GIOVANE ZITO GOMES

USO DE MICROSSIMULAÇÃO NA AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE CORREDORES RODOVIÁRIOS

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil com ênfase em Transportes.

Orientador: Prof. Dr. José Reynaldo A. Setti

São Carlos
2004

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

G633u

Gomes, Giovane Zito
Uso de microssimulação na avaliação da sustentabilidade de corredores rodoviários / Giovane Zito Gomes. -- São Carlos, 2004.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2004.
Área: Transportes.
Orientador: Prof. Dr. José Reynaldo A. Setti.

1. Microssimulação. 2. Índice de sustentabilidade. 3. Corredores rodoviários. 4. Integration. 5. Matrizes O/D sintéticas. 6. QueensOD. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **GIOVANE ZITO GOMES**

Dissertação defendida e julgada em 17-12-2004 perante a Comissão Julgadora:

Aprovado

Prof. Associado **JOSÉ REYNALDO ANSELMO SETTI (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Associado **EIJI KAWAMOTO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

aprovado

Profa. Dra. **HELENA BEATRIZ BETTELLA CYBIS**
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS)

Prof. Assoc. **JOSÉ LEOMAR FERNANDES JUNIOR**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes

Profa. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus pais, Wilson e Gerceli, e ao meu irmão Alessandro, por estarem sempre do meu lado me apoiando.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me dar saúde e força para nunca desistir dos meus sonhos.

Ao Prof. José Reynaldo A. Setti, pela dedicação de horas e mais horas de orientação, ajuda no desenvolvimento deste trabalho e muita paciência.

Ao Prof. Laurence Rilett, pela ajuda prestada na calibração dos parâmetros do Integration e no desenvolvimento do índice de sustentabilidade.

À FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pela concessão de uma bolsa de estudos.

À concessionária AutoBAn, pela autorização de se realizar o estudo de caso em seu trecho concedido e pelo fornecimento de dados.

Ao Prof. Sérgio Demarchi, pelas sugestões, conselhos e ajuda com o Integration.

À todos os professores do Departamento de Transportes da EESC/USP, pelos ensinamentos passados.

À todos os funcionários do Departamento de Transportes da EESC/USP, pela amizade, companheirismo e ótima convivência.

À todos os amigos do Departamento de Transportes da EESC/USP, em especial a Cíntia Egami, Juliana Araújo, Márcia Lika, Rogério e Ricardinho.

Aos amigos de trabalho, Vlademir Barradel e Marco Pedrocchi, pelo apoio nos momentos finais desta pesquisa.

E, em especial, à Jacira, pela sua compreensão, incentivo e carinho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS..... vi
LISTA DE TABELAS..... viii
RESUMO..... x
ABSTRACT..... xi

1 INTRODUÇÃO..... 1

1.1 SUSTENTABILIDADE DOS SISTEMAS DE TRANSPORTE..... 1
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA..... 3
1.3 ESTRUTURA DO TEXTO..... 4

2 SIMULAÇÃO MICROSCÓPICA DE CORREDORES DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO. 6

2.1 INTRODUÇÃO..... 6
2.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DE SIMULAÇÃO..... 7
2.3 CLASSIFICAÇÃO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO..... 8
2.4 VERIFICAÇÃO, VALIDAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE SIMULADORES DE TRÁFEGO. 9
2.4.1 Verificação e validação..... 9
2.4.2 Calibração..... 11
2.5 O SIMULADOR INTEGRATION..... 13
2.5.1 Representação de fluxos veiculares no INTEGRATION..... 14
2.5.2 Lógica de "car-following"..... 15
2.5.3 Lógica de mudança de faixa..... 17
2.5.4 Lógica de desaceleração e de aceleração..... 17
2.6 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO..... 19
2.6.1 Cálculo do tempo de viagem e dos atrasos pelo INTEGRATION..... 20
2.6.2 Estimativa do consumo de combustível e emissões de poluentes..... 21
2.7 ARQUIVOS NECESSÁRIOS PARA SIMULAR UM SEGMENTO DE RODOVIA..... 22

3 ESTIMATIVA DE DEMANDAS ORIGEM-DESTINO BASEADAS EM FLUXOS OBSERVADOS NA REDE..... 24

3.1 INTRODUÇÃO..... 24
3.2 ESTIMATIVA DE MATRIZES O/D A PARTIR DE FLUXOS OBSERVADOS NOS TRAMOS DA REDE..... 26
3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS PARA ESTIMATIVA DE MATRIZES O/D A PARTIR DE FLUXOS DE TRÁFEGO..... 29
3.3.1 Modelos de gravidade..... 29
3.3.2 Modelos de equilíbrio..... 31
3.3.3 Modelos entrópicos..... 32
3.3.4 Modelos estatísticos..... 33
3.4 ESTIMATIVA DE MATRIZ O/D SINTÉTICA USANDO O QUEENSOD..... 33

3.4.1 Arquivos de entrada e saída do QueensOD *35*

4 SUSTENTABILIDADE DE CORREDORES RODOVIÁRIOS **37**

4.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E OS SISTEMAS DE TRANSPORTE 37

4.2 DETERMINAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DOS SISTEMAS DE TRANSPORTE 38

4.2.1 Medidas de desempenho para o transporte sustentável 41

4.3 ÍNDICES DE SUSTENTABILIDADE 41

5 ESTUDO DE CASO **45**

5.1 ESTRUTURA GERAL DO ESTUDO DE CASO 45

5.2 DESCRIÇÃO DO CORREDOR ESTUDADO 46

5.3 CODIFICAÇÃO DO CORREDOR 47

5.3.1 Arquivo de nós 48

5.3.2 Arquivo de tramos 48

5.3.2 Arquivo de semáforos 49

5.3.3 Arquivo de demanda 49

5.3.4 Arquivo de incidentes 49

5.3.5 Arquivo de greides 49

5.4 VERIFICAÇÃO DA CODIFICAÇÃO DO CORREDOR 50

5.5 CALIBRAÇÃO DO MODELO DE "CAR-FOLLOWING" DO SIMULADOR 51

5.6 DETERMINAÇÃO DA MATRIZ O/D SINTÉTICA PARA O CORREDOR ESTUDADO 56

5.6.1 Contagens de tráfego na rede estudada 56

5.6.2 Determinação dos fluxos horários num dia útil típico 59

5.6.3 Obtenção da matriz O/D sintética para a rede estudada 61

5.6.4 Verificação das diferenças entre os fluxos observados e simulados 65

5.7 DESAGREGAÇÃO DA DEMANDA EM FUNÇÃO DA CLASSE VEICULAR 65

5.7.1 Porcentagens de veículos pesados 66

5.7.2 Arquivo de parâmetros veiculares 68

5.8 CENÁRIOS PROPOSTOS 68

5.9 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE SIMULAÇÃO E CÁLCULO DO ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE 70

5.9.1 Escolha das medidas de desempenho 71

5.9.2 Taxa de viagem 71

5.9.3 Consumo de combustível e emissões de poluentes 72

5.9.4 Resultados das simulações 75

5.9.5 Cálculo do índice de sustentabilidade 77

5.9.6 Aplicação do índice de sustentabilidade no processo decisório 80

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS **82**

6.1 CONCLUSÕES 82

6.2 RECOMENDAÇÕES 83

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **85**

ANEXOS A **94**

ANEXOS B **96**

ANEXOS C **98**

ANEXOS D **100**

ANEXOS E **102**

RESUMO

GOMES, G. Z. (2004) Uso de microssimulação na avaliação da sustentabilidade de corredores rodoviários. São Carlos, 2004. 103p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A pesquisa relatada nesta dissertação procura demonstrar como um modelo microscópico de simulação pode ser usado para produzir dados para a quantificação de medidas de desempenho relacionadas ao transporte sustentável, de tal forma que seja possível incorporar a contribuição individual de cada veículo que viaja pela rede em cada medida de desempenho utilizada. Para tanto, é apresentado um estudo de caso no corredor Anhangüera-Bandeirantes, entre São Paulo e Jundiaí, onde foram propostas quatro estratégias operacionais hipotéticas para ilustrar como o índice de sustentabilidade pode ser utilizado na tomada de decisões na área de transportes. O modelo de simulação de tráfego utilizado foi o Integration que teve seus parâmetros de entrada recalibrados a partir dos fluxos obtidos dos laços indutivos instalados ao longo do corredor estudado. As matrizes O/D utilizadas nas simulações foram estimadas através do QueensOD e as medidas de desempenho constituintes do índice de sustentabilidade proposto foram: a taxa de viagem, o consumo de combustível e as emissões de HC, CO e NO_x.

Palavras-chave: microssimulação, índice de sustentabilidade, corredores rodoviários, Integration, matrizes O/D sintéticas, QueensOD.

ABSTRACT

GOMES, G. Z. (2004) Utilizing microsimulation to analyze highways corridor's sustainability. São Carlos, 2004. 103p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The objectives of the research reported in this masters dissertation was to demonstrate how a microsimulation model outputs can be used to quantify performance measures related to sustainable transportation, in a way such that each individual vehicle contribution is accounted for in the calculation of the performance measures. A case study, focusing the São Paulo to Jundiaí segment of the Anhanguera-Bandeirantes highway corridor, was used to demonstrate the application of the proposed approach. Four hypothetical operational strategies were compared to illustrate how the proposed sustainability index might be used in decision making. The Integration model was used to simulate the highway corridor. The microsimulation model was calibrated using data from the inductive loops installed along the studied section and the synthetic O/D matrices were estimated by means of the QueensOD model, from traffic counts. The sustainability index used included the following performance measures: travel rate, fuel consumption and HC, CO e NO_x emissions.

Keywords: microsimulation, sustainability index, highways corridors, Integration, synthetic O/D matrices, QueensOD.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Sustentabilidade dos sistemas de transporte

Ainda que essencial, tanto do ponto de vista econômico como do social, a atividade de transporte (que inclui a produção de veículos, o seu uso na circulação de bens e de pessoas e a disposição final dos veículos e de seus componentes ao fim de suas vidas úteis) está indissociavelmente ligada a diversos aspectos negativos, que incluem: poluição ambiental; acidentes; consumo energético e de outros recursos naturais; divisões nos sistemas urbanos e sociais; consumo de terras agriculturáveis; destruição de paisagens; etc. Como a demanda por transportes é uma demanda derivada, o crescimento econômico implica num aumento das atividades de transportes; daí decorre uma preocupação em que o "desenvolvimento econômico ocorra de tal forma que seja possível atender às necessidades presentes sem colocar em risco a capacidade de gerações futuras atenderem às suas necessidades" (Brundtland Comission, 1987), o que se convencionou denominar *desenvolvimento sustentável*. O *transporte sustentável*, que é a expressão do desenvolvimento sustentável na circulação de bens e de pessoas, "envolve políticas de ação e investimentos em infra-estrutura que atendam simultaneamente a uma gama de objetivos relacionados ao desenvolvimento econômico, à preservação do meio ambiente e de recursos naturais, e à equidade social, de tal forma que seja possível otimizar o uso do sistema de transportes para atendimento de objetivos econômicos, sociais e de preservação do meio ambiente sem sacrificar a capacidade de gerações futuras alcançarem os mesmos objetivos" (Spaethling, 1996).

Os conceitos e princípios relacionados ao transporte sustentável são bem documentados (Litman e Burwell, 2003), têm encontrado ressonância junto a instâncias governamentais – por ex., Transport Canadá (2004) –, e incluem aspectos econômicos, sociais e ambientais. Contudo, a aplicação desses conceitos não é simples e praticamente inexistem metodologias estabelecidas para avaliar a sustentabilidade de

sistemas de transporte (Ziestman, 2000). As deficiências das técnicas tradicionalmente usadas no planejamento de transporte, quanto a este respeito, têm sido estudadas por diversos autores (Lindquist, 1998; Masser, Sviden e Wegener, 1993; Peake e Hope, 1994; Dittmar, 1996; Mickelson, 1998) e podem ser resumidas nos seguintes aspectos (Zeistman, 2000):

- o transporte sustentável é um conceito relativamente novo, cujo escopo e objetivos ainda não estão bem definidos;
- faltam orientações gerais para a seleção de medidas de desempenho que permitam quantificar o progresso em direção ao objetivo final e a eficácia das decisões tomadas nesse sentido;
- o estado da prática atual, em termos das técnicas de modelagem e de planejamento, apresenta limitações quanto ao nível de detalhamento necessário para a quantificação de medidas de desempenho; e
- não há garantias de que, seja possível tomar decisões de uma forma isenta e consistente, mesmo se for possível obter medidas de desempenho quantitativas.

Zeitsman (2000) postula que sustentabilidade de corredores de transporte pode ser quantificada através de medidas de desempenho que historicamente têm sido usadas para outros objetivos (por exemplo, em estudos de mobilidade e de congestionamento), desde que a modelagem seja feita num nível suficientemente desagregado, a fim de que essas medidas de desempenho possam ser calculadas com a precisão necessária. Do contrário, pode-se incorrer em erros consideráveis, visto que já se comprovou a existência de relações não lineares para diversas dessas medidas (Zeitsman e Rilett, 2000). Por isso, o autor propõe que, em conjunção com modelos macroscópicos (como os modelos de quatro etapas, usados tradicionalmente para analisar fluxos em redes de transporte), sejam usados modelos microscópicos de simulação e dados obtidos a partir de sistemas inteligentes de transporte (ITS, na sigla em inglês) para quantificar essas medidas de desempenho.

O advento dos sistemas inteligentes de transporte, que facilitam e barateiam a obtenção de dados desagregados, e a disseminação dos modelos de simulação microscópica, que permitem determinar dados individuais de cada veículo simulado (por ex., tempo de viagem, emissão de poluentes e consumo de combustível), possibilitam a utilização de índices de sustentabilidade que refletem melhor a contribuição individual de cada viagem realizada no sistema viário estudado e, por

conseguinte, são mais precisos que os baseados em médias globais, muitas vezes obtidos em laboratórios, em condições muito diferentes que as encontradas numa viagem real. Daí surge a motivação para a pesquisa relatada nesta dissertação: usar modelos de simulação microscópica para obter dados desagregados ao nível de viagens individuais para avaliar o efeito de modificações em corredores rodoviários.

1.2 Objetivos da pesquisa

A meta da pesquisa relatada nesta dissertação é demonstrar que um modelo microscópico de simulação pode ser usado para produzir dados para a quantificação de medidas de desempenho relacionadas ao transporte sustentável, de tal forma que seja possível incorporar a contribuição individual de cada veículo que viaja pela rede em cada medida de desempenho utilizada. Para isso, usa-se um estudo de caso, através do qual os impactos de alternativas de operação para o corredor formado pelas rodovias Anhanguera e Bandeirantes foram avaliados usando-se o índice de sustentabilidade proposto por Zeistman (2000). Assim sendo, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos para a pesquisa:

1. Modelar o sistema Anhangüera-Bandeirantes, usando o simulador INTEGRATION;
2. Coletar os dados de tráfego para determinar a variação do fluxo horário num dia típico da operação do corredor rodoviário estudado;
3. Obter, a partir dos dados de tráfego coletados, uma matriz OD sintética que reproduza os fluxos observados nos segmentos do corredor estudado;
4. Definir os cenários hipotéticos e conduzir experimentos de simulação para produção dos dados necessários para o cálculo das medidas de desempenho usadas no índice de sustentabilidade adotado; e
5. Calcular os valores do índice de sustentabilidade para cada cenário hipotético e comparar as alternativas de operação com base nos valores obtidos para o índice de sustentabilidade.

Na delimitação do objeto de estudo, deve-se ressaltar que existem três aspectos do problema que foram deixados de fora do escopo desta pesquisa. O primeiro aspecto é que a aplicação de um índice de sustentabilidade como o proposto por Zeistman (2000) requer mais dados (por ex., níveis de ruído, custo operacional, custo de capital, etc.), cuja obtenção foi impossível, em função das limitações de recursos disponíveis. O segundo aspecto é a definição dos cenários e alternativas usadas no estudo: uma aplicação real do procedimento proposto deve ser baseada em alternativas que

efetivamente possam ser usadas e devem ser obtidas a partir de discussões com operadores, usuários e órgãos gestores. As alternativas adotadas neste estudo são hipotéticas e apenas servem para exemplificar como o método proposto deve ser usado. Em último lugar, a calibração do modelo foi a melhor possível, dada a heurística adotada e os dados disponíveis. Numa aplicação real, seria conveniente que fossem usados mais de um parâmetros para avaliar a diferença entre as correntes de tráfego observada e simulada (no caso, apenas os fluxos nos tramos foram usados), mas a falta de dados confiáveis de origem/destino dos veículos e da velocidade média no espaço (que poderiam ser obtida a partir dos *tags* com que uma parcela significativa dos veículos está equipada) impediu uma melhor calibração do modelo.

1.3 Estrutura do texto

Esta dissertação compõe-se de seis capítulos, o primeiro dos quais é esta introdução. No segundo capítulo, apresenta-se uma discussão a respeito de modelos de simulação de correntes de tráfego rodoviário e apresentam-se as características principais do modelo de microssimulação de tráfego usado nesta pesquisa, o Integration.

No capítulo três, discute-se como obter dados de demanda entre origens e destinos numa rede, a partir dos fluxos observados nos tramos dessa rede. Para isso, discutem-se alguns métodos para estimativa indireta de matrizes origem/destino e apresenta-se as características principais do QueensOD, o software utilizado para gerar a matriz origem/destino sintética usada no estudo de caso.

O capítulo quatro apresenta, inicialmente, uma discussão sobre desenvolvimento sustentável e transporte sustentável mostrando as diferenças entre o planejamento convencional e o sustentável; a seguir, discutem-se os aspectos relacionados à quantificação da sustentabilidade de sistemas de transporte; e por fim o capítulo se encerra com a construção de índices de sustentabilidade de transportes.

No capítulo cinco é apresentado um estudo de caso que demonstra como um modelo microscópico de simulação (o Integration) pode ser usado para produzir dados para a quantificação de medidas de desempenho para o sistema Anhangüera-Bandeirantes, a partir das quais foram calculados os índices de sustentabilidade para quatro cenários hipotéticos, que representam estratégias operacionais para o corredor estudado. O capítulo inicia-se mostrando como foi realizada a calibração do modelo de "car-following" do Integration para a rede estudada, a partir dos dados de fluxo e velocidade obtidos dos sensores instalados nas pistas do corredor. A seguir, apresentam-se o

processo usado para geração de uma matriz origem/destino sintética, a partir das contagens de tráfego nos tramos da rede simulada, o processo de calibração do simulador, os cenários hipotéticos criados para representar alternativas operacionais, a escolha das medidas de desempenho, as simulações realizadas e como os resultados das simulações foram usados para cálculo das medidas de desempenho. O capítulo encerra-se mostrando como os índices de sustentabilidade de cada cenário foram obtidos e discutindo e como esses índices poderiam ser usados na avaliação e escolha de alternativas de ação para o corredor.

O sexto e último capítulo apresenta as conclusões e faz recomendações para o aprimoramento do estudo apresentado.

2 SIMULAÇÃO MICROSCÓPICA DE CORREDORES DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO

Inicialmente, neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre simulação de fluxos de tráfego rodoviário em que se apresentam as vantagens e desvantagens do uso de simuladores e uma classificação dos simuladores de tráfego. A seguir, apresenta-se um panorama geral da verificação, validação e calibração de modelos de simulação de tráfego, em que se procura estabelecer os passos necessários para obtenção de um modelo capaz de simular adequadamente o sistema estudado. As principais características do simulador Integration são apresentadas a seguir, enfatizando-se alguns aspectos considerados mais importantes da forma usada pelo Integration para representar os fenômenos que existem numa corrente de tráfego.

2.1 Introdução

A simulação de fluxos de tráfego sofreu um enorme desenvolvimento desde o surgimento dos primeiros modelos de simulação, na década de 1950. Um dos primeiros simuladores foi o criado por Lighthill e Whitham (1955), que usava uma analogia entre o movimento de partículas de um fluido e o fluxo de veículos. Os simuladores atuais não apenas incorporam todos os avanços teóricos da Engenharia de Tráfego, mas também aspectos e conceitos da Psicologia, para poder retratar melhor o comportamento dos veículos interagindo com seus motoristas (Lacalle, 2003). De acordo com Lacalle (2003), esse avanço tem diversas razões: (1) avanços na ciência da computação, tanto em relação aos equipamentos (hardware) como às ferramentas de programação (software); (2) avanços na engenharia de tráfego e de transportes, que permitem melhor modelagem dos fenômenos de tráfego; e (3) a demanda, por parte da sociedade, por análises mais detalhes e mais precisas dos efeitos e conseqüências dos projetos de transporte.

Os primeiros modelos de simulação para análise de operações de tráfego em vias expressas apareceram no final dos anos de 1960 e 1970 (exemplos: FREQ, CORQ, INTRAS) e floresceram nos anos de 1980 e 1990 (exemplos: FRESIM, KRONOS, INTEGRATION, PARAMICS e AIMSUN-2). Um estudo recente identificou 64 simuladores capazes de representar fluxos em vias expressas e rodovias de pista dupla (Boxill e Yu, 2000). Atualmente, os simuladores disponíveis permitem uma abordagem bastante realística das condições das vias expressas com baixo custo computacional (Prevedouros e Li, 2000).

Atualmente, a simulação de tráfego por computador é muito usada para avaliar estratégias dos sistemas inteligentes de transporte (Boxill e Yu, 2000). Segundo Al-Kaisy *et al.* (1999), o uso da simulação de tráfego nessas aplicações deve-se à capacidade dos modelos de simulação integrarem diferentes ferramentas analíticas em um único modelo e representar dinamicamente as interações do sistema.

2.2 Vantagens e desvantagens do uso de simulação

A principal vantagem do uso de simulação, em relação à observação direta de correntes de tráfego, é a possibilidade de se ter total controle sobre as variáveis que influem na corrente de tráfego (McLean, 1989). A simulação ainda oferece mais vantagens: (a) é possível simular uma ampla gama de condições operacionais com relativa facilidade, sem os custos e dificuldades associadas ao grande número de coletas de dados necessárias para a obtenção de amostras adequadas; (b) a possibilidade de simular condições difíceis ou impossíveis de serem observadas na prática ou de combinações de características de fluxos e de via que são inexistentes ou difíceis de serem encontradas; e (c) permitem a obtenção de dados impossíveis de serem observados na prática (por ex., a distribuição de velocidades desejadas num dado ponto), já o modelo mantém informações relevantes para todos os veículos simulados (McLean, 1989).

Em relação à observação direta do fluxo de veículos, a simulação sofre das mesmas desvantagens que uso de modelos matemáticos e experimentos de laboratório: fica sempre a suspeita de que o modelo ou experimento não seja capaz de replicar adequadamente o sistema real que se deseja estudar (McLean, 1989). Os processos de verificação, validação e calibração servem para minimizar essas suspeitas, servindo para reduzir ao máximo as diferenças entre as correntes de tráfego real e simulada (Rakha *et al.*, 1996; Hellinga, 1998). A variabilidade estatística é outra desvantagem da simulação,

já que uma simulação de um intervalo finito de tempo real fornece apenas uma amostra dos possíveis resultados que o modelo pode fornecer. Para aumentar a confiabilidade dos resultados da simulação é preciso usar técnicas de redução da variância que exigem replicações das simulações, o que dificulta o seu uso (McLean, 1989). A necessidade de calibração dos parâmetros internos dos modelos para que o simulador possa representar as condições de tráfego real é outra desvantagem dos modelos de simulação (Wang e Prevedouros, 1998).

2.3 Classificação de modelos de simulação de tráfego

Os modelos de simulação de tráfego podem ser classificados em:

- **Microscópicos**: os veículos na corrente de tráfego são tratados individualmente e se movem segundo o comportamento *car-following* e modelos de mudança de faixa por rotas preestabelecidas (Astarita *et al.* 2001). As medidas de desempenho microscópicas são derivadas da velocidade e da posição de cada veículo ao longo do tempo. Como exemplos desta categoria pode-se citar: CORSIM, INTRAS, INTEGRATION, NETSIM, TRANSIMS, AIMSUN-2, PARAMICS, etc. (Boxill e Yu, 2000).
- **Macroscópicos**: consideram a corrente de tráfego como um todo, nos quais a noção de partícula não é considerada. As variáveis macroscópicas do tráfego (velocidade, fluxo e densidade) aplicam-se ao conjunto de veículos trafegando em uma determinada via ou trecho de via e apresentam os valores médios associados ao fluxo (Boxill e Yu, 2000; Silva e Tyler, 2001). Exemplos desta classe de modelos incluem: AUTOS, FREFLO, CORFLO, FREQ, KRONOS, PASSER, TRANSYT, etc. (Boxill e Yu, 2000).
- **Mesoscópicos**: consideram sistemas de tráfego compostos de elementos discretos, mas tais elementos não são unitários. É um modelo intermediário, que possui tanto características dos modelos macroscópicos como dos modelos microscópicos (Boxill e Yu, 2000; Silva e Tyler, 2001). Exemplos desta classe são modelos como DYNASMART, DYNAMIT e DYNEMO (Boxill e Yu, 2000).

Com base no grau de detalhamento, os simuladores de tráfego, também podem ser classificados em modelos de simulação de alta fidelidade ou de baixa fidelidade (Rilett, Kim e Raney, 2000). Um modelo de simulação de alta fidelidade tenta representar o comportamento do tráfego em detalhe, controlando grande número de parâmetros, tais como greide, porcentagem de caminhões, agressividade dos motoristas, enquanto um

modelo de baixa fidelidade contém poucas regras de decisões dos motoristas no comportamento do tráfego e, portanto, representa o fluxo de veículo de forma mais simplificada. Um exemplo de modelo de baixa fidelidade é o TRANSIMS, ao passo que o CORSIM e o INTEGRATION são exemplos de modelos de alta fidelidade (Rilett, Kim e Raney, 2000).

2.4 Verificação, validação e calibração de simuladores de tráfego

Para que os modelos de simulação possam ser confiáveis e forneçam resultados precisos é necessário proceder à verificação, validação e calibração do modelo (Rakha *et al.*, 1996; Hellinga, 1998).

Verificação é checar se o código do modelo realmente representa a lógica[1] escolhida para representação do comportamento da corrente de tráfego (alguns autores – como Rao e Owen (2000) – chamam esta etapa de "validação conceitual"). A validação visa determinar se o programa computacional é capaz de representar o comportamento dos veículos conforme especificado pela lógica adotada e se os resultados gerados são compatíveis com observações realizadas em sistemas reais (Rakha *et al.*, 1996; Silva e Tyler, 2000). Na validação, o comportamento dos veículos em situações como por ex., *car-following*, mudança de faixa, faixas de entrada e saída deve ser verificado e comparado com dados de campo; além disso, os padrões de aceleração e desaceleração, padrões de mudança de velocidade, trajetória *e headways* produzidos pelo simulador devem ser compatíveis com os observados em campo (Benekohal, 1991; Rao e Owen, 2000, Silva e Tyler, 2000). Rao e Owen (2000) denominam esta etapa também de "validação operacional". Normalmente, essas duas etapas iniciais ficam a cargo dos criadores do modelo, já que pode ser preciso alterar as instruções do programa, além dos valores *default* dos parâmetros do simulador, se o programa não estiver produzindo os resultados esperados (Rakha *et al.*, 1996).

2.4.1 Verificação e validação

Segundo Benekohal (1991), a validação dos modelos de simulação de tráfego pode ser dividida em dois níveis, conforme se mostra na Figura 2.1. No nível microscópico, a comparação da simulação com dados de campo deve ser feita individualmente, para cada veículo simulado e os atributos a serem examinados são: a posição do veículo no instante do tempo simulado, o headway e a velocidade. No nível macroscópico, as

[1] O conjunto de regras e relações matemáticas usadas para representar o comportamento do tráfego é chamado de "lógica" do modelo (Rakha *et al.*, 1996)

comparações são feitas num nível agregado e os parâmetros que devem ser comparados são: velocidade média, densidade e taxa de fluxo para pelotões de veículos.

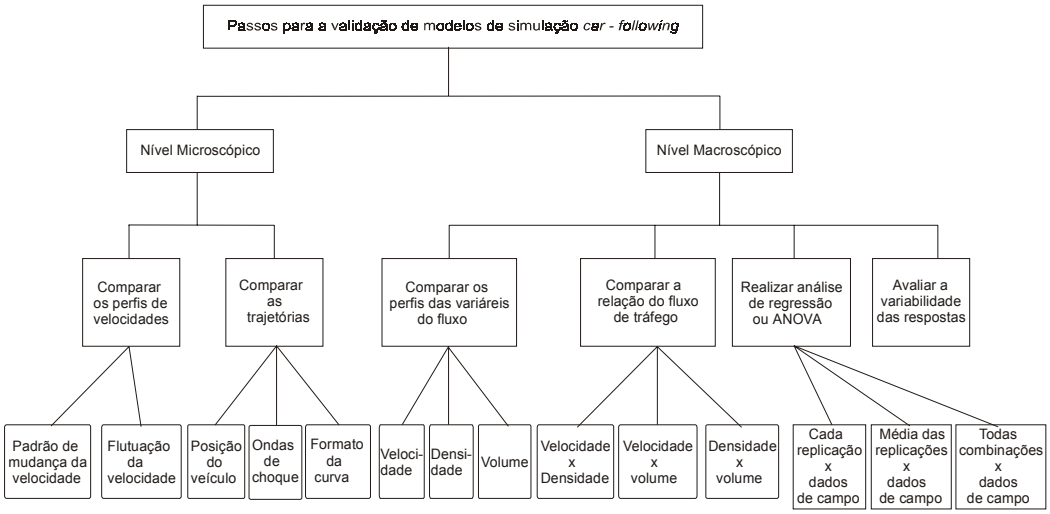


Figura 2.1: Fluxograma para validação de um modelo de simulação *car-following* (Benekohal, 1991).

Rao e Owen (2000) propuseram uma estrutura de validação multiestágio para os modelos de simulação de tráfego de alta fidelidade separando a validação em conceitual e operacional (Figura 2.2). A validação conceitual (que corresponde ao estágio de "verificação"), é uma avaliação qualitativa dos fundamentos teóricos e da implementação computacional da lógica adotada no simulador. Nesta etapa, o objetivo é determinar se a lógica adotada realmente serve para representar o tipo de situação em que se pretende usar o simulador e verificar se as equações e relações matemáticas codificadas no programa são consistentes e corretas. Para isso, os autores propõem dois mecanismos: (a) pesquisa ("survey") com especialistas e (b) verificação do código. A pesquisa visa determinar, com a ajuda de especialistas, se a metodologia escolhida, se os dados de entrada exigidos e se os resultados do modelo são adequados e capazes de reproduzir os comportamentos observados em correntes de tráfego reais. A fase de verificação do código consiste numa revisão detalhada da lógica do modelo para garantir que o programa funcione conforme esperado.

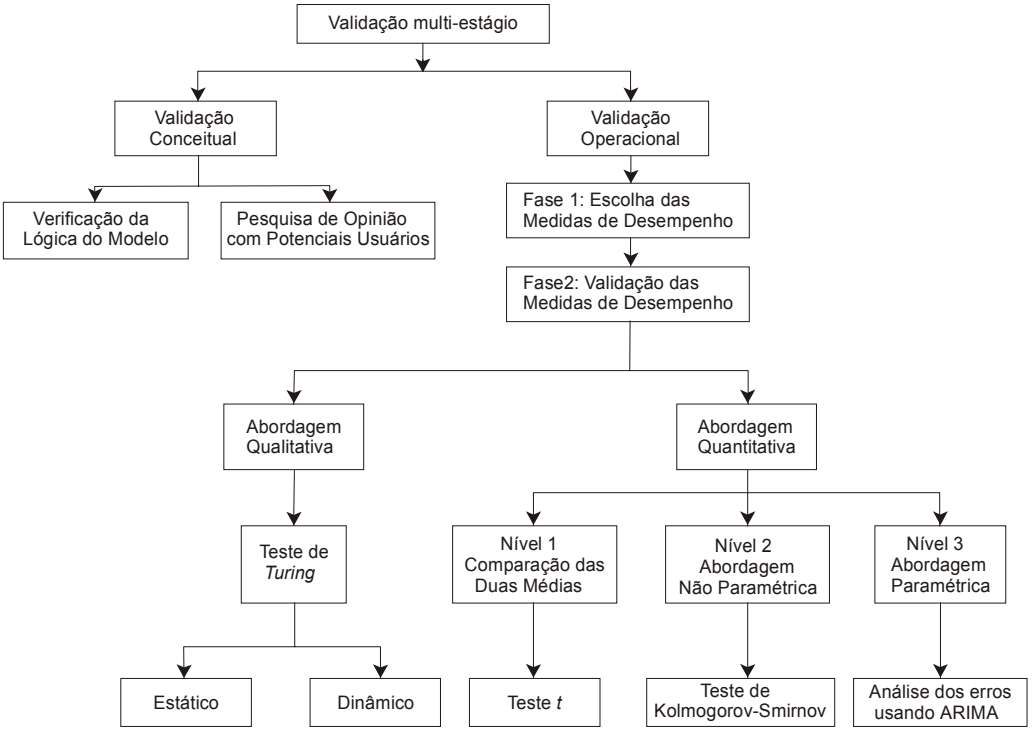


Figura 2.2: Estrutura de validação para modelos de simulação de alta fidelidade (Rao e Owen, 2000).

Na validação operacional, são feitas comparações quantitativas e qualitativas entre os resultados de medidas de desempenho obtidas com o modelo e valores reais, medidos no campo. As medidas de desempenho devem ser escolhidas pelo usuário para representar a aplicação pretendida do modelo, pois uma escolha errada pode levar a conclusões falhas a respeito da validação do modelo. As comparações qualitativas são feitas por meio de um teste de Turing, no qual representações gráficas dos resultados do modelo e dos valores observados no sistema real são mostrados simultaneamente a um especialista, ao qual se pede que indique qual provém do sistema real e qual provém do simulado. As comparações quantitativas são comparações entre médias através do teste *t* e de Kolmogorov-Smirnov (para o nível mais macro) e uma análise de erros usando ARIMA (para um nível mais micro).

2.4.2 Calibração

A calibração é o processo de ajuste dos valores dos parâmetros do modelo usando dados observados para que o modelo possa representar realisticamente os componentes específicos do sistema modelado e fica, basicamente, a cargo do usuário, já que o modelo deve ser calibrado para cada sistema que se pretende simular (Rakha *et al.*, 1996; Hellinga, 1998). Devido à complexidade da calibração dos modelos de simulação de tráfego, o processo de calibração é essencialmente heurístico em natureza e inclui

identificar os valores dos parâmetros que otimizem uma ou mais medidas de desempenho escolhidas pelo usuário para medir as diferenças entre a corrente de tráfego observada e a simulada (Rilett e Kim, 2001).

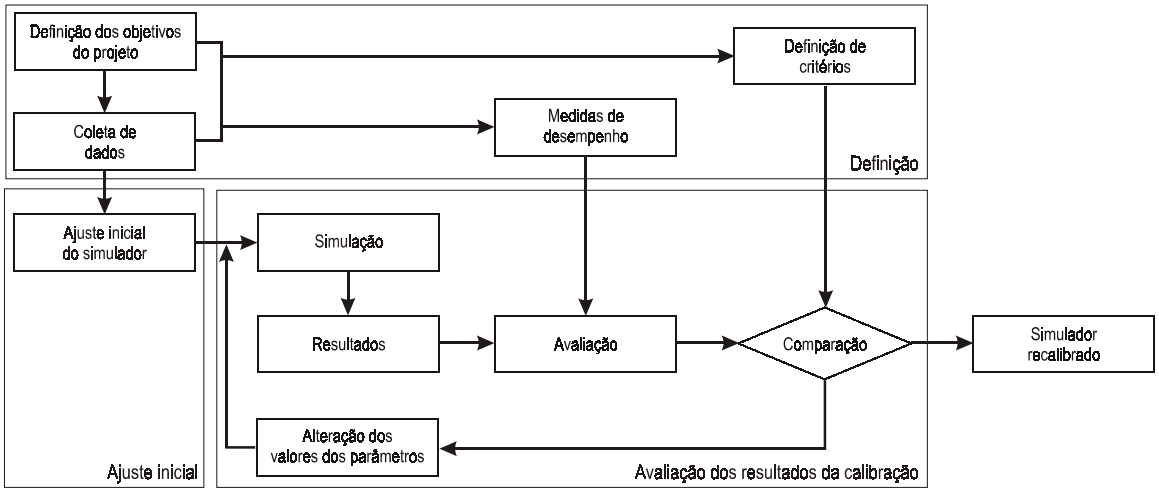


Figura 2.3: Processo de calibração para modelos de simulação de tráfego (Hellinga, 1998).

De acordo com Hellinga (1998), o processo de calibração pode ser dividido em três fases. A primeira fase compreende as tarefas e atividades realizadas antes de qualquer modelagem e inclui: a definição dos objetivos do estudo e da calibração; a identificação dos dados de campo necessários; a escolha das medidas de desempenho (que devem ser consistentes com o objetivo do estudo, com os dados disponíveis e com as limitações do simulador escolhido); e a especificação do critério para a avaliação do processo de calibração. A segunda fase consiste na calibração inicial dos parâmetros do simulador, com base nos dados disponíveis. Tipicamente, os parâmetros calibrados nesta fase incluem: a codificação da rede (incluindo a definição das zonas e dos nós); as características dos tramos da rede (por ex., a relação fluxo-velocidade-densidade de cada tramo); as características comportamentais dos motoristas (por ex., critérios de aceitação de *gaps* e para escolha de rotas); e as demandas entre as diversas origens e destinos da rede. Na terceira fase, os resultados produzidos pelo simulador são comparados aos dados disponíveis. Se o critério preestabelecido for satisfeito, então o modelo pode ser considerado adequadamente calibrado e pode ser usado para avaliar outros cenários. Do contrário, os valores atribuídos aos parâmetros do simulador devem ser modificados até que o critério preestabelecido seja satisfeito e o simulador possa ser considerado calibrado. A Figura 2.3 ilustra a estrutura do processo de calibração proposto.

2.5 O simulador INTEGRATION

O simulador Integration foi criado originalmente por Michel Van Aerde na Queens University, no Canadá, no final da década de 1980. Foi o primeiro modelo de simulação microscópica capaz de simular, de forma integrada, redes compostas por segmentos de vias expressas, vias arteriais, coletoras e locais; por cruzamentos controlados por semáforos, sinal "Pare" ou "Dê a preferência", ou sem controle; por zonas de entrelaçamento; e por trechos de convergência e divergência de fluxos (Demarchi, 2000). O Integration é um modelo de simulação microscópico que acompanha individualmente o movimento de todos os veículos simulados ao longo das suas viagem entre uma origem e um destino (Rakha, 2004a). A cada décimo de segundo, o Integration atualiza a posição longitudinal (ao longo dos tramos) e transversal (ao longo das faixas de tráfego) de todos os veículos simulados.

Vários estudos foram realizados com o Integration comprovando a sua eficiência como modelo de simulação de tráfego (Hellinga e Van Aerde, 1994; Rakha e Van Aerde, 1996; Hall *et al.,* 2000). As regras microscópicas que controlam o comportamento individual dos veículos na mudança de faixa no Integration são consistentes com observações empíricas (Al-Kaisy *et al*., 1999). A estimativa do consumo de combustíveis e emissões de poluentes pode ser avaliada com o uso do Integration (Rakha *et al.*, 2000; Ahn *et al.*, 2002). O estudo de operação de rodovias com faixas exclusivas para veículos com alta ocupação é possível (Bacon *et al*. 1994). Rampas de saída, seções de entrelaçamento e rampas de entrada podem ser simuladas (Prevedouros e Wang, 1999).

O modelo é capaz de simular fenômenos dinâmicos do tráfego, tais como ondas de choque, aceitação de *gaps* e entrelaçamento de fluxos, o que faz com que a densidade da corrente de tráfego possa variar ao longo de um tramo. O Integration é também capaz de variar de forma quase contínua a demanda e a alocação de tráfego ao longo da rede (Rakha, 2004). O Integration permite visualizar os fluxos simulados na tela do computador, o que torna seu uso bastante atrativo, pois permite acompanhar os fenômenos que nele estão ocorrendo e identificar eventuais erros de modelagem do sistema.

No Brasil, especificamente no Departamento de Transportes da USP – São Carlos, o Integration já foi utilizado para determinar o nível de serviço de praças de arrecadação de pedágio (Araújo, 2001), calcular a capacidade de processamento, atraso e espera média em diversos tipos de interseções rodoviárias em nível (Xerez, 2002) e avaliar o

desempenho operacional do tráfego de veículos em dispositivos rodoviários em nível nos níveis de serviço de A a E (Ortolani, 2003).

Em todos os casos citados, o Integration mostrou-se uma ferramenta computacional muito útil para a análise de cenários e estratégias operacionais. A seguir será apresentada a estrutura básica de funcionamento do Integration.

2.5.1 Representação de fluxos veiculares no INTEGRATION

O Integration é um modelo de simulação de tráfego microscópico, baseado em viagens em que o movimento de cada veículo é modelado individualmente (microscópico), podendo, no entanto, ser calibrado a partir de dados macroscópicos facilmente coletados, tais como fluxo e velocidade média (Rakha, 2004). Esta característica leva a alguns autores a classificá-lo como um modelo mesoscópico, que reúne tanto características de modelos microscópicos (que simulam veículos individualmente) como de modelos macroscópicos (que tratam as correntes de tráfego sem levar em conta os veículos que as formam).

A simulação de tráfego em uma rodovia de pista dupla inicia-se com a geração de todos os veículos individuais que serão simulados de maneira a satisfazer as taxas de partida macroscópicas estabelecidas pelo modelador no arquivo de dados de entrada do modelo.

O Integration especifica a demanda de tráfego como um histograma de série temporal, com taxa de partidas O/D para cada possível par O/D em toda a rede. Essa taxa de partida, que carregará a rede de tráfego com os veículos, pode ser totalmente aleatória, totalmente constante ou parcialmente aleatória e constante, de acordo com o determinado pelo usuário. Isso é obtido através dos headways gerados, que são usados para determinar os instantes de partida dos veículos simulados: se os headways for determinísticos, a taxa de partidas será determinística; se forem aleatórios, será aleatória; se forem formados por uma parcela constante e uma parcela aleatória, a taxa de partidas é parcialmente aleatória e constante.

Cada partida de veículo gerado é rotulada com o instante (horário) de partida, a origem e destino da viagem, o tipo do veículo e o número identificador do veículo. Este número pode ser utilizado para seguir um veículo ao longo de todo o caminho em direção ao seu destino final. Quando o relógio da simulação atinge o horário de partida de um veículo, uma chamada é feita para inserir aquele veículo na rede, em sua zona de origem. Deste ponto o veículo irá prosseguir, de tramo em tramo até o destino final.

A escolha da rota que os veículos irão seguir é definida através de uma lista, criada pelo programa durante a geração dos veículos, que contém os tramos a serem percorridos da origem até o destino final para cada veículo. O veículo após percorrer um tramo consulta essa lista, que contém a seqüência a ser percorrida, para saber qual o próximo tramo que se deve utilizar para alcançar o seu destino de forma mais eficiente. Quando seu percurso neste novo tramo está completo, o processo é repetido até alcançar o tramo que contenha o nó de destino.

A passagem do veículo no final de um tramo para o início do tramo seguinte irá depender da possibilidade do tramo seguinte acomodar esse novo veículo sem desrespeitar a densidade de congestionamento estabelecida pelo modelador para esse tramo. Assim, caso o tramo seguinte esteja ocupado, o veículo do tramo anterior deverá esperar no seu tramo até que ocorra um esvaziamento do tramo para que ela possa entrar.

No Integration os congestionamentos nos tramos são propagados para os tramos anteriores à medida que o volume de tráfego atinge a capacidade do tramo, que é calculada para cada faixa de tráfego como sendo o produto da densidade de congestionamento versus o comprimento do tramo.

2.5.2 Lógica de “car-following”

Durante a simulação em uma rede com mais de uma faixa de tráfego os veículos tendem a ocupar a faixa de tráfego onde existe o maior espaçamento, de forma que possam trafegar com maior velocidade possível. Essa velocidade é escolhida em função do espaçamento entre o veículo e o veículo que viaja na sua frente, na mesma faixa de tráfego, de acordo com um modelo de “car-following” específico para o tramo. Esse modelo de “car-following” determina a velocidade do veículo por meio de uma relação fluxo-velocidade macroscópica, definida para cada um dos tramos da rede, como ilustrado pela Figura 2.4.

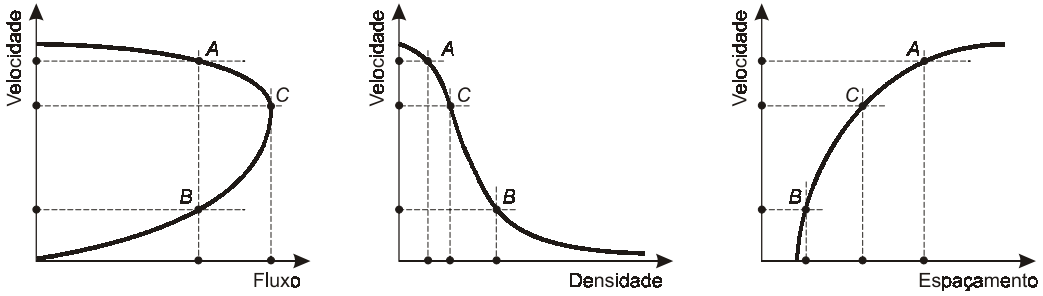


Figura 2.4: Determinação microscópica da velocidade do veículo a partir da relação fluxo-velocidade macroscópica (Rakha, 2004).

A relação entre o espaçamento s e a velocidade v (à direita na Figura 2.4) para um certo tramo pode ser obtida por (Demarchi, 2002):

$$s = \frac{1}{k_j}\left[\frac{v_f(v - v_c)^2}{v_c^2(v_f - v)}\right] + \frac{v}{q_c} \tag{2.1}$$

em que v_f : velocidade de fluxo livre do tramo;

k_j : densidade de congestionamento do tramo;

v_c : velocidade na capacidade para o tramo; e

q_c : fluxo na capacidade para o tramo.

A velocidade do veículo é determinada em função da distância entre o veículo e o que segue na sua frente – ou seja, pelo espaçamento entre os dois veículos. No ponto A, em que a corrente opera abaixo da capacidade, a velocidade é alta, porque o espaçamento é suficientemente longo para isso. No ponto B, onde o fluxo é o mesmo que o do ponto A, a velocidade é baixa, porque a corrente opera acima da capacidade e o espaçamento é pequeno. No ponto C, que corresponde à capacidade, a velocidade está entre a velocidade para as condições do ponto A e do ponto B. Nota-se que, conforme o espaçamento diminui, a velocidade do veículo seguidor também diminui até chegar a zero, o que ocorre quando o espaçamento é igual ao inverso da densidade de congestionamento. Da mesma forma, um veículo só viajará na velocidade livre se existir uma distância suficientemente grande entre ele e o veículo que viaja à sua frente. Mais detalhes do modelo de "car-following" usado pelo Integration podem ser encontrados em Van Aerde (1995), Van Aerde & Rakha (1995) ou em Demarchi (2002).

A lógica de "car-following" usada no Integration é aplicada tanto nos casos em que o fluxo encontra-se em equilíbrio como nos casos em que a corrente está num estado de transição. Essa situação ocorre sempre que a densidade da corrente está mudando de um valor alto para um baixo (ou vice-versa), devido a uma onda de choque, como, por exemplo, num semáforo ou num congestionamento.

Para explicar como o Integration simula este tipo de situação, deve-se ter em mente que é necessário definir uma relação fluxo-velocidade para todos os tramos da rede, sejam eles semaforizados ou não. Num nó onde exista um semáforo, um veículo virtual, parado, é colocado no final do tramo quando o período de vermelho efetivo começa. Com isso, um veículo que esteja chegando ao cruzamento é obrigado a reduzir sua velocidade até parar, em função da lógica de "car-following", já que o espaçamento fica

cada vez menor. Os veículos seguintes têm comportamento semelhante e se juntam à fila formada no semáforo, onde a concentração é a de congestionamento. Ao final do vermelho efetivo, o veículo virtual é retirado do nó semaforizado e o primeiro veículo da fila passa a ter um novo espaçamento, muito maior que o espaçamento de congestionamento, o que irá induzi-lo a acelerar, iniciando-se assim a fase de descarga da fila (Rakha, 2004).

2.5.3 Lógica de mudança de faixa

Para determinar se uma mudança de faixa deva ser realizada, o simulador calcula três velocidades alternativas. A primeira alternativa representa a velocidade potencial na qual o veículo pode continuar a trafegar na faixa em que se encontra, enquanto a segunda e a terceira alternativa representam as velocidades potenciais nas quais o veículo poderia trafegar nas faixas imediatamente à esquerda e à direita da faixa atual. Essas comparações de velocidade são feitas com base no espaçamento em cada faixa e em condições predefinidas para o veículo permanecer na faixa atual ou mover para a faixa adjacente. O veículo, então, muda para a faixa que permitirá a viagem com a maior das três velocidades potenciais.

Uma vez iniciada a manobra de mudança de faixa, uma mudança de faixa seguinte não é permitida até que se passe um certo intervalo de tempo. Este intervalo mínimo assegura que os veículos não executem um manobra atrás da outra representando um caso mais real do comportamento dos motoristas.

Para que não ocorra uma mudança de velocidade muito brusca nos casos em que um veículo entra em uma corrente de tráfego com baixa velocidade e encontra um espaçamento grande entre ele e o veículo a sua frente, o simulador usa um modelo de desempenho onde a magnitude da aceleração diminui com o aumento da velocidade do veículo. Assim à medida que a velocidade do veículo vai aumentando, sua aceleração vai diminuindo até o veículo se aproximar do veículo a sua frente ou atingir a velocidade de equilíbrio.

2.5.4 Lógica de desaceleração e de aceleração

O modelo de desempenho do Integration é função da interação entre forças de tração e de resistência ao movimento. Este modelo não considera trocas de marcha e a potência do motor é admitida constante para qualquer velocidade (Demarchi e Setti, 2000). A Figura 2.5 mostra uma representação esquemática das equações utilizadas no modelo e a Tabela 2.1 apresenta uma descrição das variáveis e parâmetros utilizados no modelo.

O modelo de desempenho é usado para simular o comportamento do veículo toda vez que ele deve acelerar ou quando ele está trafegando por uma rampa especificada pelo usuário

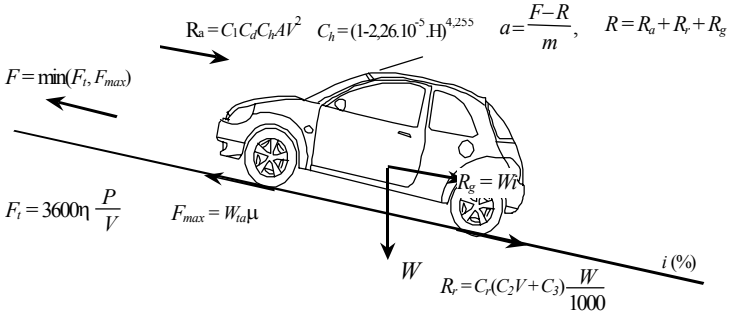


Figura 2.5: Diagrama de forças que atuam em um veículo em movimento

Tabela 2.1: Variáveis e parâmetros utilizados no modelo

Definição		Definição	
V	: velocidade (km/h)	**R**	: resistência total (N)
A	: aceleração (m/s^2)	$\mathbf{R_a}$	: resistência aerodinâmica (N)
F	: força motriz (N)	$\mathbf{R_r}$	: resistência de rolamento (N)
$\mathbf{F_t}$	: força de tração (N)	$\mathbf{R_g}$	: resistência de rampa (N)
$\mathbf{F_{máx}}$	: força de tração máxima (N)	$\mathbf{C_1}$	: constante = 0,047285
P	: potência do motor (kW)	$\mathbf{C_d}$	: coeficiente de arrasto aerodinâmico
η	: coeficiente de eficiência da transmissão	$\mathbf{C_h}$	: coeficiente de correção devido à altitude
W	: peso do veículo (N)	**H**	: altitude (m)
M	: massa do veículo (kg)	**A**	: área frontal (m^2)
$\mathbf{W_{ta}}$	: peso do veículo atuante no eixo motriz (N)	$\mathbf{C_2}$	: constante para tipo de pneu
μ	: coeficiente de atrito estático pneu-pavimento	$\mathbf{C_3}$	: constante para tipo de pneu
I	: inclinação da rampa (%)	$\mathbf{C_r}$	: coeficiente de rolamento

A lógica usada para simular a desaceleração dos veículos usa um modelo cinemático. Na simulação, calcula-se a desaceleração que atua sobre o veículo durante cada décimo de segundo e admite-se que durante este intervalo de 1/10, a desaceleração é constante. A desaceleração atuando sobre um veículo é calculada considerando-se o espaçamento entre ele e o veículo que está à sua frente. O mecanismo pode ser melhor entendido usando-se um exemplo em que o veículo líder está parado, por exemplo, numa fila de semáforo. Nesse caso, se as condições de contorno se mantiverem inalteradas, o veículo seguidor também deverá parar, posicionando-se a uma distância s_k do veículo líder ($s_k = 1/k_j$), conforme mostra a Figura 2.6. Se o espaçamento entre os veículos for X, então o veículo seguidor deverá desacelerar de y até 0, no espaço $X - s_k$. A desaceleração a, que irá atuar sobre o veículo seguidor naquele décimo de segundo é calculada por:

$$a = \frac{v_{\text{líder}}^2 - v_{\text{seguidor}}^2}{2(X - s_k)} \tag{2.2}$$

em que $v_{\text{líder}}$: velocidade do veículo que segue à frente;

v_{seguidor} : velocidade do veículo que segue o líder;

X : espaçamento entre o líder e o seguidor; e

s_k : inverso da densidade de congestionamento (k_j).

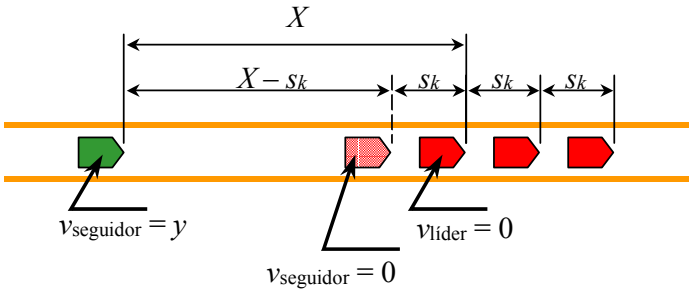


Figura 2.6: Cálculo da desaceleração que atua sobre um veículo (Rakha, 2004)

Numa simulação, o usuário pode usar veículos predefinidos no Integration ou definir as características de aceleração dos veículos usados. O Integration já dispõe de parâmetros de aceleração para 25 tipos de veículos diferentes: 21 automóveis ou "pick-ups" leves e pesadas; 3 caminhões (100 lb/hp, 200 lb/hp e 300 lb/hp) e ônibus. Caso o usuário prefira definir as características dos veículos, o arquivo "max_acc.dat" deve ser criado. Detalhes sobre esse arquivo podem ser encontrados no volume II do manual do Integration (Rakha, 2004).

2.6 Resultados da simulação

O Integration adota 0,1 s como o incremento do tempo da simulação. Por isso, a cada décimo de segundo, a simulação atualiza a posição longitudinal e transversal de cada veículo na corrente de tráfego simulada, fornecendo uma série de medidas de desempenho a respeito das viagens realizadas durante a simulação. Além dos resultados agregados fornecidos pelo programa, o usuário tem a opção de solicitar a geração de resultados desagregados, que podem ser estratificados em função das viagens completas (entre uma origem e um destino) realizadas durante a simulação ou em função das viagens realizadas dentro de cada tramo da rede (entre os nós inicial e final do tramo).

Os resultados agregados da simulação são fornecidos no arquivo 10 e os arquivos 15 e 16 fornecem, respectivamente, os resultados desagregados em função das viagens completas entre uma origem e um destino (arquivo 15) e em função das viagens

realizadas dentro dos tramo da rede (arquivo 16). O arquivo 10 é gerado em toda simulação; os arquivos 15 e 16 só são gerados se o usuário quiser. Nesses arquivos de saída, o Integration fornece, para cada veículo simulado:

- o seu número de identificação individual;
- a classe a que o veículo pertence,
- o nó de origem da viagem;
- o nó de destino da viagem;
- o horário programado para iniciar a viagem;
- o horário em que a viagem foi efetivamente iniciada;
- o tempo total de viagem entre a origem e o destino;
- o atraso;
- a distância total percorrida na rede;
- a velocidade média de viagem;
- o consumo total de combustível ao longo da viagem; e
- as emissões de poluentes: hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO_x).

Esses arquivos fornecem ainda outras medidas que não estão apresentadas aqui por não terem relação com a pesquisa relatada. O leitor pode consultar todos os tipos de resultados gerados pelo Integration nos arquivo 15 e 16 em Rakha (2004, volume II do manual). Dos parâmetros de saída gerados pelo Integration, quatro merecem uma discussão mais detalhada, já que foram usados nesta pesquisa: o tempo de viagem, o atraso, o consumo de combustível e as emissões de poluentes.

2.6.1 Cálculo do tempo de viagem e dos atrasos pelo Integration

O Integration determina o tempo de viagem no link para um dado veículo através de um "*cartão de tempo*", em que são registrados o instante de entrada e saída do link. O tempo de viagem em cada link é dado pela diferença entre esses horários registrados. O tempo de viagem de uma origem *i* para um destino *j* é obtido somando-se os tempos gastos em todos os links por onde o veículo trafegou para atingir seu destino final.

O atraso é calculado pela diferença entre o tempo de viagem real gasto pelo veículo e o tempo de viagem que ele levaria para realizar a viagem se estivesse sozinho na rede trafegando na velocidade de fluxo livre.

2.6.2 Estimativa do consumo de combustível e emissões de poluentes

Os modelos de consumo de combustíveis e emissões de poluentes do Integration utilizam como variáveis de entrada a velocidade instantânea e os níveis de aceleração, a partir dos quais são estimados o consumo de combustível e as emissões de HC, CO e NO_x a cada segundo. Esses modelos foram desenvolvidos a partir de dados coletados pelo Oak Ridge National Laboratory (ORNL). A expressão matemática deste modelo é (Rakha *et al.*, 2000; Ahn *et al.*, 2001):

$$In(MOE_e) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{3}\sum_{j=0}^{3}\left(L_{i.j}^{e} \times s^{i} \times a^{j}\right) & \text{para } a \geq 0 \\ \sum_{i=0}^{3}\sum_{j\neq 0}^{3}\left(M_{i.j}^{e} \times s^{i} \times a^{j}\right) & \text{para } a < 0 \end{cases} \tag{2.4}$$

em que MOE_e : consumo de combustível instantâneo (ml/s);

$L_{i,j}^{e}$: coeficiente de regressão do modelo para MOE "e" na velocidade i e na aceleração j, para acelerações positivas;

$M_{i,j}^{e}$: coeficiente de regressão do modelo para MOE "e" na velocidade i e na aceleração j, para acelerações negativas;

s : velocidade instantânea (km/h); e

a : aceleração instantânea (km/h/s).

No modelo de estimativa do consumo de combustíveis pode-se perceber que a aceleração tem um impacto significativo na taxa de consumo, especificamente em altas velocidades como resultado do elevado esforço do motor. A Figura 2.7 apresenta o modelo de consumo de combustível baseado no modelo implementado no Integration, que é comparado com os dados do ORNL.

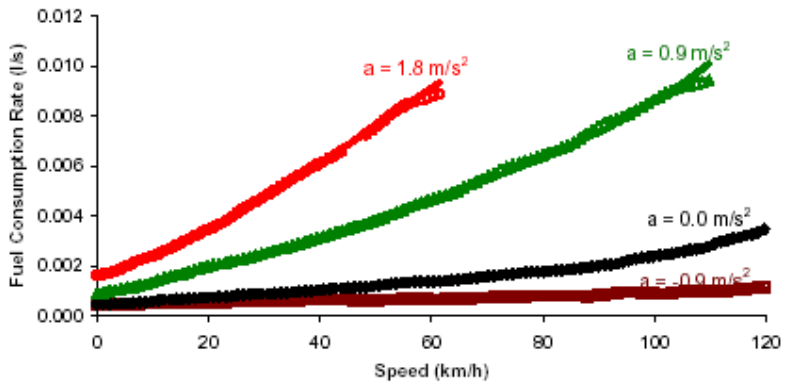


Figura 2.7: Modelo de consumo de combustível baseado no dados do ORNL (Rakha *et al.*, 2000; Ahn *et al.*, 2001)

O Integration também é capaz de fornecer as emissões instantâneas de poluentes para cada veículo, em intervalos de 1 segundo. O modelo de estimativa das emissões de poluentes, a exemplo do modelo de consumo de combustível, também é baseado na velocidade instantânea dos veículos e seus níveis de aceleração, como pode ser visto na Figura 2.8, na qual são comparados os resultados produzidos pelo Integration com os dados do ORNL. No modelo implementado no Integration, a idade dos veículos e o estado de manutenção do motor não são considerados.

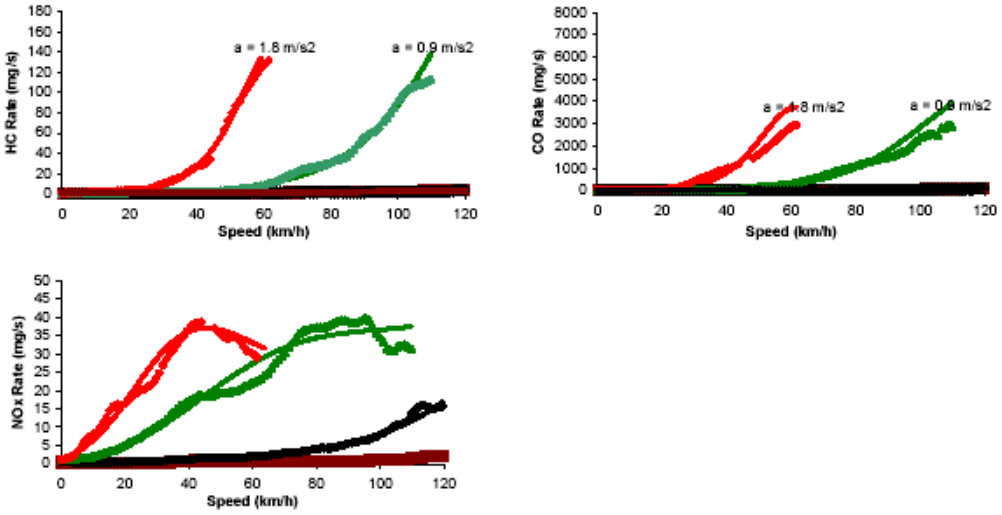


Figura 2.8 Modelo de emissões de baseado no dados do ORNL (Rakha *et al.*, 2000; Ahn *et al.*, 2001)

2.7 Arquivos necessários para simular um segmento de rodovia

Para que o modelo possa simular um corredor rodoviário de fluxo ininterrupto com múltiplas faixas de tráfego, o Integration requer obrigatoriamente um arquivo de controle, denominado arquivo mestre, mais cinco arquivos de entrada de dados: arquivo de nós, arquivo de tramos, arquivo de semáforo, arquivo de demanda e arquivo de incidente. O conteúdo de cada um desses arquivos é o seguinte:

- Arquivo mestre: especifica os parâmetros globais da simulação e contém as informações sobre os nomes dos arquivos de entrada e saída de dados, sua localização e o tempo de simulação;
- Arquivo de nós: contém as coordenadas cartesianas, as características e os atributos dos nós da rede;
- Arquivo de tramos: contém o nó de origem e de destinos de cada tramo e suas características, tais como comprimento, número de faixas, velocidade de fluxo livre, capacidade, velocidade na capacidade e densidade de congestionamento;

- Arquivo de semáforos: contém informações sobre os semáforos e a sua programação. Embora na simulação de fluxo ininterrupto não deva conter nenhum tipo de dado, o arquivo é necessário para a execução das simulações e deve estar vazio;
- Arquivo de demanda: contém a matriz origem/destino, indicando a magnitude de cada demanda, o instante de início e fim de sua geração, o padrão de geração das viagens e a composição veicular; e
- Arquivo de incidentes: contém informações que permitem simular a ocorrência de incidentes, tais como o fechamento temporário de uma faixa de tráfego. Nesse arquivo é identificado o tramo onde ocorre o incidente, o número de faixas bloqueadas e o tempo de bloqueio.

Além dos arquivos de entrada, o Integration requer que pelo menos o nome do arquivo de resultados agregados (arquivo 10) seja especificado no arquivo de controle (mestre). Caso o nome do arquivo de resultados agregados não seja especificado, o programa cria um arquivo denominado "`default.u10`" no qual são escritos os resultados agregados da simulação.

No capítulo 5, discute-se como o Integration foi recalibrado para simular o corredor estudado e como foram feitas as simulações dos cenários criados para representar alternativas para a operação do corredor estudado.

3 ESTIMATIVA DE DEMANDAS ORIGEM-DESTINO BASEADAS EM FLUXOS OBSERVADOS NA REDE

Como visto no capítulo anterior, um aspecto importante do simulador Integration é a sua capacidade de simular viagens realizadas entre nós de origem e nós de destino. Numa simulação, o usuário deve especificar a demanda entre origens e destinos. Essas demandas irão produzir os fluxos de veículos nos tramos da rede simulada. Para redes simples, como um segmento de rodovia de pista dupla sem nós de origem e destino intermediários, a determinação das demandas origem/destino (O/D) é trivial: os fluxos observados em cada direção correspondem às demandas O/D necessárias para a simulação. Em redes mais complexas, em que existem diversos nós de origem e destino, a obtenção de demandas O/D é mais difícil, principalmente se as informações disponíveis se resumem a fluxos nos tramos da rede. Neste capítulo é apresentada inicialmente uma revisão bibliográfica sobre estimação de matrizes de origem/destino sintéticas e sobre o QueensOD, o programa usado para obter a matriz O/D sintética usada no estudo de caso.

3.1 Introdução

A determinação das demandas de viagem das diversas origens para os diversos destinos é um parâmetro de entrada importante para o planejamento e operação de uma rede de tráfego. Com a estimativa dos volumes demandados de uma região para outra se pode, através de estratégias operacionais de gerência de tráfego, otimizar o uso da infra-estrutura existente, diminuindo a necessidade de grandes investimentos em novas infra-estruturas. As demandas de viagem entre origens e destinos são normalmente expressas através de uma matriz de viagens (também chamada de matriz origem/destino) em que as origens são colocadas nas linhas e os destinos, nas colunas (Ortúzar e Willumsen, 1994), como ilustrado na Figura 3.1. As células numa linha contém as viagens iniciadas na origem correspondente àquela linha cujos destinos são os correspondentes a cada

coluna. Na diagonal principal da matriz são colocadas, caso existam, as viagens cuja origem coincide com o destino (chamadas de viagens intrazonais).

O\D	**1**	**2**	**3**	**... *j***	**... *z***	$\sum_j T_{ij}$
1	T_{11}	T_{12}	T_{13}	... T_{1j}	... T_{1z}	O_1
2	T_{21}	T_{22}	T_{23}	... T_{2j}	... T_{2z}	O_2
3	T_{31}	T_{32}	T_{33}	... T_{3j}	... T_{3z}	O_3
.	.	.	.	... .	... .	.
.	.	.	.	... .	... .	.
.	.	.	.	... .	... .	.
i	T_{i1}	T_{i2}	T_{i3}	... T_{ij}	... T_{iz}	O_i
.	.	.	.	... .	... .	.
.	.	.	.	... .	... .	.
.	.	.	.	... .	... .	.
z	T_{z1}	T_{z2}	T_{z3}	... T_{zj}	... T_{zz}	O_z
$\sum_i T_{ij}$	D_1	D_2	D_3	... D_j	... D_z	$\sum_{ij} T_{ij} = T$

Figura 3.1: Matriz de viagens ou matriz origem/destino (Ortúzar e Willumsen, 1994)

As matrizes de origem/destino (O/D) podem ser obtidas através de métodos diretos tais como levantamento das placas dos veículos nos pontos de entrada e saída da rede, entrevistas domiciliares; levantamentos à beira da rodovia, entre outros. Matrizes O/D podem também ser estimadas através de métodos indiretos em que os dados de contagens de volume nos tramos da rede são utilizados para estimar as demandas entre os diversos pares O/D (Paramahamsan, 1999).

Os métodos diretos de determinação de matrizes O/D possuem algumas desvantagens significativas: são muito custosos, consomem muito tempo, exigem trabalho intensivo e causam transtornos aos viajantes. Além disso, em alguns casos não são capazes de capturar o comportamento do tráfego durante os picos de tráfego, importante para a operação de sistemas de tráfego (Paramahamsan, 1999).

Informações sobre demandas O/D não são rotineiramente disponíveis para estudos de simulação de redes de tráfego, ainda que a implantação de sistemas inteligentes de transportes (ITS, na sigla em inglês) esteja tornando mais fácil o levantamento de informações sobre demandas O/D através de sistemas de identificação automática de veículos (AVI, na sigla em inglês) baseados em leitura de “tags”, identificação de placas e rastreamento de telefones celulares (Dixon e Rilett, 2002). Para a maioria dos estudos, os dados disponíveis limitam-se aos fluxos de tráfego nos trechos em que foram feitas contagens manuais ou automáticas, através de sensores instalados temporária ou permanentemente. Como o Integration requer informações sobre as demandas de viagens entre origens e destinos, surge a necessidade de se estimar matrizes O/D a partir

de fluxos observados nos links da rede estudada. A seguir, faz-se uma revisão sobre métodos para estimativa de matrizes O/D através de métodos indiretos (isto é, baseados nos fluxos observados na rede).

3.2 Estimativa de matrizes O/D a partir de fluxos observados nos tramos da rede

Inicialmente, é conveniente fazer a distinção entre distribuição de viagens e geração de matrizes O/D sintéticas, como normalmente se denomina a estimativa de demandas entre origens e destinos baseadas em fluxos observados nos links de uma rede. Para isso, é conveniente usar a Figura 3.2, que mostra uma rede composta por 16 tramos e oitos nós. Os nós rotulados de A, B, C e D representam zonas de origem e destino; os links numerados de 1 a 8 são links virtuais usados para conectar as zonas A a D aos nós I a IV, que representam cruzamentos das vias rotuladas de 11 a 18. Se a determinação da matriz O/D for tratada como distribuição de viagens, apenas os fluxos nos links 1 a 8 seriam conhecidos e os fluxos observados nos tramos 1, 3, 5 e 7 representariam as viagens geradas nas zonas A, B, C e D, respectivamente, enquanto que os fluxos nos tramos 2, 4, 6 e 8, por sua vez, representariam as viagens atraídas pelas zonas A a D. Nos métodos tradicionalmente usados para estimar distribuição de viagens, as informações sobre os fluxos nos tramos 11 a 18 e as rotas usadas para se viajar entre uma origem e um destino não são consideradas explicitamente. Se o problema, contudo, for tratado como geração de matriz O/D sintética, as informações sobre rotas devem ser consideradas, já que a relevância do fluxo observado num dado link, para um dado par O/D, está fortemente correlacionada com a fração de veículos que viaja entre aquele par O/D usando o link em questão (Van Aerde *et al.*, 2003).

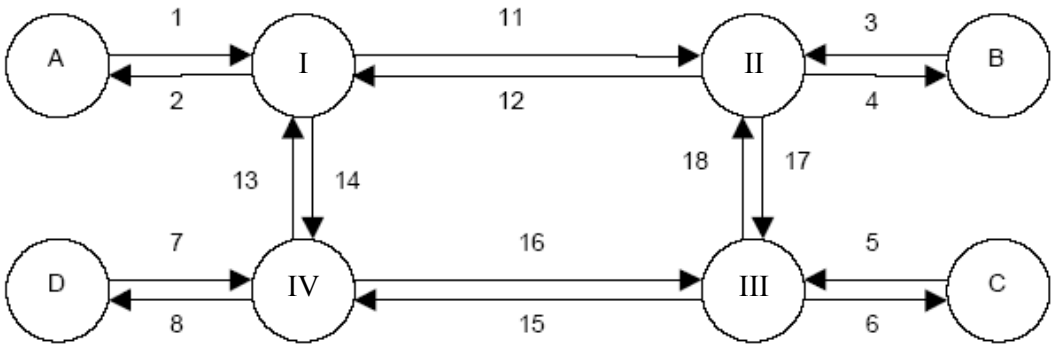


Figura 3.2: Rede com 8 nós e 16 tramos (Van Aerde *et al.*, 2003)

Além disso, na distribuição de viagens, o número total de viagens gerado ou atraído por uma cada zona costuma ser estimado através de modelos baseados no uso do solo e tipicamente fornecem estimativas do total médio de viagens no dia ou, mais raramente, do número médio de viagens realizadas durante o período de pico (Van Aerde *et al.*, 2003). Para a maioria das simulações de tráfego, é desejável dispor de demandas desagregadas a cada 15 minutos, o que não é possível fazer com modelos de geração e atração zonal tradicionais. Ainda que seja possível aplicar um fator de escala na demanda total diária para estimar a demanda para intervalos de 15 minutos, Van Aerde *et al.* (2003) sugerem que a utilização da matriz O/D obtida pela distribuição de viagens como uma semente para a estimação da matriz O/D sintética é uma abordagem melhor, pois permite incorporar as contagens de tráfego nos links ao processo de estimativa das demandas O/D.

Essa abordagem tem a vantagem de contribuir para a mitigação da subespecificação, que é um dos problemas mais sérios associados à geração de matrizes O/D sintéticas, pois, na maioria dos casos, o número de incógnitas supera o número de equações (Dixon e Rilett, 2002). Como o problema da estimativa de pares O/D indiretamente a partir da observação de fluxos nos tramos é subespecificado, há a possibilidade de existir mais de uma demanda O/D que replicam os fluxos observados. Um segundo problema é que, em muitos casos, as rotas dos veículos não são conhecidas, adicionando um nível de complicação na estimativa da demanda O/D. O terceiro problema é que raramente a demanda O/D verdadeira é conhecida o que torna extremamente difícil avaliar o quanto a estimativa da demanda O/D sintética está próxima da realidade (Rakha, Paramahamsan e Van Aerde, 1999).

Segundo Hellinga (1994), os métodos de estimativa de demanda O/D baseados na observação de fluxos de tráfego em tramos apresentam três vantagens em relação aos métodos diretos:

1. Com o crescente uso dos sistemas de gerência de tráfego, muitos centros urbanos têm monitoramento eletrônico em pelo menos parte da rede viária. Esse monitoramento eletrônico, tipicamente na forma de detectores de laços indutivos, é capaz de fornecer contagens contínuas de tráfego nos tramos quase que em tempo real. A disponibilidade desses dados torna mais atrativa a alternativa de usar métodos indiretos para estimar as demandas entre os pares O/D.

2. Os fluxos de tráfego nos links são a manifestações da interação das demandas O/D dentro da rede. Assim, as contagens nos links fornecem um reflexo direto da demanda O/D desconhecida. Além disso, essas contagens refletem o comportamento dinâmico, tanto espacial como temporal, dessa demanda.
3. As contagens fornecem restrições específicas para cada link no problema de estimativa de O/D, ao contrário das que ocorrem quando se estima O/D por agrupamento de zonas, em que o grau de agrupamento é determinado pelo nível da representação da rede de tráfego.

Os dados de fluxo de tráfego nos links necessários para a calibração dos métodos de estimativa de matrizes sintéticas podem ser obtidos através de sistemas de coletas de dados de laços indutivos, através de informações de arrecadação nos pedágios e também através de sistemas de identificação automática de veículos (AVI, da sigla em inglês). Os sistemas de identificação automática dos veículos podem ser através de transponders ("tags" eletrônicas), de telefones celulares e de reconhecimento das placas dos veículos (Dixon e Rilett, 2002).

Uma das desvantagens associadas com o uso de AVI para estimar demandas O/D é o fato que muitas viagens começando durante um intervalo *t* só terminam num intervalo posterior de tempo, o que faz com que as informações O/D para o intervalo *t* sejam incompletas. Outro problema é que apenas uma fração dos veículos podem ser identificados (por ex., só os equipados com "tags"), o que pode distorcer a amostra e, em conseqüência, as informações O/D para toda a população (Dixon e Rilett, 2002).

A coleta de dados de fluxo através de sensores de tráfego baseados em laços indutivos pode fornecer dados errôneos devido ao mau funcionamento dos sensores causados pela quebra de sinal do sistema, ruídos no sinal, extrapolação da capacidade de memória de armazenamento de dados, etc. Como a presença de dados errôneos na contagem dos volumes de tráfego influencia severamente a precisão da estimativa da matriz O/D, os modelos de estimação devem ser capazes de tratarem dados contendo erros de medidas (Nihan e Hamed, 1992).

Além dos erros de medidas do volume de tráfego na rede em estudo, durante o processo de construção, calibração e previsão da estimativa de demandas O/D sintéticas podem ocorrer mais três tipos de erros: (1) erros da amostra; (2) erros computacionais e (3) erros de especificação (Ortúzar e Willumsen, 1994). Os erros da amostra surgem porque as demandas devem ser estimadas usando conjunto de dados finitos. Reduzir esse tipo de erro pode ser muito custoso uma vez que ele é aproximadamente

inversamente proporcional à raiz quadrada do número de observações, isto é, para diminuir pela metade o erro é necessário quadruplicar o tamanho da amostra. Os erros computacionais aparecem porque os modelos de estimativa das demandas são geralmente baseados em processos iterativos na busca da solução ótima. Esse tipo de erro é geralmente menor em comparação com os outros tipos de erros, à exceção dos casos que tratam de redes congestionadas e problemas de equilíbrio entre oferta e procura em sistemas complexos. Os erros de especificação (tais como a inclusão de variáveis irrelevantes e omissão de variáveis relevantes) ocorrem basicamente devido ao desconhecimento do fenômeno a ser modelado ou a simplificações feitas no modelo por quaisquer razões. Em princípio, os erros de especificação podem ser reduzidos aumentando a complexidade do modelo utilizado – o que, por outro lado, pode induzir a outros tipos de erros.

3.3 Classificação dos modelos para estimativa de matrizes O/D a partir de fluxos de tráfego

Uma variedade de modelos tem sido desenvolvida para estabelecer matrizes de origem/destino baseado nas contagens de tráfego nos links. Esses modelos são denominados de modelos sintéticos (porque estimam as demandas da matriz O/D sem usar diretamente padrões de viagem observados a priori) e podem ser classificados em quatro categorias: modelos de gravidade, modelos de equilíbrio, modelos entrópicos e modelos estatísticos (Easa, 1993).

3.3.1 MODELOS DE GRAVIDADE

Os modelos de gravidade são chamados assim devido a sua analogia com o modelo gravitacional de Newton. Esses modelos partem da suposição que a demanda por viagens e suas rotas são influenciadas por fatores externos tais como o número total de viagens e a distância viajada (Ortúzar e Willumsen, 1994). Técnicas de regressão e leis de conservação de fluxo nos links são aplicadas para calibrar os parâmetros do modelo, de tal forma que a diferença entre o fluxo observado e o fluxo estimado seja minimizada. Entre as desvantagens dos modelos de gravidade inclui-se a necessidade de estimação de viagens realizadas fora da área de estudo, que devem ser subtraídas dos fluxos observados. Outra desvantagem é que esses modelos nem sempre conseguem levar em consideração o princípio de equilíbrio de Wardrop em redes congestionadas (Paramahamsan, 1999).

A formulação mais simples do modelo de gravidade é apresentada na Equação (3.1) em que T_{ij} é a demanda de tráfego de i para j, P_i e P_j são as populações da origem i e do destino j, d_{ij} a distância entre i e j e α um fator de proporcionalidade (Ortúzar e Willumsen, 1994):

$$T_{ij} = \frac{\alpha \cdot P_i \cdot P_j}{d_{ij}^2} . \tag{3.1}$$

Em formulações posteriores, as populações das zonas de origem e destino são substituídas pelo número total de viagens originadas em i (O_i) e destinadas a j (D_j) e a distância por uma função decrescente de impedância, $f(c_{ij})$, que tem por objetivo desestimular a viagem em função das distâncias, tempos ou custos (Ortúzar e Willumsen, 1994):

$$T_{ij} = \alpha \cdot O_i \cdot D_j \cdot f(c_{ij}) . \tag{3.2}$$

As versões mais populares das funções $f(c_{ij})$ são apresentadas pelas Equações (3.3), (3.4) e (3.5), cuja forma geral, para diferentes valores de seus parâmetros, é apresentada na Figura 3.3.

$$f(c_{ij}) = \exp(-\beta \cdot c_{ij}) \tag{3.3}$$

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^{-n} \tag{3.4}$$

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^{n} \cdot \exp(-\beta \cdot c_{ij}) \tag{3.5}$$

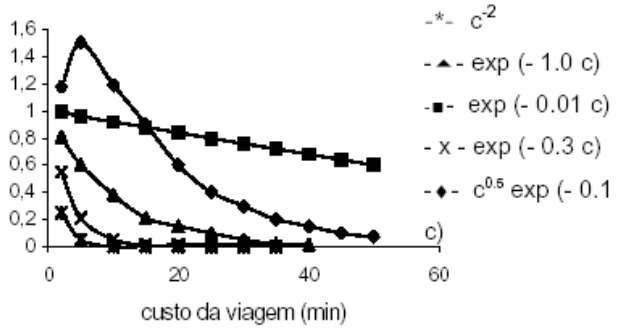


Figura 3.3: Diferentes funções de restrição. (Ortúzar e Willumsen, 1994)

Easa (1993) ressalta que os métodos de estimativa de matrizes O/D sintéticas baseados no modelo gravitacional são simples e foram criados com a intenção de serem aplicados para redes rurais ou interurbanas.

3.3.2 MODELOS DE EQUILÍBRIO

Esses modelos são baseados no princípio de equilíbrio dos usuários na alocação de fluxos de tráfego e são mais adequados para análises de áreas congestionadas e pequenas áreas urbanas (Easa, 1993). Em 1952, Wardrop apresentou dois princípios a respeito do comportamento do usuário e dos custos de transporte em redes congestionadas, que dão o suporte conceitual para os modelos de equilíbrio.

O primeiro princípio de Wardrop, considerando que cada usuário procura minimizar seus custos de transporte em uma viagem, afirma que "sob condições de equilíbrio, o tráfego em uma rede congestionada distribui-se pelas rotas de tal forma que nenhum usuário é capaz de reduzir seus custos de viagem escolhendo uma rota alternativa" (Wardrop, 1952, *apud* Ortúzar e Willumsen, 1994). Se todos os usuários percebem custos da mesma forma (isto é, não existem efeitos estocásticos), então pode-se afirmar que "sob condições de equilíbrio, o tráfego numa rede congestionada distribui-se de tal forma que todas as rotas usadas entre um par O/D têm custos iguais e mínimo, enquanto que todas as rotas não utilizadas tem custo maior ou igual ao das rotas usadas" (Ortúzar e Willumsen, 1994). Os fluxos de tráfego que satisfazem esse princípio são geralmente referidos como os fluxos "de equilíbrio dos usuários", já que cada usuário escolhe a melhor rota (a de custo mínimo) para si. Especificamente, um ponto de ótimo do equilíbrio dos usuários é atingido quando nenhum usuário pode diminuir seu custo de transporte através de uma ação unilateral.

Normalmente, os modelos para estimativas de matrizes O/D sintéticas baseados no equilíbrio dos usuários pressupõem que as rotas são conhecidas a priori e que já se dispõe de uma matriz O/D inicial (chamada de matriz alvo). O modelo itera entre geração de pares O/D e alocação de tráfego até que uma solução seja obtida, de tal forma que tanto as restrições relativas ao número de viagens como às contagens nos links sejam satisfeitas. As soluções obtidas tendem a ser muito parecidas com a matriz alvo (Paramahamsan, 1999).

A principal desvantagem dos modelos de equilíbrio é que podem existir múltiplas matrizes O/D que produzem o mesmo padrão de tráfego observado nos links, o que requer que se façam suposições sobre a distribuição a fim de que se possa obter a matriz O/D mais provável entre as soluções possíveis. Outros aspectos negativos incluem a necessidade de se dispor de contagens para todos os tramos da rede, o que nem sempre é viável. Em outros casos, a natureza altamente não linear dos modelos faz com que nem sempre convergência para uma solução seja possível. De qualquer forma, os modelos de

equilíbrio só são aplicáveis a redes pequenas, uma vez que a obtenção de uma solução aceitável para redes grandes requer recursos computacionais de monta – ao que pode ser atribuída a relativa impopularidade desta classe de modelos (Paramahamsan, 1999).

3.3.3 MODELOS ENTRÓPICOS

Os modelos entrópicos estimam a matriz O/D mais provável através de contagens de tráfego e outras informações, como por exemplo, uma matriz semente. Os pioneiros na estimativa de matrizes sintéticas utilizando a abordagem entrópica foram Willumsen (1978), Van Zuylen (1979) e Van Zuylen & Willumsen (1980).

A abordagem entrópica assume que a probabilidade de uma distribuição particular de viagem ocorrer é proporcional ao número de possibilidades de se obter a distribuição. A matriz O/D mais provável é definida como a que maximize a entropia (Easa, 1993).

O número de possibilidades de se obter uma distribuição de viagem pode ser matematicamente representado por:

$$W = \frac{T!}{\prod_{ij} T_{ij}!} \tag{3.6}$$

em que W : é o número de possibilidades de se obter uma dada distribuição;
T : é o total de viagens observadas no sistema; e
T_{ij} : é o número de viagens de i para j.

Como a abordagem entrópica assume que todas as possibilidades têm a mesma probabilidade de ocorrer, a distribuição mais provável de viagens é a que apresenta o maior número de combinações possíveis de se obter a distribuição. Para resolver o problema da maximização da entropia, aplica-se o logaritmo na Equação (3.6) sem modificarmos seu valor máximo:

$$\log W = \log \frac{T!}{\prod_{ij} T_{ij}!} = \log T! - \sum_{ij} \log T_{ij}! \tag{3.7}$$

Utilizando-se a aproximação de Stirling em que $\log X! = X \cdot \log X - X$ tem-se:

$$\log W = \log T! - \sum_{ij} \left(T_{ij} \log T_{ij} - T_{ij} \right). \tag{3.8}$$

Admitindo-se que o número total de viagens na rede em estudo é constante, o termo $\log T!$ pode ser omitido do problema de otimização e a distribuição de viagens mais provável (T_{ij}) é a que maximiza a Equação (3.9):

$$\text{Max } \log W = -\sum_{ij}\left(T_{ij}\log T_{ij} - T_{ij}\right) \tag{3.9}$$

$$\text{Sujeito a} \quad V_a = \sum_{ij} T_{ij} \cdot p_{ij}^{a}$$

$$T_{ij} \geq 0$$

Nos casos em que existem informações adicionais na forma de valores conhecidos previamente, por exemplo, uma matriz de viagens *t*, o problema pode ser reformulado com essa informação originando a Equação (3.10):

$$\log W = -\sum_{ij}\left(T_{ij}\log\left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}}\right) - T_{ij} + t_{ij}\right) \tag{3.10}$$

3.3.4 MODELOS ESTATÍSTICOS

Os modelos estatísticos tentam estimar as matrizes de viagens diretamente de informações prévias baseadas em técnicas estatísticas. Estes modelos empregam métodos de maximização da probabilidade, técnicas de estimação dos mínimos quadrados ou inferência bayesiana para atingir seus objetivos (Abrahamsson, 1998). A principal vantagem dos modelos estatísticos na determinação de matrizes de viagem é que eles levam em consideração a natureza estocástica dos dados, embora ignorem a probabilidade das viagens serem feitas (Paramahamsan, 1999). Os modelos estatísticos não são tão populares na prática como os modelos de equilíbrio e os entrópicos (Easa, 1993).

Embora exista disponível no mercado uma grande variedade de abordagens e modelos de estimativa de matrizes de viagens OD, Timms (2001) recomenda que os engenheiros de tráfego reexaminem os modelos já desenvolvidos antes de utilizá-los, a fim de reavaliar se suas suposições prévias, relacionadas aos pesos dados às diversas fontes de informações e como os dados de entrada foram levados em conta nos modelos, são justificáveis ou precisam ser revistas.

Uma descrição mais detalhada dos modelos de estimação de matrizes de origem/destino usando contagem de tráfego pode ser encontrada em Abrahamsson (1998).

3.4 Estimativa de matriz O/D sintética usando o QueensOD

QueensOD é um modelo para estimar demandas sintéticas de origem/destino baseado nos fluxos de tráfego observados nos links, desenvolvido originalmente por

Michel Van Aerde (1998) na *Queen's University*, Canadá. O modelo também utiliza contagens de movimentos de conversões observados nos links, tempos de viagens nos links e informações adicionais de escolha das rotas pelos motoristas para estimar a matriz O/D. O modelo foi criado para subsidiar o uso do modelo de simulação de tráfego Integration. Os dois modelos compartilham a mesma estrutura e formato de arquivos de dados, sendo, contudo independentes – isto é, não é necessário usar o modelo Integration para se estimar matrizes O/D com o modelo QueensOD, bem como não é necessário usar o QueensOD para se simular uma rede de tráfego com o Integration.

O QueensOD é uma implementação computacional de um modelo entrópico que estima a matriz O/D de máxima verossimilhança resolvendo numericamente a equação:

$$MaxT \ln\left(\frac{T}{t}\right) - \sum_{ij} T_{ij} \ln\left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}}\right) - \sum_{ij}\left\{\lambda_{ij} 2\left[\sum_{a}\left(V_a p_{ij}^a\right) - \left(\sum_{a} p_{ij}^a \left(\sum_{ij} T_{ij} p_{ij}^a\right)\right)\right]\right\} \tag{3.11}$$

em que T: número total de viagens ($\Sigma\Sigma\, T_{ij} = \Sigma\, P_i = \Sigma\, A_j$)

t: semente (informação prévia) do número total de viagens;

T_{ij}: número estimado de viagens entre origem i e destino j;

t_{ij}: semente do número de viagens entre origem i e destino j;

V_a: fluxo observado no link a;

p_{ij}^a: parcela das viagens de i para j que usam a rota a; e

λ_{ij}: multiplicador de Lagrange.

A solução numérica inicia-se pela construção de uma árvore de caminhos mínimos e por uma atribuição do tipo tudo-ou-nada das demandas da matriz semente. Dependendo da escolha do usuário, calcula-se o erro absoluto, relativo ou de Poisson para os fluxos nos links. Esses erros são usados para cômputo de fatores de ajuste que são usados para alterar a matriz O/D semente, assim, se o fluxo em um link está subestimado, o fator de ajuste diminui o tempo de viagem nesse link e se o fluxo está superestimado, o fator de ajuste aumentará o tempo de viagem nesse link. Este processo é iterativo e continua até que se satisfaça pelo menos um de dois critérios: erro menor que um mínimo ou número de iterações. Se mais de uma árvore de caminhos mínimos deve ser usada, o programa constrói um novo conjunto de árvores de caminho mínimo e gradualmente transfere o tráfego para a segunda árvore. A função objetivo para duas árvores é computada de modo análogo ao descrito para o caso em que uma única árvore é usada. O processo de

construção de árvores e procura da solução ótima continua até que todas as árvores possíveis tenham sido exploradas (Van Aerde *et al.*, 2003).

3.4.1 Arquivos de entrada e saída do QueensOD

Para estimar demandas de tráfego de origem/destino, o QueensO/D requer até nove tipos de arquivos de entrada de dados, além do arquivo de controle (Tabela 3.1). Desses nove arquivos de entrada, apenas três são indispensáveis para a execução do modelo: o arquivo de nós, o arquivo de tramos e o arquivo de fluxos de tráfego. Os dois primeiros arquivos servem para descrever a rede, enquanto que o terceiro fornece as contagens de tráfego nos tramos da rede. Como o Integration e o QueensOD são compatíveis, os arquivos de nós e de tramos do Integration podem ser usados diretamente no QueensOD, já que o formato destes arquivos é o mesmo nos dois programas (Van Aerde, 1998).

Tabela 3.1: Arquivos de entrada de dados do QueensO/D

Arquivo	Descrição	Importância
1	Arquivo de nós	Indispensável
2	Arquivo de tramos	Indispensável
3	Arquivo de semáforos	Opcional
4	Arquivo de demanda O/D semente	Opcional
5	Arquivo de incidentes	Opcional
6	Arquivo de fluxos observados nos links	Indispensável
7	Arquivo de movimentos de conversões	Opcional
8	Arquivo de caminhos a serem utilizados pelo tráfego	Opcional
9	Arquivo de demanda O/D exata	Opcional

O arquivo de controle serve para o usuário determinar o tipo de método a ser utilizado pelo modelo na estimativa da matriz O/D sintética, o número de iterações a serem realizadas, o número de árvores a serem construídas, o número de passos a serem considerados na mudança da demanda de uma árvore de caminhos mínimos para outra, o fator de ajuste dos tempos de viagens nos links, os nomes dos arquivos de entrada e saída, etc. Mais detalhes sobre os arquivos de entrada podem ser encontrados no manual (Van Aerde, 1998).

O QueensOD fornece resultados diretamente na tela do computador durante a execução do programa e através de arquivos texto. Durante a execução do programa, são fornecidas atualizações periódicas do estado da simulação na tela do computador, mostrando o número da árvore de caminhos mínimos sendo usada, o número do passo, o número da iteração, o peso da árvore e o erro médio do fluxo nos links.

Nos arquivos de resultado, o QueensOD fornece as estimativas das demandas O/D, as árvores de caminho mínimo, as contagens nos links e os movimentos de conversões nos nós num formato compatível com os arquivos de entrada do Integration. Isso permite que os arquivos de saída do QueensOD sejam usados diretamente pelo Integration, facilitando a integração entre os dois modelos. Além disso, o QueensOD produz outros arquivos que fornecem dados para a análise dos resultados da estimativa da matriz O/D. Esses dados incluem os erros médios dos fluxos nos links para cada iteração, a matriz O/D semente utilizada, a demanda O/D estimada, os fluxos nos links e os movimentos de conversões. Um exemplo de arquivo de resultados gerado pelo programa é apresentado na Figura 3.4 (Van Aerde, 1998).

```
Listing of estimated and actual link flows


 Link flows resulting from estimated O-D
 - Note: Links not listed have both no observed nor estimated
flow.

 Period Link TM     Sat    Cap    Obs    Est      V/C  (obs-est)
   1       1  4    8800   8800   2566   2568    0.292      -2
   1       2  4    8800   8800   3755   3748    0.426       7
   1       3  4    8800   8800   1952   1949    0.222       3
   1       4  4    8800   8800   2286   2285    0.260       1
   1       7  4    6900   6900   2566   2568    0.372      -2
   1       8  4    6900   6900   3755   3748    0.543       7
   1       9  4    6900   6900   2566   2568    0.372      -2
   1      10  4    6900   6900   3755   3748    0.543       7
   .       .  .      .      .      .      .        .        .
   .       .  .      .      .      .      .        .        .
   .       .  .      .      .      .      .        .        .
   1     217  4   11500  11500   2899   2868    0.249      31
```

Figura 3.4: Amostra do arquivo de saída 16 do QueensOD

No capítulo 5, que trata do estudo de caso, discute-se como o QueensOD foi usado para estimar demandas origem/destino sintéticas que reproduzem os fluxos observados nos tramos da rede simulada.

4 SUSTENTABILIDADE DE CORREDORES RODOVIÁRIOS

Neste capítulo, é apresentada uma discussão sobre desenvolvimento sustentável e transporte sustentável mostrando as diferenças entre o planejamento convencional e o sustentável. A seguir, discutem-se os aspectos relacionados à quantificação da sustentabilidade de sistemas de transporte e por fim o capítulo se encerra com a construção de índices de sustentabilidade de transportes.

4.1 Desenvolvimento sustentável e os sistemas de transporte

Desenvolvimento sustentável pode ser definido como uma forma de desenvolvimento que assegura equidade entre gerações, uma vez que busca atender às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem a suas próprias necessidades. Os conceitos e princípios associados ao desenvolvimento sustentável se apóiam no tripé desenvolvimento social, desenvolvimento econômico e preservação ambiental (Brundtland Comission, 1987 apud François, 200?).

O desenvolvimento social busca conciliar atividades e processos de desenvolvimento com valores culturais e atender às expectativas da sociedade, tendo a equidade social como princípio de distribuição e justiça. O desenvolvimento econômico tem como princípio a qualidade de vida acima da quantidade produtiva das atividades econômicas. A preservação ambiental visa a conservação dos ecossistemas e manejo racional do meio ambiente e dos recursos naturais (Brundtland Comission, 1987 apud François, 200?).

O transporte sustentável pode ser encarado como uma expressão do desenvolvimento sustentável no setor de transportes. Um sistema de transporte sustentável pode ser definido como aquele no qual o consumo de combustível, as emissões dos veículos, a segurança, o congestionamento e os acessos econômicos e

sociais são de tais níveis que eles podem ser mantidos indefinidamente, sem comprometer a capacidade de gerações futuras satisfazer suas próprias necessidades de transporte (Richardson, 1999).

4.2 Determinação da sustentabilidade dos sistemas de transporte

O transporte sustentável pode ser considerado como um dos conceitos mais discutidos, mas menos incorporados na análise de sistemas de transporte (Lindquist, 1998). Os conceitos e princípios associados com o desenvolvimento sustentável e o transporte sustentável são bem documentados e encontram apoio em muitos segmentos da sociedade, inclusive agentes públicos e políticos. Os conceitos relacionados com a sustentabilidade dos sistemas de transporte se ajustam às dimensões econômicas, sociais e ambientais do desenvolvimento sustentável e incluem aspectos como segurança, emprego, produtividade, acessibilidade, equidade social, proteção ambiental, etc. O problema é como incorporar esses conceitos ao planejamento de transportes e à tomada de decisões sobre sistemas de transporte (Zietsman *et al.*, 2003). Na Tabela 4.1 são apresentadas as principais diferenças entre o planejamento convencional e o planejamento sustentável de transportes.

Tabela 4.1: Diferenças entre planejamento convencional e sustentável de transportes (Litman, 1999)

Aspecto	Planejamento convencional	Planejamento sustentável
Transporte	Define e mede o transporte principalmente em termos de viagem dos veículos	Define e mede o transporte em termos de acessibilidade
Objetivos	Maximizar a capacidade para satisfazer a demanda de tráfego prevista	Usar análises econômicas para determinar políticas e investimentos ótimos
Envolvimento do público	Modesto para moderado: o público é convidado para comentar pontos específicos no processo de planejamento	Moderado para alto: o público é envolvido em muitos pontos no processo de planejamento
Custos	Considera os custos para as agências específicas ou níveis de governo	Considera todos os custos, incluindo os custos de outros níveis de governo e custos para as empresas
Custos dos usuários	Considera o tempo do usuário, o custo de operação do veículo e tarifas de pesagem e pedágios	Considera o tempo do usuário, o custo de operação e propriedade do veículo e tarifas de pesagem e pedágios
Custos externos	Pode considerar o custo da poluição do ar local	Considera a poluição local e global, os congestionamentos, os prejuízos dos acidentes não indenizados, impactos nos usuários de outras rodovias e outros impactos identificados
Equidade	Considera uma abrangência limitada de questões de equidade. Adiciona equidade principalmente pelo transporte público subsidiado	Considera uma ampla gama de questões de equidade. Favorece políticas de transporte que melhoram o acesso para os pedestres, ciclistas e a população em geral.
Demanda	Define demanda de viagem baseado nos custos para os usuários	Define demanda de viagem baseada em vários níveis de custos aos usuários
Geração de tráfego e indução de viagens	Ignora completamente ou pode incorporar somente um número limitado de realimentação do tráfego dentro do modelo	Leva em conta o modelo e a avaliação econômica das políticas alternativas e dos investimentos

Integração com o planejamento estratégico	Considera comumente os planos de uso do solo como entrada do modelo de transporte	Decisões individuais de transporte são selecionadas para dar suporte as visões estratégicas da comunidade. As decisões são reconhecidas como tendo impactos no uso do solo
Política de investimento	Baseada nos mecanismos existente de financiamento	O planejamento de baixo custo permite que os recursos sejam usados para a solução mais eficiente
Preço	As rodovias e estacionamentos são de graça ou taxadas para se recuperar os custos investidos	As rodovias e estacionamentos são taxados para recuperar os custos e os preços são baseados no custo marginal para encorajar a eficiência da economia
Gerenciamento da demanda de transporte	Usa gerenciamento apenas onde o aumento da capacidade é considerado inviável	Implementa o gerenciamento sempre que possível. A expansão da capacidade apenas ocorre onde o gerenciamento não é eficiente.

A implementação dos conceitos do transporte sustentável no processo de planejamento e tomada de decisões em transportes, entretanto, tem sido lenta e sem muito sucesso, principalmente em função da dificuldade em quantificar os efeitos de cada alternativa em termos da sustentabilidade (Zeitsman e Rilett, 2000; Peake e Hope, 1994). A dificuldade em quantificar os aspectos da sustentabilidade de um sistema de transporte deve-se, segundo Zeitsman e Rilett (2002), a diversos fatores, entre os quais ressaltam-se: (a) falta de clareza e entendimento dos objetivos e escopo das atividades necessárias para quantificar o grau de sustentabilidade de um sistema de transportes; (b) falta de diretrizes para identificar as medidas de desempenho apropriadas para quantificar a sustentabilidade de um sistema de transportes; (c) falta de modelos e técnicas de análise capazes de calcular corretamente os valores para as medidas de desempenho escolhidas; e (d) a dificuldade em tomar decisões, de forma equilibrada e consistente, com base em medidas de desempenho quantitativas (caso elas estejam disponíveis) já que pouco se sabe sobre os "trade-offs" entre os diversos aspectos da sustentabilidade. Zeistman (2000) lista três desafios com relação à quantificação da sustentabilidade de um sistema de transporte: identificar medidas de desempenho apropriadas, quantificá-las e usá-las na tomada de decisões.

Na escolha das medidas de desempenho, é muito importante não confundir metas e objetivos. As metas são o que a sociedade deseja, enquanto objetivos são coisas que ajudam a atingir as metas (Litman, 2003). Como exemplo, pode-se citar a riqueza e o bem-estar, em que o bem-estar é a meta final da sociedade enquanto a riqueza é uma medida substituta utilizada para ajudar a medir o contentamento da sociedade (Litman, 2003). Com relação ao setor de transportes, pode-se exemplificar a diferença entre meta e objetivo demonstrando a diferença entre tempo de viagem e acessibilidade. O desejo final da sociedade é a acessibilidade para obter mercadorias, serviços e atividades, mas

como é difícil medir isto, os planejadores de transporte utilizam como medida substituta o tempo de viagem com o objetivo de minimizá-lo (Litman, 2003).

O desafio de quantificar adequadamente as medidas de desempenho pode ser superado utilizando-se modelos que sejam capazes de representar o sistema real de uma forma suficientemente realística. Os modelos usados na análise do transporte sustentável incluem modelos de planejamento de transporte, modelos de simulação de tráfego, modelos de impacto do transporte no meio ambiente e modelos econômicos. Esses modelos permitem a quantificação de medidas de desempenho que dificilmente seriam possíveis de serem coletadas diretamente em campo como, por exemplo, o atraso sofrido pelos veículos ao realizarem suas viagens (Zietsman, 2000).

Usar medidas de desempenho no processo de tomada de decisão no contexto do transporte sustentável representa um desafio, porque os sistemas de transporte são complexos e os objetivos econômicos e ambientais são conflitantes. Técnicas de avaliação baseadas em conceitos estáticos e lineares, como, por exemplo, técnicas de análise de custo-benefício, não são adequadas porque os efeitos secundários causados pela dinâmica do sistema não são levados em consideração (Schade e Rothengatter, 2001).

Existem muitos fatores que influenciam a sustentabilidade dos sistemas de transporte, dentre os quais pode-se citar: a segurança, a mobilidade, o consumo de combustível, os congestionamentos e as emissões de poluentes. Cabe ao responsável pelo sistema de transporte decidir quais serão os níveis aceitáveis de cada fator (Richardson, 2000). Essa decisão deve levar em consideração o efeito combinado desses fatores, pois embora o impacto de um fator isoladamente pareça ser modesto, o impacto considerando todos os fatores pode ser grande (Litman, 2000).

Ao mesmo tempo em que indicam a existência de diversas medidas de desempenho que podem ser usadas para quantificação da sustentabilidade de sistemas de transporte, Zeitsman *et al.* (2003) apontam dois problemas associados a isso: a dificuldade causada pelo excesso de informação e a dificuldade em se lidar com medidas de desempenho muito complexas, que só são adequadamente compreendidas por técnicos especializados. Por isso, os autores insistem na necessidade de se criar um procedimento para identificar um número adequado de medidas de desempenho que, ao mesmo tempo em que sejam facilmente compreendidas por todas as partes envolvidas no processo decisório, sejam também capazes de capturar os objetivos do transporte sustentável.

4.2.1 Medidas de desempenho para o transporte sustentável

Dentro do contexto do desenvolvimento sustentável e do transporte sustentável, as medidas ou indicadores de desempenho apresentam um papel importante, pois fornecem subsídios para a tomada de decisões em todos os níveis e contribuem para a obtenção de uma integração auto-regulatória entre os sistemas ambientais e de desenvolvimento (OECD, 1997). As medidas de desempenho facilitam a comunicação e a compreensão de alternativas de ação e são capazes de traduzir dados e estatísticas em informação sucinta que pode ser fácil e prontamente compreendida e utilizada por cientistas, administradores, agentes públicos e políticos e pela população em geral (Gannon e Shalizi, 1995).

As aplicações mais importantes das medidas de desempenho incluem: (a) fornecer uma perspectiva ampla das alternativas de ação; (b) avaliar o desempenho de um sistema ou instalação; (c) calibrar modelos; (d) identificar problemas; (e) desenvolver e avaliar melhorias; (f) formular programas e estabelecer prioridades; (g) educar um conjunto amplo de grupos de interesse; e (h) estabelecer políticas de ação (Pratt e Lomax, 1996; EPA, 1996). Pode-se perceber que as medidas de desempenho servem principalmente para fornecer subsídios, em termos quantitativos, para a tomada de decisões e para o monitoramento das ações relacionadas às decisões tomadas.

4.3 Índice de sustentabilidade

Uma das dificuldades associadas à quantificação da sustentabilidade de sistemas de transporte é a dificuldade causada pelo excesso de informação, causada pela utilização simultânea de um número grande de medidas de desempenho (Zietsman *et al.*, 2003). O uso de um índice de sustentabilidade pode resolver esse problema.

Um índice é uma agregação ponderada de um conjunto de medidas de desempenho para produzir um indicador composto, normalmente usado para acompanhar o progresso em direção a uma meta preestabelecida (OECD, 1997). Em transportes, os índices têm sido tradicionalmente usados para avaliar diversos aspectos, tais como a qualidade de pavimentos e da infraestrutura, do grau de congestionamento, etc. As vantagens do uso de índices incluem: (a) facilidade de uso; (b) facilidade de compreensão; e (c) capacidade de reduzir a sobrecarga de informações que normalmente está associada ao uso de um conjunto extenso de medidas de desempenho (Lomax *et al.*, 1997). Por outro lado, existem problemas associados ao uso de índices, nos quais incluem-se: (a) possibilidade de mascarar e distorcer informações e estatísticas usadas na sua

composição; (b) robustez potencialmente limitada espacial e temporalmente; e (c) falta de clareza acerca do propósito para o qual o índice foi criado, como ele foi criado e por quem ele foi criado (Houghton, 1998).

São poucos os autores que propuseram índices para avaliação da sustentabilidade de sistemas de transporte. Litman (1997) e Black (2000) propuseram índices com este propósito. O índice proposto por Litman (1997) é composto por 14 medidas de desempenho que incluem desde características pessoais das viagens até o desempenho do sistema de transportes. O valor do índice proposto por Black (2000) é computado usando-se análise de componentes principais (PCA), a partir de: (a) dependência em combustíveis fósseis, (b) impacto das emissões de poluentes na qualidade do ar local e na saúde humana, (c) número de feridos e mortos em acidentes rodoviários, (d) o grau de congestionamento e (e) a disponibilidade de outros modos de transporte.

Zietsman e Rilett (2000) apontam a necessidade de estabelecer um índice de sustentabilidade de sistemas de transporte que possa ser facilmente aplicado em países em desenvolvimento, já que as diferenças entre países em desenvolvimento e países desenvolvidos com relação à disponibilidade de dados para obtenção de medidas de desempenho tornam impossível a aplicação de um índice como o proposto por Litman (1997). Para a criação deste índice, existe a necessidade de identificar medidas de desempenho representativas do fenômeno e que possam ser usadas na composição desse índice, a partir das informações cuja obtenção seja viável dos pontos de vista tecnológico e econômico.

Zietsman *et al.* (2003), num estudo que trata da aplicação dos conceitos de transporte sustentável para comunidades em desenvolvimento, propõem um índice de sustentabilidade baseado em conceitos da avaliação multicritério, o que possibilita incluir no processo decisório uma ampla gama de objetivos, aos quais são atribuídos pesos diferentes, em função da sua importância relativa. O valor do índice é obtido através da soma ponderada de valores normalizados para as medidas de desempenho que compõem o índice. O peso de cada medida de desempenho é normalmente determinado através de um processo interativo, do qual participam, se não todas as partes interessadas, pelo menos os tomadores de decisão. Os valores normalizados para cada medida de desempenho variam entre zero (desempenho extremamente insatisfatório) e um (desempenho altamente satisfatório). A formulação matemática do índice é dada por:

$$I_S = W_m \cdot N_m + W_p \cdot N_p + W_f \cdot N_f \tag{4.1}$$

em que I_S: índice de sustentabilidade;

N_m: valor normalizado da medida de desempenho relativa à mobilidade;

N_p: valor normalizado da medida de desempenho relativa à emissão de poluentes;

N_f: valor normalizado da medida de desempenho relativa ao consumo de combustível;

W_m: peso atribuído para o critério de mobilidade;

W_p: peso atribuído para o critério de emissão de poluentes; e

W_f: peso atribuído para o critério de consumo de combustível.

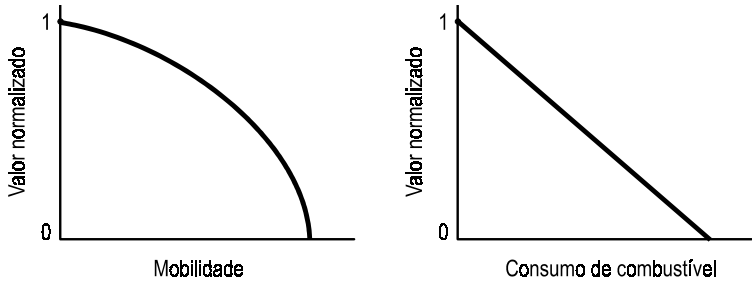


Figura 4.1: Funções para normalização das medidas de desempenho (Zeitsman *et al.*, 2003)

O valor normalizados N_i da i-ésima medida de desempenho é calculado por meio de funções que procuram refletir a percepção dos motoristas em relação a cada medida de desempenho. Os autores ressaltam que a determinação da função de normalização é complexa e deve ser mais bem estudada e, para ilustrar as potencialidades da abordagem proposta, adotaram uma função parabólica para a mobilidade e funções lineares para a emissão de poluentes e para o consumo de combustível, cujo formato geral é mostrado na Figura 4.1. A formulação matemática destas duas funções de normalização é:

$$N_m = a_1 + b_1 \cdot \exp(-c_1 \cdot s_m) \tag{4.2}$$

$$N_p = a_2 + b_2 \cdot s_p \tag{4.3}$$

$$N_f = a_3 + b_3 \cdot s_f \tag{4.4}$$

em que s_m: valor da medida de desempenho relativa à mobilidade;

s_p: valor da medida de desempenho relativa à emissão de poluentes;

s_f: valor da medida de desempenho relativa ao consumo de combustível; e

a_i, b_i e c_i: parâmetros de calibração.

A Tabela 4.2 mostra os valores dos pesos para cada medida de desempenho. Esses pesos devem refletir a importância relativa de cada medida de desempenho. No estudo relatado, seus valores foram atribuídos por uma aplicação do método de Delfos, através da qual um grupo de engenheiros atribuiu, individualmente, valores aos pesos e, posteriormente, discutiu em grupo os valores atribuídos na fase inicial do processo.

Tabela 4.2: Pesos para cálculo do índice de sustentabilidade [adaptado de Zeitsman *et al.* (2003)]

Critério	***Peso***	***Medida de desempenho***	***Subpeso***
Mobilidade	0,50	Taxa de viagem (min/km)	1,00
Consumo de combustível	0,25	Combustível consumido	1,00
Emissão de poluentes	0,25	HC	0,43
		CO	0,12
		NO_X	0,45

Os autores usam o índice proposto para comparar três corredores rodoviários (dois deles localizados nos EUA e um na África do Sul) e um corredor ferroviário (na África do Sul), determinar melhoramentos nos corredores rodoviários estudados e analisar a sustentabilidade dos corredores estudados ao longo de um período de 10 anos.

No próximo capítulo, um estudo de caso focalizando o corredor rodoviário formado pelo sistema Anhangüera-Bandeirantes demonstra o uso de um índice de sustentabilidade similar para a avaliação de alternativas de operação para o corredor.

5 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo é apresentado um estudo de caso que demonstra como um modelo microscópico de simulação (Integration) pode ser usado para produzir dados para a quantificação de medidas de desempenho para o sistema Anhangüera-Bandeirantes. O capítulo inicia-se mostrando a codificação, verificação e calibração do modelo de simulação Integration. A seguir, apresentam-se o processo usado para geração de uma matriz origem/destino sintética, a partir das contagens de tráfego nos tramos da rede simulada, os cenários hipotéticos criados para representar alternativas operacionais, a escolha das medidas de desempenho, as simulações realizadas e como os resultados das simulações foram usados para cálculo das medidas de desempenho. O capítulo encerra-se mostrando como os índices de sustentabilidade de cada cenário foram obtidos e discutindo como esses índices poderiam ser usados na avaliação e escolha de alternativas de ação para o corredor.

5.1 Estrutura geral do estudo de caso

O estudo de caso demonstra a utilização de um modelo de simulação microscópica de tráfego (no caso, o Integration) para a obtenção de dados relativos a cada viagem realizada no corredor estudado. Esses dados são usados para quantificação das medidas de desempenho escolhidas que, após serem normalizadas, são usadas para cálculo do índice de sustentabilidade de cada cenário. O índice de sustentabilidade reflete a importância relativa de cada medida de desempenho para a comunidade em que o corredor está situado. Os cenários podem então ser comparados em termos do índice de sustentabilidade. A Figura 5.1 mostra a seqüência das etapas do processo proposto.

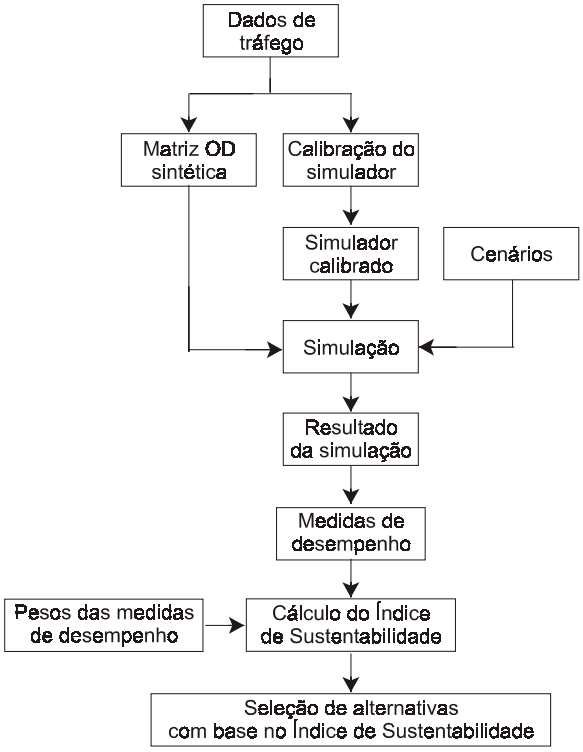


Figura 5.1: Seqüência de etapas do estudo de caso

5.2 Descrição do corredor estudado

A Figura 5.2 ilustra o segmento do sistema Anhangüera-Bandeirantes que foi usado para o estudo de caso. A Via Anhangüera é uma rodovia de pista dupla, cuja construção data dos anos 1950, e foi a principal ligação entre São Paulo e a região nordeste do estado de São Paulo até 1978, quando foi inaugurada a Rodovia dos Bandeirantes, uma auto-estrada com três faixas de tráfego em cada sentido. O corredor formado pelo sistema Anhangüera-Bandeirantes é usado tanto para movimentos pendulares ("commuter traffic") como para viagens mais longas, já que faz parte da conexão entre Santos e as regiões agrícolas do estado de São Paulo e do centro-oeste brasileiro.

Em maio de 1998, a operação do corredor estudado foi transferida em concessão para um consórcio privado que, além da operação das rodovias, ficou encarregado de implantar diversas melhorias, que incluem um sistema inteligente de transporte (ITS) baseado numa rede de fibra óptica de 640 km. O ITS implantado inclui sistema de coleta eletrônica de pedágio, painéis eletrônicos de mensagens, sistema de circuito fechado de TV cobrindo mais de 50% da rede, sistema avançado de informações aos usuários que inclui um sítio na Internet e um número 0800 para informações, telefones para usuários a cada quilômetro ao longo da rede, cinco postos fixos de pesagem com

funcionamento contínuo e três balanças móveis para fiscalização de peso, estações meteorológicas automáticas, radares fixos e móveis para controle de velocidade e sensores automáticos para contagem classificada de tráfego. Os sensores automáticos são capazes de produzir contagens classificadas totalizadas a cada 6 minutos, nas quais o tráfego é dividido em carros e veículos pesados. A obtenção dos dados de tráfego é totalmente automatizada e centralizada no centro de controle operacional, localizado em Jundiaí.

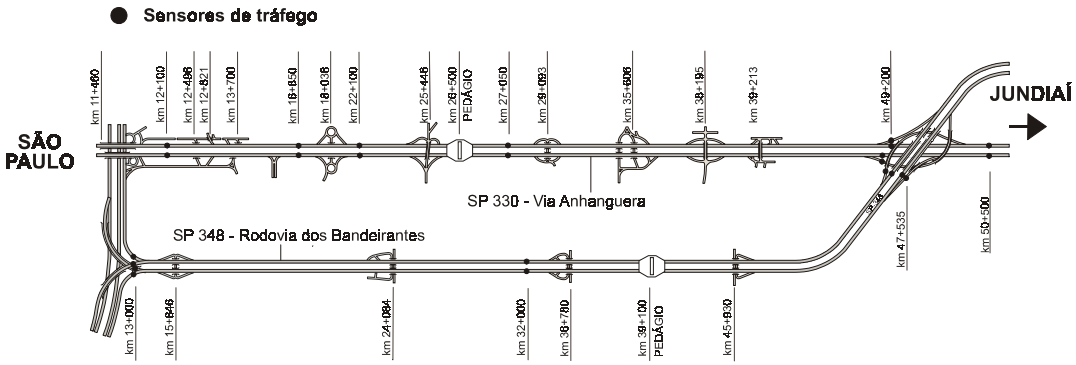


Figura 5.2: Representação simplificada do corredor rodoviário estudado

5.3 Codificação do corredor

O corredor formado pelas rodovias Anhanguera e Bandeirantes foi codificado como mostra a Figura 5.3. Pode-se perceber que a rede codificada inclui o Rodoanel (SP 21), que faz a ligação entre a Anhangüera e a Bandeirantes na altura do km 24, e duas outras conexões, nos km 13 e 50, que são representações simplificadas da interseção com a Marginal do Tietê (km 13) e da interligação entre as duas rodovias que existe no km 50.

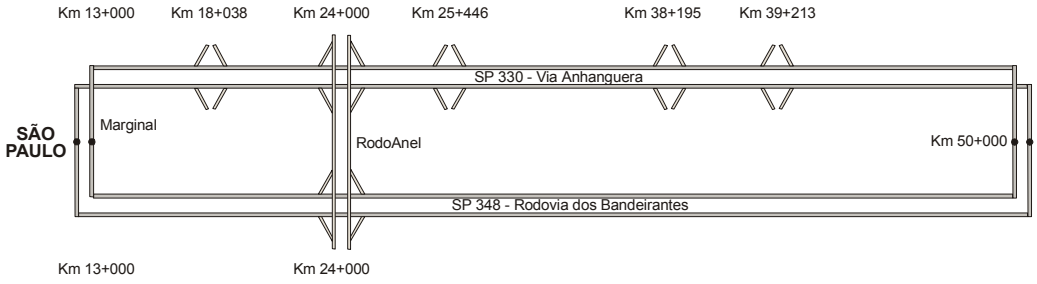


Figura 5.3: Representação da rede codificada para o estudo de caso

Para incluir na simulação o impacto dos caminhões na corrente de tráfego, foram construídos, além dos arquivos obrigatórios para executar o Integration, dois arquivos opcionais: o arquivo de greides e o arquivo de parâmetros veiculares. O detalhamento

da codificação de cada arquivo utilizado nas simulações do corredor é apresentado a seguir.

5.3.1 Arquivo de nós

Os dados referentes à via foram obtidos do projeto do Sistema de Análise de Tráfego (SAT), fornecido pela AutoBAn, através do mapa rodoviário de 1997 da DERSA, do projeto geométrico fornecido pela AutoBAn e de inspeções e filmagens *in loco*.

A rede representada pela Figura 5.3 foi desenhada em escala retigráfica no AutoCad e as coordenadas dos nós foram obtidas do programa. A rede usada contém 147 nós sendo: 6 nós de origem e destino, 6 nós de destino, 7 nós de origem e 128 nós intermediários. Deve-se ressaltar que as coordenadas dos nós no Integration apenas servem para que a rede modelada possa ser visualizada no monitor, pois as distâncias entre nós não são calculadas pelo modelo através dessas coordenadas, mas fornecidas pelo usuário no arquivo de tramos.

5.3.2 Arquivo de tramos

O corredor é representado por 162 tramos. O número de faixas de tráfego em cada tramo foi obtido por meio de inspeções *in loco*. As distâncias entre os dispositivos de acesso, o comprimento das faixas de aceleração e de desaceleração de cada acesso e a extensão das rampas mais significativas foram medidas com o hodômetro do carro, que foi zerado com os marcos quilométricos existentes na rodovia, o que proporcionou uma precisão de cerca de 100 metros, considerada suficiente em função da extensão total da rede simulada (40 km) e das simplificações inevitáveis ao processo de simulação.

Na construção do arquivo de tramos, os tramos representando acessos à rodovia foram codificados como tendo placas de "Dê a preferência". Com isso, o simulador representa melhor o comportamento observado do tráfego, já que os veículos não são necessariamente obrigados a parar antes de entrar na pista principal, mas apenas diminuem a velocidade até encontrarem um *gap* suficiente para sua entrada.

A velocidade de fluxo livre, a capacidade, a velocidade na capacidade e a densidade de congestionamento de cada tramo foram obtidos a partir dos dados de tráfego coletados pelos laços indutivos instalados na rodovia. A forma como esses dados foram obtidos está descrita em detalhes no item 5.5 Calibração do modelo fluxo-velocidade-densidade.

Uma cópia da representação do corredor codificado com a identificação dos nós, tramos, rampas e acessos está no Anexo A.

5.3.3 Arquivo de semáforos

Embora o corredor estudado não apresente nenhum tipo de semáforo, este arquivo é imprescindível para execução da simulação. Portanto, um arquivo vazio foi criado.

5.3.4 Arquivo de demanda

A descrição da forma como os dados para o arquivo de demanda foram obtidos está apresentada no item 5.6, uma vez que foram usadas matrizes O/D sintéticas, construídas a partir dos fluxos observados nos diversos tramos da rede, para determinar os valores das demandas entre os nós de origem e os nós de destino.

5.3.5 Arquivo de incidentes

Como o arquivo de incidentes é imprescindível para a execução da simulação, um arquivo vazio foi usado, já que nenhum dos cenários usados considerava a ocorrência de incidentes.

5.3.6 Arquivo de greides

O arquivo de greides, embora opcional, foi usado para representar mais realisticamente as características geométricas das rodovias. O arquivo contém a declividade das rampas mais significativas do corredor estudado, nas quais a velocidade dos veículos pesados sofre maior influência do greide. No total foram codificados 18 trechos de rampas sendo 8 na Rodovia dos Bandeirantes e 10 na Via Anhanguera, que estão mostradas na Tabela 5.1.

A determinação das rampas mais significativas do corredor foi baseada da definição de rampas específicas do *Highway Capacity Manual (HCM-2000),* desta forma foram codificadas as rampas com comprimentos maiores que 1.600 metros ou rampas que excedessem 3% por mais de 700 metros para a Via Anhangüera; para a Rodovia dos Bandeirantes, as rampas com mais de 800 metros ou que excedessem 3% por mais de 400 metros foram codificadas. A declividade das rampas foi estimada com o aparelho apresentado na Figura 5.4, através da média de três a cinco leituras realizadas ao longo das rampas. A medida da declividade foi realizada alinhando-se o aparelho paralelamente ao eixo longitudinal da rodovia, nivelando-se a bolha e fazendo-se a leitura na régua graduada.

Tabela 5.1: Localização, comprimento e declividade das rampas específicas

(a) Rodovia dos Bandeirantes

Pista Norte			Pista Sul		
Localização	Comprimento (m)	Greide (%)	Localização	Comprimento (m)	Greide (%)
km 20,6–km 21,6	1.000	2,5	km 20,6–km 21,6	1.000	– 2,5
km 21,6–km 22,1	500	– 3,0	km 21,6–km 22,1	500	3,0
km 28,3–km 29,4	1.100	4,0	km 28,3–km 29,4	1.100	– 4,0
km 38,0–km 39,0	1.000	3,5	km 38,0–km 39,0	1.000	3,5

(b) Via Anhanguera

Pista Norte			Pista Sul		
Localização	Comprimento (m)	Greide (%)	Local5ização	Comprimento (m)	Greide (%)
km 19,5–km 20,7	1.200	6,0	km 19,5–km 20,7	1.200	– 6,0
km 20,7–km 21,4	700	– 6,0	km 20,7–km 21,4	700	6,0
km 30,1–km 30,8	700	4,5	km 30,1–km 30,8	700	– 4,5
km 30,8–km 33,0	2.200	5,0	km 30,8–km 33,0	2.200	– 5,0
km 33,0–km 34,0	1.000	– 5,0	km 33,0–km 34,0	1.000	5,0

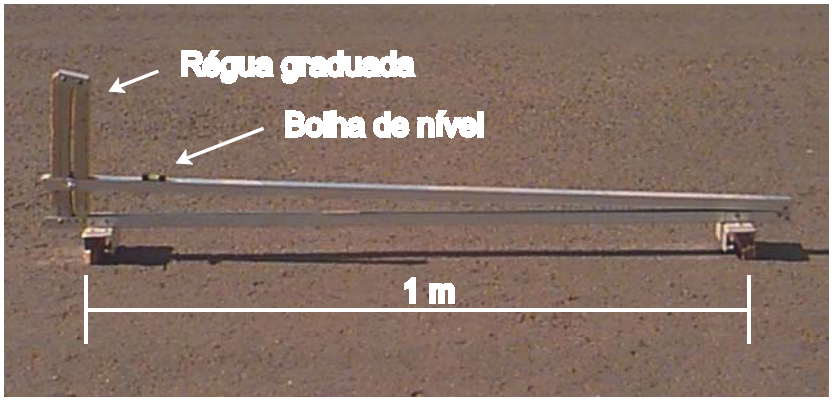


Figura 5.4: Aparelho usado para medir a declividade das rampas

5.4 Verificação da codificação do corredor

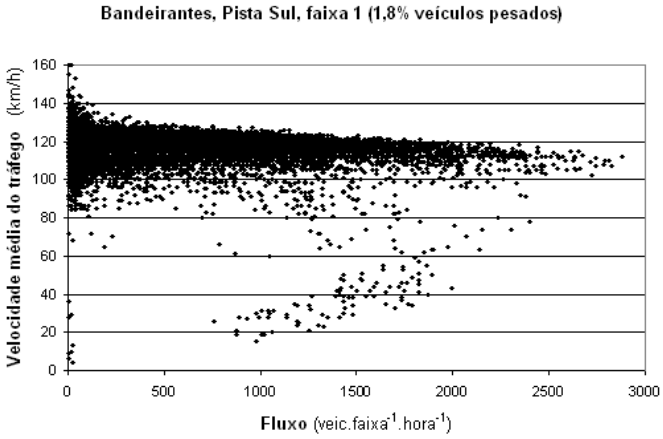
Uma verificação da codificação do corredor foi realizada através da análise visual da simulação para um caso em que uma matriz O/D hipotética foi inserida no arquivo de demanda.

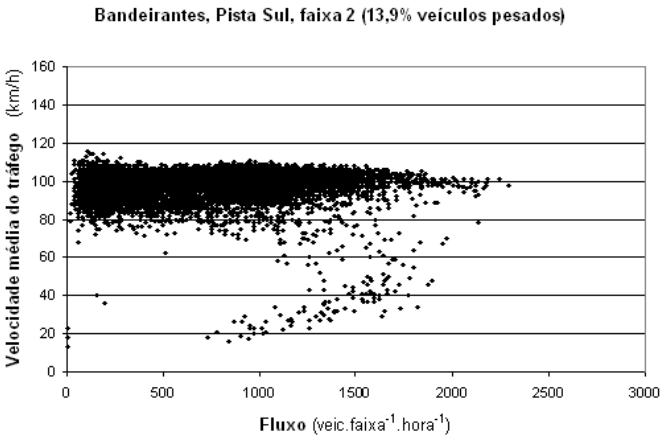
Com a visualização da simulação foi possível verificar e corrigir, quando necessário, a codificação da geometria das rodovias que formam o corredor, tais como: a localização dos nós; o número de faixas em cada tramo; a localização das faixas de aceleração e de desaceleração, a localização da sinalização de "Dê a preferência" nos tramos de acesso à rodovia.

Com a matriz O/D sintética estimada pelo QueensOD pôde-se verificar a trajetória dos veículos; os padrões de aceleração e de desaceleração nas rampas específicas, em manobras de ultrapassagem e nas faixas de aceleração e desaceleração; os nós de origem e destino.

5.5 Calibração do modelo de 'car-following' do simulador

A calibração do Integration foi realizada em duas etapas: a calibração do modelo de "car-following" e a calibração dos fluxos nos tramos da rede simulada. Para a primeira fase da calibração, que trata do modelo de "car-following", foi necessário determinar a velocidade livre, a velocidade na capacidade, a densidade de congestionamento e o fluxo na capacidade para cada um dos tramos da rede analisada. Esses quatro parâmetros são usados no modelo de "car-following" do Integration. Para isso, foram usados dados de fluxo e velocidade obtidos no SAT da AutoBAn para todos os sensores instalados nas rodovias que formam o corredor estudado. Os dados utilizados na recalibração dos parâmetros do modelo foram os obtidos dos laços indutivos da faixa de tráfego mais próxima do canteiro central (faixa 1 da Figura 5.5), por ser a que apresenta a menor porcentagem de veículos pesados.





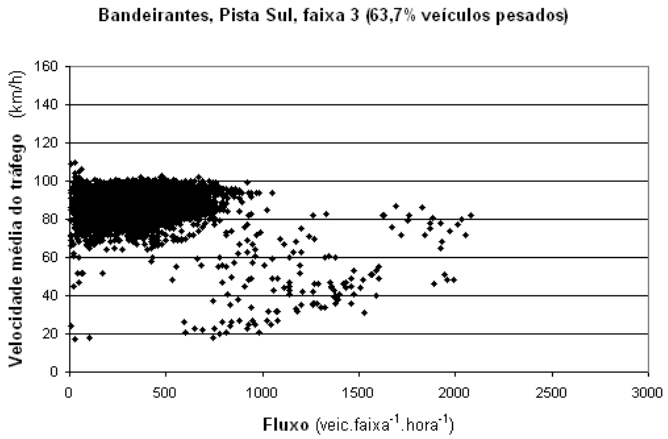


Figura 5.5: Dados de tráfego da Rodovia dos Bandeirantes, km 32

A escolha dos dados desta faixa para recalibração do modelo pode ser justificada considerando-se os gráficos mostrados na Figura 5.5, que ilustram a influência da composição do tráfego na capacidade de cada faixa. Na faixa mais à esquerda, em cujo tráfego os veículos pesados são menos de 2%, existem diversas observações de taxas de fluxo horário equivalente (referentes a intervalos de 15 minutos) de mais de 2500 veic/(h.faixa), a velocidades variando entre 100 e 120 km/h. Na faixa mais à direita, em que mais de 60% dos veículos são caminhões, as maiores taxas de fluxo observadas são da ordem de 2000 veic/(h.faixa), a velocidades variando entre 50 e 90 km/h.

Para determinar a velocidade livre, a velocidade na capacidade, a densidade de congestionamento e o fluxo na capacidade foi utilizado o equacionamento alternativo ao de Van Aerde (1995) desenvolvido por Demarchi (2002) na construção da curva fluxo-velocidade. Van Aerde (1995) considera que o espaçamento entre dois veículos consecutivos corresponde à soma de um termo constante, independente da velocidade, um termo inversamente proporcional à diferença entre a velocidade de fluxo livre e a velocidade dos veículos na corrente de tráfego, e um termo linearmente dependente da velocidade:

$$s = c_1 + \frac{c_2}{v_f - v} + c_3 \cdot v \tag{5.1}$$

em que s : espaçamento entre veículos consecutivos (km);

v : velocidade (km/h);

v_f : velocidade do fluxo livre (km/h);

c_1 : constante de calibração 1 (km);

c_2 : constante de calibração 2 (km^2/h); e

c_3 : constante de calibração 3 (h).

Considerando-se que a densidade da corrente de tráfego é o inverso do espaçamento, se o fluxo de tráfego for uniforme e determinístico, então $k = 1/s$, e substituindo-se a Equação (5.1) na relação fundamental de tráfego $q = v.k$, tem-se a relação entre fluxo-velocidade da Equação (5.2):

$$q = \frac{v}{c_1 + \dfrac{c_2}{v_f - v} + c_3 \cdot v} \tag{5.2}$$

As constantes de calibração c_1, c_2 e c_3 podem ser calculadas pelas Equações de (5.4) a (5.6), sendo necessário antes se calcular a constante c_{vc} utilizada para ajustar a velocidade na capacidade:

$$c_{vc} = \frac{2 \cdot v_c - v_f}{\left(v_f - v_c\right)^2} \tag{5.3}$$

$$c_2 = \frac{1}{k_j \cdot \left(c_{vc} + \dfrac{1}{v_f} \right)} \tag{5.4}$$

$$c_1 = c_{vc} \cdot c_2 \tag{5.5}$$

$$c_3 = \frac{1}{v_c} \left(\frac{v_c}{q_c} - c_1 - \frac{c_2}{v_f - v_c} \right) \tag{5.6}$$

em que v_c : velocidade na capacidade (km/h);

q_c : capacidade (veíc/h); e

c_{vc} : constante utilizada para ajustar a velocidade na capacidade.

No equacionamento alternativo desenvolvido por Demarchi (2002), as constantes de calibração c_1, c_2 e c_3 são expressas diretamente em função dos parâmetros v_f, v_c, q_c e kj, sendo possível expressar diretamente a relação fluxo-velocidade sem que seja necessária a determinação prévia das constantes do modelo, como no equacionamento formulado por Van Aerde. A relação fluxo-velocidade desenvolvida por Demarchi e utilizada na determinação dos parâmetros de calibração do modelo é apresentada na Equação (5.7):

$$q = \frac{v}{\frac{1}{k_j}\left[\frac{v_f\left(v - v_c\right)^2}{v_c^2\left(v_f - v\right)}\right] + \frac{v}{q_c}} \tag{5.7}$$

Deste equacionamento foi realizado um ajuste visual a partir das filmagens visando-se obter a melhor curva fluxo-velocidade para cada rodovia do corredor, com valores de velocidade livre, capacidade e densidade de congestionamento que fizessem sentido: as duas rodovias deveriam ter a mesma densidade de congestionamento e os demais parâmetros deveriam ter valores mais altos para a Rodovia dos Bandeirantes em relação à Via Anhangüera. Assim, determinou-se a curva fluxo-velocidade mais representativa do comportamento do tráfego da Via Anhanguera, mostrada na Figura 5.6, e a curva fluxo-velocidade mais representativa do comportamento do tráfego da Rodovia dos Bandeirantes (Figura 5.7). Os resultados da recalibração dos parâmetros do modelo são apresentados na Tabela 5.2. Como cada uma das duas rodovias tem características homogêneas ao longo de todo o trecho estudado (à exceção das rampas e do número de faixas de rolamento), admitiu-se que os quatro parâmetros (velocidade livre, velocidade na capacidade, taxa de fluxo horário na capacidade por faixa de tráfego e densidade de congestionamento por faixa de tráfego) têm o mesmo valor para todos os tramos simulados.

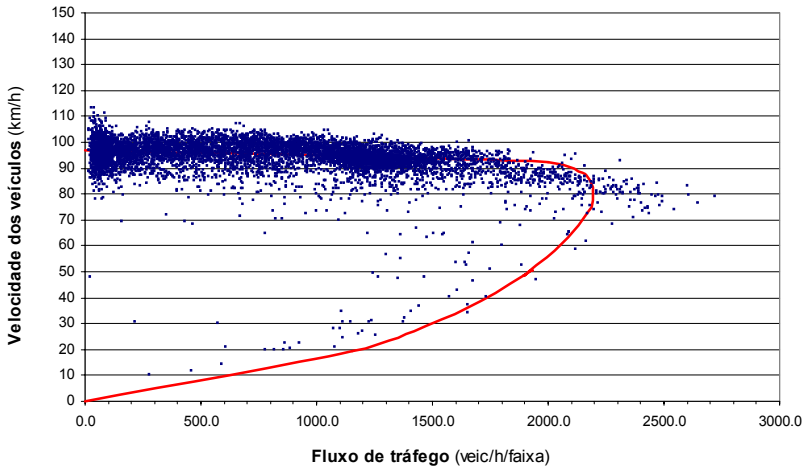


Figura 5.6: Curva fluxo-velocidade típica para a Via Anhanguera, km 16, Pista Sul.

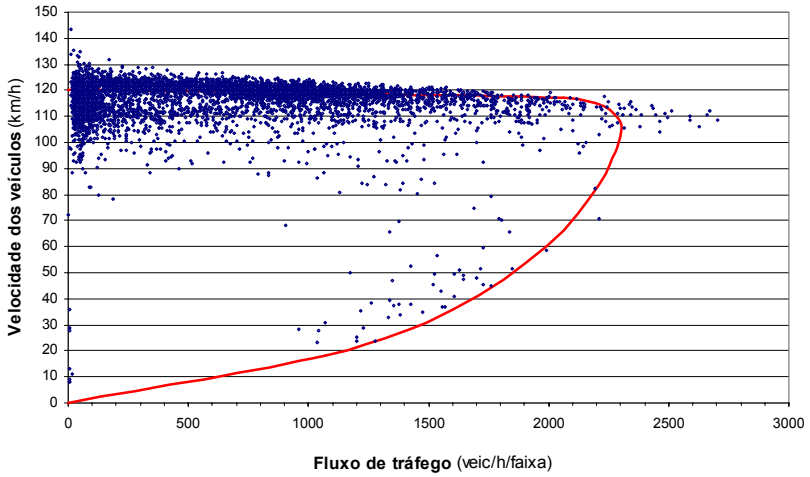


Figura 5.7: Curva fluxo-velocidade típica para a Rodovia dos Bandeirantes, km 32, Pista Sul.

Tabela 5.2: Resultados da recalibração do Integration

Parâmetro	Via Anhanguera	Rodovia dos Bandeirantes
Velocidade de fluxo livre	97 km/h	120 km/h
Velocidade na capacidade	81 km/h	105 km/h
Taxa de fluxo na capacidade	2200 veic/(h.faixa)	2300 veic/(h.faixa)
Densidade de congestionamento	90 veic/(km.faixa)	90 veic/(km.faixa)

A densidade de congestionamento adotada de 90 veic/(km.faixa) é coerente com os valores típicos de densidade de congestionamento obtidas em outros estudos, como pode ser visto na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Valores típicos de densidade de congestionamento obtidos da literatura

Autores	Local	Modelo utilizado	k_j (veic/km)
Drake *et al.* (1967)	Eisenhower Expressway, EUA	Greenshields	78
Drake *et al.* (1967)	Eisenhower Expressway, EUA	Linear (2 regimes)	94
Drake *et al.* (1967)	Eisenhower Expressway, EUA	Linear (3 regimes)	94
Drake *et al.* (1967)	Eisenhower Expressway, EUA	Greenberg modificado	91
Drake *et al.* (1967)	Eisenhower Expressway, EUA	Edie	101
Van Aerde e Rakha (1995)	Eisenhower Expressway, EUA	Van Aerde	121
Van Aerde e Rakha (1995)	Holand Tunnel, EUA	Van Aerde	125
Van Aerde e Rakha (1995)	Via arterial, Inglaterra	Van Aerde	102
Stewart *et al.* (1995)	I-4 Freeway, Orlando, EUA	Van Aerde	92
Demarchi e Setti (2001)	SP 330, São Paulo, Brasil	Van Aerde	152

Comparando-se a curva fluxo-velocidade calibrada por Demarchi e Setti (2001) para a Via Anhanguera (com dados coletados com sensores móveis entre os km 110 e 141) com a curva calibrada nesse estudo, observa-se uma semelhança entre os valores encontrados dos parâmetros do modelo, v_f, v_c, q_c, exceto para k_j (Tabela 5.4). Uma possível explicação para a diferença entre a densidade de congestionamento encontrada

nos dois estudos pode ser a pouca quantidade de dados sobre a região congestionada na calibração realizada por Demarchi e Setti (2001), conforme ressaltado pelos próprios autores.

Tabela 5.4: Parâmetros da curva fluxo-velocidade para a Via Anhanguera (Demarchi e Setti, 2001)

Parâmetro	Demarchi e Setti (2001)	Este estudo
Velocidade de fluxo livre	102 km/h	97 km/h
Velocidade na capacidade	80 km/h	81 km/h
Taxa de fluxo na capacidade	2248 veic/(h.faixa)	2200 veic/(h.faixa)
Densidade de congestionamento	152 veic/(km.faixa)	90 veic/(km.faixa)

A verificação das diferenças entre os fluxos observados e simulados está discutida a seguir, no item que trata da obtenção de demandas O/D sintéticas para o corredor estudado.

5.6 Determinação da matriz O/D sintética para o corredor estudado

Como dados de origem e destino das viagens realizadas no corredor não estavam disponíveis, e considerando que os recursos disponíveis para a realização da pesquisa não eram suficientes para a obtenção de uma matriz O/D diretamente (isto é, através de entrevistas com uma amostra dos motoristas ou através de pesquisa de placas), decidiu-se obter as demandas entre as origens e destinos da rede de forma indireta, a partir dos fluxos observados no corredor. Nesta seção, descreve-se a forma como a matriz O/D sintética para o corredor foi obtida.

5.6.1 Contagens de tráfego na rede estudada

Os dados referentes ao tráfego foram obtidos através de filmagens dos acessos às rodovias e de dados brutos dos sensores de tráfego, obtidos diretamente dos arquivos eletrônicos do Sistema de Análise de Tráfego (SAT) da AutoBAn. A localização dos contadores de tráfego ao longo das rodovias entre o quilômetro 11 (Marginal do Tietê, em São Paulo) ao quilômetro 50, interligação Via Anhanguera-Rodovia dos Bandeirantes, está apresentada na Figura 5.9. A contagem do tráfego é feita por laços indutivos instalados no pavimento, cujos dados são enviados por fibra óptica para o CCO, em Jundiaí.

Os dados brutos dos contadores/classificadores são armazenados com dois tipos de totalização: intervalos de 6 minutos ou de 60 minutos. Os dados são fornecidos sob a forma de arquivos ASCII, para cada um dos laços indutivos. Para cada intervalo de

totalização, os dados disponíveis são a data, a hora e minuto do início do intervalo, o número total de veículos, o número de veículos pesados e a média das velocidades dos veículos observados durante o período de totalização. Os arquivos ASCII gerados pelo SAT podem ser exportados para uma planilha eletrônica (como o MS-Excel), para tratamento e análise dos dados. A AutoBAn disponibilizou dados de tráfego para o período de novembro de 2001 a fevereiro de 2002 e de abril de 2002 a junho de 2002, para os sensores mostrados na Figura 5.8.

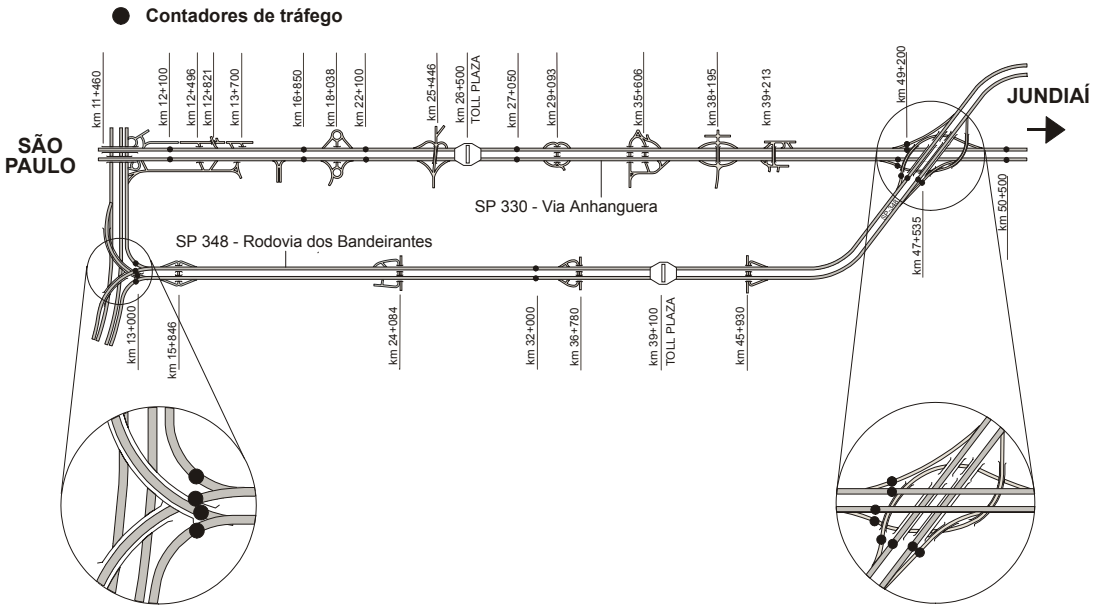


Figura 5.8: Rede estudada entre São Paulo (km 11) e interligação Anhanguera-Bandeirantes (km 50)

O posicionamento dos sensores na rede é tal que só se dispõem de dados de tráfego para segmentos entre acessos e saídas, à exceção das alças de conexão com a Marginal do Tietê (km 11) e das alças na interligação (km 50). Como a rede estudada inclui alças de acesso e saída nos demais trevos (vide Figura A.1, que mostra a rede codificada), foi necessário complementar os dados do SAT através de estimativas de fluxos nas alças desses trevos.

Os volumes de tráfego nas alças de acesso das rodovias Anhanguera e Bandeirantes foram obtidos de filmagens usando câmaras do circuito fechado de TV da AutoBAn, entre os dias 5 e 8 de novembro de 2002, das 8:00 às 10:00h. Nos locais onde não existem câmaras da AutoBAn, foram realizadas filmagens com câmara digital portátil no dia 5/12/2002 ao longo do dia. A Figura 5.9 apresenta um exemplo de interseção da Via Anhanguera. A Tabela 5.5 mostra o período de filmagem e a porcentagem dos volumes nas alças em relação ao volume na rodovia para o trevo de interligação com o

Rodoanel. A porcentagem do volume da alça foi calculada pela relação entre o volume da alça e o volume na rodovia, naquele sentido, imediatamente a montante (para saídas) ou a jusante (para acessos) da alça. Os dados obtidos para os demais cruzamentos (todos localizados na Via Anhanguera) estão mostrados no Anexo B.

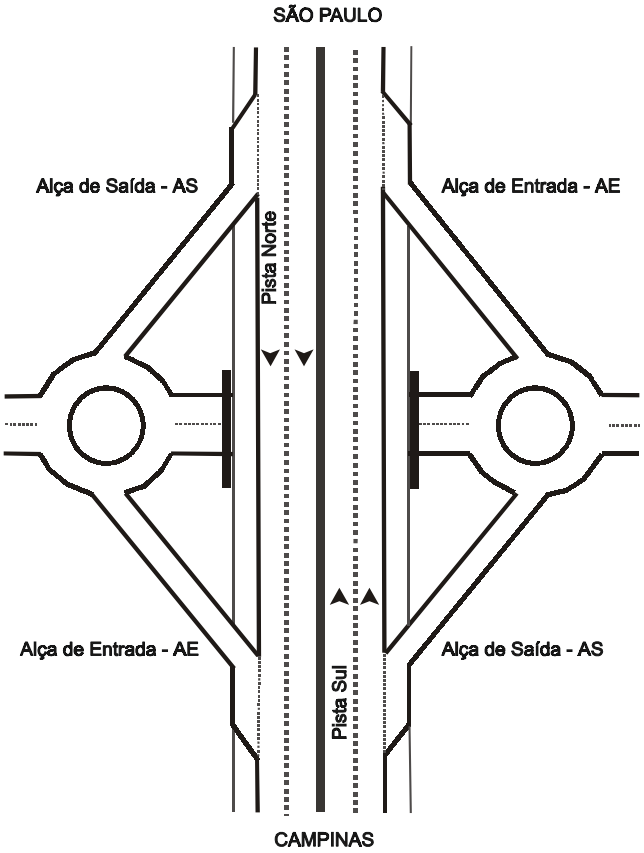


Figura 5.9: Interseção no km 18 da Via Anhanguera

Tabela 5.5: Porcentagem dos volumes nas alças de acesso do Rodoanel

Acesso	Alça	Data	Período	Porcentagem
Bandeirantes	AS N	05 e 06/11/02	08:00 às 10:00	14,0
	AE S	05 e 06/11/02	08:00 às 10:00	17,6
Anhanguera	AS N	05/11/02	08:00 às 10:00	27,3
	AE S	05/11/02	08:00 às 10:00	14,0
	AE N	05 e 06/11/02	08:00 às 10:00	12,5
	AS S	05 e 06/11/02	08:00 às 10:00	22,9

em que AS N : alça de saída da pista norte;
AE S : alça de entrada na pista sul;
AE N : alça de entrada na pista norte; e
AS S : alça de saída da pista sul.

5.6.2 Determinação dos fluxos horários num dia útil típico

Com o objetivo de analisar o comportamento do tráfego no corredor estudado, os gráficos com os volumes médios para cada dia da semana e para cada contador de tráfego foram construídos, como ilustrado na Figura 5.10, que mostra a variação horária do tráfego ao longo de uma típica quarta-feira útil no corredor analisado. Para isso, calcularam-se as médias dos fluxos horários para todas as quartas-feiras úteis do conjunto de dados obtidos do SAT. Os feriados e os intervalos de tempo em que o sistema de contagem de tráfego da AutoBAn falhou foram desconsiderados da média dos volumes.

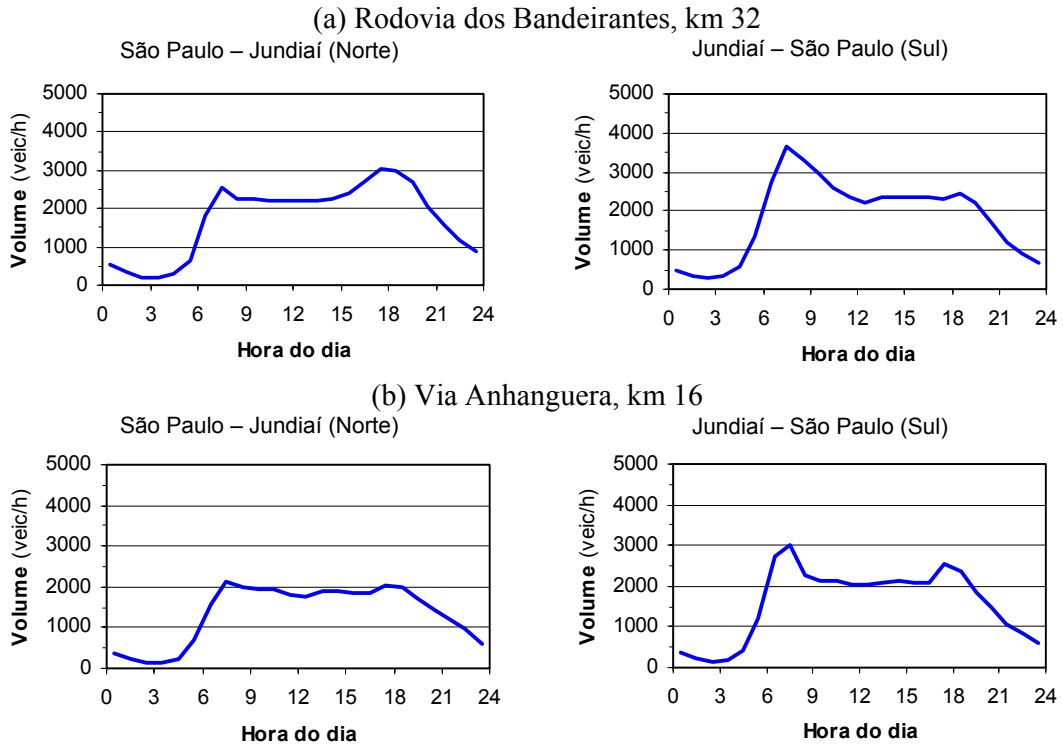


Figura 5.10: Distribuição do tráfego ao longo da quarta feira média

Através dos gráficos de volume médio ao longo das horas e dias da semana, pode-se perceber que os picos de tráfego do período da manhã ocorrem na pista sul (Jundiaí a São Paulo), entre 7:00 e 8:00 horas, e o pico da tarde ocorre na pista norte (São Paulo a Jundiaí) entre 18:00 e 19:00 horas. Estes horários de pico podem ser explicados pelo fato da cidade de São Paulo ser um grande pólo de geração de viagens por motivo trabalho. Assim, pessoas que residem nas cidades ao longo do corredor dirigem-se ao trabalho em São Paulo, pela manhã, e retornam aos seus lares à tarde.

O volume diário médio ao longo do corredor estudado foi calculado desprezando-se os feriados e os períodos em que os contadores de tráfego falharam (Figura 5.11). Pode-se perceber que os volumes aumentam à medida que se aproxima de São Paulo e que a Rodovia dos Bandeirantes apresenta um volume de tráfego maior que o da Via Anhanguera.

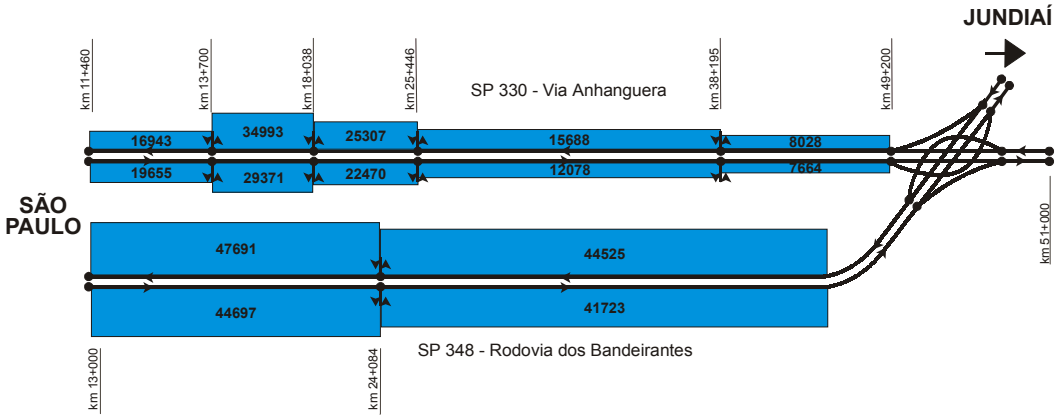
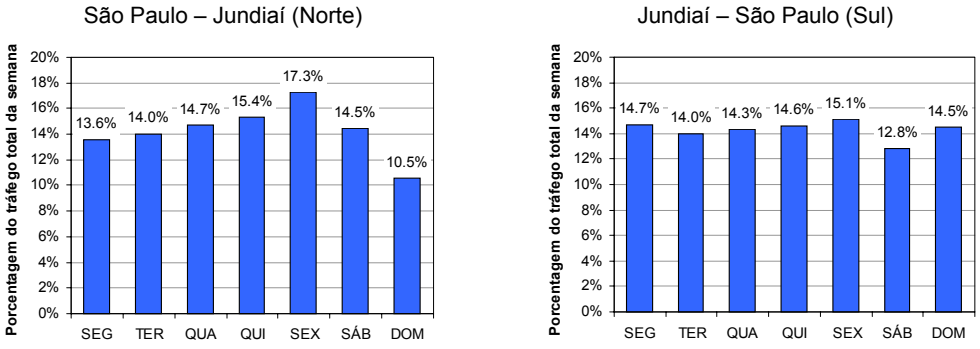


Figura 5.11: Volume diário médio ao longo do corredor estudado

Durante uma semana típica – isto é, em que não há feriados –, o maior volume de tráfego ocorre na sexta-feira, tanto na Via Anhanguera como na Rodovia dos Bandeirantes, em ambos os sentidos, conforme se pode perceber na Figura 5.12. O dia de menor movimento, no sentido sul, é o domingo; no sentido norte, é o sábado. As terças, quartas e quintas-feiras apresentam pouca variação de volume e, por isso, foram considerados os dias úteis típicos para representar o corredor. O volume médio diário para um dia da semana é a média dos volumes totais registrados para aquele dia da semana pelo SAT, excluindo-se os feriados e os dias em que os sensores não funcionaram.

(a) Rodovia dos Bandeirantes, km 32



(b) Via Anhanguera, km 16

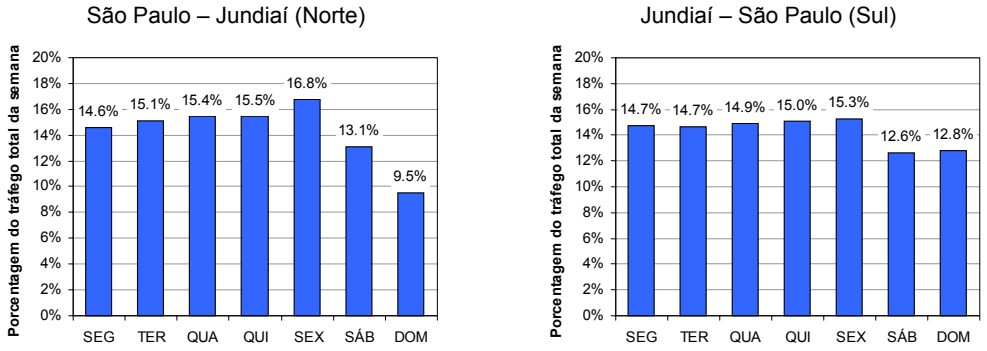


Figura 5.12: Distribuição do tráfego ao longo da semana média útil (sem feriados) no corredor estudado

5.6.3 Obtenção da matriz O/D sintética para a rede estudada

Além da matriz O/D sintética obtida usando-se os fluxos observados no período de pico da manhã (das 7:00 às 8:00), foram também estimadas outras quatro matrizes O/D sintéticas, com as demandas horárias sintéticas das 5:00 às 6:00 e das 6:00 às 7:00 (para que a simulação pudesse representar adequadamente o carregamento do sistema antes do pico da manhã) e com as demandas horárias sintéticas das 8:00 às 9:00 e das 9:00 às 10:00, para incluir na simulação a dissipação das filas formadas durante o período de pico. As demandas sintéticas foram obtidas usando-se os fluxos horários observados num dia útil típico do corredor. A distribuição horária do tráfego num dia útil foi determinada a partir de dados do SAT, cobrindo o período de 27/11/2001 a 18/2/2002, de tal forma que o fluxo de uma dada hora (por ex., das 7:00 às 8:00) é a média do fluxo horário observado para esta hora em todas as terças, quartas e quintas-feiras, que não foram feriados.

Assim, foram obtidas cinco matrizes O/D sintéticas, descrevendo a demanda das 5:00 às 10:00 horas, para permitir observar todo o comportamento típico do tráfego na formação e dissipação das filas nos dias úteis da semana.

Os fluxos horários nos links de entrada e saída da rede em que não existem laços indutivos foram estimados através de filmagens das alças dos trevos de acesso às rodovias Anhanguera e Bandeirantes. Com isso, pôde-se determinar as porcentagens do fluxo principal entrando ou saindo dessas alças, conforme explicado no item 5.6.1. Para garantir que a continuidade dos fluxos nos nós da rede, os fluxos nos links de entrada e saída estimados através de porcentagens do fluxo principal foram ajustados, a fim de que a rede não apresentasse erros nos fluxos observados.

Tendo-se determinado os fluxos horários das 5:00 às 10:00 horas para cada link da rede simulada de forma a não haver erros de equilíbrio de fluxo entre os links (Anexo C), foram construídos os arquivos de fluxos de tráfego observados, exigidos para a execução do QueensOD. Os tempos de viagem nos links, quando submetido aos fluxos observados, foram calculados dividindo-se o comprimento do link pela velocidade média no link. A velocidade média no link foi determinada através da relação fluxo-velocidade calibrada para cada rodovia do corredor estudado, mostrada no item 5.5.

Quando o QueensOD foi usado para estimar as demandas horárias das 5:00 às 10:00 horas utilizando apenas os três arquivos indispensáveis (arquivo de nós, arquivo de tramos e arquivo de fluxo nos links), foram obtidos pares origem/destino pouco prováveis de existirem no sistema real, como por exemplo, o par O/D em que os veículos saem de São Paulo pela Rodovia dos Bandeirantes (km 11), vão até o RodoAnel (km 24) e voltam pela Via Anhanguera até o seu destino no quilômetro 18. Esses pares O/D improváveis foram obtidos porque não se dispunha de nenhuma informação prévia (matriz O/D semente) e, por conseguinte, todas as combinações O/D tinham a mesma probabilidade de ocorrência.

Para eliminar esses pares O/D pouco prováveis, foi utilizado o arquivo de demanda semente na estimação das matrizes O/D. Como não se dispunha de informações prévias sobre a matriz O/D para o corredor estudado, decidiu-se criar uma matriz O/D semente a partir da matriz inicial calculada pelo QueensOD, da qual foram excluídos os pares O/D considerados improváveis.

Um segundo ajuste realizado visou corrigir uma distorção observada na atribuição de tráfego realizada pelo Integration e pelo QueensOD. Analisando-se o comportamento de escolha da rota dos veículos na rede simulada, observou-se que todos os veículos que saíam do interior (origem 25) em direção a São Paulo (destino 12) e de São Paulo (origem 11) em direção ao interior (destino 18) escolhiam a Rodovia dos Bandeirantes como rota. Ainda que esta escolha tenha lógica, pois o caminho mínimo entre estes dois pares O/D passa pela Rodovia dos Bandeirantes, isso fez com que o fluxo de tráfego nos links da Via Anhanguera fosse subestimado. Para reduzir os erros nos fluxos nos links da rede simulada, foi criada uma classe adicional de automóveis que são proibidos de trafegar na Rodovia dos Bandeirantes. O volume dessa classe adicional foi determinado como sendo a diferença entre o volume observado na Via Anhanguera e o volume simulado que passou pela Via Anhanguera. Com essa classe adicional de veículos, que

representa 7% do volume total de veículos simulados, e com a matriz semente, as diferenças entre os fluxos observados e estimados pelo QueensOD reduziu-se praticamente a zero, como pode ser visto na Tabela 5.6, que mostra as médias e os desvios padrões dos erros relativos entre o fluxo observado e o estimado nos links da rede simulada fazendo os automóveis da classe 4 trafegarem pela Via Anhanguera.

Tabela 5.6: Erros relativos médios e desvios padrões dos erros relativos entre o fluxo observado e estimado nos links das demandas O/D sintéticas horárias no período entre 5:00 e 10:00

Período (horas)	**5:00 – 6:00**	**6:00 - 7:00**	**7:00 - 8:00**	**8:00 - 9:00**	**9:00 - 10:00**
Erro médio (%)	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Desvio padrão (%)	0,7	0,2	0,1	0,2	0,1

As matrizes O/D obtidas estão mostradas nas Figuras 5.13(a) a 5.13(e). A Figura 5.14 é uma representação esquemática da rede simulada, na qual são mostrados apenas os nós de origem e de destino. A partir das demandas horárias estimadas pelo QueensOD, o arquivo de demanda de tráfego do Integration foi construído e o corredor simulado.

O\D	**1**	**2**	**3**	**5**	**7**	**8**	**9**	**10**	**12**	**15**	**16**	**18**	**Total**
1	0	0	87	0	10	0	10	0	0	10	0	16	133
2	0	0	0	0	0	0	0	0	488	0	0	0	488
4	0	0	0	0	12	0	20	0	0	20	0	94	146
6	0	28	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	128
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	15
8	0	21	0	0	0	0	0	0	418	0	0	0	439
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	27
10	0	30	0	0	0	0	0	0	34	0	0	0	64
11	389	0	285	0	120	0	63	0	0	84	0	607	1548
14	0	0	0	0	0	0	0	0	113	0	0	0	113
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47	47
24	0	66	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	166
25	0	68	0	222	0	4	0	45	1216	0	40	0	1595
Total	389	213	372	222	142	4	93	45	2469	114	40	806	4909

Figura 5.13(a): Matriz O/D sintética estimada para o período entre 5:00 e 6:00

O\D	**1**	**2**	**3**	**5**	**7**	**8**	**9**	**10**	**12**	**15**	**16**	**18**	**Total**
1	0	0	206	0	25	0	25	0	0	25	0	40	321
2	0	0	0	0	0	0	0	0	1097	0	0	0	1097
4	0	0	0	0	25	0	51	0	0	50	0	259	385
6	0	60	0	0	0	0	0	0	216	0	0	0	276
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37	37
8	0	45	0	0	0	0	0	0	901	0	0	0	946
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	75	75
10	0	65	0	0	0	0	0	0	75	0	0	0	140
11	861	0	691	0	285	0	129	0	0	177	0	1717	3860
14	0	0	0	0	0	0	0	0	128	0	0	0	128
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	128	128
24	0	144	0	0	0	0	0	0	219	0	0	0	363
25	0	118	0	480	0	11	0	128	2538	0	116	0	3391
Total	861	432	897	480	335	11	205	128	5174	252	116	2256	11147

Figura 5.13(b): Matriz O/D sintética estimada para o período entre 6:00 e 7:00

O\D	1	2	3	5	7	8	9	10	12	15	16	18	Total
1	0	0	265	0	40	0	40	0	0	40	0	82	467
2	0	0	0	0	0	0	0	0	1211	0	0	0	1211
4	0	0	0	0	39	0	79	0	0	78	0	358	554
6	0	63	0	0	0	0	0	0	228	0	0	0	291
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	58	58
8	0	47	0	0	0	0	0	0	952	0	0	0	999
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	113	113
10	0	65	0	0	0	0	0	0	96	0	0	0	161
11	1120	0	609	0	353	0	219	0	0	297	0	2346	4944
14	0	0	0	0	0	0	0	0	923	0	0	0	923
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	193	193
24	0	165	0	0	0	0	0	0	253	0	0	0	418
25	0	101	0	756	0	34	0	307	3313	0	278	0	4789
Total	1120	441	874	756	432	34	338	307	6976	415	278	3150	15121

Figura 5.13(c): Matriz O/D sintética estimada para o período entre 7:00 e 8:00

O\D	1	2	3	5	7	8	9	10	12	15	16	18	Total
1	0	0	280	0	30	0	30	0	0	30	0	85	455
2	0	0	0	0	0	0	0	0	919	0	0	0	919
4	0	0	0	0	35	0	71	0	0	70	0	317	493
6	0	49	0	0	0	0	0	0	178	0	0	0	227
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	52	52
8	0	37	0	0	0	0	0	0	744	0	0	0	781
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	115	115
10	0	63	0	0	0	0	0	0	93	0	0	0	156
11	982	0	618	0	391	0	164	0	0	226	0	2135	4516
14	0	0	0	0	0	0	0	0	875	0	0	0	875
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	195	195
24	0	159	0	0	0	0	0	0	245	0	0	0	404
25	0	73	0	785	0	44	0	220	2987	0	199	0	4308
Total	982	381	898	785	456	44	265	220	6041	326	199	2899	13496

Figura 5.13(d): Matriz O/D sintética estimada para o período entre 8:00 e 9:00

O\D	1	2	3	5	7	8	9	10	12	15	16	18	Total
1	0	0	268	0	25	0	25	0	0	25	0	82	425
2	0	0	0	0	0	0	0	0	878	0	0	0	878
4	0	0	0	0	36	0	64	0	0	64	0	309	473
6	0	44	0	0	0	0	0	0	158	0	0	0	202
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48	48
8	0	33	0	0	0	0	0	0	662	0	0	0	695
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	116	116
10	0	61	0	0	0	0	0	0	89	0	0	0	150
11	987	0	680	0	376	0	137	0	0	190	0	2111	4481
14	0	0	0	0	0	0	0	0	627	0	0	0	627
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	197	197
24	0	153	0	0	0	0	0	0	236	0	0	0	389
25	0	12	0	727	0	44	0	162	2671	0	147	0	3763
Total	987	303	948	727	437	44	226	162	5321	279	147	2863	12444

Figura 5.13(e): Matriz O/D sintética estimada para o período entre 9:00 e 10:00

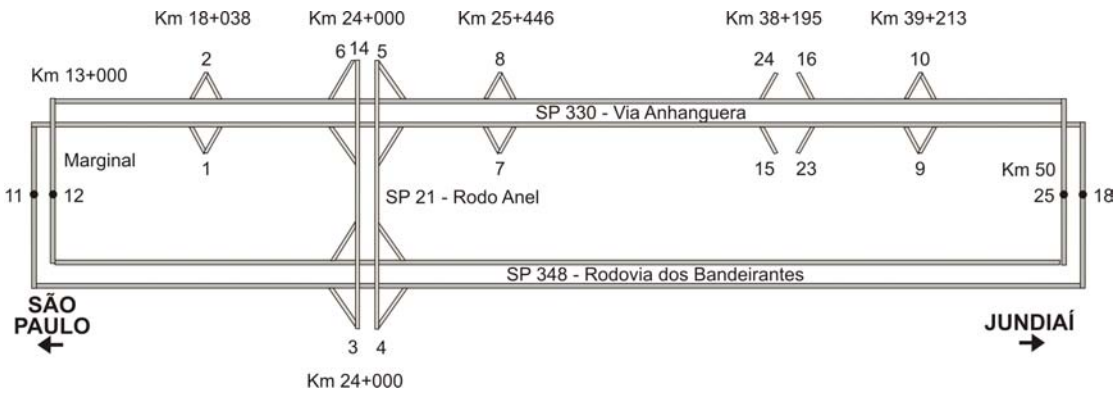


Figura 5.14: Nós de origem e destino na rede representando o corredor estudado

5.6.4 Verificação das diferenças entre os fluxos observados e simulados

Com os parâmetros de "car-following" do modelo calibrados como apresentado no item 5.5, e com as demandas horárias de tráfego estimadas pelo QueensOD e ajustadas como apresentado anteriormente (eliminação dos pares O/D pouco prováveis e criação da classe adicional de veículos que só trafegam pela Via Anhanguera), a média das diferenças entre os fluxos observados e simulados nos links do corredor estudado para o período das 6:00 às 9:00 horas foi de 3,4% e o desvio padrão 3,6%.

Essa diferença encontrada foi considerada satisfatória para essa pesquisa devido à complexidade do corredor estudado, a falta de dados mais confiáveis de origem/destino dos veículos e o objetivo principal do trabalho ser demonstrar como um modelo de microssimulação pode ser utilizado para produzir dados relacionados ao transporte sustentável e não uma calibração refinada do modelo.

5.7 Desagregação da demanda em função da classe veicular

Numa simulação no Integration, as demandas entre os pares origem e destino são usadas para geração das partidas de veículos. Portanto, é necessário fornecer informações sobre a composição da demanda, em termos das classes veiculares, quando existir mais de uma classe de veículos na simulação – o Integration admite até cinco classes veiculares numa mesma simulação. As matrizes O/D sintéticas mostradas na Figura 5.14(a) a 5.14(e) são agregadas e representam o número total de viagens, de todos os tipos de veículos que viajam entre uma dada origem e um dado destino. Nesta seção, apresenta-se a forma como foram obtidos dados para caracterização das classes veiculares e como as demandas agregadas entre pares O/D foram estratificadas em função dos tipos de veículos.

5.7.1 Porcentagens de veículos pesados

O número de veículos pesados nos tramos do corredor estudado foi obtido diretamente dos dados do SAT. A partir desses dados, as porcentagens médias de veículos pesados foram calculadas para cada hora entre 5:00 e 10:00 horas como sendo a média das porcentagens horárias das terças, quartas e quintas feiras, no período de 27/11/01 a 18/02/02 (Tabelas 5.7 e 5.8). Para a Rodovia dos Bandeirantes, as porcentagens médias utilizadas nas simulações foram obtidas do contador de tráfego do quilômetro 32. As porcentagens médias de veículos pesados, para a Via Anhanguera, foram calculadas como sendo as médias das porcentagens fornecidas pelos contadores instalados nos quilômetros 16, 22 e 27. A média, o número de observações e o desvio padrão das porcentagens de veículos pesados para cada hora, entre 5:00 e 10:00 horas, obtidos de cada contador de tráfego são apresentadas no Anexo D.

Tabela 5.7: Porcentagens médias de veículos pesados na Rodovia dos Bandeirantes

Período	**5 - 6**	**6 - 7**	**7 - 8**	**8 - 9**	**9 – 10**
Pista norte	43,1%	25,4%	15,8%	15,3%	18,8%
Pista sul	62,8%	37,9%	22,1%	15,3%	17,8%

Tabela 5.8: Porcentagens de veículos pesados na Via Anhanguera

Período	**5 - 6**	**6 - 7**	**7 - 8**	**8 - 9**	**9 – 10**
Pista norte	45,6%	23,8%	15,9%	15,7%	18,9%
Pista sul	29,4%	17,1%	12,8%	14,3%	16,4%

Os veículos pesados foram ainda subdivididos em classes de caminhões, a partir de dados da composição veicular do tráfego de caminhões obtida num estudo anterior (Demarchi e Setti, 1999), que analisou 6.765 observações nas balanças rodoviárias dos quilômetros 58 e 110 da Via Anhanguera em 1997 e 1998. As classes de caminhões observadas nesse estudo e a proporção de cada classe no tráfego de caminhões que passa pelas balanças estão apresentadas na Figura 5.15.

Nomenclatura	Configuração típica	Porcentagem
11		17,7 %
12		48,6 %
11+1		0,5 %
11+2		4,1 %
11+3		24,8 %
12+3		3,2 %
11+111		0,8 %
Outros	-	0,3 %

Figura 5.15: Tipos de caminhões observados na Via Anhanguera (Demarchi e Setti, 1999)

Baseado nessa classificação, a composição do tráfego no corredor estudado foi dividida em cinco classes de veículos, como mostra a Tabela 5.9 Duas das classes incluem apenas automóveis e três das classes são caminhões (rígidos leve, rígidos pesados e articulados). As demandas entre pares O/D para automóveis (classe 1), automóveis proibidos de viajar pela Rodovia dos Bandeirantes (classe 4) e de caminhões (classes 2, 3 e 5) foram geradas usando-se o QueensOD. A demanda total de caminhões foi estratificada pelas classes 2 (caminhões rígidos leves), 3 (caminhões rígidos pesados) e 5 (caminhões articulados) usando-se as proporções mostradas na Tabela 5.10.

Tabela 5.9: Divisão das classes de veículos utilizada nas simulações

Classe	Tipo de veículo
1	Automóvel
4	Automóvel (proibido de trafegar na Rodovia dos Bandeirantes)
2	Caminhão rígido leve
3	Caminhão rígido pesado
5	Caminhão articulado

Tabela 5.10: Composição do tráfego de caminhões no corredor estudado

Classe	Tipo de caminhão	Porcentagem do tráfego de caminhões
2	Rígido leve	17,7 %
3	Rígido pesado	48,6%
5	Articulado	33,7%

5.7.2 Arquivo de parâmetros veiculares

Na aplicação do simulador, decidiu-se que, ao invés de se usar alguns dos 25 veículos norte-americanos já codificados no Integration, seria mais adequado codificar veículos nacionais, com base em estudos anteriores (Demarchi, 2000; Araújo, 2001). Portanto, valores do peso, potência, comprimento, área frontal e os coeficientes do modelo de desempenho para cada classe de veículo codificada para representar a composição do tráfego no corredor foram obtidos de um estudo anterior (Demarchi, 2000). Esses dados, que estão apresentados em Anexo E, foram incluídos no arquivo "`max_acc.dat`". O automóvel usado foi o Gol 1.6, que foi considerado como sendo representativo dos veículos que circulam pelo corredor estudado.

5.8 Cenários propostos

Idealmente, os cenários estudados deveriam retratar opções operacionais ou de investimento para o corredor estudado, obtidas a partir de discussões envolvendo os operadores do corredor, seus usuários, o poder concedente e a população que vive no entorno do corredor, já que cada um desses grupos têm seus interesses próprios que, provavelmente, não são coincidentes. A disponibilidade limitada de recursos físicos e humanos para a realização desta pesquisa impediu que esta linha de ação fosse adotada. Por isso, foram definidos quatro cenários hipotéticos para serem usados no estudo de caso. Estes cenários são:

- Cenário 1: operação atual do sistema;
- Cenário 2: aumento da velocidade de fluxo livre na Via Anhanguera para 110 km/h;
- Cenário 3: prolongamento de terceiras faixas em rampas íngremes nas duas rodovias; e
- Cenário 4: proibição de tráfego de caminhões no período de pico (das 7:00 às 8:00).

O cenário 1 representa a operação atual do corredor estudado e foi simulado considerando-se que todas as classes de veículos podem trafegar livremente em qualquer rodovia e em qualquer horário. Este cenário, como os demais, foi simulado com o tráfego atual e com o tráfego previsto para os próximos quatro anos.

O cenário 2 foi definido para representar um aumento de 10 km/h na velocidade regulamentada da Via Anhanguera, de 100 km/h (condição atual) para 110 km/h. Para

isso, a velocidade de fluxo livre nos links desta rodovia foi codificada como sendo 110 km/h.

O cenário 3 (que não é estratégia puramente operacional, já que requer investimento de capital) foi escolhido por ser uma medida de baixo custo se comparado ao aumento de capacidade através da construção de faixas de tráfego adicionais ao longo de toda a extensão das rodovias do corredor. Neste cenário as faixas adicionais existentes nas principais rampas de subida da Via Anhanguera foram prolongadas em 400 metros (Figura 5.16).

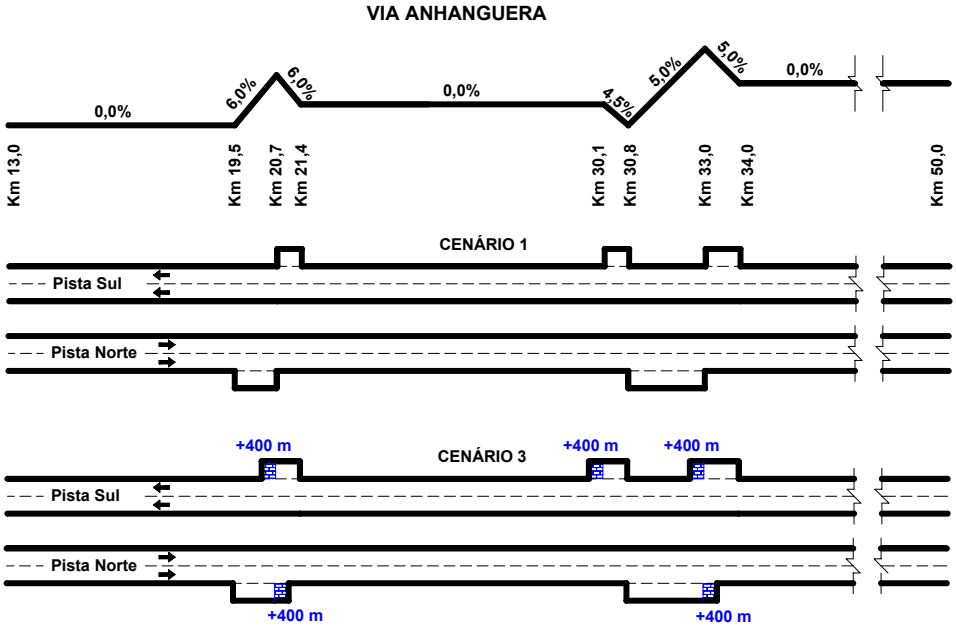


Figura 5.16: Representação do número de faixas codificadas para os cenários 1 e 3.

As faixas de aceleração e desaceleração do acesso ao RodoAnel pela Rodovia Bandeirantes também foram prolongadas passando de 200 metros, cenário 1, para 500 metros no cenário 3. Assim, o cenário 3 simula a construção de 3.200 metros de faixas de tráfego em pontos estratégicos do corredor, visando melhorar o desempenho do fluxo de tráfego nos pontos considerados mais críticos do corredor.

No cenário 4, a circulação de caminhões foi proibida no corredor no período de pico, entre 7:00 e 8:00 horas. Na simulação deste cenário, foi suposto que metade da demanda dos caminhões que deveriam entrar na rede das 7:00 às 8:00 horas antecipam suas viagens e passam pelo corredor entre 6:00 e 7:00 horas. Supôs-se também que a outra metade da demanda concentra-se nos 15 minutos após o término da proibição, entre 8:00 e 8:15.

Todos os cenários mencionados foram simulados das 5:00 às 10:00 horas com os fluxos de tráfego observados em 2001 e com os fluxos estimados para os anos de 2002 a 2005. As demandas de tráfego futuras foram estimadas através da taxa de crescimento de tráfego de 3,4% ao ano, que é a taxa usada no Plano Diretor de Desenvolvimento dos Transportes (PDDT), elaborado pela Secretaria dos Transportes do Estado de São Paulo entre 1999 e 2000, e que visa "a partir de um diagnóstico da situação atual do sistema de transporte, buscar um sistema de transporte mais eficiente no futuro, removendo os gargalos e os pontos críticos do sistema atual, capacitando-o a atender a demanda futura de transporte" (São Paulo, 2000).

Devido à natureza estocástica dos fluxos de tráfego rodoviários, foram feitas cinco replicações das simulações para cada um dos cinco anos de análise, para cada um dos quatro cenários adotados. Desta forma, o total de simulações realizadas nessa etapa da pesquisa foi de 100 = 4 (cenários) × 5 (anos) × 5 (replicações). O tempo total de simulação gasto foi de aproximadamente 350 horas, uma vez que cada simulação levou em média 3,5 horas para ser completada. Para a realização dessas simulações, foram utilizados 3 microcomputadores equipados com CPUs AMD Athlon XP 2200 e 256 MB de memória RAM e um microcomputador com CPU AMD Athlon XP 1600 e 256 MB de memória RAM, que funcionaram praticamente ininterruptamente durante uma semana.

5.9 Análise dos resultados dos experimentos de simulação e cálculo do índice de sustentabilidade

Como já apresentado no Capítulo 2, o Integration é capaz de fornecer uma série de informações, agregadas ou desagregadas, a respeito das viagens realizadas durante a simulação. O usuário tem a opção de solicitar a geração de resultados desagregados, estratificados em função das viagens completas (isto é, entre uma origem e um destino) ou em função das viagens realizadas ao longo de cada tramo da rede.

Para este estudo, foram usadas as informações desagregadas referentes às viagens completas, que são fornecidas através do arquivo 15 do Integration. Das informações de saída disponíveis no arquivo 15, as seguintes informações foram usadas, para cada um dos veículos simulados:

- o número de identificação individual;
- a classe a que o veículo pertence,
- o nó de origem da viagem;

- o nó de destino da viagem;
- o horário programado para iniciar a viagem;
- o horário em que a viagem foi efetivamente iniciada;
- o tempo total de viagem entre a origem e o destino;
- o atraso;
- a distância total percorrida na rede;
- a velocidade média de viagem;
- o consumo total de combustível ao longo da viagem; e
- as emissões de poluentes: hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO_x).

5.9.1 Escolha das medidas de desempenho

As medidas de desempenho escolhidas para incorporação no índice de sustentabilidade foram: a taxa de viagem, o consumo de combustível e as emissões de poluentes (HC, CO e NO_x). Essas medidas de desempenho indicam, respectivamente, a performance do sistema em relação a: mobilidade, consumo energético e poluição ambiental.

A taxa de viagem, medida em minutos/km, foi escolhida devido ser a medida de desempenho relacionada à mobilidade proposta por Zeistman (2000). O consumo total de combustível ao longo da viagem (em litros) foi escolhido por ser uma medida direta do gasto energético de cada viagem. As emissões de poluentes são medidas diretas da contribuição de cada viagem à poluição ambiental ao longo do corredor estudado.

5.9.2 Taxa de viagem

A taxa de viagem é calculada dividindo-se o tempo de viagem pela distância percorrida. O tempo de viagem de uma origem *i* para um destino *j* é obtido somando-se os tempos gastos em todos os links por onde o veículo trafegou para atingir seu objetivo. O tempo de viagem num link é dado pela diferença entre o instante de entrada e o instante de saída do link, que são registrados pelo simulador. A distância percorrida é calculada somando-se todos os comprimentos dos links por onde o veículo trafegou para atingir o seu destino final:

$$\text{Taxa de viagem (min/km)} = \text{Tempo de viagem (min)} / \text{distância percorrida (km)} \quad (5.8)$$

5.9.3 Consumo de combustível e emissões de poluentes

Na falta de parâmetros para calibração de um modelo de consumo de combustível e emissão de poluentes para veículos nacionais, o modelo de consumo de combustível e emissões de HC, CO e NO_x utilizado foi o calibrado para o veículo americano Geo Prizm. Esse veículo apresenta especificações técnicas muito próximas do veículo nacional Gol utilizado no arquivo de parâmetros veiculares para representar os automóveis do corredor (Tabela 5.11).

Tabela 5.11: Comparação das especificações técnicas do Geo Prizm com o Gol.

Característica	Geo Prizm 1.6L	Gol 1.6 L
Massa (kg)	1116	1180
Potência do motor (kW)	78	68
Comprimento (m)	4,4	4,0

Como a versão do Integration usada ainda não incorporava um modelo de consumo de combustível e emissões para caminhões, decidiu-se estimar o consumo de combustível e as emissões de poluentes dos caminhões simulados através da aplicação de um fator de escala nos resultados gerados pelo modelo de consumo e emissões calibrado para o Geo Prizm.

Para isso, foram usados os arquivos "`max_acc.dat`" e "`fuelemis.dat`", que permitem que o usuário defina os parâmetros dos modelos de aceleração, de consumo de combustível e emissões para as cinco classes de veículos simuladas pelo Integration. No arquivo "`max_acc.dat`" foram definidas as características de desempenho das duas classes de automóveis (que correspondem ao Gol 1.6) e das três classes de caminhões: rígidos leves, rígidos pesados e articulados. Com isso, garantiu-se que o Integration seria capaz de simular adequadamente a velocidade e a aceleração das cinco classes veiculares usadas na simulação. Isso faz com que as estimativas de consumo de combustível e emissões para cada classe veicular sejam mais realísticas, já que tanto o modelo usado para estimar o consumo de combustível como o modelo para estimar as emissões usam, como variáveis independentes, a velocidade e a aceleração.

No arquivo "`fuelemis.dat`", os mesmo parâmetros veiculares foram usados para todas as cinco classes de veículos, já que não se dispunha de parâmetros de consumo de combustível e emissões para caminhões. Os parâmetros usados foram os do Geo Prizm 1.6 norte-americano, que corresponde ao Gol 1.6 brasileiro. Com isso, o consumo e as emissões das classes de caminhões estimados pelo Integration correspondem ao consumo e emissões de um Gol 1.6 que se comporta, em termos de desempenho (isto é,

velocidade e aceleração), como os caminhões correspondentes a cada classe. Essas estimativas de consumo e emissões (baseadas no Gol 1.6) foram então multiplicadas por um fator de ajuste para produzir as estimativas de consumo e emissões correspondentes a dos caminhões de cada classe.

Os fatores de ajuste do consumo de combustível para os caminhões foram determinados através de pesquisas realizadas em empresas transportadoras da região de São Carlos, onde foram obtidas informações a respeito dos consumos médios de combustíveis dos diferentes tipos de caminhões que trafegam em rodovias de pista dupla. Assim, o fator de ajuste adotado para estimar o consumo de combustível das classes de veículos simuladas foi calculado dividindo-se o consumo do Geo Prizm (14,0 km/l) pelo consumo médio obtido das empresas para cada classe de veículo. Por exemplo: fator de ajuste para a classe 2 = 14,0/5,0 = 2,8 (Tabela 5.12).

Tabela 5.12: Fatores de ajustes para o consumo de combustível dos veículos comerciais.

Classes de veículos simulados no Integration	Descrição	Consumo médio de combustível	Fator de ajuste
1	Automóvel	14,0 km/l	1,0
2	Caminhões rígidos leves	5,0 km/l	2,8
3	Caminhões rígidos pesados	2,5 km/l	5,6
4	Automóvel	14,0 km/l	1,0
5	Caminhões articulados	2,0 km/l	7,0

Deste modo, o consumo total de combustível gastos em cada cenário foi calculado pela Equação (5.9):

$$Comb_{Total} = Comb_1 + 2{,}8 \times Comb_2 + 5{,}6 \times Comb_3 + Comb_4 + 7{,}0 \times Comb_5 \qquad (5.9)$$

em que $Comb_{Total}$: consumo total de combustível dos veículos simulados (l);

$Comb_1$: consumo de combustível dos automóveis da classe 1 (l);

$Comb_2$: consumo de combustível dos caminhões da classe 2 (l);

$Comb_3$: consumo de combustível dos caminhões da classe 3 (l);

$Comb_4$: consumo de combustível dos automóveis da classe 4 (l); e

$Comb_5$: consumo de combustível dos caminhões da classe 5 (l);

Os fatores de ajuste utilizados para quantificar as emissões de poluentes dos veículos comercias no corredor foram determinados em função dos limites máximos de emissões de poluentes para veículos automotores estabelecidos pelo Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE (Ministério do

Meio Ambiente, 2004). Considerando-se que todos os veículos comerciais obedecem a esses limites estabelecidos, os fatores de ajuste das emissões de HC, CO e NO_x foram calculados como sendo a relação entre o limite permitido para os veículos pesados em relação ao limite permitido para os veículos leves de passeio. Por exemplo, o fator de ajuste para as emissões de CO das Classes 2, 3 e 5 é 4,0/2,0 = 2,0. A Tabela 5.13 mostra os fatores de ajuste usados para emissões de HC, CO e NO_x.

Tabela 5.13: Fatores de ajuste adotados no calculo das emissões de poluentes pelos caminhões

Poluente	Limites máximos de emissões de poluentes		Fator de ajuste
	Veículos leves	Veículos pesados	
HC (g/km)	0,3	1,1	3,7
CO (g/km)	2,0	4,0	2,0
NO_x (g/km)	0,6	7,0	11,7

As quantidades de hidrocarbonetos (HC) geradas pelos veículos em cada cenário foram calculadas pela Equação (5.10):

$$HC_{Total} = HC_1 + HC_4 + 3{,}7 \times (HC_2 + HC_3 + HC_5) \tag{5.10}$$

em que HC_{Total} : quantidade total de HC emitida pelos veículos simulados (g);

HC_1 : emissão de HC dos automóveis da classe 1 (g);

HC_4 : emissão de HC dos automóveis da classe 4 (g);

HC_2 : emissão de HC dos caminhões da classe 2 (g);

HC_3 : emissão de HC dos caminhões da classe 3 (g); e

HC_5 : emissão de HC dos caminhões da classe 5 (g);

As quantidades de monóxido de carbono (CO) geradas pelos veículos em cada cenário foram calculadas pela Equação (5.11):

$$CO_{Total} = CO_1 + CO_4 + 2{,}0 \times (CO_2 + CO_3 + CO_5) \tag{5.11}$$

em que CO_{Total} : quantidade total de CO emitida pelos veículos simulados (g);

CO_1 : emissão de CO dos automóveis da classe 1 (g);

CO_4 : emissão de CO dos automóveis da classe 4 (g);

CO_2 : emissão de CO dos caminhões da classe 2 (g);

CO_3 : emissão de CO dos caminhões da classe 3 (g); e

CO_5 : emissão de CO dos caminhões da classe 5 (g);

E as quantidades de óxidos de nitrogênio (NO_x) geradas pelos veículos em cada cenário foram calculadas pela Equação (5.12):

$$NOx_{Total} = NOx_1 + NOx_4 + 11{,}7 \times (NOx_2 + NOx_3 + NOx_5) \tag{5.12}$$

em que NOx_{Total} : quantidade total de NO_x emitida pelos veículos simulados (g);

NOx_1 : emissão de NO_x dos automóveis da classe 1 (g);

NOx_4 : emissão de NO_x dos automóveis da classe 4 (g);

NOx_2 : emissão de NO_x dos caminhões da classe 2 (g);

NOx_3 : emissão de NO_x dos caminhões da classe 3 (g); e

NOx_5 : emissão de NO_x dos caminhões da classe 5 (g);

5.9.4 Resultados das simulações

Embora o corredor tenha sido simulado para o período das 5:00 às 10:00 horas, as contribuições de cada veículo da rede para cada medida de desempenho escolhida foram calculadas para o tempo programado de partida dos veículos das 6:00 às 9:00 horas. Inicialmente, pretendia-se calcular os índices de sustentabilidade apenas para o pico das 7:00 às 8:00 horas, mas com a definição do cenário 4 em que os caminhões foram proibidos de trafegaram entre 7:00 e 8:00 horas, decidiu-se estender o período de análise para abranger este cenário.

Tomou-se um cuidado especial para que as medidas de desempenho fossem calculadas, para cada um dos cenários, em termos de uma mesma quantidade de veículos, independentemente do tempo necessário para que esse número de veículos viaje pelo corredor. Isso é um fator muito importante por que se trabalha com dados desagregados e as medidas de desempenho são calculadas a partir do somatório das contribuições individuais de cada veículo. Um número menor de veículos em um cenário poderia distorcer as conclusões, já que o somatório das contribuições de, por exemplo, 10.000 veículos é sempre menor que o somatório das contribuições de 30.000 veículos.

As médias dos resultados obtidos das cinco replicações de cada cenário para cada ano da análise estão apresentadas nas Tabelas 5.14 a 5.18. A Tabela 5.19 apresenta a soma das contribuições de cada veículo para cada medida de desempenho nos cinco anos de análise, de 2001 a 2005.

Tabela 5.14: Resultados das simulações – 2001

Cenário	Veículos simulados	Taxa de viagem (min/km)	Combustível (L)	Emissões (g)		
				HC	CO	NO_x
1	40121	1,089	147816	158136	6038788	757837
2	40121	1,063	146783	154211	5805458	750628
3	40121	0,963	146340	162300	6302087	748276
4	40121	1,097	147031	147792	5417306	754593

Tabela 5.15: Resultados das simulações – 2002

Cenário	Veículos simulados	Taxa de viagem (min/km)	Combustível (L)	Emissões (g)		
				HC	CO	NO_x
1	41337	1,158	154202	165174	6349286	794281
2	41337	1,152	153139	160353	6060822	787309
3	41337	1,039	152375	168996	6592135	782830
4	41337	1,172	153586	155598	5765832	794897

Tabela 5.16: Resultados das simulações – 2003

Cenário	Veículos simulados	Taxa de viagem (min/km)	Combustível (L)	Emissões (g)		
				HC	CO	NO_x
1	42524	1,224	160861	173495	6725162	832627
2	42524	1,216	159738	168784	6446873	824843
3	42524	1,109	158367	176144	6914739	816339
4	42524	1,257	160473	164853	6203182	835361

Tabela 5.17: Resultados das simulações – 2004

Cenário	Veículos simulados	Taxa de viagem (min/km)	Combustível (L)	Emissões (g)		
				HC	CO	NO_x
1	43879	1,300	167889	180459	7029035	874067
2	43879	1,303	166978	175658	6733822	866030
3	43879	1,198	165133	185963	7367072	855404
4	43879	1,343	168141	175840	6721792	881486

Tabela 5.18: Resultados das simulações – 2005

Cenário	Veículos simulados	Taxa de viagem (min/km)	Combustível (L)	Emissões (g)		
				HC	CO	NO_x
1	45238	1,380	174899	189154	7415752	913478
2	45238	1,393	174523	182269	7010064	911265
3	45238	1,289	172280	194668	7767100	895890
4	45238	1,441	176006	185749	7184371	927409

Tabela 5.19: Soma dos resultados das simulações – 2001 a 2005

Cenário	Veículos simulados	Taxa de viagem (min/km)	Combustível (L)	Emissões (g)		
				HC	CO	NO_x
1	213099	1,235	805666	866418	33558022	4172290
2	213099	1,230	801161	841275	32057038	4140075
3	213099	1,124	794495	888071	34943134	4098740
4	213099	1,267	805237	829833	31292483	4193745

5.9.5 Cálculo do índice de sustentabilidade

O índice de sustentabilidade proposto por Zietsman (2000) é determinado pela soma ponderada dos valores normalizados das medidas de desempenho escolhidas, considerando a sustentabilidade do transporte (Equação 5.13).

$$IS = \sum P_i \cdot N_i \tag{5.13}$$

em que IS : índice de sustentabilidade do sistema;

P_i : peso dado a medida de desempenho *i*; e

N_i : valor normalizado da medida de desempenho *i*.

Nesta pesquisa as medidas de desempenho utilizadas no cálculo do *IS* foram: a taxa de viagem, o consumo de combustível e as emissões de hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO_x) (Equação 5.14).

$$IS = P_{TV} \cdot N_{TV} + P_C \cdot N_C + P_{HC} \cdot N_{HC} + P_{CO} \cdot N_{CO} + P_{NO_X} \cdot N_{NO_X} \tag{5.14}$$

em que IS : índice de sustentabilidade do corredor Anhangüera-Bandeirantes;

P_{TV} : peso da taxa de viagem;

N_{TV} : valor normalizado da taxa de viagem;

P_C : peso do consumo de combustível;

N_C : valor normalizado do consumo de combustível;

P_{HC} : peso da emissão de HC;

N_{HC} : valor normalizado da emissão de HC;

P_{CO} : peso da emissão de CO;

N_{CO} : valor normalizado da emissão de CO;

P_{NO_X} : peso da emissão de NO_x; e

N_{NO_X} : valor normalizado da emissão de NO_x;

A normalização dos valores das medidas de desempenho (N_i) utilizadas foi determinada através de dois métodos: o da magnitude e o do Intervalo (Furtado e Kawamoto, 1997). No método da magnitude, a normalização dos valores das medidas de desempenho é obtida pela Equação (5.15); e no método do intervalo pela Equação (5.16). Vale lembrar que esses dois tipos de métodos não esgotam todos os tipos de

normalizações existentes. Eles foram utilizados nesta pesquisa apenas para ilustrar que diferentes normalizações podem gerar diferentes resultados.

$$N_i = \frac{s_i}{s_{máx}} \tag{5.15}$$

$$N_i = \frac{s_i - s_{mín}}{s_{máx} - s_{mín}} \tag{5.16}$$

em que s_i : valor da medida de desempenho *i;*

$s_{mín}$: valor mínimo da medida de desempenho *i*; e

$s_{máx}$: valor máximo da medida de desempenho *i*.

Como as medidas de desempenho escolhidas para constituir o índice de sustentabilidade são negativas e obedecem à máxima, quanto menor, melhor, o valor normalizado 1 corresponde ao pior resultado e o valor 0 ao melhor.

Os valores normalizados da soma das contribuições de cada veículo nos cinco anos de análise foram normalizados pelos métodos da magnitude e do intervalo. Estes valores são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 5.20 e Tabela 5.21.

Tabela 5.20: Valores normalizados da soma das contribuições de cada veículo nos 5 anos de análise – Método da magnitude

Cenário	Taxa de Viagem (min/km)	Combustível (L)	Emissões (g)		
			HC	CO	NO_x
1	0,974	1,000	0,976	0,960	0,995
2	0,971	0,994	0,947	0,917	0,987
3	0,887	0,986	1,000	1,000	0,977
4	1,000	0,999	0,934	0,896	1,000

Tabela 5.21: Valores normalizados da soma das contribuições de cada veículo nos 5 anos de análise – Método do intervalo

Cenário	Taxa de Viagem (min/km)	Combustível (L)	Emissões (g)		
			HC	CO	NO_x
1	0,773	1,000	0,628	0,621	0,774
2	0,742	0,597	0,196	0,209	0,435
3	0,000	0,000	1,000	1,000	0,000
4	1,000	0,962	0,000	0,000	1,000

Os pesos dados a cada medida de desempenho são determinados por grupos de pessoas compostos de representantes da sociedade, especialistas no assunto, administradores do sistema, investidores, etc, levando-se em consideração objetivos pré-definidos. Se, por exemplo, uma dada região estiver apresentando muitos casos de

doenças respiratórias, as possíveis alternativas de mudança no sistema viário pode ser comparadas dando maior peso às emissões de poluentes dos veículos com o objetivo de melhorar a qualidade do ar. Caso o objetivo seja aumentar a mobilidade, o grupo pode dar um peso maior para a taxa de viagem do que para o consumo de combustível, por exemplo.

Nesta pesquisa foram utilizadas duas distribuições de pesos dados as medidas de desempenho. Na primeira distribuição, os pesos adotados foram os apresentados no estudo de Zietsman *et al.*(2003) em que a mobilidade representa 50% do peso no índice de sustentabilidade e o consumo de combustível e as emissões de poluentes 25% cada um (Tabela 5.22).

Tabela 5.22: Primeira distribuição de pesos adotada no calculo do índice de sustentabilidade

Critério	***Peso***	***Medida de desempenho***	***Subpeso***
Mobilidade	0,50	Taxa de viagem (min/km)	1,00
Consumo de combustível	0,25	Combustível consumido	1,00
Emissão de poluentes	0,25	HC	0,43
		CO	0,12
		NO_X	0,45

Na segunda distribuição buscou representar um alto interesse em relação à qualidade do ar, assim o peso adotado as emissões de poluentes corresponde a 80% do peso no cálculo do índice de sustentabilidade (Tabela 5.23). Vale lembrar que os pesos foram adotados arbitrariamente e servem apenas para demonstrar a sua influência no índice de sustentabilidade.

Tabela 5.23: Segunda distribuição de pesos adotada no calculo do índice de sustentabilidade

Critério	***Peso***	***Medida de desempenho***	***Subpeso***
Mobilidade	0,10	Taxa de viagem (min/km)	1,00
Consumo de combustível	0,10	Combustível consumido	1,00
Emissão de poluentes	0,80	HC	0,43
		CO	0,12
		NO_X	0,45

Os índices de sustentabilidade do corredor Anhangüera-Bandeirantes encontrados para cada cenário proposto considerando as contribuições de todos os veículos das 6:00 às 9:00 horas de 2001 a 2005 e os pesos adotados da Tabela 5.22 e Tabela 5.23 são apresentados na Tabela 5.24 e Tabela 5.25. Na Tabela 5.24 os índices foram calculados considerado os valores normalizados das medidas de desempenho pelo método da magnitude e a Tabela 5.25 pelo método do intervalo.

Tabela 5.24: Índice de sustentabilidade do corredor Anhangüera-Bandeirantes. Normalização: método da magnitude

Cenário	Descrição	*IS*	
		1ª Distr	2ª Distr
1	Operação atual	0,983	0,983
2	Velocidade regulamentada na Via Anhangüera = 110 km/h	0,974	0,966
3	Prolongamento de faixas adicionais e de aceleração/desaceleração	0,938	0,979
4	Proibição do tráfego de caminhões das 7:00 às 8:00 horas	0,990	0,967

Tabela 5.25: Índice de sustentabilidade do corredor Anhangüera-Bandeirantes. Normalização: método do intervalo

Cenário	Descrição	*IS*	
		1ª Distr	2ª Distr
1	Operação atual	0,810	0,732
2	Velocidade regulamentada na Via Anhangüera = 110 km/h	0,597	0,378
3	Prolongamento de faixas adicionais e de aceleração/desaceleração	0,138	0,440
4	Proibição do tráfego de caminhões das 7:00 às 8:00 horas	0,853	0,556

A seguir, mostra-se um exemplo da aplicação do índice de sustentabilidade no processo de tomada de decisão.

5.9.6 Aplicação do índice de sustentabilidade no processo decisório

Pode-se perceber, através dos dados apresentados nas Tabela 5.24 e Tabela 5.25, que os cenários propostos de mudanças no corredor Anhangüera-Bandeirantes apresentaram um índice de sustentabilidade melhor que a operação atual do corredor com exceção para o cenário 4 calculado com a primeira distribuição de pesos.

Analisando-se os resultados obtidos com a primeira distribuição de pesos, o prolongamento das faixas adicionais de subida e dos tapers de aceleração/desaceleração, representado pelo cenário 3, é a melhor opção, independente do tipo de normalização utilizada no cálculo do *IS* (*IS* = 0,938; *IS* = 0,138). Entretanto, pode-se também observar que esse cenário não obteve o melhor índice de sustentabilidade, quando se analisa os cenários propostos com a preocupação de dar maior peso às emissões de poluentes (segunda distribuição de pesos). Nesse caso, o cenário 2, que é o aumento da velocidade regulamentada na Via Anhanguera de 100 km/h para 110 km/h, passa a ser a melhor alternativa (*IS* = 0,966; *IS* = 0,378), ainda que por uma pequena margem de vantagem.

No entanto, deve-se fazer uma ressalva a respeito desta conclusão: embora o aumento da velocidade regulamentada na Via Anhanguera para 110 km/h (cenário 2) tenha o melhor índice de sustentabilidade para segunda distribuição de pesos (e talvez seja o cenário mais fácil de ser implantado no corredor, do ponto de vista de aceitação dos usuários), nem todas as suas vantagens e desvantagens foram consideradas no índice de sustentabilidade usado, já que não foram considerados, por exemplo, os

impactos deste cenário na segurança de trânsito. É possível que, com o aumento da velocidade regulamentada, também ocorra um aumento no número e na gravidade dos acidentes. Desta forma, seria mais conveniente que o índice de sustentabilidade usado também incorporasse uma medida de desempenho relacionada com a segurança de trânsito – o que não foi feito por falta de recursos e informações. Nesse caso, é bem possível que o cenário 2 deixasse de ser a melhor opção.

Um outro aspecto a ser ressaltado é a influência dos pesos adotados nos resultados do cômputo do índice de sustentabilidade. Comparando-se os índices de sustentabilidade obtidos com as duas distribuições de pesos adotadas, pode-se perceber que o valor dos pesos atribuído às medidas de desempenho pode alterar significativamente os resultados da análise. Por outro lado, esta é uma característica interessante, já que possibilita incorporar no cálculo do índice a importância que se deseja atribuir a um ou mais aspectos da sustentabilidade do sistema de transporte sendo analisado.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O objetivo desta pesquisa foi demonstrar como um modelo de microssimulação de tráfego pode ser usado para produzir informações sobre medidas de desempenho usadas para avaliar o grau de sustentabilidade de um corredor rodoviário. Neste capítulo são apresentadas as conclusões gerais sobre o estudo desenvolvido e as recomendações para trabalhos futuros de aprimoramento, visto as limitações presentes nessa pesquisa.

6.1 Conclusões

O corredor formado pela Rodovia dos Bandeirantes e pela Via Anhanguera entre São Paulo e Jundiaí foi modelado com um alto grau de detalhe, representando tanto os fluxos de veículos em um dia típico como também as características geométricas das rodovias. Na composição do tráfego, foram simuladas, além dos automóveis, três diferentes classes de caminhões: rígidos leves, rígidos pesados e articulados. A simulação incluiu ainda a localização dos acessos às rodovias, o comprimento, o número de faixas e a inclinação das principais rampas ao longo de todo o corredor modelado.

Com os dados de tráfego obtidos dos laços indutivos instalados no corredor, foi possível recalibrar o simulador Integration e obter uma matriz O/D sintética para o período de pico da manhã com baixo custo e com pouco tempo despendido em coleta de campo, mostrando que dados obtidos dos sistemas inteligentes de transporte podem ser uma importante fonte de dados.

O modelo de simulação de tráfego Integration foi capaz de representar o corredor e gerar dados individuais para cada veículo que dificilmente poderiam ser coletados diretamente em campo. As informações geradas pelo modelo foram usadas para calcular um índice de sustentabilidade que leva em conta a mobilidade (taxa de viagem),

consumo energético (consumo de combustível) e poluição ambiental (emissões de poluentes) ao longo do corredor analisado.

A normalização dos valores das medidas de desempenho escolhidas para compor o índice de sustentabilidade não alterou a classificação de qual intervenção no corredor é a melhor opção tendo em vista o transporte sustentável. Uma possível explicação é o fato dos valores máximos e mínimos utilizados na normalização serem os valores máximos e mínimos obtidos dos cenários propostos.

Os pesos dados às medidas de desempenho, que refletem a importância relativa das medidas de desempenho usadas na composição do índice de sustentabilidade e deve estar relacionadas com os objetivos e valores da sociedade, são um fator importante na definição do índice de sustentabilidade, pois podem afetar o ordenamento das alternativas analisadas. Desta forma, na definição das medidas de desempenho que constituirão o índice de sustentabilidade e os pesos dados a cada uma destas medidas, deve-se ter em mente quais os objetivos almejados com as alternativas de ação que serão avaliadas através do índice de sustentabilidade.

6.2 Recomendações

Frente às limitações desta pesquisa, sugere-se que, para aprimoramento dos resultados encontrado:

1. O modelo Integration seja calibrado usando mais de um parâmetro de desempenho, através de um procedimento de busca mais exaustivo. Nesta pesquisa apenas os fluxos simulados foram comparados com os fluxos observados em cada tramo do corredor.
2. Sejam realizadas coletas de dados nas alças de entrada e saída da rede a fim de se obter uma matriz O/D diretamente, a fim de que se possa verificar quanto a matriz O/D estimada pelo QueensOD difere dessa matriz O/D obtida através de entrevistas ou placas.
3. Atualizar a composição do tráfego de veículos pesados no corredor, uma vez que a composição utilizada nesta pesquisa foi obtida em 1998.
4. Coletar dados de emissões e consumo de combustível de veículos nacionais, de tal forma que seja possível recalibrar os modelos de consumo de combustível e emissão de poluentes utilizados pelo Integration.
5. Analisar se é conveniente que o índice de sustentabilidade inclua outras medidas de desempenho, tais como segurança de trânsito, custo dos deslocamentos, etc.

Nesse caso, seria necessário criar modelos para incorporar essas medidas de desempenho aos resultados das simulações.

6. Utilizar outros tipos de normalizações a fim de se analisar sua influência nos resultados do índice de sustentabilidade.
7. Simular o corredor com um outro modelo de simulação (por ex., o CORSIM) e comparar os resultados obtidos por cada modelo, a fim de se identificar possíveis distorções que podem ter sido introduzidas pela lógica interna dos modelos.

Seria também conveniente que o método proposto para o cálculo do índice de sustentabilidade fosse aplicado em outros corredores rodoviários para avaliar a sua aplicabilidade e confiabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHAMSSON, T. (1998) *Estimation of origin-destination matrices using traffic counts – A literature survey*. Publicado no 45th North American Meetings Regional Science Association International Santa Fe, New Mexico, USA, November 11-14, 1998. (http: iiasa.ac.at/Publications/Documents/IR-98-021.pdf, acessado em 18/agosto/03).

AHN, K.; RAKHA, H.; ASCE, M.; TRANI, A.; VAN AERDE, M. (2002) *Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels*. Journal of Transportation Engineering, v. 128, n 2, p. 182–190.

AL-KAISY, A. F.; STEWART, J. A.; VAN AERDE, M (1999) *Microscopic simulation of lane changing behaviour at freeway weaving sections.* Canadian Journal of Civil Engineering, v. 26, p. 197–207.

ARAÚJO, J. J. (2001) *Características operacionais de praças de arrecadação de pedágio.* São Carlos, 2001. 104 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ASTARITA, V. *et al* (2001) *Comparison of three methods for dynamic network loading.* Transportation Research Record, n 1771, p 179-190.

BACON, V. W. *et al* (1994) *Use of INTEGRATION model to study high-occupancy-vehicle facilities*. Transportation Research Record, n 1446, p 8-13.

BENEKOHAL, R. F. (1991) *Procedure for validation of microscopic traffic flow simulation models*. Transportation Research Record, n 1320, p 190-202.

BLACK, W. R. (2000) *Toward a Measure of Transport Sustainability.* Proceedings of the 79th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C.

BOXILL, S.A.; YU, L. (2000) *An Evaluation of Traffic Simulation Models for Supporting ITS Development* Report 167602-1, Southwest Region University Transportation Center, Texas A&M University, College Station, TX, EUA. Disponível em <http://swutc.tamu.edu/Reports/167602-1.pdf>, acesso em 20.11.2004.

BRUNDTLAND COMMISSION (1987) *Our Common Future*. World Commission on Environment and Development. Oxford University Press, Oxford, Inglaterra.

DEMARCHI, S. H. (2000) *Influência de veículos pesados na capacidade e nível de serviço de rodovias de pista dupla*. Tese de doutorado (orientador: Prof. Dr. José Reynaldo A. Setti). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. S. Carlos, SP.

DEMARCHI, S. H. (2002) *Uma nova formulação para o modelo fluxo-velocidade-densidade de Van Aerde*. In: Panorama Nacional de Pesquisa em Transportes 2002 (Anais do XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes) ANPET, Natal, RN, vol. 1, p. 313-324.

DEMARCHI, S. H.; SETTI, J. R. A. (2000) *Desempenho de caminhões em rampas ascendentes*. In: Transporte em Transformação, ed. 1, São Paulo, Makron Books, v.3, p. 79-94.

DEMARCHI, S. H.; SETTI, J. R. A. (2001) *Recalibração do simulador INTEGRATION para uma rodovia de pista dupla.* TRANSPORTES: uma experiência em rede. FINEP, p. 87-102.

DITTMAR, H. (1996) *Thinking Like a System: Sustainability Through Transportation Technology*. Transportation Quarterly, v. 4, n. 1, p. 19-26.

DIXON, M. D.; RILETT, L. R. (2002) *Real-time OD estimation using automatic vehicle identification and traffic count data*. International Journal of Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 17, p. 7-21.

DRAKE, J. S.; SCHOFER, J. L.; MAY, A. D., JR. (1967) *A statistical analysis of speed density hypotheses*. Transportation Research Record, n 154, p. 53-87.

EASA, S. M. (1993) *Urban trip distribution in practice. II: Quick response and special topics*. Jounal of Transportation Engineering, vol. 119, n. 6, p. 816-834.

EPA (1996) *Indicators of the Environmental Impacts of Transportation: Highway, Rail, Aviation, and Maritime Transport.* Report 230-R-96-009, Environmental Protection Agency, Washington D.C.

FRANÇOISE, A. (200?) *Desenvolvimento Sustentável - Modulo1*. Escola de Engenharia de Sorocaba – FACENS. <http://www.facens.br/alunos/material/AndreaC405TNI1/>. Acesso em 02.12.04

FURTADO, N.; KAWAMOTO, E. (1997) *Avaliação de projetos de transporte*. Apostila da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC – USP.

GANNON, C.; SHALIZI, Z. (1995) *The Use of Sectoral and Project Performance Indicators in Bank-Financed Transport Operations: A First Edition Note.* The World Bank, Washington D.C.

HALL, F. L. *et al* (2000) *Validation results for four models of oversaturated freeway facilities*. Transportation Research Record, n 1710, p 161-170.

HELLINGA, B. R. (1994) *Estimating dynamic origin-destination demands from link and probe counts*. Ph.D. Thesis, Queens University, Kingston, Ontario, Canada.

HELLINGA, B. R. (1998) *Requirements for the calibration of traffic simulation models*. Proceedings of the Annual Meeting of the CSCE, v. IV-B, p. 211–222.

HELLINGA, B.; VAN AERDE, M. (1994) *An overview of a simulation study of the Highway 401 freeway traffic management system*. Canadian Journal of Civil Engineering, v. 21, p. 439–454.

HELLINGA, B. R.; VAN AERDE, M. (1998) *Estimating dynamic O-D demands for a freeway corridor using loop detector data*. Proceedings of the Canadian Society for Civil Engineering 1998 Annual Conference held in Halifax, Nova Scotia, vol. IVb, p. 185-197.

HOUGHTON, N. (1998) *Ecologically sustainable development: indicators and decision process.* ARRB Transportation Research, Report 319, Vermont South, Austrália.

LACALLE, M.J. (2003) *Calibración del Microsimulador AIMSUN para Flujo Ininterrumpido en la Ciudad de Santiago*. Dissertação de mestrado, Escuela de Ingenieria, PUC, Chile.

LIGHTHILL, M.; WHITHAM, G. (1955) *On Kinetic waves II: a theory of traffic flow on long, crowded roads*. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, n. 229, p. 317–345. Citado por Lacalle (2004).

LINDQUIST, E. (1998) *Moving toward sustainability: transforming a comprehensive land use and transportation plan*. Transportation Research Record. n 1617, p. 1–9.

LITMAN, T. (1999) *Exploring the paradigm shifts needes to reconcile transportation and sustainbility objectives.* Transportation Research Record. n 1670, p. 8–12.

LITMAN, T. (2000) *Transportation market reforms for sustainability.* Transportation Research Record. n 1702, p. 11–20.

LITMAN, T. (2003) *Sustainable transportation indicators*. Victoria Transportation Policy Institute, Victoria, BC, Canadá.

LITMAN, T.; BURWELL, D. (2003) *Issues in Sustainable Transportation*. Victoria Transport Policy Institute, Victoria, B.C., Canadá. <http://www.vtpi.org/sus_iss.pdf>, acesso em 27.11.2004.

LOMAX, T. *et al.* (1997) *Quantifying congestion – Volume 1: Final Report*. NCHRP Report 398, Transportation Research Board, Washington, D.C.

MASSER, I.; SVIDEN, O.; WEGENER, M. (1993) *Transport Planning for Equity and Sustainability*. Transportation Planning and Technology, v. 17, p. 319–330.

McLEAN, J.R. (1989) *Two-Lane Traffic Operations: Theory and Practice*. Gordon & Breach, Nova York, 408 p.

MICKELSON R. P. (1998) *Synthesis of Highway Practice 267: Transportation Development Process*. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (2004) *Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE.* <http://www.ibama.gov.br/proconve>, acesso em 24.11.2004.

NIHAN, N. L.; HAMED, M. M. (1992) *Fixed-point approach to estimating freeway origin-destination matrices and the effect of erroneous data on estimate precision*. Transportation Research Record, n 1357, p. 18-28.

OECD (1997) *Better Understanding our Cities: The Role of Urban Indicators.* Organization for Economic Co-operation and Development, Paris, França.

ORTOLANI, G. A. (2003) *Comparação do desempenho de dispositivos de interseções rodoviárias em nível utilizando o simulador Integration*. São Carlos, 2003. 100 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ORTÚZAR, J. D.; WILLUMSEN, L. G. (1994) *Modelling Transport*. 2.ed. England, John Wiley & Sons.

PARAMAHAMSAN, H. (1999) *Fundamental properties of synthetic O-D generation formulations and solutions*. M.S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute & State University, Blacksburg, Virginia, EUA.

PEAKE, S.; HOPE, C. (1994) *Sustainable mobility in context: three transport scenarios for the UK.* Transport Policy (vol. 3), Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford, Inglaterra, p. 195-207.

PRATT, R. H.; LOMAX, T. J. (1996) *Performance measures for multimodal transportation systems*. In: Transportation Research Record 1518, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D. C., p. 85–93.

PREVEDOUROS, P. D.; WANG, Y. (1999) *Simulation of large freeway and arterial network with CORSIM, INTEGRATION, and WATSim.* Transportation Research Record, n 1678, p 197-207.

PREVEDOUROS, P. D.; LI, H. (2000) *Comparison of freeway simulation with Integration, Kronos e KWaves.* In: Proceeding of fourth International Symposium on Highway Capacity. Transportation Research Circular E-C018, p 96-103.

RAKHA, H.; PARAMAHAMSAN, H.; VAN AERDE, M. (1999) *Static synthetic o-d estimation formulations, assumptions, and limitations.* Submitted to the 78nd Transportation Research Board Annual Meeting.

RAKHA, H. A. (2004) *Integration release 2.30 for Windows: User's Guide. Vol. I, II*. Transportation Systems Research Group, Queen's University. Kingston, Ontario, Canadá.

RAKHA, H. A.; VAN AERDE, M (1996) *Comparison of simulation modules of TRANSYT and INTEGRATION Models*. Transportation Research Record, n 1566, p 1-7.

RAKHA, H.; HELLINGA, B.; VAN AERDE, M.; PEREZ, W. [1996] *Systematic verification, validation and calibration of traffic simulation models*. Proceedings of the 75th Annual Meeting of the TRB, Washington, D.C., EUA.

RAKHA, H.; VAN AERDE, M.; AHN, K.; TRANI, A. (2000) *Requirements for evaluating traffic signal control impacts on energy and emissions based on instantaneous speed and acceleration measurements*. Transportation Research Record, n 1738, p 56-67.

RAO, L.; OWEN, L. (2000) *Validation of high-fidelity traffic simulation models*. Transportation Research Record, n 1710, p 69-78.

RICHARDSON, B. C. (1999) *Toward a policy on sustainable transporte system*. Transportation Research Record, n 1670, p 27-34

RICHARDSON, B. C. (2000) *Role of the motor-vehicle industry in a sustainable transportation system* Transportation Research Record, n 1702, p 21-27

RILETT, L. R.; KIM, K. (2001) *A Comparison of the TRANSIMS and CORSIM traffic signal simulation modules*. Transportation Research Record, TRB, National Research Council, Washington, D.C., aceito para publicação.

RILETT, L. R.; KIM, K.; RANEY, B. (2000) *A Comparison of the low fidelity TRANSIMS and high fidelity CORSIM highway simulation models using ITS data*. In: Transportation Research Record 1739, TRB, National Research Council, Washington, D.C., EUA, p. 1–8.

SÃO PAULO (Estado). Governo do Estado de São Paulo. Secretaria dos Transportes (2000). *Plano Diretor de Desenvolvimento dos Transportes - PDDT Vivo 2000/2020*.

SCHADE, W.; ROTHENGATTER, W. (2001) *Strategic sustainability analysis. Broadening exixting assessment aprroaches for transport policies.* Transportation Research Record, n 1756, p 03-11

SILVA, P. C. M.; TYLER, N. (2002) *Sobre a validação de modelos microscópicos de simulação de tráfego*. TRANSPORTES, v. 10, n.1 p. 49-64.

SPAETHLING, D. (1996) *Sustainable Transportation: The American Experience*. Proceedings of Seminar C: Planning for Sustainability of the 24th European Transport Forum. PTRC, Londres, Inglaterra. Citado por Zeitsman (2000).

STEWART, J. A.; RAKHA, H. E VAN AERDE, M. (1995) *Analysis of temporal and spatial variability of free speed along a freeway segment*. Transportation Research Record, n 1494, p. 1-10.

TIMMS, P. (2001) *A philosophical context for methodos to estimate origin-destination trip matrices using link counts*. Transport Reviews, vol. 21, n. 3, p. 269-301.

TRANSPORT CANADA (2004) *Sustainable Development Strategy 2004-2006*. http://www.tc.gc.ca/programs/Environment/SD/sds0406/menu.htm, acesso em 27.11.2004.

VAN AERDE, M (1995) *A single regime speed-flow-density relationship for congested and uncongested higways*. Apresentado na 74th TRB Annual Conference, Washington, D.C. Paper nº. 950802.

VAN AERDE, M (1998) *QueensOD release 2.10*: User's Guide: Estimating Origin – Destination Traffic Demand from Links Flow Counts.

VAN AERDE, M.; RAKHA, H. (1995) *Multivariate calibration of single regime speed-flow-density relationships*. VNIS/Pacific Rim Conference Proceedings, Seattle, WA, p. 334-341.

VAN AERDE, M.; RAKHA, H.; PARAMAHAMSAN, H (2003) *Estimation of O-D matrices: The relationship between practical and theoretical considerations*. Submitted to the 82nd Transportation Research Board Annual Meeting.

VAN ZUYLEN, H. J. (1979) *A method to estimate a trip matrix from traffic volume counts.* Proc., Summer Annual Meeting, Planning and Transport Res. and Computation (PTRC) Co. Ltd., London, England, 305-311. Citado por: EASA, S. M. (1993)

VAN ZUYLEN, H. J.; WILLUMSEN, L. G. (1980). *The most likely trip matrix estimated from traffic counts*. Transportation Research, 14(B): 281-293.

XEREZ, R. S. (2002) *Método comparativo de desempenho para interseções em nível de rodovias de pista simples.* São Carlos, 2002. 100 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

WANG, Y.; PREVEDOUROS, P. D. (1998) *Comparison of INTEGRATION, TSIS/CORSIM, and WATSim in replicating volumes and speeds on three small networks*. Transportation Research Record, n 1644, p 80-92.

WARDROP, J. G. (1952) *Some theoretical aspects of road traffic research*. Proceedings of the Institute of Civil Engineers, part II, 1: 325-378. Citado por: ORTÚZAR, J. D.; WILLUMSEN, L. G. (1994).

WILLUMSEN, L. G. (1978) *Estimation of an OD matrix from traffic counts: A review*. Working paper nº 99, Institute for Transport Studies, University of Leeds, Leeds, England. Citado por: EASA, S. M. (1993).

ZEITSMAN, J. (2000) *Incorporating sustainability performance measures into the transportation planning process*. Ph.D. Thesis, Texas A&M University, Texas, EUA.

ZEITSMAN, J.; RILETT, L. R. (2000) *Aggregate- and Disaggregate-Based Travel Time Estimations: Comparison of Applications to Sustainability Analysis And Advanced Traveler Information Systems*. Transportation Research Record, n 1725, p. 86–94.

ZEITSMAN, J.; RILETT, L. R. (2002) *Sustainable transportation: conceptualization and performance mesuares*. Research Report SWUTC/02/167403-1. Center for Transportation Research. University of Texas Austin. Austin

ZEITSMAN, J.; RILETT, L.; KIM, S (2003) *Sustainable transportation performance mesures for developing communities*. Research Report SWUTC/03/167128-1. College Station. Texas A&M University Transportation Center. Texas Transportation Institute

ANEXO A

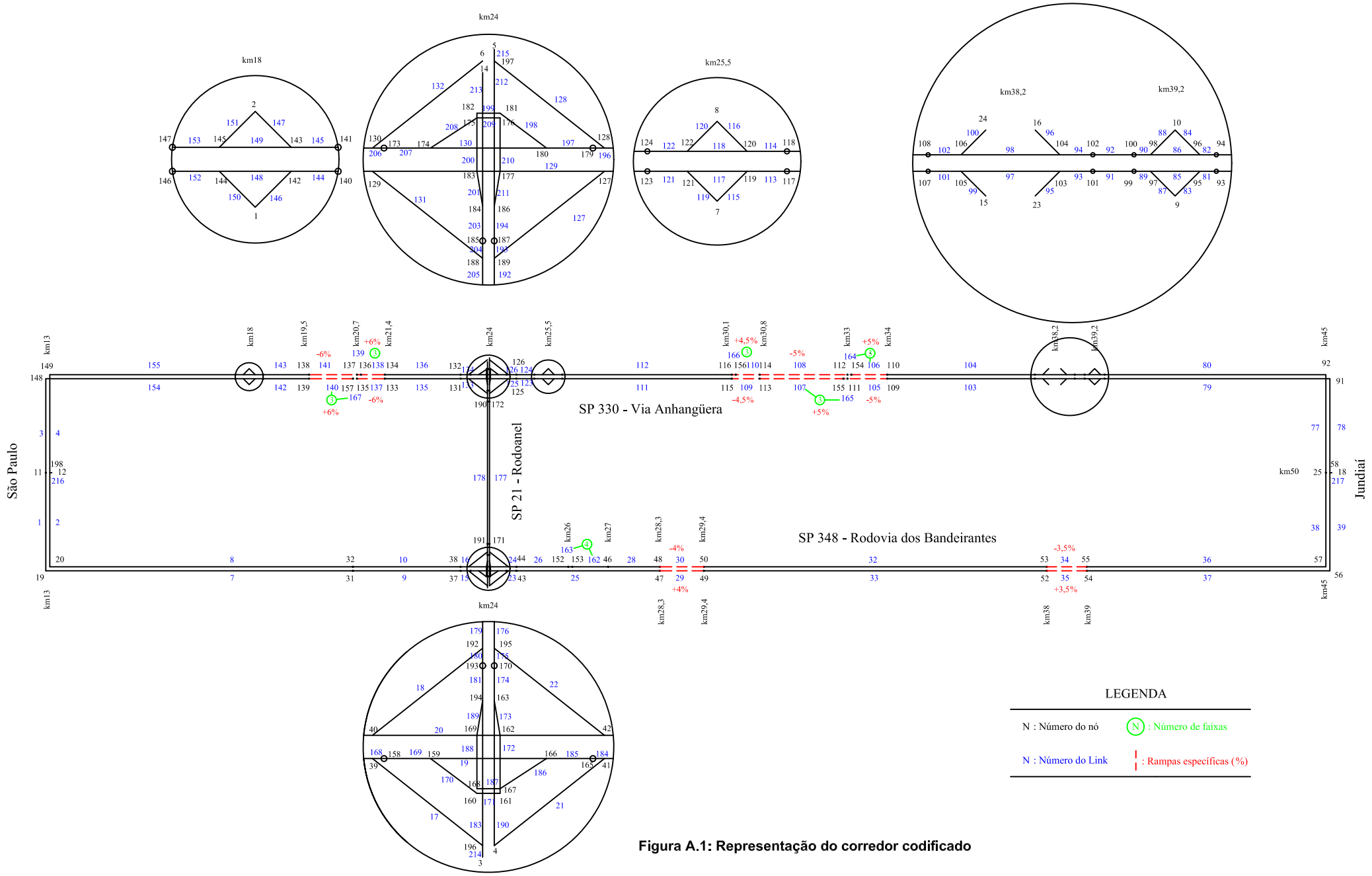


Figura A.1: Representação do corredor codificado

ANEXO B

Tabela B.1: Porcentagem dos volumes nas alças de acesso as rodovias

Acesso	Alça	Data	Período	Porcentagem
		Rodovia dos Bandeirantes		
Km 24 (Rodoanel)	AS N	05 e 06/11/02	08:00 às 10:00	14,0
	AE S	05 e 06/11/02	08:00 às 10:00	17,6
		Via Anhanguera		
km 12	AE N	05, 06 e 07/11/2002	08:00 às 10:00	45,6
	AS S	05, 06 e 07/11/2002	08:00 às 10:01	68,2
Km 18	AS N	05/11/02	08:00 às 10:00	43
		06/11/02	08:00 às 09:00	
	AE S	05/11/02	08:00 às 10:00	36,5
		06/11/02	08:00 às 09:00	
	AE N	05/12/02	15:43 às 16:43	33,0
	AS S	05/12/02	15:43 às 16:43	33,3
		06/11/02	09:00 às 10:00	
Km 24 (Rodoanel)	AS N	05/11/02	08:00 às 10:00	27,3
	AE S	05/11/02	08:00 às 10:00	14,0
	AE N	05 e 06/11/02	08:00 às 10:00	12,5
	AS S	05 e 06/11/02	08:00 às 10:00	22,9
km 25	AS N	05/12/02	10:33 às 12:34	39,7
	AE S	05/12/02	10:33 às 12:34	38,3
	AE N	05 e 06/11/02	08:00 às 10:00	5,7
	AS S	05 e 06/11/02	08:00 às 10:00	5,5
km 38	AS N	05 e 06/11/02	08:00 às 10:00	34,7
	AE S	05 e 06/11/02	08:00 às 10:00	40,5
	AE N	08/11/02	08:00 às 10:00	25,2
	AS S	08/11/02	08:00 às 10:00	16,5
km 39	AS N	05/12/02	08:39 às 09:39	32,1
	AE S	05/12/02	08:39 às 09:39	21,5
	AE N	05/12/02	08:39 às 09:39	17,9
	AS S	05/12/02	08:39 às 09:39	19,2

em que AS N : alça de saída da pista norte;
AE S : alça de entrada na pista sul;
AE N : alça de entrada na pista norte; e
AS S : alça de saída da pista sul.

ANEXO C

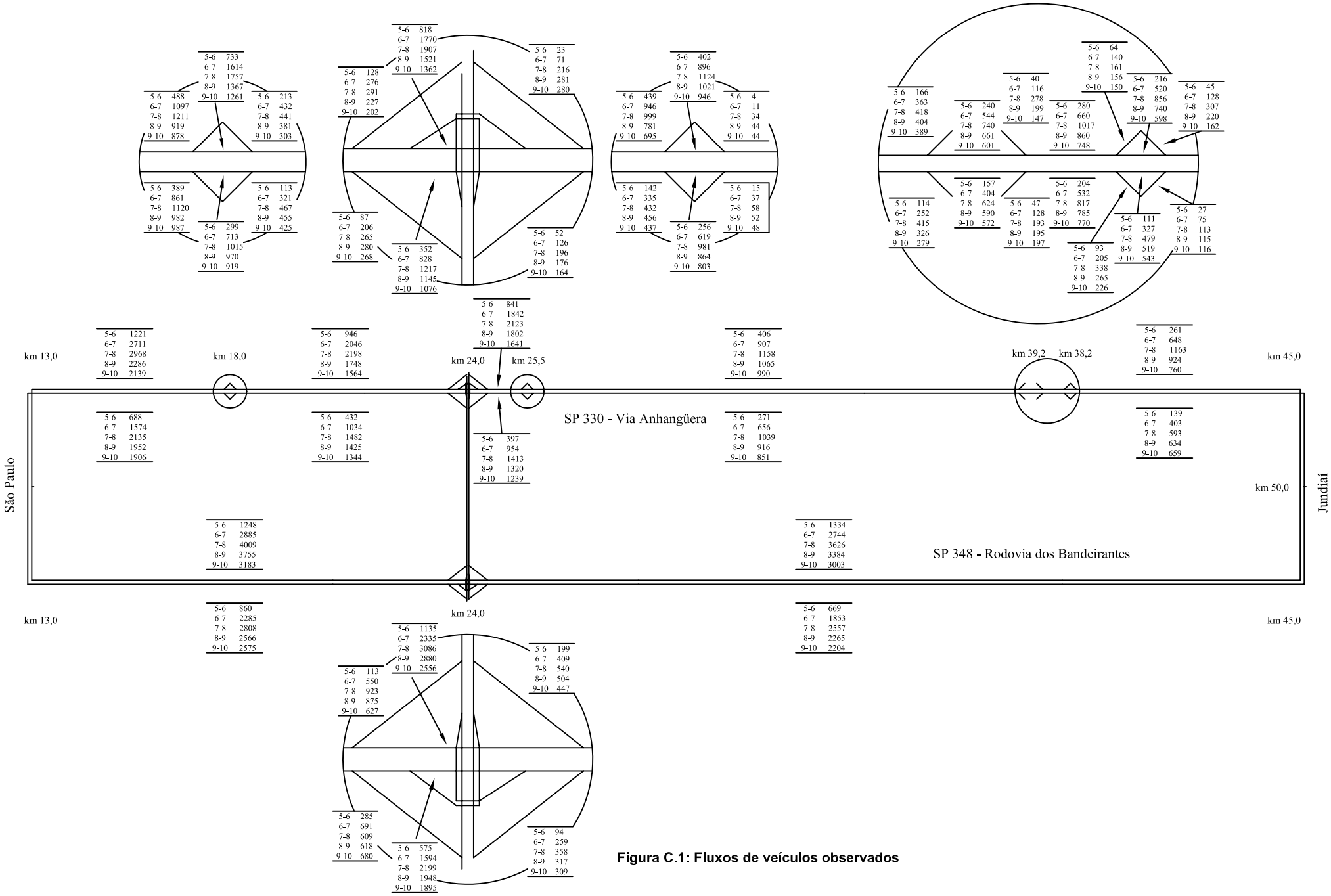


Figura C.1: Fluxos de veículos observados

ANEXO D

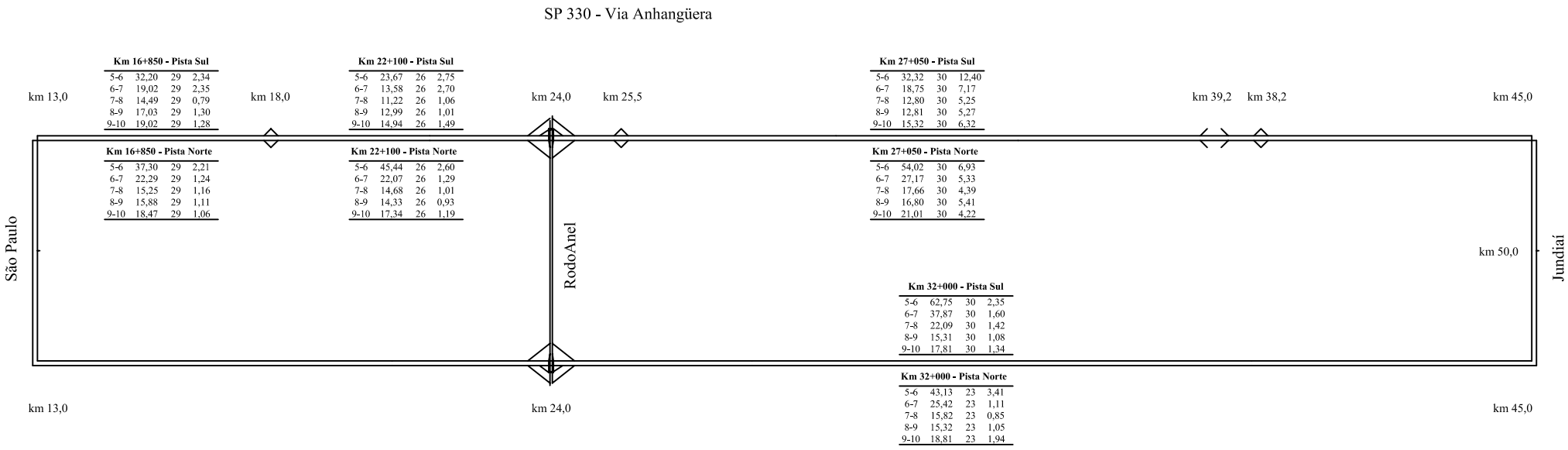


Figura D.1: Porcentagem de veículos comerciais no corredor

ANEXO E

```
Maxi_acc
5   1.00
1   1180   4.0   0.50   0.6   68.0   0.80   0.3   2.0   1.2   0.0125  7.6
2   10469  7.0   0.66   0.6   103.3  0.87   0.8   7.7   1.2   0.0125  7.6
3   21850  9.0   0.39   0.6   111.2  0.87   0.7   6.5   1.2   0.0125  7.6
4   1180   4.0   0.50   0.6   68.0   0.80   0.3   2.0   1.2   0.0125  7.6
5   42120  17.0  0.25   0.6   242.7  0.87   0.8   7.5   1.2   0.0125  7.6
```

Figura E.1: Arquivo de parâmetros veiculares utilizado nas simulações

Tabela E.1: Descrição dos dados do arquivo de parâmetros veiculares

Linha	Coluna	Descrição
1	1	Nome do arquivo (até 40 caracteres)
2	1	Número de veículos definidos no arquivo
	2	Percentual da aceleração efetivamente utilizada pelo veículo. Se a = 0,5, somente 50% da aceleração calculada pelo modelo de desempenho é utilizada pelo veículo
3 e restantes	1	Número identificador do veículo (deve corresponder aos números listados na coluna 16 do arquivo de demandas)
	2	Massa do veículo (kg)
	3	Comprimento (m)
	4	Porcentagem da massa veicular no(s) eixo(s) trator(es)
	5	Coeficiente estático de atrito pneu-pavimento
	6	Potência nominal do motor (kW)
	7	Coeficiente de eficiência da transmissão
	8	Coeficiente de atrito aerodinâmico
	9	Área frontal (m^2)
	10	Coeficiente de rolamento
	11	Constante para tipo de pneu (C_2)
	12	Constante para tipo de pneu (C_3)