo referente a rodovias de múltiplas faixas ou *Multilane Highways* do HCM⁽¹⁾.

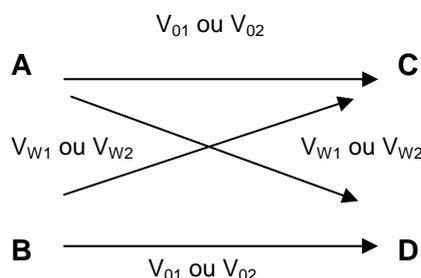
Os principais parâmetros considerados para análise de entrelaçamento são os seguintes:

- L: comprimento total do trecho de entrelaçamento, em metros;
- N: número total de faixas no segmento de entrelaçamento;
- V: fluxo total equivalente no segmento de entrelaçamento, em veículos equivalentes por hora (veículos/h);
- V_{01} : maior dos dois fluxos que não sofrem entrelaçamento no segmento (veq/h);
- V_{02} : menor dos dois fluxos que não sofrem entrelaçamento no segmento (veq/h);
- V_{W1} : maior dos dois fluxos que sofrem entrelaçamento no segmento (veq/h);



- V_{W2} : menor dos dois fluxos que sofrem entrelaçamento no segmento (veq/h);
- V_W : fluxo total de veículos que sofrem entrelaçamento no segmento (veq/h);
- V_{NW} : fluxo total de veículos que não sofrem entrelaçam no segmento (veq/h);
- S_W : velocidade dos veículos que sofrem entrelaçamento no segmento em km/h;
- S_{NW} : velocidade dos veículos que não sofrem entrelaçamento no segmento em km/h;
- S : velocidade dos veículos no segmento de entrelaçamento em km/h.

A seguir é apresentado o esquema para análise de entrelaçamento:



Após a identificação dos fluxos de tráfego é necessário classificar a configuração do segmento com entrelaçamento por meio da tabela 24-5, reproduzida a seguir.

Tabela 9 – Mudanças de Faixa para Análise de Entrelaçamentos

| Número de mudanças de faixa necessárias para o movimento V_{W1} | Número de mudanças de faixa necessárias para o movimento V_{W2} | | |
|---|---|--------|----------|
| | 0 | 1 | ≥ 2 |
| 0 | Tipo B | Tipo B | Tipo C |
| 1 | Tipo B | Tipo A | N/A |
| ≥ 2 | Tipo C | N/A | N/A |

N/A – não aplicável – configuração inviável

Fonte: HCM 2000(1)

Os tipos indicados na tabela são:

- tipo a: os veículos em entrelaçamento em ambas direções têm que mudar de faixa para completar a manobra;
- tipo B: em uma direção, os veículos em entrelaçamento podem completar a manobra sem mudar de faixa, enquanto outros veículos no entrelaçamento têm que mudar de faixa para completar a manobra;
- tipo C: veículos em uma direção no entrelaçamento podem completar a manobra sem fazer mudança de faixa, enquanto outros necessitam realizar duas ou mais mudanças



consecutivas para completar a manobra de conversão.

Em seguida calcula-se o fator de intensidade do entrelaçamento, através da seguinte fórmula:

$$W_{(i)} = \frac{a \times (1 + VR)^b \times \left(\frac{v}{N}\right)^c}{(3,28 \times L)^d}$$

Onde:

- i: índice que pode ser igual a w, para fluxos que sofrem entrelaçamento, ou nw, para fluxos que não sofrem entrelaçamento;
- VR: proporção entre os fluxos que sofrem entrelaçamento e o fluxo total;
- L: comprimento do segmento com entrelaçamento.

Os índices a, b, c e d são dados obtidos na tabela a seguir.

Tabela 10 – Constantes para o Cálculo do Fator de Intensidade do Entrelaçamento

| Tipo de Operação | Fluxos com entrelaçamento, S _w | | | | Fluxos sem entrelaçamento, S _{nw} | | | |
|---------------------|---|-----|------|------|--|-----|-----|------|
| | a | b | c | d | a | b | c | d |
| Configuração TIPO A | | | | | | | | |
| não restrita | 0.15 | 2.2 | 0.97 | 0.80 | 0.0035 | 4.0 | 1.3 | 0.75 |
| restrita | 0.35 | 2.2 | 0.97 | 0.80 | 0.0020 | 4.0 | 1.3 | 0.75 |
| Configuração TIPO B | | | | | | | | |
| não restrita | 0.08 | 2.2 | 0.70 | 0.50 | 0.0020 | 6.0 | 1.0 | 0.50 |
| restrita | 0.15 | 2.2 | 0.70 | 0.50 | 0.0010 | 6.0 | 1.0 | 0.50 |
| Configuração TIPO C | | | | | | | | |
| não restrita | 0.08 | 2.3 | 0.80 | 0.60 | 0.0020 | 6.0 | 1.1 | 0.60 |
| restrita | 0.14 | 2.3 | 0.80 | 0.60 | 0.0010 | 6.0 | 1.1 | 0.60 |

Na análise supõe-se inicialmente que a operação seja do tipo não restrita, para que seja possível o cálculo do fator de entrelaçamento.

Tal hipótese deve ser confirmada através do cálculo do parâmetro N_w, ou seja, número de faixas necessárias para que os veículos que realizam movimento de entrelaçamento atinjam o equilíbrio ou a operação não restrita, que deve ser comparado ao número máximo de faixas que pode ser utilizado para veículos em entrelaçamento em uma dada configuração.



Tabela 11 – Número Máximo de Faixas para Veículos em Entrelaçamento

| Configuração | Número de faixas necessárias para a operação não restrita, N_w | N_w (max) |
|--------------|--|-------------|
| TIPO A | $1.21(N)VR^{0.571}L^{0.234}/S_w^{0.438}$ | 1.4 |
| TIPO B | $N[0.085+0.703VR+(71.57/L)-0.0112(S_{nw}-S_w)]$ | 3.5 |
| TIPO C | $N[0.761+0.047VR-0.00036L-0.0031(S_{nw}-S_w)]$ | 3.0 |

Caso N_w calculado seja superior a N_w (max), a operação deve ser restrita e o fator de intensidade de entrelaçamento (W) deve ser recalculado.

Definido o tipo de operação e calculada a intensidade do entrelaçamento, é possível calcular as velocidades para os fluxos com entrelaçamento e sem entrelaçamento, isto é, S_w e S_{nw} , respectivamente.

$$S_{(i)} = 24 + \frac{S_{FF} - 16}{1 + W_i} \quad (\text{km/h})$$

Onde S_{FF} é a velocidade de fluxo livre na rodovia.

A velocidade média dos veículos no segmento com entrelaçamento pode ser calculada por meio da seguinte fórmula:

$$S = \frac{v}{\left(\frac{v_w}{S_w}\right) + \left(\frac{v_{nw}}{S_{nw}}\right)}$$

Onde v é o fluxo total de veículos no segmento e v_w e v_{nw} são as proporções de fluxos com e sem entrelaçamento (respectivamente).

A densidade no segmento, em veículos de passeio, por quilômetro, por faixa é calculada através da seguinte fórmula:

$$D = \frac{\left(\frac{v}{N}\right)}{S}$$

O nível de serviço ofertado pelo segmento com entrelaçamento é obtido pela consulta à tabela 24-2, reproduzida a seguir.



Tabela 12 - Níveis de Serviço para Entrelaçamento

| Nível de Serviço | Densidade (veic/km/px) |
|------------------|------------------------|
| A | ≤8.0 |
| B | >8.0-15.0 |
| C | >15.0-20.0 |
| D | >20.0-23.0 |
| E | >23.0-25.0 |
| F | >25.0 |

A capacidade, em veículos de passeio por hora, é calculada através da seguinte fórmula:

$$c = cb \times f_{HV} \times f_p \times FPH$$

Onde:

fHV: fator de ajuste devido à presença de veículos pesados no fluxo de tráfego

fP: fator de ajuste devido aos usuários da rodovia;

FPH: fator de pico horário e cb é o valor base de capacidade do segmento para condições ideais, conforme tabela 24-8 do HCM 2000(1).

5.5 Proposição de Melhorias em Rodovias Existentes

5.5.1 Implantação de Faixa Adicional

Para implantação de faixa adicional em pista simples, deve-se utilizar a metodologia preconizada pela *American Association of Highway and Transportation Officials - AASHTO* em *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*⁽²⁾, de acordo com a qual devem ser atendidas as seguintes condições:

- condição 1: fluxo de veículos maior que 200 veículos por hora em active;
- condição 2: fluxo de veículos comerciais maior que 10% em active;
- condição 3: uma das seguintes condições atendidas:
 - redução de 15 km/h ou mais para os veículos comerciais;
 - nível de serviço E ou F;
 - redução de dois ou mais níveis de serviço em relação ao segmento anterior ao active.

As condições 1 e 2 podem ser facilmente determinadas pela análise do tráfego existente.

Na condição 3 deve-se analisar a situação através do gráfico de performance de veículos comerciais, utilizando-se a curva de desempenho do veículo comercial com 120 kg/kW, conforme figura A23-2 do HCM 2000⁽¹⁾, considerando velocidade inicial de 90 km/h e a metodologia de análise de nível de serviço, descrita anteriormente.



| | | | |
|---------|---------------|-------|----------|
| CÓDIGO | IP-DE-J00/001 | REV. | A |
| EMISSÃO | maio/2005 | FOLHA | 32 de 33 |

O ponto de início da faixa adicional deve ser definido a partir da estimativa da perda de velocidade dos veículos pesados. Recomenda-se adotar o valor de 15 km/h, de acordo com o capítulo 7 do Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais⁽³⁾ publicado pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER em 1999. O fim da faixa adicional deve ser definido de maneira semelhante, o veículo pesado deve recuperar velocidade até que esta seja inferior em 15 km/h em relação à velocidade do fluxo de veículos. Também devem ser considerados *tapers*, de acordo com o item 7.3.3. do referido manual.

5.5.2 Duplicação

O critério usual no estado de São Paulo para operação do tráfego rodoviário estabelece que o nível de serviço mínimo desejável deva ser o nível “D”, tolerando-se não mais que 50 horas no ano, operando a níveis inferiores, “E” ou “F”. Assim, como critério de projeto define-se que, sempre que for atingido em algum trecho o Nível “E” na 50ª hora de maior fluxo do ano, deve-se providenciar aumento de capacidade.

5.5.3 Adequação de Interseção

Através das análises de entrelaçamento, ramos de convergência e divergência, deve-se garantir para operação do tráfego, que o nível de serviço mínimo desejável deva ser o nível “D” para o ano de horizonte do projeto.

5.6 Cálculo do Número “N”

Para cálculo do número N, a ser utilizado no dimensionamento de pavimentos, deve-se seguir o procedimento e as recomendações constantes da Instrução de Projeto de Pavimentação (IP-DE-P00/001).

6 APRESENTAÇÃO

6.1 Estudos Preliminares

A fase preliminar tem como um de seus produtos a apresentação de relatório parcial, contendo o resumo de coleta de dados, com respectivos gráficos, tabelas e mapas, incluindo estimativa preliminar de tráfego, tráfego atual e de capacidade e níveis de serviços.

Todos os documentos emitidos devem estar de acordo com as Instruções de Projeto de Elaboração e Apresentação de Documentos Técnicos, Codificação e Revisão de Documentos Técnicos e Apresentação de Projetos Elaborados em Meio Digital.

6.2 Projeto Básico ou Executivo

A apresentação do estudo de tráfego deve ser realizada em relatório no formato A4, contendo memória de cálculo, planilhas, quadros, tabelas e gráficos utilizados.

Todos os documentos emitidos devem estar de acordo com as Instruções de Projeto de Elaboração e Apresentação de Documentos Técnicos, Codificação e Revisão de Documentos Técnicos e Apresentação de Projetos Elaborados em Meio Digital.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS



| | | | |
|--------|---------------|-------|----------|
| CÓDIGO | IP-DE-J00/001 | REV. | A |
| EMIÇÃO | maio/2005 | FOLHA | 33 de 33 |

- 1 TRB. *Highway Capacity Manual*. Washington DC, Transportation Research Board, 2000.
- 2 AASHTO. *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. Washington DC, American Association of Highway and Transportation Officials, 2004. 896 p.
- 3 DNER. **Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico, Divisão de Capacitação Tecnológica. Rio de Janeiro, 1999, 195 p.
