

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

**SIMULAÇÃO DE SEGMENTOS RODOVIÁRIOS DE PISTA  
SIMPLES COM FAIXAS ADICIONAIS**

**Caroline Cavagni Pecker**

**Porto Alegre**

**2003**

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

**SIMULAÇÃO DE SEGMENTOS RODOVIÁRIOS DE PISTA  
SIMPLES COM FAIXAS ADICIONAIS**

**Aluna: Caroline Cavagni Pecker**

**Orientadora: Professora Helena Beatriz Bettella Cybis, Ph.D.**

**Banca Examinadora:**

**Professor José Reynaldo Anselmo Setti, Ph.D.**

**Prof. Escola de Engenharia / USP - São Carlos**

**Professora Carla ten Catten, Dr<sup>a</sup>.**

**Prof. PPGEP / UFRGS**

**Professor Luis Antonio Lindau, Ph.D.**

**Prof. PPGEP / UFRGS**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de**

**Produção como requisito parcial à obtenção do título de**

**MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**Área de concentração: Sistemas de Transportes**

**Porto Alegre, junho de 2003**

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

---

**Profª. Helena Beatriz Bettella Cybis**  
Orientador

---

**Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.**  
Coordenador PPGEP/UFRGS

**Banca Examinadora:**

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

**Professora Carla ten Catten, Drª**  
Profª. PPGEP /UFRGS

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

À minha Família: PAULO, DENISE,  
PAULA E BIBI, pelo apoio e incentivo  
que encontrei em todos os momentos.

## AGRADECIMENTOS

Com carinho, gostaria de agradecer

à minha orientadora HELENA BEATRIZ BETTELA CYBIS, por sua dedicação e sabedoria, e pelo apoio e confiança que dispensados durante a realização desta dissertação.

ao Professor LUIS ANTONIO LINDAU pelas valiosas considerações e críticas para o desenvolvimento deste trabalho.

ao Professor FERNANDO DUTRA MICHEL pelo grande apoio e disponibilidade, principalmente durante a programação do STIRO.

ao Professor JOSÉ LUIS DUARTE RIBEIRO pelo apoio na montagem do projeto de experimentos.

ao Professor SERGIO HENRIQUE DEMARCHI que, gentilmente, compartilhou dados e conhecimentos.

ao RODRIGO CASTILHO por disponibilizar o Mosaic, e ajudar a dar o ponta-pé inicial no desenvolvimento do STIRO.

ao Professor LEONARDO BRUNET, que me apresentou para a simulação de tráfego, me incentivando a ingressar na área acadêmica.

aos amigos do Lastran, PITI, LUISANA, FLÁVIA, HOMERO, bolsistas, mestrandos e doutorandos pela amizade e compreensão que demonstraram sempre.

aos queridos colegas DAVI ARAÚJO e LUCIANA FERRONATTO pelas palavras de conforto nas horas de “trevas” e pelos bons momentos que passamos juntos.

à LUCIANA ROHDE pela amizade e apoio sempre.

à TIA CLARINHA que esteve por perto em todos os momentos.

ao meu querido GABRIEL JACONDINO pelo carinho e companheirismo, indispensáveis para a concretização deste sonho.

à CAPES pelo apoio financeiro concedido através da bolsa de mestrado.

à UFRGS e ao PPGEP que, através de seus professores e funcionários, proporcionam o desenvolvimento da pesquisa na área de Transportes.

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>AGRADECIMENTOS</b> .....   | <b>4</b>  |
| <b>LISTA DE QUADROS</b> .....   | <b>7</b>  |
| <b>LISTA DE FIGURAS</b> .....   | <b>8</b>  |
| <b>RESUMO</b> .....   | <b>9</b>  |
| <b>ABSTRACT</b> .....   | <b>10</b> |
| <b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>11</b> |
| 1.1 JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DO TEMA.....                                   | 12        |
| 1.2 OBJETIVOS.....  | 13        |
| <b>1.2.1 Objetivos principais</b> .....                                     | <b>13</b> |
| <b>1.2.2 Objetivos específicos</b> .....                                    | <b>13</b> |
| 1.3 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO .....   | 14        |
| 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....   | 14        |
| <b>CAPÍTULO 2 - MODELOS DE SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO</b> .....                   | <b>15</b> |
| 2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO.....                                      | 16        |
| 2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS DE TRÁFEGO.....                               | 16        |
| 2.3 MODELOS MICROSCÓPICOS DE TRÁFEGO.....                                   | 18        |
| <b>2.3.1 Progressão longitudinal dos veículos</b> .....                     | <b>18</b> |
| 2.3.1.1 Modelos <i>Estimulus-Response</i> .....                             | 19        |
| 2.3.1.2 Modelos <i>Collision Avoidance</i> .....                            | 21        |
| 2.3.1.3 Modelos <i>Action Point</i> .....                                   | 22        |
| 2.3.1.4 Outros modelos .....  | 22        |
| <b>2.3.2 Representação do movimento lateral</b> .....                       | <b>23</b> |
| 2.4 MODELOS DE SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO PARA RODOVIAS DE PISTA<br>SIMPLES ..... | 24        |
| <b>2.4.1 TRARR</b> .....  | <b>25</b> |
| <b>2.4.2 TWOPAS</b> .....   | <b>26</b> |
| 2.5 SIMULAÇÃO DE RODOVIAS DE PISTA SIMPLES NO BRASIL .....                  | 26        |
| 2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....  | 27        |
| <b>CAPÍTULO 3 - O MODELO STIRO</b> .....                                    | <b>28</b> |
| 3.1 INTRODUÇÃO.....   | 28        |
| 3.2 PROPÓSITO E ESTRUTURA DO MODELO .....                                   | 29        |
| <b>3.2.1 Perfil da rodovia modelada</b> .....                               | <b>31</b> |
| <b>3.2.2 Os veículos</b> .....  | <b>33</b> |
| 3.3 ATUALIZAÇÃO DA POSIÇÃO DOS VEÍCULOS.....                                | 33        |
| <b>3.3.1 Modelo dinâmico de desempenho de veículos</b> .....                | <b>35</b> |

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| <b>3.3.2</b>  | <b>Determinação da velocidade do veículo na simulação .....</b>        | <b>38</b> |
| 3.4   | MUDANÇA DE FAIXA .....   | 39        |
| <b>3.4.1</b>  | <b>Veículos na faixa normal de tráfego .....</b>                       | <b>39</b> |
| 3.4.1.1   | Veículos na faixa normal de tráfego dentro da zona de emergência ..... | 40        |
| <b>3.4.2</b>  | <b>Veículos na faixa adicional .....</b>                               | <b>43</b> |
| 3.5   | CONSIDERAÇÕES FINAIS .....   | 44        |
| <b>CAPÍTULO 4 - TESTES PRELIMINARES COM O MODELO.....</b> |  | <b>45</b> |
| 4.1   | APRESENTAÇÃO.....  | 45        |
| 4.2   | AVALIAÇÃO PRELIMINAR.....  | 46        |
| 4.3   | SIMULAÇÃO COM FAIXA ADICIONAL EM ACLIVE .....                          | 48        |
| <b>4.3.1</b>  | <b>Descrição dos elementos da simulação .....</b>                      | <b>49</b> |
| 4.3.1.1   | Veículos .....   | 49        |
| 4.3.1.2   | Rodovia modelada .....   | 51        |
| <b>4.3.2</b>  | <b>Resultados Obtidos.....</b>   | <b>51</b> |
| 4.4   | CONSIDERAÇÕES FINAIS .....   | 54        |
| <b>CAPÍTULO 5 - PROJETO DE EXPERIMENTOS .....</b>         |  | <b>55</b> |
| 5.1   | APRESENTAÇÃO.....  | 55        |
| 5.2   | AMBIENTE SIMULADO .....  | 56        |
| 5.3   | PROJETO DE EXPERIMENTOS .....  | 57        |
| 5.4   | VARIÁVEIS DE RESPOSTA .....  | 57        |
| 5.5   | FATORES CONTROLÁVEIS.....  | 59        |
| 5.6   | PLANEJAMENTO DA MATRIZ DO EXPERIMENTO .....                            | 59        |
| <b>5.6.1</b>  | <b>Modelos estimados.....</b>  | <b>63</b> |
| <b>5.6.2</b>  | <b>Análise de sensibilidade .....</b>                                  | <b>65</b> |
| 5.7   | CONSIDERAÇÕES FINAIS .....   | 71        |
| <b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....</b>                       |  | <b>72</b> |
| 6.1   | RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....                  | 74        |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                   |  | <b>75</b> |
| <b>ANEXO.....</b>   |  | <b>79</b> |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 4.1 – Parâmetros característicos dos veículos da simulação. ....   | 49 |
| Quadro 5.1 – Variáveis de Resposta para o experimento.....  | 58 |
| Quadro 5.2 – Fatores Controláveis do experimento.....   | 59 |
| Quadro 5.3 – Fatores de entrada em níveis codificados para o projeto de experimentos. ....  | 60 |
| Quadro 5.4 – Projeto de experimentos em níveis codificados com os níveis de demanda corrigidos e resultados dos experimentos..... | 62 |
| Quadro 5.5 – Tabela ANOVA dos modelos estimados.....  | 63 |
| Quadro 5.6 - Estatísticas da regressão para a Velocidade Média de Percurso.....   | 64 |
| Quadro 5.7 - Estatísticas da regressão para a variável Ocupação Média do Trecho.....  | 64 |



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.1 – Saída gráfica do simulador STIRO. ....  | 30 |
| Figura 3.2 – Estrutura do modelo de simulação. ....  | 31 |
| Figura 3.3 – Esquema de um segmento de rodovia modelado. ....  | 32 |
| Figura 3.4 – Atualização da posição dos veículos pelo modelo STIRO. ....   | 34 |
| Figura 3.5 – Esquema de forças que atuam em um veículo em movimento na rampa. ....                                 | 38 |
| Figura 3.6 – Esquema da mudança de faixa quando o veículo está na faixa normal. ....                               | 40 |
| Figura 3.7 – Veículos na zona de emergência. ....  | 40 |
| Figura 3.8 – Fluxograma da mudança de faixa para veículos fora da zona de emergência. ....                         | 41 |
| Figura 3.9 – Fluxograma da mudança de faixa para veículos dentro da zona de emergência. ....                       | 42 |
| Figura 3.10 – Esquema da mudança de faixa a partir da faixa adicional. ....  | 43 |
| Figura 3.11 – Fluxograma da mudança de faixa para veículos na faixa adicional. ....                                | 43 |
| Figura 4.1 – Curvas para a avaliação inicial do modelo de <i>car-following</i> . ....                              | 47 |
| Figura 4.2 – Croqui esquemático do trecho rodoviário simulado. ....  | 48 |
| Figura 4.3 – Esquema planimétrico do trecho para o experimento. ....   | 48 |
| Figura 4.4 – Gráficos do desempenho individual dos veículos da simulação (trecho em nível).<br>.....               | 50 |
| Figura 4.5 – Curvas fluxo-velocidade para composição de tráfego com 10% de caminhões,<br>com faixa adicional. .... | 52 |
| Figura 4.6 – Curvas fluxo-velocidade para composição de tráfego com 25% de caminhões,<br>com faixa adicional. .... | 52 |
| Figura 4.7 – Curvas fluxo-velocidade para composição de tráfego com 40% de caminhões,<br>com faixa adicional. .... | 53 |
| Figura 4.8 – Curvas fluxo-velocidade sem faixa adicional, com 25% de caminhões. ....                               | 53 |
| Figura 5.1 – Segmento rodoviário para o projeto de experimentos. ....  | 56 |
| Figura 5.2 – VMP X demanda X inclinação da rampa. ....   | 66 |
| Figura 5.3 – OMT X demanda X inclinação da rampa. ....   | 66 |
| Figura 5.4 – VMP X demanda X % caminhões. ....   | 67 |
| Figura 5.5 – OMT X demanda X % caminhões. ....   | 67 |
| Figura 5.6 – VMP X demanda X configuração do fluxo de caminhões. ....  | 68 |
| Figura 5.7 – OMT X demanda X configuração do fluxo de caminhões. ....  | 68 |
| Figura 5.8 – VMP X demanda X extensão da rampa. ....   | 69 |
| Figura 5.9 – OMT X demanda X extensão da rampa. ....   | 69 |
| Figura 5.10 – VMP X demanda X extensão em rampa sem faixa adicional. ....  | 70 |
| Figura 5.11 – OMT X demanda X extensão em rampa sem faixa adicional. ....  | 70 |

## RESUMO

Este trabalho apresenta o modelo de simulação microscópico, STIRO (Simulador de Tráfego Ininterrupto Rodoviário), desenvolvido para representar trechos de rodovias de pista simples em aclives com faixas adicionais para veículos lentos. STIRO foi utilizado para avaliar as condições de tráfego sob diferentes alternativas de projeto e demanda. O comportamento dos veículos é representado pelos modelos de *car-following* e *lane-changing*. No STIRO, o modelo de *car-following* ainda incorpora uma restrição ao desempenho motriz baseado na relação entre massa e potência de cada categoria de veículo. O trabalho apresenta um estudo sobre diferenças entre as velocidades dos veículos pesados e automóveis e as melhorias proporcionadas pela implantação de faixas adicionais. Por fim, foi realizado um projeto de experimentos para determinar o efeito sobre a velocidade média de percurso dos veículos e ocupação média da via causado por fatores como inclinação da rampa, proporção de veículos pesados no fluxo de tráfego, extensão da rampa, e outras variáveis consideradas no modelo STIRO.

## **ABSTRACT**

This work presents a microscopic simulation model named STIRO (Simulator of Traffic in unInterrupted ROads) developed to represent two-lane highway segments on upgrades and climbing lanes. STIRO was used to assess the conditions of two-lane highway segments under different project and demand alternatives. A car-following model and a lane-changing model represent the vehicles behaviour of the vehicles. The car-following model incorporates a restriction to the engine performance based in the weight/power ratio for each category of vehicle. This work presents an experiment that analyzed the speed differences between heavy vehicles and cars and the operational improvement obtained after the implementation of climbing lanes. Finally, it presents a project of experiments to determine the effect on the highway speed and occupation caused by factors like grade, percentage of heavy vehicles in the traffic flow, length of grade, and other variables simulated in STIRO.

## **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

---

O modal rodoviário é responsável por mais de 60% do escoamento da produção brasileira, e por mais de 95% do transporte de passageiros. A malha rodoviária brasileira é formada por 164.988 km de rodovias pavimentadas. Desta extensão, as rodovias de pista simples constituem 156.384 km, ou seja, 95% do total (GEIPOT, 2001).

Os veículos de carga que trafegam nas rodovias brasileiras, em geral, estão equipados com motores de baixa potência e carregam excesso de peso (DEMARCHI, 2000). O elevado fluxo de caminhões contribui para a diminuição do padrão de desempenho operacional das rodovias, aumentando o tempo de viagem e, conseqüentemente, os custos operacionais do transporte de carga e de passageiros.

A falta de recursos financeiros para o aumento da capacidade das rodovias nos países em desenvolvimento impulsiona a busca por soluções de menor custo. Em contrapartida à duplicação integral da via ou projetos mais sofisticados que contemplem raios maiores e rampas menos íngremes, uma solução alternativa pode consistir na implantação de faixas adicionais em trechos específicos.

Nos locais onde o alto volume de veículos pesados gera atrasos, e a geometria da rodovia não proporciona oportunidades seguras de ultrapassagem, existe a necessidade de

implantação de faixas adicionais. As faixas adicionais diminuem atrasos imputados aos veículos leves e reduzem os riscos de acidentes inerentes a manobras de ultrapassagens forçadas. Nas rodovias com faixa adicional, os veículos mais lentos são motivados a trafegar sobre a faixa mais à direita, liberando a faixa principal para os veículos mais rápidos.

### 1.1 JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DO TEMA

Uma rodovia com faixa adicional não é considerada como tendo três faixas, mas sim constituída de trechos dotados de uma faixa para os veículos lentos (DNER, 1999) e necessita de procedimentos próprios para a sua implantação. Inclusive, na última versão do *Highway Capacity Manual* (TRB, 2000) foram adicionados novos procedimentos analíticos para avaliar faixas adicionais em terreno plano, ondulado e em aclives. Estes procedimentos relativos às faixas denominadas de *passing lanes* e *climbing lanes* foram determinados com o auxílio de um simulador de tráfego.

Modelos microscópicos de simulação, que consideram os movimentos individuais de cada veículo no fluxo de tráfego, podem ser usados para estudar a operação de rodovias. A sua utilização tem se tornado uma prática tradicional, principalmente para os casos onde a solução analítica é complexa ou mesmo impossível. Podem ser usados para comparar situações existentes com aquelas que resultariam de mudanças no controle do tráfego, na infraestrutura, na tecnologia dos veículos e no comportamento dos motoristas.

Dentro do universo dos modelos microscópicos de tráfego, vários simuladores contemplam a representação do comportamento de veículos em segmentos rodoviários (ALGERS *et al.*, 1997). Entre outros, incluem-se AUTOBAHN, FRESIM, TRANSIMS e INTEGRATION. Alguns modelos foram exclusivamente desenvolvidos para simular o tráfego em rodovias rurais, como é o caso do TRARR (HOBAN *et al.*, 1991) e TWOPAS (TRB, 2000).

No entanto, a grande maioria dos modelos existentes não permite tratar de forma adequada as condições vigentes nas rodovias brasileiras. Um dos maiores problemas operacionais das nossas rodovias refere-se ao elevado número de caminhões na corrente de tráfego, que chega a alcançar 40% em alguns trechos. Ainda, não é incomum encontrar caminhões com motores de baixa potência transportando excesso de carga, o que prejudica sensivelmente o desempenho operacional da rodovia. Nem todos os modelos incorporam restrições ao desempenho motriz dos veículos. Segundo Algiers *et al.* (1997), dos 32

simuladores microscópicos descritos no Projeto SMARTTEST somente 19% incorporam restrições ao desempenho motriz do veículo.

Existe também uma dificuldade em representar as restrições para o uso das faixas adicionais em aclives sem possibilidade de ultrapassagem pela direita. A regulamentação de trânsito brasileira estabelece que ultrapassagens devem ocorrer unicamente pela faixa da esquerda. Muitos modelos, em geral, possuem lógicas de mudança de faixa genéricas que permitem ultrapassagens tanto pela direita quanto pela esquerda, principalmente aqueles voltados para representação de *freeways* e vias arteriais.

Considerando que os modelos existentes têm a manipulação de seus processos e restrições limitada ao seu projetista, estes modelos tornam-se, por vezes, inflexíveis para algumas situações. Neste contexto, o presente trabalho consiste em apresentar uma ferramenta computacional de simulação flexível e voltada para a representação das rodovias brasileiras.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivos principais

Este trabalho pode ser classificado como pesquisa aplicada de natureza quantitativa. Seu objetivo principal é avaliar o desempenho operacional de um trecho rodoviário de pista simples com aclive, mediante implantação de faixa adicional, através da construção e utilização de um modelo de simulação computacional, chamado STIRO.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- (i) Construir um modelo de simulação microscópico de tráfego que represente uma rodovia de pista simples;
- (ii) Demonstrar a aplicabilidade prática deste modelo;
- (iii) Avaliar o desempenho de uma rodovia de pista simples sob diferentes alternativas de projeto:
  - Geométrico: declividade e comprimento da rampa, localização do início e término da faixa adicional;
  - Operacional: tipos de veículos e suas relações peso/potência, e;
  - Demanda: intensidade e composição do fluxo de veículos.

### 1.3 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

A aplicação do modelo de simulação é restrita ao estudo de segmentos rodoviários com total proibição de ultrapassagem pela faixa de fluxo contrário. O fluxo no sentido oposto não é considerado. STIRO não avalia o efeito das curvas horizontais do traçado da via na redução da velocidade.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos.

O segundo capítulo mostra uma revisão da literatura sobre modelos de simulação, proporcionando uma visão geral sobre o tema.

O terceiro capítulo apresenta a descrição do modelo de simulação STIRO, desenvolvido no transcorrer deste trabalho.

O quarto capítulo mostra os testes realizados para avaliar a melhoria operacional causada pela faixa adicional em um segmento rodoviário de pista simples.

No quinto capítulo foi descrito o projeto de experimentos realizado para determinar a influência de diversos fatores na velocidade média de percurso e na ocupação média da via. Os fatores analisados no projeto de experimentos foram demanda, inclinação e extensão da rampa, percentual de veículos pesados, configuração da composição caminhões e distância até o início da faixa adicional.

O sexto capítulo apresenta as conclusões e recomendações para futuros trabalhos.

## **CAPÍTULO 2 - MODELOS DE SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO**

O uso da simulação como ferramenta para o estudo do tráfego tem se tornado uma prática cada vez mais comum. Esta abordagem permite analisar uma grande variedade de problemas dinâmicos, geralmente associados a processos complexos, os quais não podem ser facilmente descritos de forma analítica (LIEBERMAN e RATHI, 1997). Mais do que isso, a simulação tem um papel importante no desenvolvimento de novos processos e metodologias analíticas. De fato, a simulação foi utilizada em muitas pesquisas para desenvolver novos procedimentos de análise para o HCM2000 (TRB, 2000).

Este capítulo apresenta uma visão geral sobre modelos de simulação de tráfego. Com ênfase nos modelos microscópicos de tráfego, é desenvolvida uma revisão sobre os processos envolvidos na representação do comportamento dos motoristas. Também são descritos modelos de simulação microscópicos que representam o tráfego em rodovias rurais. Por fim são apresentados alguns trabalhos realizados no Brasil utilizando simulação para o estudo de segmentos rodoviários em rodovias de pista simples.



## 2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO

Simulação, segundo Shannon (1975), é processo de desenvolver um modelo de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de compreender o seu comportamento e avaliar estratégias para a sua operação. Um modelo em si é formado por relações matemáticas e lógicas que representam o comportamento do sistema (LAW e KELTON, 1991). Ainda, conceitualmente, um modelo pode ser definido como uma aproximação ou idealização de aspectos selecionados da estrutura, comportamento ou outra característica de um processo ou sistema do mundo real (OWEN *et al.*, 1996).

A modelagem por simulação é uma metodologia experimental e aplicada, que busca (i) descrever o comportamento de sistemas; (ii) construir teorias ou hipóteses que explicam o comportamento observado; e (iii) usar estas teorias para predizer o comportamento futuro produzidos por mudanças no sistema ou na forma de administrá-lo (SHANNON, 1975).

A grande vantagem da utilização de modelos de simulação é que os resultados obtidos podem ser totalmente repetidos e todas as variáveis de saída podem ser manipuladas independentemente, permitindo a investigação do efeito individual da variação de cada parâmetro (NOWOTNY e HARDMAN, 1977). Ainda, técnicas novas ou controversas podem ser experimentadas sem afetar o tráfego da rede real (HIDAS, 2002).

O sistema de transporte proporciona um excelente ambiente de estudo pela simulação. Além de cobrir grandes áreas físicas, existe um grande número de participantes ativos no sistema, e suas necessidades e objetivos não são necessariamente os mesmos, nem entre os usuários nem entre eles e o operador do sistema. Existem, também, elementos fora do controle dos operadores e usuários do sistema de transportes, tais como condições climáticas, volume de usuários, acidentes. Neste caso, o uso de ferramentas analíticas, apesar de muito importantes, é limitado a pequenos sistemas ou para avaliação de sistemas com baixo nível de detalhe (Pursula, 1999).

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS DE TRÁFEGO

A classificação dos modelos de simulação de tráfego pode ser feita de acordo com: (i) o nível de desagregação que são tratados os elementos do sistema, (ii) a escala das variáveis independentes, (iii) a representação dos processos que regem o sistema, e (iv) a escala de aplicação (LIEBERMAN e RATHI, 1997).

Com relação ao nível de desagregação em que são tratados os elementos do sistema, os modelos podem ser classificados em microscópicos, mesoscópicos e macroscópicos:

- Modelos *macroscópicos*: as entidades, suas atividades e interações são descritas em um baixo nível de detalhamento. O fluxo de tráfego é representado de forma agregada, e suas características são descritas através de taxas de fluxo, densidade e velocidade. Manobras individuais dos veículos não são descritas.
- Modelos *mesoscópicos*: descrevem as entidades componentes do sistema com mais baixo nível de agregação. Consideram sistemas de tráfego como compostos de elementos discretos, não unitários (SILVA e TYLER, 2002).
- Modelos *microscópicos*: as entidades do sistema e suas interações são tratadas individualmente com um alto nível de desagregação.

Quanto à escala das variáveis independentes, considerando que na maioria dos modelos de simulação de tráfego o tempo é a variável independente, os modelos podem ser contínuos ou discretos.

- Modelos *contínuos*: as mudanças de estado do sistema são descritas continuamente no tempo em resposta a estímulos contínuos.
- Modelos *discretos*: consideram que o estado do sistema é modificado abruptamente em determinados instantes do tempo. Ainda, neste último, o estado pode ser modificado em sucessivos e determinados intervalos de tempo (tempo discreto), ou em resposta à ocorrência de algum evento pré-determinado (eventos discretos).

Nos modelos de simulação a representação dos processos do sistema pode ser determinística ou estocástica.

- Modelos *determinísticos*: não consideram variáveis aleatórias, ou seja, todas as interações entre as entidades do sistema são definidas por relações exatas.
- Modelos *estocásticos*: incorporam funções de probabilidade.

Segundo Lieberman e Rathi (1997), a simulação têm sido correntemente usados para:

- Avaliar tratamentos alternativos, pois com a simulação, o engenheiro de tráfego pode controlar o ambiente experimental e a escala de condições a explorar;
- Testar novos projetos, uma vez que os custos de investimentos em transportes são altos, a simulação pode ser aplicada para quantificar os ganhos com a melhoria, antes do comprometimento dos recursos;

- Como um elemento no processo de projeto, o modelo de simulação pode ser utilizado para identificar defeitos e limitações de projetos, através da animação gráfica dos resultados;
- Treinar pessoal, utilizando o simulador como um laboratório em tempo real para operadores de central de gerenciamento de tráfego.
- Analisar as condições de segurança, pois além de permitirem recriar situações de acidentes, os modelos de simulação têm se tornado uma ferramenta indispensável para a construção de veículos e vias mais seguros.

Além disso, os modelos de simulação são aplicados nas mais variadas áreas de estudo de transportes, como controle de tráfego, planejamento de transportes, projeto e pesquisa. Pode-se utilizar modelos para representar uma rede de tráfego urbano ou um segmento de via rural, avaliar a coordenação de semáforos ou o desempenho de apenas uma interseção, entre outros.

Como o presente trabalho trata do desenvolvimento e aplicação de um modelo microscópico de simulação de tráfego, a revisão sobre modelos, a partir deste ponto, se volta para este tema.

## 2.3 MODELOS MICROSCÓPICOS DE TRÁFEGO

Nos modelos microscópicos, o sistema é tratado com um alto nível de desagregação. Cada elemento do sistema corresponde a uma entidade com características individuais.

Nos modelos microscópicos de simulação de tráfego, os dois processos básicos que regem o comportamento dos veículos estão relacionados com os movimentos longitudinal e lateral. Movimento longitudinal é o deslocamento do veículo ao longo da rodovia. Movimento lateral se refere ao deslocamento do veículo entre as faixas de tráfego. Na simulação, o movimento longitudinal é representado, em geral, pelas regras de *car-following*, e o lateral, pelo processo de *lane-changing*.

A seguir, é apresentada uma revisão sobre as teorias que buscam explicar e reproduzir estes dois fenômenos.

### 2.3.1 Progressão longitudinal dos veículos

Segundo Ahmed (1999), os modelos de progressão longitudinal podem representar dois regimes de tráfego distintos, a saber, *car-following* e fluxo livre. No regime de *car-*

*following*, um veículo viajando com uma velocidade igual ou inferior a sua velocidade desejada, segue outro veículo imediatamente a sua frente (veículo líder), na mesma faixa, sem ultrapassá-lo. Quando em fluxo livre, os motoristas não se encontram muito próximos de seus líderes, têm a liberdade de alcançar a velocidade desejada.

Os estudos sobre a progressão longitudinal dos veículos iniciaram ainda nos anos 50, quando os engenheiros de tráfego buscavam uma melhor compreensão da dinâmica do fluxo. Este problema atraiu a atenção de um grande grupo de pesquisadores e teóricos das mais variadas áreas do conhecimento, esforçados em construir modelos matemáticos para explicar o fenômeno observado no tráfego rodoviário (PIPES, 1967). Desde meados do século XX, esses modelos matemáticos, conhecidos como modelos de *car-following*, têm sido extensivamente estudados.

Os modelos de *car-following* podem ser, basicamente, divididos em três tipos:

- Modelos ‘*Estimulus-Response*’, nos quais um estímulo em forma de aceleração é tipicamente dado em termos da separação e velocidade relativas entre os veículos.
- Modelos ‘*Action Point*’, nos quais o veículo seguidor busca manter a distância desejada, e altera sua aceleração de acordo com sua posição na curva espaço vs. velocidade, relativa ao número dos chamados *action points*.
- Modelos ‘*Collision Avoidance*’, nos quais a desaceleração é controlada de forma a evitar a todo custo colisão entre o veículo seguidor e seu líder.

Os itens a seguir revisam a literatura sobre cada tipo de modelo de *car-following*.

### 2.3.1.1 Modelos *Estimulus-Response*

Este processo de *car-following* se baseia no princípio de que a reação é proporcional à relação entre estímulo e sensibilidade. A reação é a aceleração, ou desaceleração, do veículo seguidor.

Foi neste princípio que se baseou o primeiro modelo de *car-following*, proposto por Chandler *et al.* (1958) nos laboratórios de pesquisa da *General Motors*. Este modelo linear sugere que a aceleração do veículo seja proporcional à variação da velocidade entre dois veículos sucessivos. Matematicamente, o modelo pode ser expresso da seguinte forma:

$$a_n(t) = \alpha \cdot [v_l(t + \Delta) - v_s(t + \Delta)] \quad (1)$$

onde,

$a_n(t)$ : aceleração do veículo n no tempo t

$\alpha$ : constante de sensibilidade

$v_l(t+\Delta)$ ,  $v_s(t+\Delta)$ : velocidades do veículo líder e veículo seguidor no tempo  $t+\Delta$

$\Delta$ : tempo de reação

O modelo foi estimado pelo método de análise da correlação, e comparado com dados de uma rodovia de pista simples e faixa única, coletados de oito motoristas que dirigiam veículos-teste. Os dados coletados incluíam medições de aceleração, velocidade, *headway* espacial. Os valores estimados de  $\Delta$  e  $\alpha$  foram, respectivamente, 1,5 s e  $0,37 \text{ s}^{-1}$ .

Do trabalho de Chandler e seus colegas do Laboratório de Pesquisas da *General Motors* foram publicados vários trabalhos com o objetivo de propor melhores modelos para representar o comportamento dos veículos. Gazis *et al.* (1959) mostrou que o parâmetro de sensibilidade era inversamente proporcional ao *headway* espacial entre dois veículos sucessivos:

$$a_n(t) = \frac{\alpha}{x_l(t+\Delta) - x_s(t+\Delta)} \cdot [v_l(t+\Delta) - v_s(t+\Delta)] \quad (2)$$

onde,

$x_l(t+\Delta)$ ,  $x_s(t+\Delta)$ : posição do veículo líder e veículo seguidor no tempo  $t+\Delta$

Este modelo foi estimado a partir de dados coletados em túneis de Nova York e na pista de testes da própria *General Motors*.

Considerando a contribuição de Newell (1961) e outros autores sobre relações não-lineares em modelos de *car-following*, Gazis *et al.* (1961) apresentam um modelo não-linear. A relação matemática do modelo é a seguinte:

$$a_n(t) = \alpha \cdot \frac{v_s(t+\Delta)^\beta}{(x_l(t+\Delta) - x_s(t+\Delta))^\gamma} \cdot [v_l(t+\Delta) - v_s(t+\Delta)] \quad (3)$$

onde,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são parâmetros do modelo.

Vários trabalhos foram realizados com o intuito de determinar os melhores valores de  $\beta$  e  $\gamma$ . May e Keller (1967), por exemplo, utilizaram novos conjuntos de dados e encontraram solução ótima para  $\beta = 1$  e  $\gamma = 3$ . Heyes e Ashworth (1972) determinaram valores

correspondentes a  $\beta = -0,8$  e  $\gamma = 1,2$ . Ceder e May (1976) utilizaram o maior conjunto de dados até então e encontraram valores ótimos iguais a  $\beta = 0,6$  e  $\gamma = 2,4$ . Entretanto, sua maior contribuição foi a determinação de valores diferentes para condições de tráfego congestionado ( $\beta = 0$  e  $\gamma = 0-1$ ) e livre ( $\beta = 0$  e  $\gamma = 3$ ).

Até hoje ainda são feitos estudos sobre os modelos originados no Laboratório de pesquisas da GM. Yang e Koutsopoulos (1996) desenvolveram para o simulador MITISIM, um modelo de *car-following* que representa três regimes de tráfego: (i) emergência, quando o *headway* é menor que o limite inferior aceitável; (ii) *car-following*; e (iii) fluxo livre, quando o *headway* é maior que o limite superior para estar em pelotão. No regime de *car-following*, o cálculo da taxa de aceleração é baseado no modelo proposto por Herman *et al.* (1958). Quando no regime de emergência, o veículo imprime uma certa taxa de desaceleração para evitar uma colisão e aumentar o *headway*. No fluxo livre o veículo não interage com o líder e o seu comportamento passa a ser regido pela aceleração e velocidade desejada pelo motorista.

### 2.3.1.2 Modelos *Collision Avoidance*

Gipps (1981) desenvolveu um modelo de *car-following* que calcula uma aceleração máxima para um veículo, o qual não pode exceder sua velocidade desejada e deve manter uma distância segura em relação ao veículo líder. Para limitar mecanicamente os veículos, Gipps utilizou parâmetros de aceleração máxima e desaceleração mais severa possível. O modelo também representa o comportamento dos veículos em fluxo livre através de uma equação linear de desaceleração. Como este modelo de *car-following* foi usado no simulador desenvolvido para este trabalho, a sua descrição será apresentada no capítulo seguinte.

Aycin e Benekohal (1998) desenvolveram um modelo de *car-following* para simular o fluxo de tráfego tanto em condições normais quanto em congestionamentos chamado CARSIM. Este modelo utiliza uma função linear para a aceleração, permitindo que o perfil de aceleração seja contínuo no tempo. Estudos mostraram que, em condições de *car-following*, os motoristas igualam sua velocidade à velocidade do líder para manterem o espaçamento desejado. Neste ponto a velocidade e aceleração são igualadas. O *headway* entre os dois veículos é, então, considerado como o tempo de reação estimado pelo veículo seguidor (que segue o líder) necessário para evitar colisão com o líder. O cálculo da aceleração no instante  $t$  é a soma da aceleração do instante  $t-1$  com o produto entre a taxa de variação da aceleração e o tempo de reação estimado.

### 2.3.1.3 Modelos *Action Point*

Leutzbach (1988) mostra como um modelo de *car-following* baseado na percepção psicofísica dos motoristas possibilita a descrição do processo de forma muito realista. Estudos sobre a percepção dos motoristas mostram que (i) quando distantes um do outro, o motorista do veículo seguidor não é influenciado pela diferença entre a sua velocidade e a do veículo líder, e (ii) quando próximos, existem combinações de velocidade e *headways* para as quais o motorista seguidor também não é influenciado pelo comportamento do líder.

### 2.3.1.4 Outros modelos

Contrariando a formulação estímulo-resposta de trabalhos anteriores, Newell (1961) propôs que a velocidade fosse uma função ( $G_j$ ) não-linear do *headway* espacial:

$$v_j(t) = G_j[x_{j-1}(t + \Delta) - x_j(t + \Delta)] \quad (4)$$

onde  $G_j$  é tal que:

$$v_j(t) = V_j - V_j \cdot e^{\frac{-\lambda[x_{j-1}(t+\Delta) - x_j(t+\Delta) - d_j]}{V_j}} \quad (5)$$

onde:

$v_j(t)$ : velocidade veículo seguidor no tempo  $t$

$x_j(t+\Delta)$ ,  $x_{j-1}(t+\Delta)$  : velocidades veículo seguidor e veículo líder no tempo  $t+\Delta$

$V_j$ : velocidade de fluxo livre do veículo seguidor

$\lambda$ : inclinação da tangente quando  $v_j(t) = 0$

$d_j$ : *headway* mínimo.

Newell mostra que com este modelo não-linear, é possível incorporar todos os resultados derivados de modelos lineares de *car-following* e, também, os fenômenos não-lineares obtidos das teorias macroscópicas

Além dos modelos de *car-following*, existe uma abordagem para a representação do movimento dos veículos baseada num arranjo de células (sítios) em forma de matriz, usualmente de tamanho finito onde, para cada célula atribui-se um valor discreto. Esta abordagem chama-se modelagem por automata celular e consiste, segundo a definição de Wolfram (1983), em uma idealização matemática de sistemas físicos, na qual o tempo e o

espaço são discretos e as quantidades físicas são tidas como valores finitos e discretos. A configuração da automata celular é dada pelos valores das variáveis em cada uma das células.

Sobre a aplicação de automata celular para modelagem do tráfego de veículos, Schadschneider e Schreckenberg (1993) apresentam um modelo simples. Este modelo consiste num anel viário, com uma faixa de tráfego, dividido em  $L$  células (ou sítios) de tamanhos iguais (geralmente 7,5 m) cada célula pode estar vazia ou ocupada por apenas um veículo com velocidade  $v$ : 0, 1, ...,  $v_{max}$ . A cada intervalo discreto de tempo, o arranjo de veículos é atualizado pelas seguintes regras:

- Aceleração: se a velocidade  $v$  de um veículo é menor que a velocidade máxima  $v_{max}$ , então o veículo tem sua velocidade aumentada em uma unidade;
- Desaceleração: se a distância  $d$  até o próximo veículo não é maior que  $v$ , então a velocidade será reduzida para  $d-1$ .
- Movimento: cada veículo se movimenta de acordo com sua nova velocidade.

Este modelo ficou conhecido com Modelo NaSch (CHOWDHURY *et al.*, 2000). Vários outros trabalhos foram publicados sobre o tema (Nagel *et al.*, 1998). O modelo de planejamento e simulação de tráfego que utiliza esta abordagem, denominado TRANSIMS, tem sido utilizado em trabalhos norte americanos. Um outro exemplo é o simulador em tempo real desenvolvido pela Universidade de Duisburg – On Line SIMulator – baseado na técnica de automata celular (OLSIM, 2003).

### 2.3.2 Representação do movimento lateral

A representação das manobras de mudança de faixa é outro componente essencial da simulação microscópica de tráfego. Na maioria dos simuladores, essa manobra ocorre de forma obrigatória, como no caso de veículos que desviam de obstáculos ou realizam movimentos de conversão, ou na ultrapassagem, de forma a possibilitar ganhos de velocidade (AL-KAISY *et al.*, 1999; YANG e KOUTSOPOULOS, 1996). Independentemente da motivação (ultrapassar veículo lento, tomar posição correta para conversão, evitar um obstáculo) o comportamento de um veículo realizando uma mudança de faixa consiste no movimento rápido de uma faixa para outra. Já as condições para efetivação dessa manobra dependem de restrições impostas por veículos que circulam na faixa de destino.

Gipps (1986) desenvolveu um modelo abrangente de mudança de faixas adaptado para o ambiente urbano, onde a decisão de realizar a manobra leva em conta a necessidade, a vontade do motorista e a possibilidade de realizar a mudança de faixa. As situações incluem a



influência de semáforos, obstáculos na pista, veículos pesados e corredores de ônibus. O modelo considera, ainda, a urgência de trocar de faixa devido à aproximação da necessidade de fazer a conversão. Yang e Koutsopoulos (1996) basearam a mudança de faixa do simulador MITSIM no trabalho desenvolvido por Gipps.

Yousif e Hunt (1995) elaboram um modelo de escolha e mudança de faixas para segmentos rodoviários com múltiplas faixas, num único sentido. O modelo baseia-se no fato de que se o *gap* existente na faixa de destino for menor que a aceitável, o veículo não trocará de faixa. Segundo os autores, o desejo de trocar de faixa depende (i) preferência individual, influenciada pela velocidade e pelo tipo de veículo, (ii) a concentração do tráfego nas adjacências, (iii) a velocidade média do tráfego nas adjacências, (iv) as regras de trânsito, (v) aproximação de acesso e saídas da via, ou estreitamento de pista. Quando o veículo decide trocar de faixa os *gaps* são examinados e comparados com os valores aceitáveis.

Sultan e McDonald (2001) propuseram um modelo de mudança de faixas para rodovias de pista dupla e múltiplas faixas. No modelo proposto são consideradas somente trocas de faixas para uma faixa mais rápida de modo a ultrapassar algum veículo mais lento, ou para a faixa mais lenta para permitir que algum veículo rápido passe à frente. A lógica de decisão comporta dois processos: (i) detectar o desejo ou necessidade de trocar de faixa; (ii) avaliar a situação em relação aos veículos adjacentes (velocidades e posições relativas). Para este estudo foi necessária uma base de dados completa e detalhada. Testes de sensibilidade mostraram que o modelo era afetado por alguns fatores como o utilizado para corrigir o número de trocas de faixa. Outro fator era o período de tempo em que o veículo que realizava a troca não era afetado com a presença de algum outro veículo à frente na faixa de desejo.

Na seção seguinte são apresentados alguns modelos de tráfego disponíveis para a simulação de rodovias.

## 2.4 MODELOS DE SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO PARA RODOVIAS DE PISTA SIMPLES

Atualmente, existe uma grande variedade de modelos de simulação microscópicos disponíveis para uso comercial e acadêmico. Na verdade, Algiers *et al.* (1997), em seu trabalho sobre revisão de modelos microscópicos de tráfego, identificaram 58 diferentes modelos, dos quais 32 foram analisados no Projeto SMARTTEST. Entretanto, muito poucos simuladores foram desenvolvidos para representar segmentos rodoviários de pista simples.

Na continuidade, são apresentados dois modelos de simulação utilizados para representar o fluxo de tráfego em rodovias de pista simples. TRARR é um modelo comercial já utilizado em pesquisas nacionais (EGAMI e SETTI, 2000; SILVEIRA (1996). O TWOPAS é o simulador utilizado pelo HCM2000 para análise operacional de rodovias de pista simples com faixas adicionais (TRB, 2000).

#### 2.4.1 TRARR

TRARR (TRAffic on Rural Roads) é um modelo de simulação microscópico estocástico para representar o fluxo de tráfego de rodovias de pista simples. Foi desenvolvido entre os anos de 1978 e 1980 pelo Australian Road Research Board. Foi escrito em Fortran. Permite estudar modificações no tráfego de rodovias de pista simples, tanto relativas às características geométricas da via como na corrente de tráfego (EGAMI, 2000).

Os veículos livres buscam viajar na sua velocidade desejada. Entretanto, são restringidos pela geometria da via ou por ter sua potência limitada. TRARR utiliza fatores de ajuste para representar os efeitos causados à velocidade dos veículos pelo alinhamento horizontal, largura e rugosidade do pavimento e velocidade limite. A inclinação da rampa e a resistência do vento também afetam o comportamento dos veículos livres, especialmente os veículos comerciais (HOBAN *et al.*, 1991).

No modelo de deslocamento longitudinal empregado no TRARR, os veículos empenham-se para manter uma distância ou *headway* desejado atrás do veículo líder. Quando o *headway* diminui, o veículo seguidor tenta adotar uma velocidade de tal forma que, se o veículo da frente mantiver uma velocidade constante, ele irá alcançar o *headway* desejado.

Com relação às ultrapassagens, os veículos só realizam a manobra se tiverem certeza que conseguirão terminá-la. Além disso, os motoristas podem empregar velocidade maior que a desejada quando estão ultrapassando e a potência máxima utilizada pode ser maior quando está ultrapassando do que quando está livre. As ultrapassagens múltiplas são permitidas, mas um veículo que está sendo ultrapassado não pode ultrapassar. A realização da manobra de ultrapassagem depende ainda do nível de agressividade dos veículos envolvidos.

Segundo Algers *et al.* (1997), o TRARR é um dos dez modelos de simulação microscópicos com maior número de usuários. A sua última versão é de 1991.

## 2.4.2 TWOPAS

TWOPAS é um modelo de simulação microscópico para tráfego em rodovias de pista simples. O modelo foi desenvolvido pelo Midwest Research Institute (MRI) e apresentado em uma publicação do TRB em 1978. Em 1983, o *Texas Transportation Institute* (TTI) e a *KLD and Associates* atualizaram o modelo original, resultando na versão utilizada para desenvolver o capítulo 8 do HCM de 1985. Nesta versão, o modelo já tinha capacidade de simular a operação de tráfego em rodovias de pista simples normais, incluindo tanto zonas de proibição e permissão de ultrapassagem quanto os efeitos das curvas horizontais, rampas, curvas verticais e distância de visibilidade. Em seguida, o MRI adicionou ao modelo a capacidade de simular faixas adicionais (TRB, 1999). O modelo foi escrito em FORTRAN.

TWOPAS considera o efeito da geometria da via especificada pelo usuário, incluindo curvas horizontais, rampas, curvas verticais, distância de visibilidade e faixas adicionais, para determinar o comportamento dos veículos. O controle de tráfego também pode ser especificado pelo usuário, particularmente zonas de proibição e permissão de ultrapassagem marcadas na via. A mudança de faixa em trechos com faixa adicional ocorre por dois motivos: (i) evitar atrasos devido a veículos lentos, e (ii) evitar o final da faixa adicional.

Recentemente, foi desenvolvida pela Universidade da Califórnia, em Berkeley, uma interface para facilitar a entrada de dados, rodar o simulador e disponibilizar a saída em forma gráfica. A interface chama-se UCBRURAL, e está baseada naquela originalmente desenvolvida para ser usada com o modelo TRARR (TRB, 1999).

## 2.5 SIMULAÇÃO DE RODOVIAS DE PISTA SIMPLES NO BRASIL

Ainda são poucas as pesquisas dedicadas à utilização de modelos de microscópicos para o estudo de rodovias de pista simples no Brasil. A seguir serão mencionados alguns deles.

Melo (2002), buscando adaptar diretrizes da AASHTO para projetos de faixas adicionais em aclives para as condições das rodovias brasileiras, utilizou o modelo TRARR. Este estudo analisava os benefícios aos usuários após a implantação da faixa adicional. Os benefícios gerados aos usuários foram analisados por comparação de trechos em aclives com e sem faixa adicional. O modelo de simulação TRARR foi utilizado para gerar informações necessárias para a estimativa dos benefícios. As informações obtidas nestas simulações são os tempos de viagens e as velocidades para cada categoria de veículo, porcentagens de tempo de

espera em pelotão e a porcentagem média de pelotões na rampa. Em contrapartida, o custo de construção da faixa adicional foi estimado em função da quantidade de materiais necessários. Ao contrário da norma da AASHTO, que determina um valor constante para o volume mínimo de tráfego que justifica a implantação de faixas adicionais, Melo (2002) concluiu que o volume mínimo depende da geometria da rampa. Além disso, este volume mínimo tende a diminuir a medida que a porcentagem de caminhões aumenta.

Egami e Setti (2000) relatam a recalibração do modelo de simulação TRARR para representar as condições operacionais dos veículos pesados que trafegam no estado de São Paulo. Esta recalibração consiste em alterar parâmetros relativos ao desempenho (relação massa/potência) e às características (massa, comprimento) dos veículos pesados.

Silveira (1996) apresenta uma aplicação do modelo TRARR em uma rodovia norte americana. Neste trabalho foram feitas investigações sobre a capacidade da via nas condições existentes. Foram, também, realizadas simulações para determinar a melhor localização de zonas de ultrapassagem e implantação de faixas adicionais de ultrapassagem de diferentes extensões.

## 2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Muitos estudos vem sendo realizado desde a década de 50 para representar microscopicamente o comportamento dos sistemas de transportes. Com o advento do computador, a simulação de tráfego tornou-se uma ferramenta útil para testar estratégias de gerenciamento do transporte e avaliar medidas de melhoria operacional do sistema.

Este capítulo teve o objetivo de dar uma visão geral sobre o universo da simulação de tráfego, se atendo especificamente na modelagem microscópica aplicada a rodovias. Para fundamentar o modelo de simulação apresentado no próximo capítulo, foi dada ênfase no tratamento teórico na modelagem do deslocamento longitudinal e lateral de veículos. Também foram apresentados dois simuladores largamente utilizados para representar o fluxo de veículos em rodovias de pista simples. Por fim, foram descritos alguns trabalhos em nível nacional sobre a utilização de modelos de simulação envolvendo rodovias de pista simples.

A seguir, será apresentado um novo modelo para simulação de segmentos rodoviários de pista simples voltado para representar condições de tráfego brasileiras.

## **CAPÍTULO 3 - O MODELO STIRO**

---

### 3.1 INTRODUÇÃO

No capítulo anterior foram apresentados alguns exemplos de modelos de simulação que podem representar um segmento de via com fluxo ininterrupto. Aqueles modelos permitem a avaliação da operação de faixas adicionais em aclives. Entretanto, foram projetados para o tratamento de vias em condições diferentes às encontradas no Brasil, onde o grande volume de caminhões trafegando nas rodovias com motores de baixa potência e transportando excesso de carga prejudica sensivelmente o desempenho operacional de todos os veículos.

Além disso, existe uma certa dificuldade em recalibrar os simuladores disponíveis para representar, de forma adequada, condições operacionais inerentes a um contexto diferente daquele vigente em lugares outros que os de desenvolvimento dos modelos. Este fato incentivou a elaboração de um novo modelo de simulação sobre o qual se tenha total domínio, voltado para representar as condições de tráfego brasileiras.

Neste capítulo é apresentado o modelo de simulação microscópico construído para fins desta pesquisa, denominado STIRO – Simulador de Tráfego Ininterrupto ROdoviário. São descritas as condições e restrições do modelo e sua estrutura. Consta, também, a descrição da

modelagem da rodovia, dos veículos e suas regras de comportamento, além dos processos de atualização de velocidade e posição dos veículos.

### 3.2 PROPÓSITO E ESTRUTURA DO MODELO

STIRO constitui uma ferramenta para avaliar o desempenho operacional de faixas adicionais em aclives. Foi desenvolvido para representar o comportamento dos veículos em rodovias de pista simples. As simulações se limitam a um único sentido de circulação.

O simulador permite a comparação do desempenho do sistema sob diferentes alternativas de projeto geométrico (localização do início e término da faixa adicional, comprimento e declividade das rampas), configurações do fluxo de veículos (categorias de veículos e suas relações peso/potência) e demandas (intensidade e composição do fluxo de veículos). O modelo possibilita simular segmentos rodoviários com ou sem faixa adicional. O trecho rodoviário pode ser formado por segmentos com diferentes inclinações.

STIRO não considera a possibilidade de ultrapassagem pela faixa de sentido contrário. Somente ocorrem trocas de faixas no trecho com faixa adicional, no qual os veículos lentos na faixa normal se dirigem para a faixa adicional para dar passagem a veículos mais rápidos. Além disso, STIRO contempla a realização de manobras forçadas típicas de final de faixas adicionais, quando os veículos mais lentos nessas faixas são obrigados a retornar à faixa normal de tráfego.

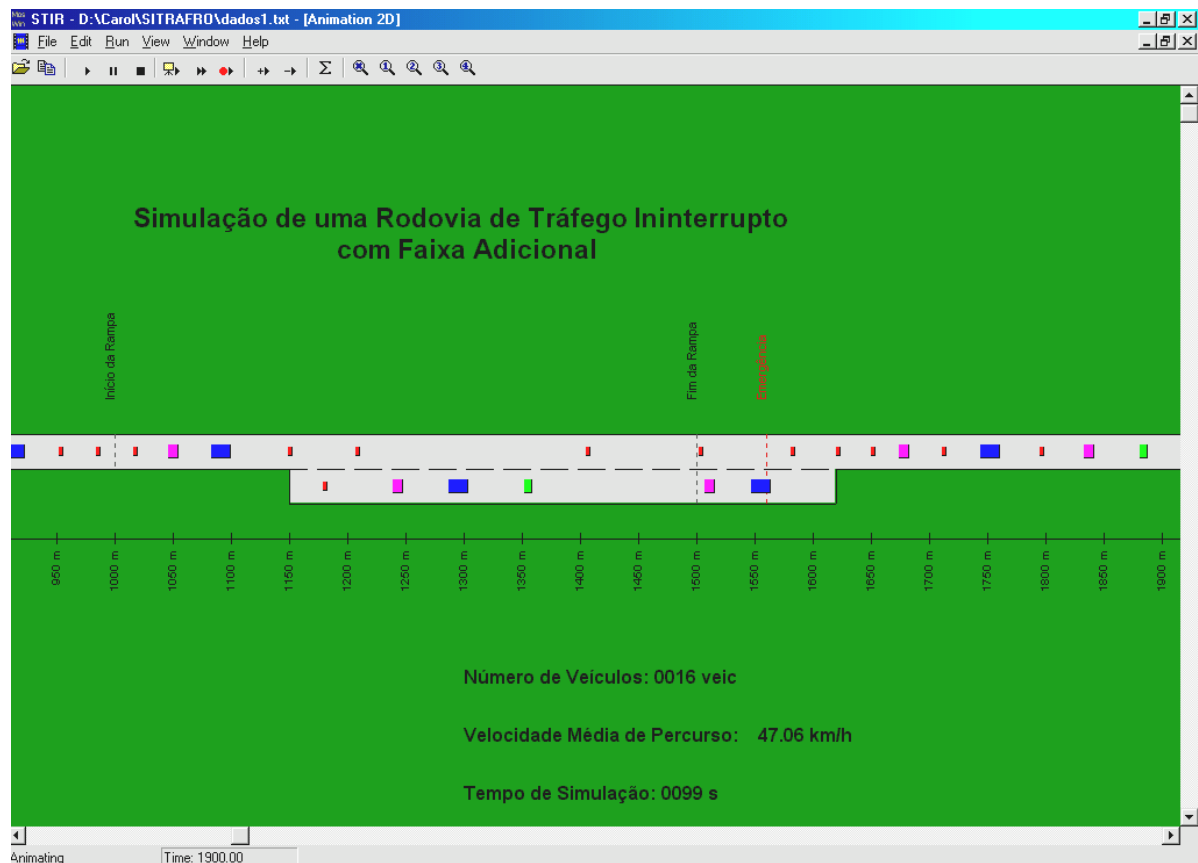
O modelo de simulação, contínuo no espaço e discreto no tempo, foi implementado em um microcomputador IBM PC, para o ambiente Windows, na linguagem C de programação, e usa a biblioteca MOSAIC de simulação. A biblioteca MOSAIC gerencia a execução dos eventos discretos, facilita a obtenção dos resultados, o cálculo das estatísticas e a representação gráfica do sistema (LIFTECH CONSULTANTS INC., 1997).

O modelo dispõe de uma interface gráfica útil para verificar o comportamento do sistema, a qual pode ser desligada para acelerar a simulação (Figura 3.1). Os parâmetros de entrada para executar a simulação são lidos pelo programa a partir de um arquivo de dados editado em qualquer ferramenta de edição de texto, até mesmo o Microsoft Word.

A estrutura básica do modelo de simulação inicia, como pode ser visto na Figura 3.2, com a leitura do arquivo que contém os dados iniciais para a caracterização do segmento viário a ser modelado, do fluxo de veículos e dos parâmetros da simulação. A partir da leitura

dos dados de entrada é gerado o segmento rodoviário. Os veículos da simulação também são gerados e inseridos um a um na fila para atualização de velocidade e posição.

Quando são inseridos na fila de atualização, os veículos passam por dois processos: *car-following* e *lane-changing*. O *car-following* determina qual a posição e velocidade de cada veículo no instante seguinte. O processo de *lane-changing* avalia a necessidade, a possibilidade e a viabilidade do veículo para trocar de faixa. Este procedimento ocorre até o veículo chegar ao final do trecho. Neste ponto, o veículo é retirado da fila de atualizações. Quando todos os veículos chegam ao final do trecho o programa gera um relatório de resultados.



**Figura 3.1 – Saída gráfica do simulador STIRO.**



**Figura 3.2 – Estrutura do modelo de simulação.**

### 3.2.1 Perfil da rodovia modelada

No modelo STIRO, um trecho rodoviário é formado por segmentos homogêneos. Nestes segmentos as características geométricas não variam. O segmento é caracterizado pela velocidade máxima permitida aos veículos, inclinação da rampa, extensão e número de faixas.

Nas aplicações apresentadas neste trabalho, o perfil da rodovia modelada é dividido em cinco segmentos homogêneos:

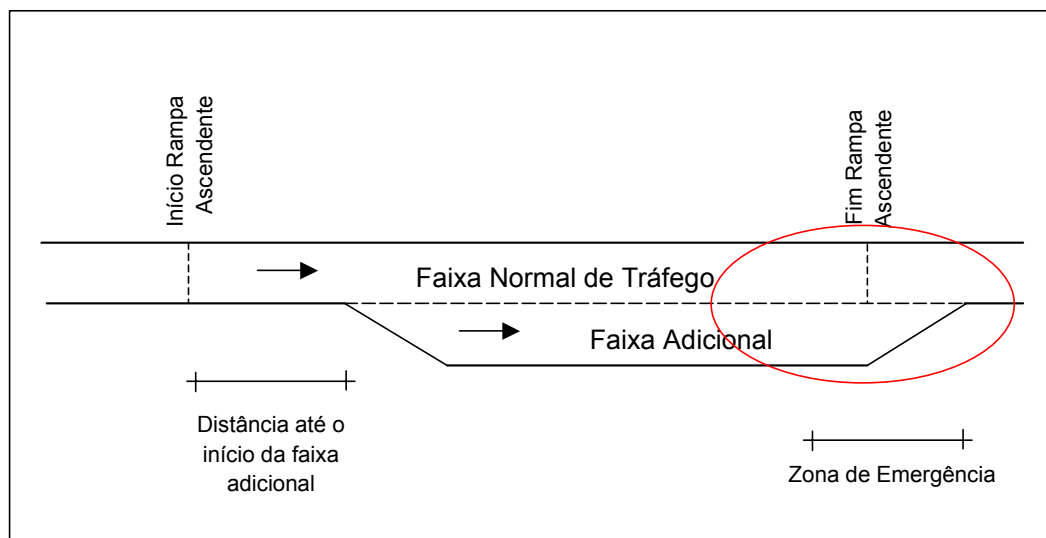
- (i) segmento plano, faixa simples
- (ii) segmento em aclive, faixa simples
- (iii) segmento em aclive, faixa simples + faixa adicional
- (iv) segmento plano, faixa simples + faixa adicional
- (v) segmento plano, faixa simples

Pode-se observar que, basicamente, o perfil da rodovia é dividido três partes: dois trechos planos intercalados por um aclive. A possibilidade da existência da faixa adicional faz com que se divida cada uma das três partes em segmentos homogêneos. Isto permite avaliar o



efeito causado pela distância entre o início do aclive e o início da faixa adicional sobre o desempenho operacional da rodovia. O usuário, então, deve informar ao modelo a extensão anterior ao início da faixa adicional (ver figura 3.3). Este valor deve ser fornecido em forma de percentual relativo à extensão em rampa, como dado de entrada para a simulação. Por exemplo, em um segmento com um aclive de 1000 m de extensão, uma extensão percentual de o comprimento crítico de 20% equivale a 200 metros. Isto quer dizer que a faixa adicional tem início a 200 metros do início do aclive.

Vale ressaltar que a norma americana (AASHTO, 2001), denomina a extensão, em aclive, anterior ao início da faixa adicional como comprimento crítico da rampa. Segundo a AASHTO, este comprimento deve se estender até o ponto onde um caminhão típico teria a sua velocidade reduzida em 15 km/h pela ação da rampa. A norma indica, para cada inclinação de rampa, um valor máximo para o comprimento crítico. No caso do modelo STIRO, preferiu-se facultar ao usuário a definição do início da rampa e a extensão da rampa sem faixa adicional.



**Figura 3.3 – Esquema de um segmento de rodovia modelado.**

Próxima ao fim da faixa adicional é determinada uma zona de emergência onde o caminhão que estiver na faixa adicional deve iniciar a operação de retorno à faixa normal de tráfego. Esta zona de emergência inicia 160 metros antes do fim da faixa adicional (ver Figura 3.3).

Basicamente, a zona de emergência foi definida para indicar o local onde os motoristas terão um comportamento diferente do padrão. A utilidade da zona de emergência será melhor entendida na seção 3.4.1.1.

### 3.2.2 Os veículos

O modelo STIRO permite a modelagem de qualquer veículo rodoviário, sem limite para a inclusão de diferentes categorias de veículos, sejam veículos leves ou pesados. Cada categoria de veículo é caracterizada por uma série de parâmetros relativos às suas condições físicas e mecânicas. Sejam estes parâmetros:

- Potência
- Massa (total e por eixo trator)
- Comprimento
- Área frontal
- Eficiência do motor
- Coeficientes para o desempenho motriz

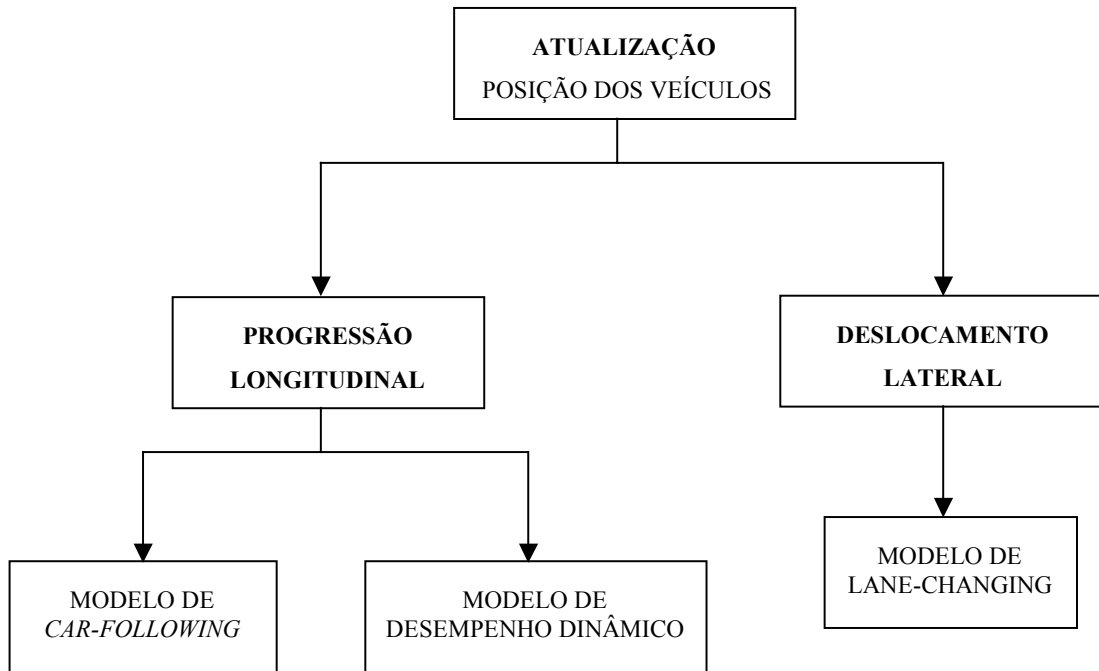
A geração das diferentes categorias de veículos (automóveis e caminhões) é feita a partir de um processo estocástico com uma distribuição exponencial transladada. É associado a cada tipo de veículo o seu percentual na configuração do fluxo da rodovia. A partir do fluxo e deste percentual, são determinados os parâmetros para a função de distribuição exponencial dos *headways*. Uma função da biblioteca Mosaic utiliza esta distribuição como um dos argumentos para gerar os veículos que percorrerão a rodovia.

### 3.3 ATUALIZAÇÃO DA POSIÇÃO DOS VEÍCULOS

A atualização da posição e da velocidade dos veículos é realizada a cada segundo, por dois processos distintos. Estes processos são *car-following* e *lane-changing*, ou seja, os modelos de veículo seguidor e de mudança de faixa.

Os veículos introduzidos no sistema são regidos por uma função SCRIPT. Esta função funciona como um roteiro para as ações que devem ser realizadas durante as suas trajetórias. Todos os veículos realizam o mesmo roteiro de ações. O que muda de um veículo para o outro são os parâmetros de entrada para a função SCRIPT. Os parâmetros de entrada variam para os diferentes tipos de veículos, podendo também apresentar diferenças entre veículos de tipos iguais, como ocorre, por exemplo, com a velocidade desejada.

Quando um veículo é gerado, suas variáveis são inicializadas, e este veículo entra em um processo repetitivo (*loop*), onde a cada incremento de tempo de um segundo, diversas ações (ver Figura 3.4) que avaliam o estado do veículo são realizadas. Este processo se repete até o veículo chegar ao final do segmento simulado.



**Figura 3.4 – Atualização da posição dos veículos pelo modelo STIRO.**

Estas ações dizem respeito à progressão longitudinal e ao deslocamento lateral na rodovia que devem ser realizados para que os veículos da simulação apresentem um comportamento próximo do real. Tais ações são:

- Incrementar a posição sem que o veículo se choque com o veículo da frente e de acordo com a capacidade motriz do veículo, e;
- Realizar as trocas de faixa necessárias, evitando colisões e dando passagem, na medida do possível, para veículos mais rápidos.

A atualização de posição e velocidade no modelo STIRO segue a regra de *car-following* desenvolvida por Gipps (1981). A escolha do modelo de Gipps deu-se pela sua larga utilização (TRG, 1999). Entre os modelos de simulação que utilizam a lógica desenvolvida por Gipps, encontram-se o pacote para simulação rodoviária do TRL denominado SISTM (WILSON, 2001), SIGSIM (MARSDEN *et al.*, 2001) e DRACULA (LIU, 1994). Ainda, o modelo de Gipps foi localmente utilizado em simulador apresentado por Castilho (1997) para avaliar o desempenho de ônibus em corredores urbanos. Além disso, Gipps utilizou variáveis mensuráveis para descrever o processo de *car-following*, como a taxa de desaceleração, tempo de reação e velocidade desejada.

Segundo Gipps (1981), o veículo seguidor ( $n$ ) procura manter uma distância em relação ao veículo líder ( $n-1$ ), de modo que não ocorra colisão mesmo que o líder reduza bruscamente sua velocidade. A velocidade do veículo seguidor fica limitada por:

$$v_n(t + \tau) \leq b_n \tau + \sqrt{(b_n^2 \tau^2 - b_n(2[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - v_n(t) - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{b}_{n-1}^2}))} \quad (6)$$

onde:

$t$ : intervalo incremental de tempo

$\tau$ : tempo de reação do veículo  $n$

$b_n$ : máxima taxa de desaceleração que o veículo  $n$  se propõe a empregar

$\hat{b}_{n-1}$ : máxima taxa de desaceleração do líder (estimada pelo seu seguidor)

$s_{n-1}$ : comprimento efetivo do veículo líder, ou seja, o comprimento físico acrescido de uma margem da qual o veículo seguidor não passe, mesmo se ambos estiverem parados.

Gipps (1981) aplicou, ainda, uma função que rege a variação da aceleração dos veículos, na qual a aceleração aumenta enquanto aumenta a velocidade. Quando o veículo se aproxima da sua velocidade desejada, a aceleração começa a diminuir até chegar a zero. Entretanto, no STIRO, esta restrição foi substituída por um modelo dinâmico de aceleração.

O modelo dinâmico de aceleração baseia-se no equilíbrio entre a força motriz e as forças de resistência ao movimento. A aceleração é calculada pela Segunda Lei de Newton aplicada para um veículo em aplace (MANNERING e KILARESKI, 1998). A descrição do modelo de desempenho será mostrada no item seguinte.

### 3.3.1 Modelo dinâmico de desempenho de veículos

O modelo de desempenho dos veículos implementado neste trabalho é analítico e fundamenta-se na Segunda Lei de Newton, e já foi utilizado no simulador INTEGRATION, como descrito em Demarchi (2000). Pela Segunda Lei de Newton, a resultante das forças aplicadas a um corpo é igual à massa  $m$  desse corpo multiplicada por sua aceleração  $a$ . Ou seja, o veículo acelera quando a resultante de forças é positiva e desacelera quando a resultante de forças é negativa. Quando a resultante é nula, o veículo passa a trafegar com velocidade constante (velocidade de equilíbrio).

A força tratora  $F_t$ , que impulsiona o veículo, é função da potência do motor deste veículo, o qual faz o eixo motriz girar:

$$F_t = 3600 \cdot \eta \cdot \frac{P}{V} \quad (7)$$

onde:

$P$ : potência do motor (kW);

$V$ : velocidade do veículo (km/h);

$\eta$ : coeficiente de eficiência da transmissão.

Quando o eixo motriz gira faz com que as rodas entrem em atrito com o pavimento e, assim, o veículo entra em movimento. A força  $F_t$  é limitada por uma força  $F_{máx}$ , função do atrito entre os pneus e o pavimento:

$$F_{máx} = W_{ta} \cdot \mu \quad (8)$$

onde:

$F_{máx}$ : força máxima (N);

$W_{ta}$ : peso do veículo que atua sobre o eixo trator (N);

$\mu$ : coeficiente estático de atrito pneu-pavimento.

Quando a força tratora  $F_t$  é maior que esta força  $F_{máx}$ , as rodas do veículo “patinam”, impedindo que o veículo se movimente. Logo, a força ( $F$ ) efetivamente usada no movimento do veículo é o valor mínimo entre a força tratora ( $F_t$ ) e a força máxima ( $F_{máx}$ ).

$$F = \min(F_t, F_{máx}) \quad (9)$$

Uma outra componente do esquema de forças é a força de resistência,  $R$ , oposta à força de tração. A força de resistência é constituída de três parcelas: resistência de rolamento, resistência aerodinâmica e resistência de greide (rampa).

A resistência de rolamento ( $R_r$ ) é gerada pelo contato do pneu com o solo:

$$R_r = C_r \cdot (C_2 \cdot V + C_3) \cdot \frac{W}{1000} \quad (10)$$

onde:

$W$ : peso do veículo (N);

$C_r$ : coeficiente de rolamento;

$C_2, C_3$ : coeficientes para o tipo de pneu.

A resistência aerodinâmica ( $R_a$ ) é provocada pelo arraste ou atrito do ar com a superfície do veículo quando este está em movimento:

$$R_a = C_1 \cdot C_d \cdot C_h \cdot A \cdot V^2 \quad (11)$$

onde:

$R_a$ : resistência aerodinâmica (N);

$C_1$ : coeficiente que inclui a densidade do ar ao nível do mar e fatores de conversão de unidades;

$C_d$ : coeficiente de atrito aerodinâmico ( $C_d$ : 0,047285);

$C_h$ : coeficiente de correção devido à altitude;

$A$ : área frontal do veículo.

A resistência do greide ( $R_g$ ) é a componente do peso do veículo na direção paralela ao pavimento, só existindo quando a inclinação da plataforma de rodagem é maior que 0%, ou seja, greides ascendentes. Em greides descendentes, a componente do peso tem mesmo sentido da força tratora e contribui positivamente para o movimento do veículo.

$$R_g = W \cdot i \quad (12)$$

onde:

$i$ : inclinação do greide (%).

Desta forma, a resistência total ao movimento é:

$$R = R_r + R_a + R_g \quad (13)$$

A aceleração do veículo é dada por:

$$a = \frac{F - R}{m} \quad (14)$$

onde:

$a$ : aceleração ( $\text{m/s}^2$ );

$m$ : massa do veículo (kg).

A Figura 3.5 representa o esquema de forças atuantes sobre o veículo em movimento em uma superfície inclinada.

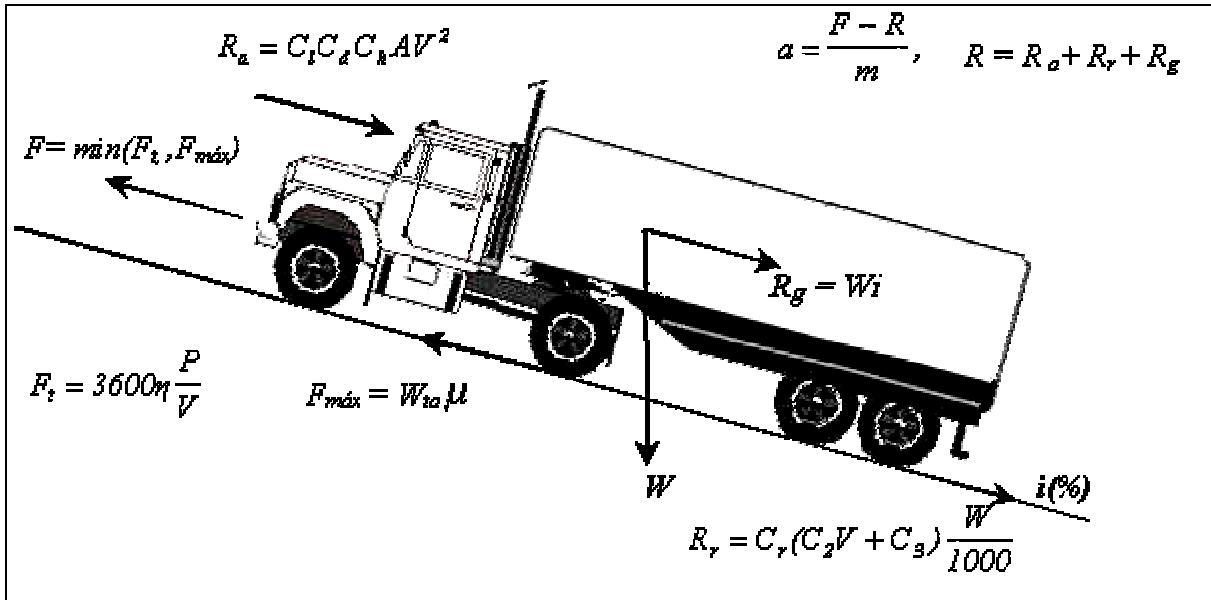


Figura 3.5 – Esquema de forças que atuam em um veículo em movimento na rampa.

Com este modelo é possível representar o desempenho de qualquer veículo do qual se disponha dados de massa, potência, comprimento, área frontal, etc. Isto permite utilizar o simulador para representar o comportamento de rodovias com diferentes tipos de veículos.

### 3.3.2 Determinação da velocidade do veículo na simulação

A velocidade que será empregada por cada veículo na corrente de tráfego é igual ao valor mínimo entre três velocidades, a saber:

- Velocidade calculada pelo modelo de *car-following*,  $V_{CF}$ ;
- Velocidade calculada pelo modelo de desempenho,  $V_{MD}$ ;
- Velocidade desejada pelo motorista,  $V_{desejada}$ .

A velocidade desejada,  $V_{desejada}$ , é atribuída a cada veículo na sua inicialização. Determinou-se que para os automóveis, a velocidade desejada seria um valor dado a partir de uma distribuição normal em torno da velocidade máxima regulamentar do trecho de entrada, com valores mínimo e máximo iguais a 70 e 130, respectivamente. Para os veículos pesados, a velocidade desejada é igual à velocidade de equilíbrio. Esta velocidade de equilíbrio é a maior

velocidade que o veículo pode alcançar com suas características físicas e mecânicas, ou seja, é a velocidade máxima calculada pelo modelo de desempenho que o veículo pode atingir trafegando no plano.

### 3.4 MUDANÇA DE FAIXA

STIRO incorpora um modelo de mudança de faixa focado para segmentos rodoviários dotados de faixa adicional. O procedimento de mudança de faixa se baseia no modelo proposto por Gipps (1986). As manobras de mudança de faixas somente ocorrem nos trechos por onde se estende a faixa adicional.

As faixas adicionais em aclives são implantadas onde há significativo volume de veículos lentos e dificuldade de visibilidade para ultrapassagem pelo fluxo oposto (AASHTO, 2001). STIRO considera que o segmento simulado tenha total proibição de ultrapassagem entre as faixas de sentido oposto e, portanto, somente é possível trocar de faixa onde existe faixa adicional.

Como em outros modelos, a duração da operação de mudança de faixas é igual ao intervalo incremental de tempo. A mudança de faixa é avaliada a cada passo da simulação como parte do processo de progressão dos veículos

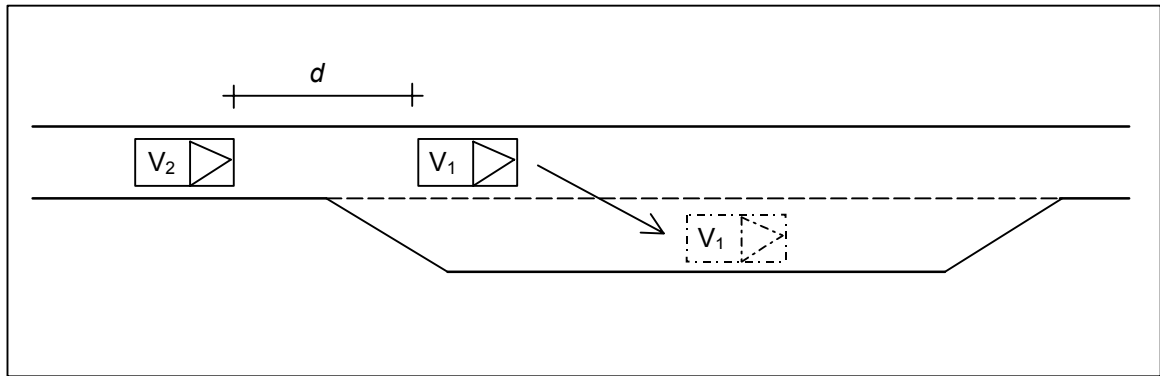
Nos itens a seguir será descrito o processo de mudança de faixa contido no simulador STIRO. O processo de mudança de faixa foi dividido em dois casos, veículos na faixa normal e veículos na faixa adicional.

#### 3.4.1 Veículos na faixa normal de tráfego

No modelo STIRO a faixa adicional é dedicada aos veículos lentos, sejam eles caminhões ou automóveis. Os veículos que se encontram na faixa normal de tráfego são impelidos a se deslocar para a faixa adicional quando estiverem impedindo a progressão de veículos mais rápidos.

Conforme a Figura 3.6, a possibilidade de trocar de faixa é avaliada pelo veículo  $V_1$  caso o veículo  $V_2$  se encontre a uma distância  $d$  inferior a 60 metros e tenha potencial de aceleração e velocidade desejada maiores que o seu.





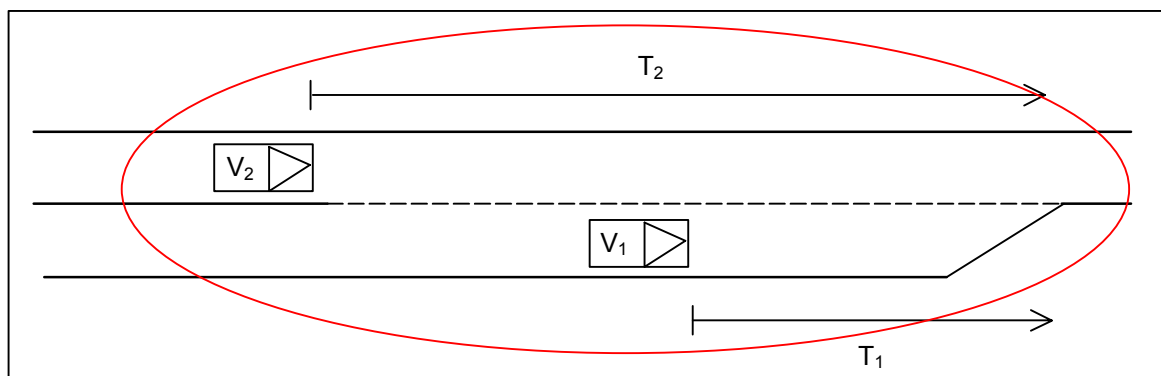
**Figura 3.6 – Esquema da mudança de faixa quando o veículo está na faixa normal.**

A viabilidade para ocorrer a mudança de faixa ocorre se houver espaço suficiente na faixa adicional para possibilitar a manobra. A Figura 3.8 mostra o fluxograma que descreve o processo de mudança de faixa para veículos que viajam na faixa normal de tráfego.

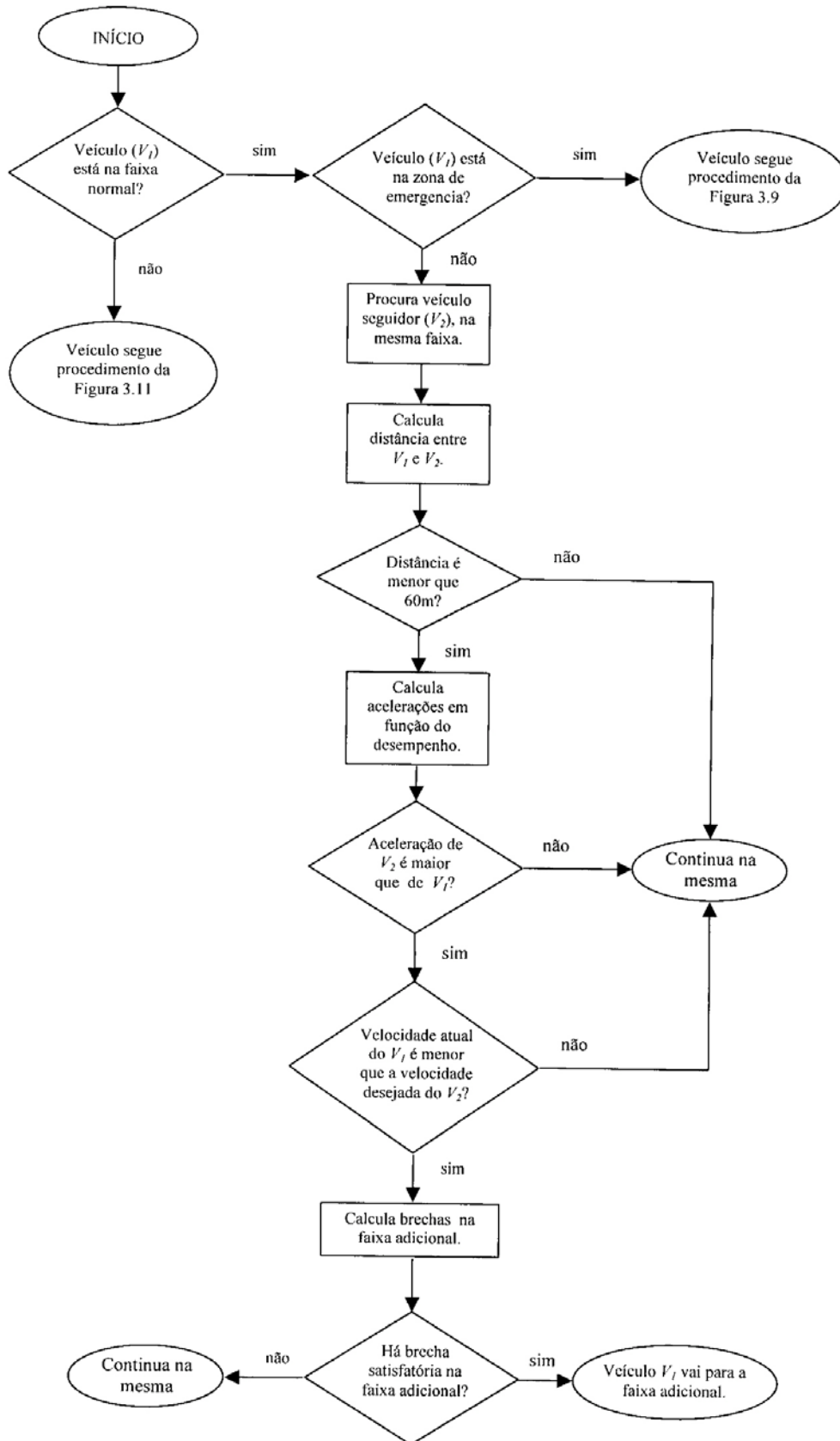
#### 3.4.1.1 Veículos na faixa normal de tráfego dentro da zona de emergência

A zona de emergência está situada no final do trecho com faixa adicional. Ela foi definida para indicar uma região onde os veículos na faixa normal devem ter um comportamento diferenciado. Nesta região, os veículos lentos que trafegam sobre a faixa adicional procuram retornar a faixa normal. Quando não existem brechas naturais na faixa normal, o modelo assume que os veículos nesta faixa abrirão brechas para possibilitar este retorno.

Quando um veículo, na faixa normal de tráfego, entra na zona de emergência, o modelo verifica se existe algum caminhão, na faixa adicional, também na zona de emergência. Em caso positivo, o veículo na faixa normal avalia a necessidade de abrir uma brecha para que o caminhão consiga voltar a faixa normal antes que a faixa adicional chegue ao fim (ver Figura 3.9).

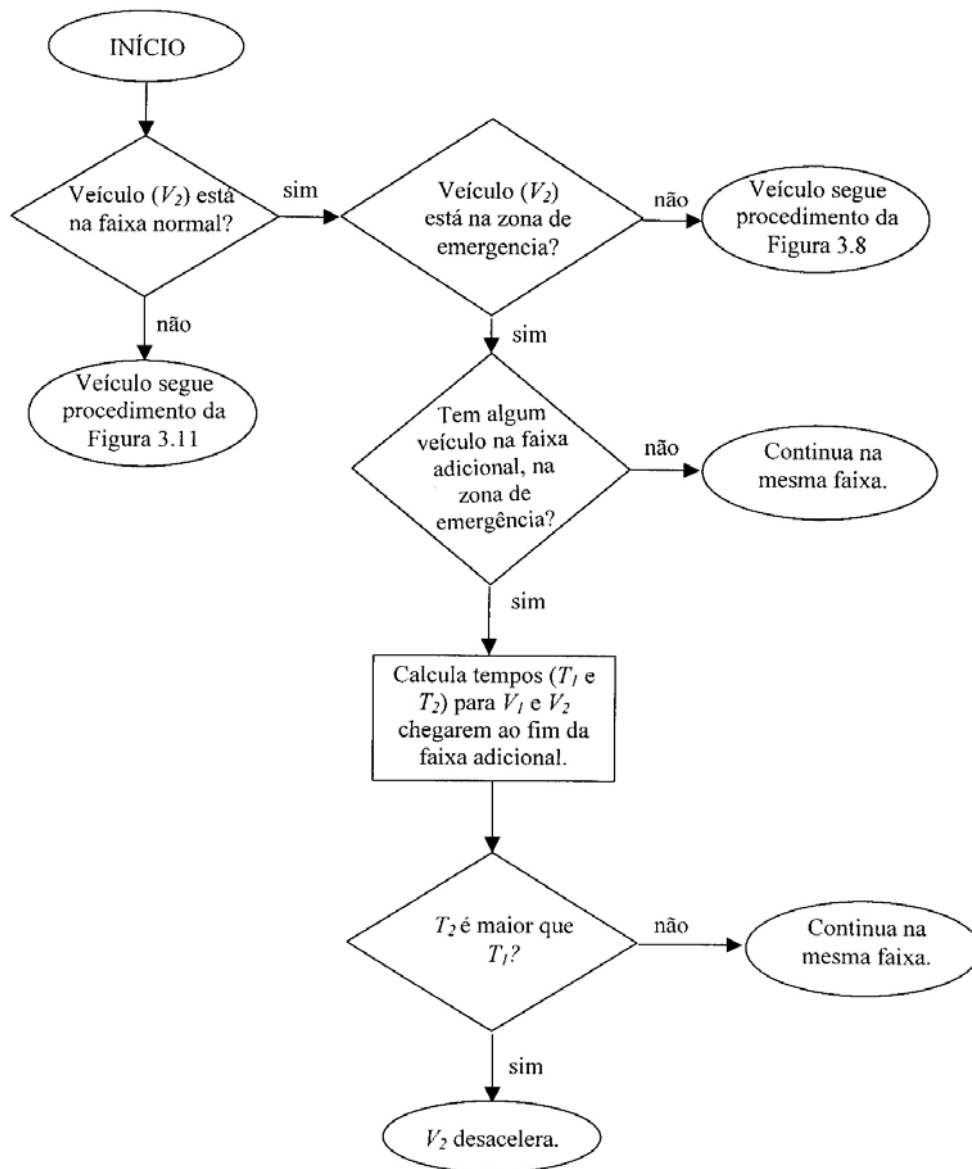


**Figura 3.7 – Veículos na zona de emergência.**



**Figura 3.8 – Fluxograma da mudança de faixa para veículos fora da zona de emergência.**

Esta avaliação ocorre através da estimativa, por parte do veículo na faixa normal, do tempo necessário para chegar ao fim do segmento com faixa adicional (ver Figura 3.9). Se este valor for menor que o tempo necessário para o caminhão atingir o fim da faixa adicional, o veículo da faixa normal continua sua viagem normalmente. Caso o tempo requerido pelo veículo da faixa normal chegar ao fim do trecho com faixa adicional for menor que o do caminhão, então este veículo deve desacelerar a fim de abrir a brecha para o caminhão retornar a faixa normal de tráfego.



**Figura 3.9 – Fluxograma da mudança de faixa para veículos dentro da zona de emergência.**

O item seguinte descreve a operação de mudança de faixa quando os veículos estão na faixa adicional e buscam a faixa normal.

### 3.4.2 Veículos na faixa adicional

Da mesma forma, todo o veículo que se deslocou para a faixa adicional, é submetido a um teste para determinar a sua volta à faixa normal de tráfego, bem como a sua permanência nela.

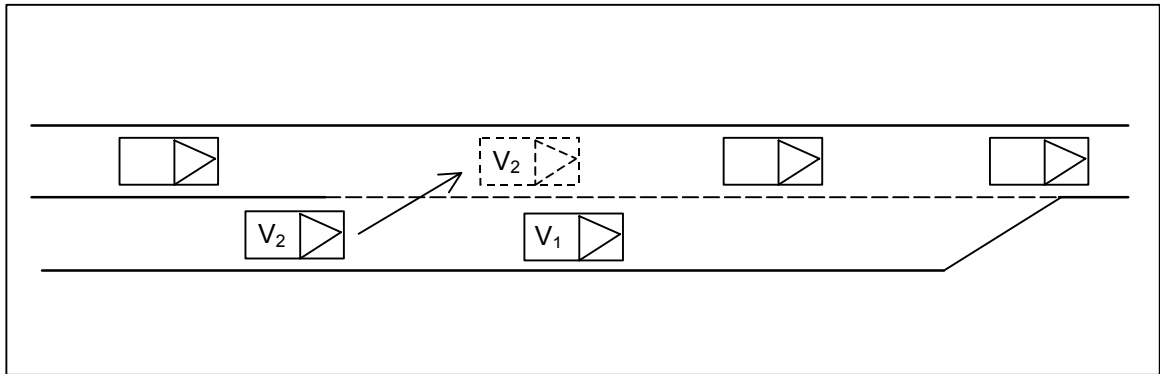
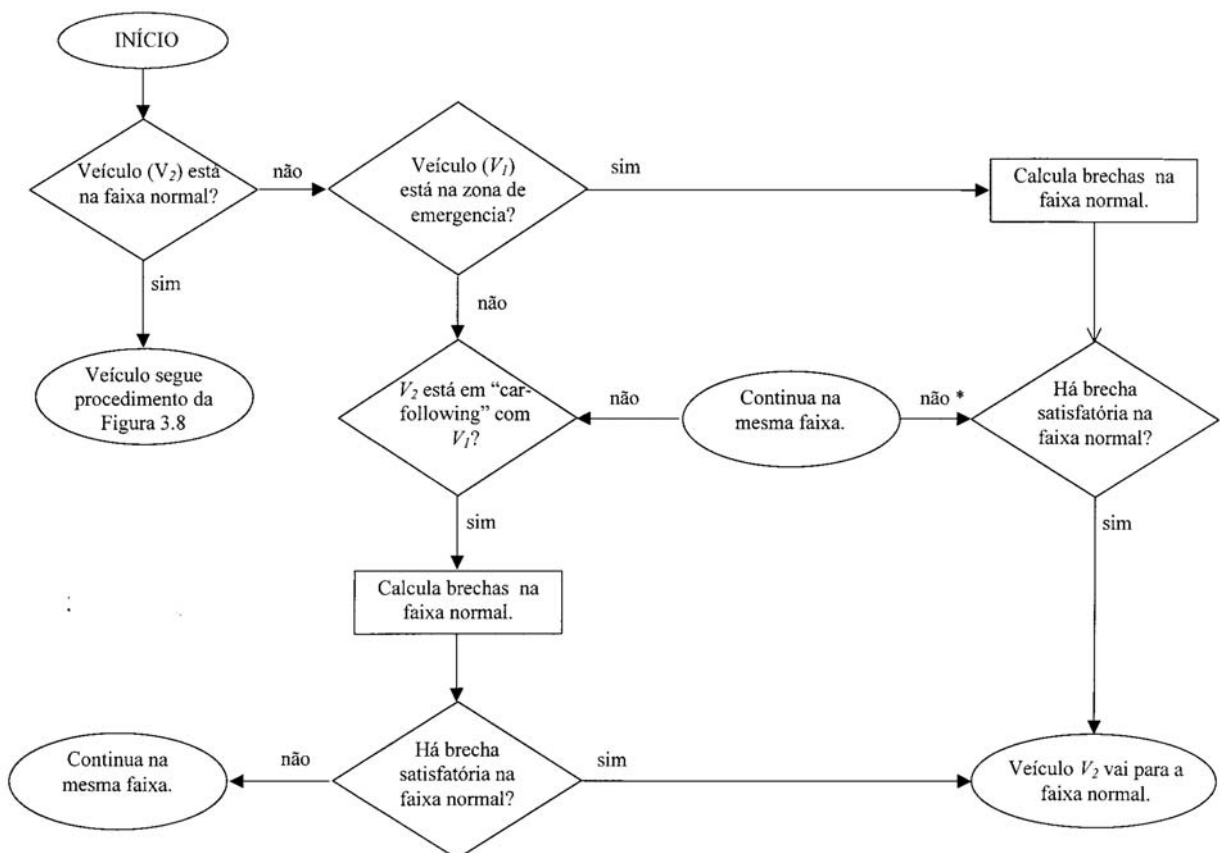


Figura 3.10 – Esquema da mudança de faixa a partir da faixa adicional.



\* Nestas condições os veículos que se encontram na faixa normal passam pelos procedimentos definidos na Figura 3.9 para gerar uma brecha que viabilize o retorno à faixa normal.

Figura 3.11 – Fluxograma da mudança de faixa para veículos na faixa adicional.

O veículo que estiver na faixa adicional deve trocar de faixa em duas ocasiões: (i) se estiver na zona de emergência, e (ii) se estiver fora da zona de emergência, mas com um veículo mais lento à sua frente. Em ambos os casos o veículo tenta encontrar uma brecha antes do término da faixa adicional. A seguir, o detalhamento deste procedimento.

### 3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O capítulo apresentou o modelo STIRO, sua estrutura e fundamentação teórica. Faixas adicionais tem comportamento particular, diferentes dos procedimentos de *lane-changing* convencionais para rodovias de pista simples. O modelo de mudança de faixas foi construído para representar especificamente o comportamento de veículos em trechos com faixa adicional.

O modelo foi estruturado para permitir refinamentos e eventuais mudanças que se julguem necessárias no futuro.

O modelo STIRO foi desenvolvido para ser simples e flexível. Portanto, sua estrutura carrega algumas simplificações:

- STIRO representa o fluxo de tráfego em apenas um sentido de circulação. O fluxo no sentido oposto ao da circulação não é levado em consideração. Também, as ultrapassagens pela faixa de fluxo oposto são proibidas.
- Quando da mudança de faixa entre a faixa normal de tráfego e a faixa adicional, a manobra ocorre no intervalo de um segundo entre a avaliação da possibilidade de troca e a atualização da posição dos veículos.

Nos capítulos seguintes serão apresentados testes realizados com o modelo STIRO, bem como aplicações práticas.

## **CAPÍTULO 4 - TESTES PRELIMINARES COM O MODELO**

### 4.1 APRESENTAÇÃO

Este capítulo apresenta dois estudos com aplicações do modelo STIRO. Em um primeiro momento, buscou-se adequar o modelo de *car-following* para representar segmentos rodoviários rurais de pista simples segundo um procedimento definido por Owen *et al.*(1996) como validação conceitual. No segundo estudo, foram realizadas algumas simulações para investigar o desempenho operacional de um segmento rodoviário com a implantação da faixa adicional e fluxo de veículos pesados.

No decorrer do capítulo será descrito o ambiente básico para as simulações aqui apresentadas. A descrição engloba as diferentes categorias de veículos, o comportamento dos motoristas e a topologia da rodovia. Também será mostrado um teste para determinar os parâmetros para o modelo *car-following* de Gipps,  $b$  e  $\hat{b}$  (ver Equação 6). A partir da determinação adequada dos parâmetros de Gipps, serão apresentados os resultados obtidos de simulações realizadas para diferentes proporções de caminhões no fluxo de tráfego, com e sem faixa adicional.

## 4.2 AVALIAÇÃO PRELIMINAR

A primeira aplicação de STIRO objetiva a validação conceitual através do ajuste nos parâmetros do modelo de Gipps que determinam a capacidade e a velocidade média do fluxo de tráfego. Os parâmetros ajustados são  $b$  (taxa de desaceleração máxima desejada pelo veículo seguidor) e  $\hat{b}$  (taxa de desaceleração máxima do veículo líder, estimada pelo seu seguidor).

Segundo Owen *et al.* (1996), a validação conceitual é a verificação qualitativa do modelo dentro da teoria de fluxo de tráfego. Para realizar a validação conceitual do STIRO, procurou-se adequar os parâmetros do modelo de *car-following* para representar o fluxo de veículos e atingir a capacidade de forma coerente com a teoria.

Para determinar os parâmetros que mais aproximavam o fluxo simulado ao fluxo real, foram geradas curvas fluxo-velocidade para algumas combinações de  $b$  e  $\hat{b}$ , considerando um intervalo incremental de tempo simulado igual a 1 segundo. As simulações foram realizadas para um segmento plano sem faixa adicional e fluxo de tráfego composto somente por automóveis. Para representar o fluxo real buscou-se uma combinação de parâmetros que alcançasse a capacidade da faixa em torno dos 1900 uvp/h (capacidade de uma faixa rodoviária) com uma velocidade aproximada de 45 km/h.

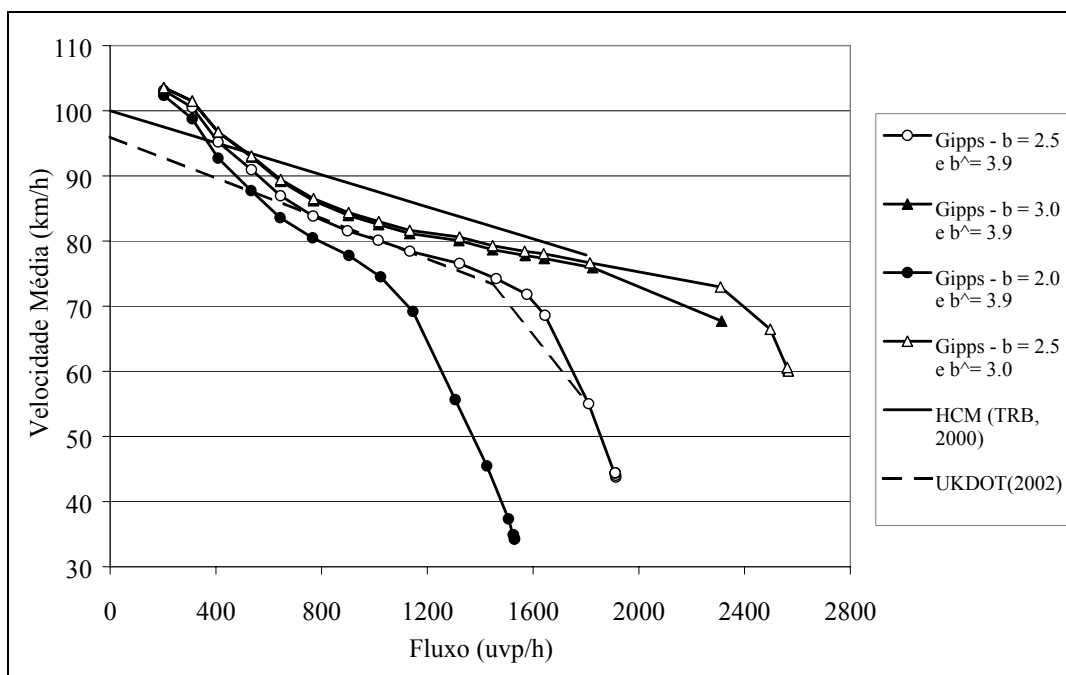
Além disso, foram escolhidas duas metodologias internacionais para avaliação de nível de serviço de rodovias. As metodologias escolhidas para este estudo são a do *Highway Capacity Manual 2000* (TRB, 2000) – HCM2000 – e o *Design Manual for Roads and Bridges* (UKDOT, 2002). Para cada metodologia foi determinada uma curva fluxo-velocidade. Estas curvas foram geradas para um tipo de rodovia com características semelhantes ao segmento simulado.

A metodologia do HCM2000 para avaliação da capacidade de rodovias de pista simples leva em conta a geometria da via, a demanda e a velocidade em fluxo livre. A velocidade em fluxo livre sofre ajustes para determinar a velocidade operacional da via, através de fatores de ajuste de largura da faixa, largura do acostamento, número de pontos de acesso, fluxo de tráfego e percentual de veículos pesados (TRB, 2000).

A metodologia aplicada pelo UKDOT (2002) para prever a velocidade do tráfego em rodovias rurais deriva de um estudo realizado em 1991 pelo *Transport and Road Research Laboratory* (TRRL). O estudo relaciona velocidade, fluxo e geometria de rodovias rurais de

pista simples da Inglaterra. As velocidades variam de 30 a 95 km/h e o percentual de veículos pesados entre 0 e 50%.

A Figura 4.1 apresenta as curvas fluxo-velocidade resultantes de quatro combinações de  $b$  e  $\hat{b}$ , utilizando o simulador STIRO. Também mostra as curvas teóricas determinadas pela aplicação das duas metodologias internacionais ao caso simulado.



**Figura 4.1 – Curvas para a avaliação inicial do modelo de *car-following*.**

A comparação dos resultados demonstra que as curvas teóricas variam bastante. É possível observar também a forma como o modelo de Gipps é sensível à variação dos parâmetros  $b$  e  $\hat{b}$ , que determinam a capacidade e a velocidade.

Observando as curvas com diferentes parâmetros do modelo de Gipps da Figura 4.1 pode-se notar que:

- Quanto maior a disposição do veículo seguidor em desacelerar, mais próximo do veículo da frente ele se manterá, aumentando a capacidade da via.
- Quanto maior o valor estimado pelo veículo seguidor para a disposição do líder em desacelerar, mais distante o seguidor se manterá deste líder, diminuindo a capacidade da via.

À luz dos resultados, decidiu-se utilizar, nos experimentos realizados neste trabalho, os valores de 2.5 e 3.9, respectivamente para  $b$  e  $\hat{b}$ . Estes valores determinam uma capacidade de

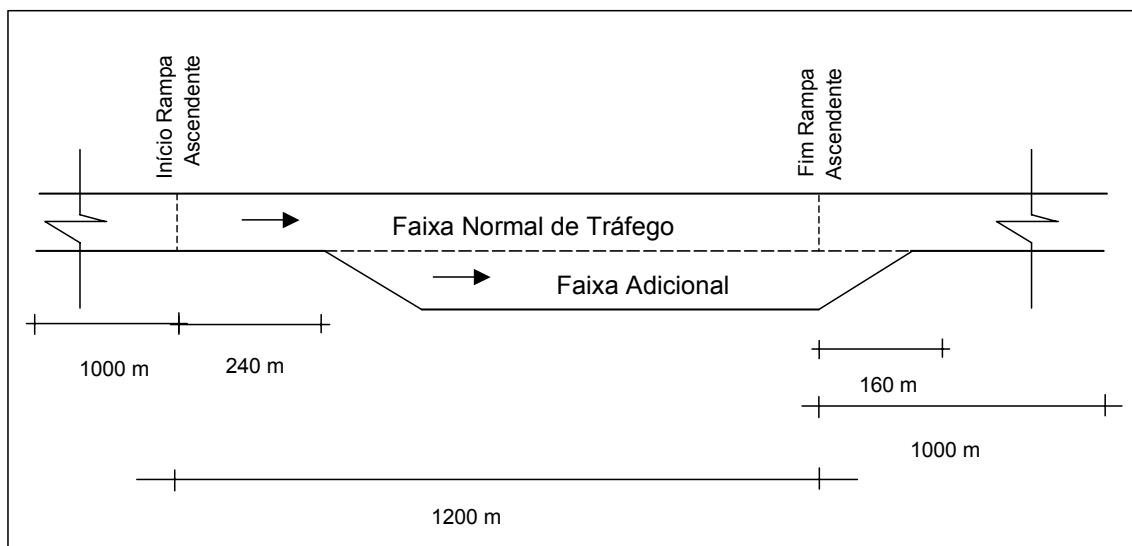


1900 uvp/h. Vale ressaltar que o segmento simulado representa uma situação extrema, onde há proibição de ultrapassagem pela faixa de fluxo oposto na totalidade de sua extensão.

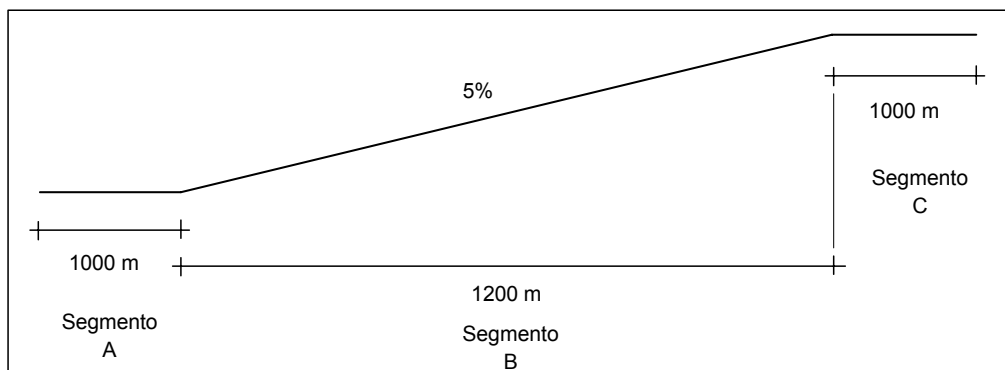
#### 4.3 SIMULAÇÃO COM FAIXA ADICIONAL EM ACLIVE

Esta seção descreve um estudo realizado com o simulador STIRO. Neste estudo, STIRO é utilizado para demonstrar o avanço operacional de uma rodovia de pista simples com a implantação de uma faixa adicional no aclive. O estudo também mostra a diferença de velocidade entre os veículos pesados e os automóveis.

O cenário para a realização do experimento é composto por uma sucessão de trechos com diferentes características altimétricas (trecho plano, trecho em aclive de 5%, trecho plano). A Figura 4.2 detalha as características planimétricas do trecho modelado. O perfil altimétrico está representado na Figura 4.3, sendo a inclinação da rampa igual a 5%.



**Figura 4.2 – Croqui esquemático do trecho rodoviário simulado.**



**Figura 4.3 – Esquema planimétrico do trecho para o experimento.**

O experimento consiste na submissão do cenário a distintas condições de fluxo e composição de tráfego. Os veículos e o segmento simulados estão descritos na seção 4.3.1 a seguir.

#### 4.3.1 Descrição dos elementos da simulação

Esta seção detalha as características dos veículos e do segmento rodoviário utilizados no experimento.

##### 4.3.1.1 Veículos

A simulação contempla duas categorias de veículos: automóveis e caminhões. Na categoria de caminhão foram especificados três modelos. Os tipos de veículos diferem em termos de dimensões físicas e características mecânicas de desempenho motriz. Ainda, cada veículo difere, entre si, em termos de comportamento desejado.

Os parâmetros responsáveis pela caracterização física e mecânica dos veículos foram extraídos do trabalho de Demarchi (2000), que avalia a composição do fluxo em uma rodovia de pista dupla do estado de São Paulo. O Quadro 4.1 apresenta um resumo dos parâmetros para cada tipo de veículo, conforme descrito na seção 3.3.1. Estes parâmetros são utilizados para determinar a velocidade e posição dos veículos na simulação.

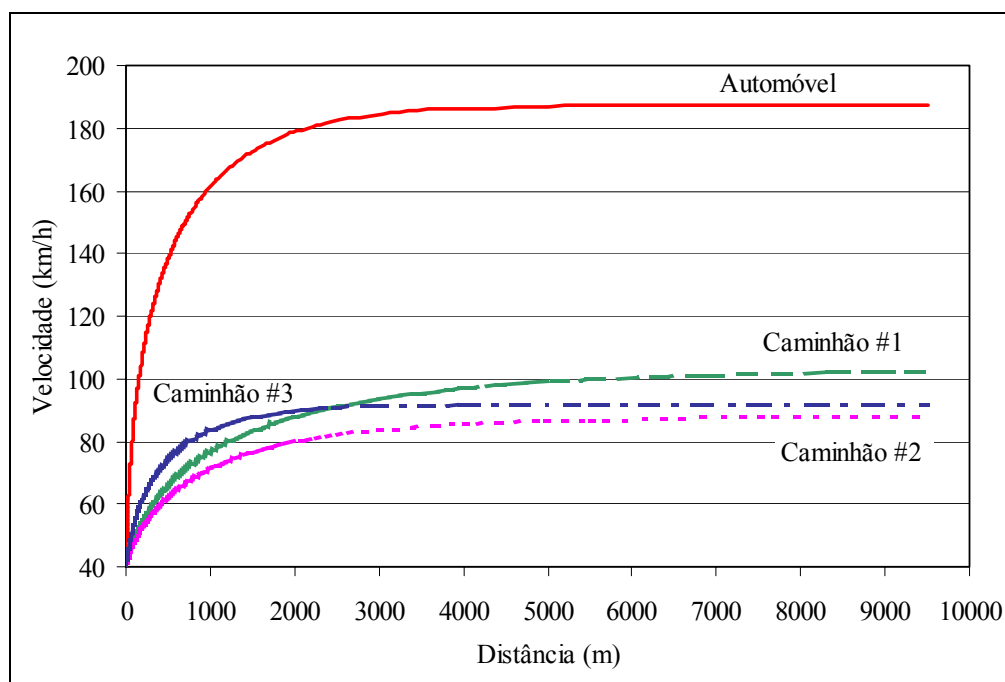
**Quadro 4.1 – Parâmetros característicos dos veículos da simulação.**

| Parâmetros          | Modelos de Veículos |             |             |           |
|---------------------|---------------------|-------------|-------------|-----------|
|                     | Caminhão #1         | Caminhão #2 | Caminhão #3 | Automóvel |
| P (kW)              | 242,7               | 111,2       | 103,3       | 68        |
| $\eta$              | 0,87                | 0,87        | 0,87        | 0,87      |
| m (kg)              | 42.120              | 21.850      | 10.469      | 1.180     |
| $m_{ta}$ (kg)       | 10.370              | 8.565       | 6.965       | 590       |
| $\mu$               | 0,6                 | 0,6         | 0,6         | 0,6       |
| $C_2$               | 0,0125              | 0,0125      | 0,0125      | 0,0125    |
| $C_3$               | 7,6                 | 7,6         | 7,6         | 7,6       |
| $C_r$               | 1,20                | 1,20        | 1,20        | 1,20      |
| $C_d$               | 0,8                 | 0,8         | 0,8         | 0,8       |
| A (m <sup>2</sup> ) | 7,5                 | 6,8         | 7,7         | 2,0       |
| L (m)               | 17                  | 9           | 7           | 4         |
| m (kg) /P (kW)      | 174                 | 196         | 101         | 17        |

O percentual de cada tipo na composição de caminhões foi adaptado, também, de Demarchi (2000): 51% de caminhões do tipo #2 (rígido-pesado), 31% do tipo #1 (articulado-pesado) e 18% do tipo #3 (rígido-leve).

Para demonstrar a diferença no desempenho dinâmico, cada categoria de veículo foi simulada isoladamente. A Figura 4.4 mostra o desempenho dinâmico dos veículos. Os veículos foram simulados em um segmento plano, partindo de uma velocidade de 40 km/h até atingir a velocidade máxima possível para a sua relação massa/potência. Esta velocidade máxima pode ser chamada de velocidade de equilíbrio do veículo. A velocidade de equilíbrio é a máxima velocidade que os veículos da simulação podem alcançar, em fluxo livre, considerando a sua potência nominal e parâmetros característicos iguais aos mostrados no Quadro 4.1.

Observando a Figura 4.4 é possível perceber a diferença no desempenho dos veículos utilizados nas simulações. Esta figura mostra como os veículos desenvolvem a velocidade segundo a capacidade dinâmica de cada um, sem interferência de veículos adjacentes e de aclives.



**Figura 4.4 – Gráficos do desempenho individual dos veículos da simulação (trecho em nível).**

Na Figura 4.4 podem ser observadas as distâncias que cada categoria de veículo necessita para atingir uma dada velocidade desejada. Este dado é importante pois mostra a dificuldade de um veículo pesado em retomar a velocidade para, por exemplo, ser inserido no

fluxo de tráfego de uma rodovia ao fim da faixa adicional, mesmo no plano. Este dado pode auxiliar no dimensionamento das faixas adicionais, principalmente no que diz respeito ao trecho posterior ao final da rampa.

#### 4.3.1.2 Rodovia modelada

A rodovia modelada, cujo o perfil planimétrico é representado na Figura 4.3, é formado por cinco segmentos homogêneos: (i) plano sem faixa adicional, (ii) aclive sem faixa adicional, (iii) aclive com faixa adicional, (iv) plano com faixa adicional e (v) outro plano sem faixa adicional.

Nos projetos rodoviários, normalmente, o segmento em aclive é formado por uma composição de greides menores para conformar a topografia do terreno. Este artifício reduz custos, aumenta o conforto e a segurança da rodovia. Neste trabalho, no entanto, os greides testados não foram decompostos, justamente, para determinar a influência de cada inclinação no desempenho motriz dos veículos.

O trecho rodoviário pode ou não contemplar uma faixa adicional no aclive. A implantação da faixa adicional segue a norma de projeto para rodovias estaduais (DAER, 1991).

Os segmentos à montante e jusante do aclive (segmentos A e C, ver Figura 4.3) são planos e têm extensão de 1000m. O segmento em aclive se estende por 1200m com inclinação de 5%. Segundo a norma do DAER (1991), para um aclive de 5% o comprimento crítico é igual a 240m, ou seja, o início da faixa adicional está a 240 m do início da rampa (ver Figura 4.2).

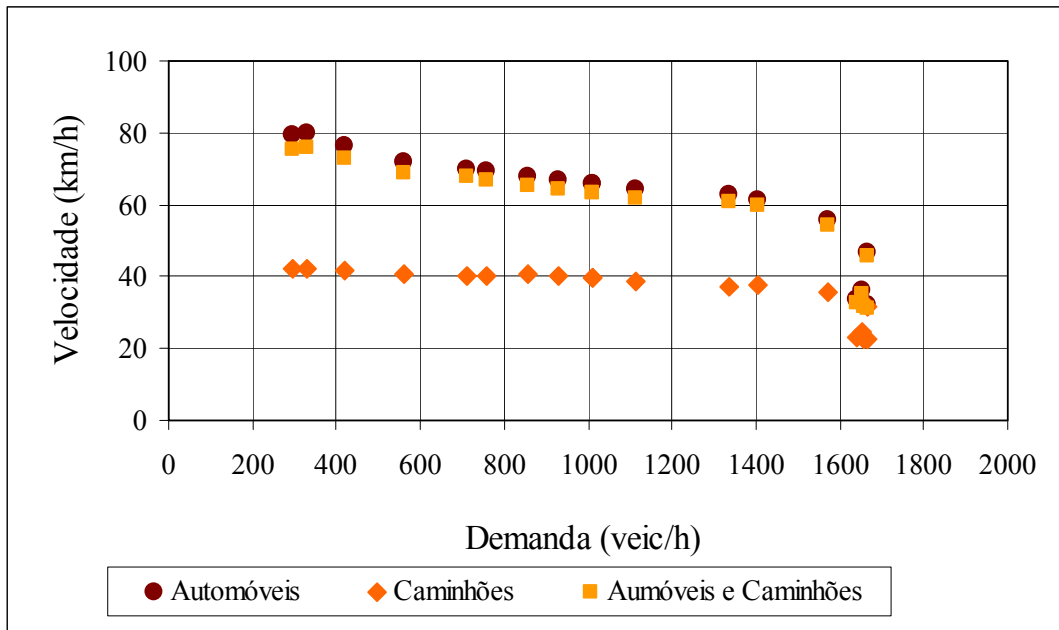
#### 4.3.2 Resultados Obtidos

Neste estudo buscou-se avaliar a variação da capacidade de um segmento rodoviário de pista simples mediante diferentes situações: (i) diferentes proporções de veículos pesados no tráfego, e (ii) implantação de faixa adicional no aclive.

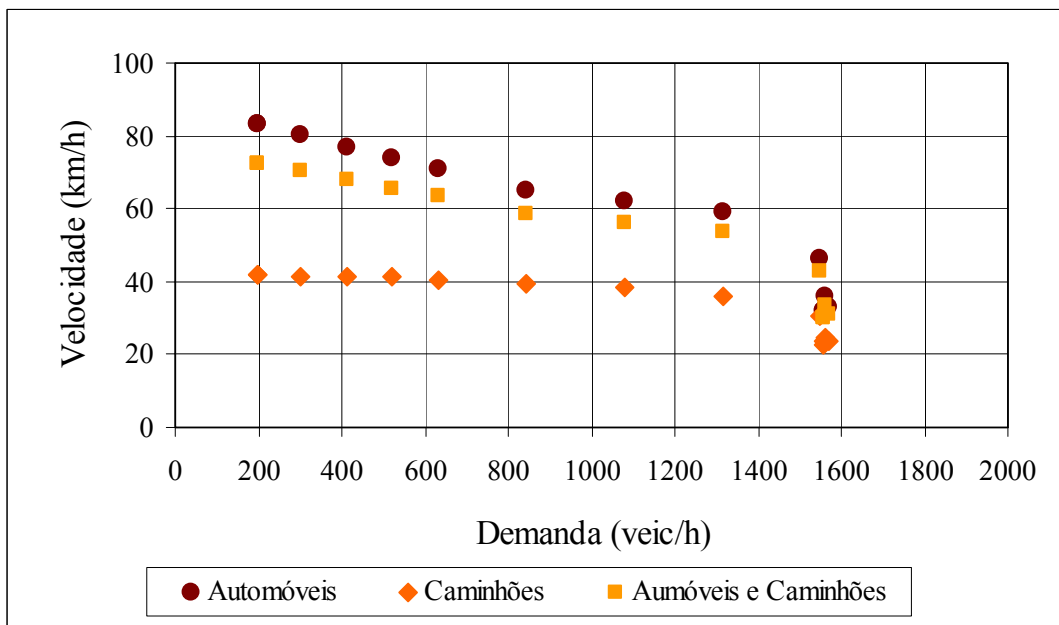
Para este estudo adotou-se como indicador de desempenho para análise da simulação a velocidade média de percurso dos veículos. O trecho utilizado para aferir a velocidade média de percurso se estende desde 100 m antes do início da rampa até 100 m após o término da faixa adicional.

As Figuras 4.5 a 4.8 mostram a variação da velocidade média segundo a demanda para diferentes proporções de caminhões. O modelo determinou, também, a capacidade do trecho

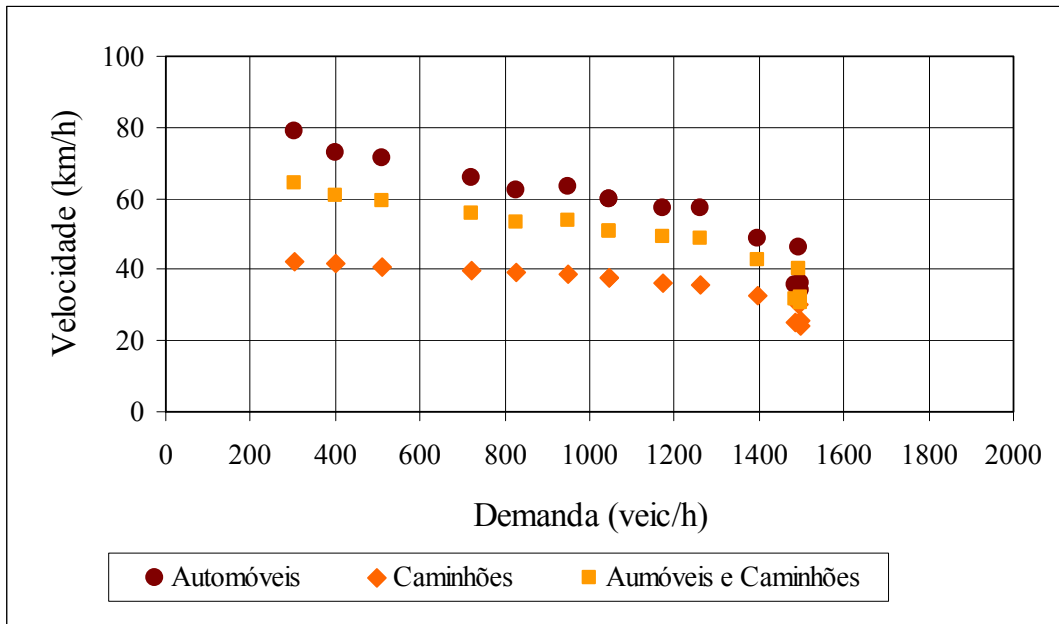
modelado. Os indicadores de desempenho foram individualizados e agregados por categoria veicular para ressaltar a diferença entre as velocidades dos automóveis e veículos pesados. Cada ponto nos gráficos representa um valor gerado por uma hora de coleta de dados. O tempo total de simulação é de 5400 segundos, com os primeiros 1800 segundos de *warming up* descartados.



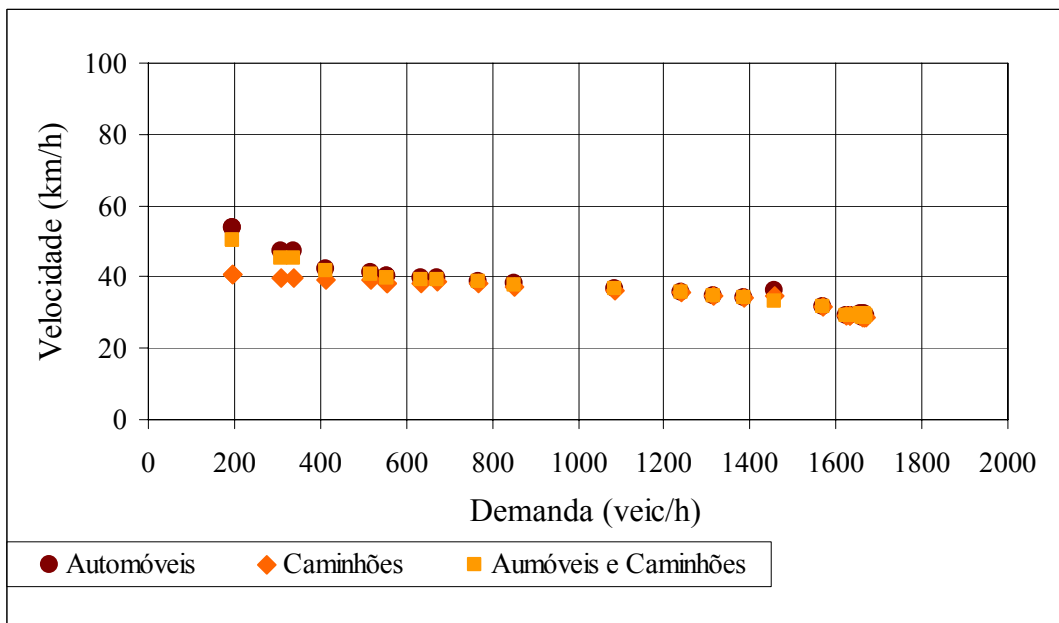
**Figura 4.5 – Curvas fluxo-velocidade para composição de tráfego com 10% de caminhões, com faixa adicional.**



**Figura 4.6 – Curvas fluxo-velocidade para composição de tráfego com 25% de caminhões, com faixa adicional.**



**Figura 4.7 – Curvas fluxo-velocidade para composição de tráfego com 40% de caminhões, com faixa adicional.**



**Figura 4.8 – Curvas fluxo-velocidade sem faixa adicional, com 25% de caminhões.**

Os resultados demonstram muito pouca variação na velocidade média dos caminhões entre os cenários com faixa adicional. Naturalmente, quanto menor a percentagem de caminhões na composição do tráfego, tanto maior a velocidade média de percurso dos

veículos em geral. Por outro lado, a existência da faixa adicional contribui fortemente para o aumento da velocidade média dos automóveis.

É interessante notar que mesmo com a faixa adicional, a capacidade reduz com o aumento do percentual de caminhões. Pode-se verificar também que a concentração de caminhões na corrente de tráfego afeta de forma significativa a capacidade viária mesmo quando a faixa adicional se encontra disponível. Com a faixa adicional repleta de veículos lentos, vários caminhões decidem não entrar nela, causando redução de capacidade na faixa normal.

Conforme pode ser visto comparando as figuras 4.6 e 4.8, a capacidade da via sem faixa adicional mostra-se maior que no trecho com faixa adicional. Isso provavelmente se deve às perturbações causadas pelos veículos lentos que retornam para a faixa normal, reduzindo a capacidade da rodovia.

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os resultados de testes realizados com o modelo STIRO. Em um primeiro momento foi apresentada a adequação do modelo de Gipps para o tráfego rodoviário. Isto foi realizado a partir de ajustes nos parâmetros  $b$  e  $\hat{b}$ , de modo que o modelo representasse uma faixa de rodovia com capacidade viária igual a 1900 uvp/h.

Este capítulo também apresentou um exercício utilizando o simulador com o objetivo de demonstrar como varia a capacidade de um segmento rodoviário com e sem a implantação da faixa adicional. Ainda, pode ser visto nos resultados, a variação da capacidade segundo o volume de caminhões trafegando no fluxo de tráfego.

No capítulo seguinte é apresentado um projeto de experimentos realizado para determinar a influência dos diversos fatores geométricos e características de demanda no desempenho operacional da rodovia.

## **CAPÍTULO 5 - PROJETO DE EXPERIMENTOS**

### 5.1 APRESENTAÇÃO

O experimento apresentado neste capítulo tem por finalidade avaliar o efeito de características geométricas e operacionais no desempenho operacional de uma rodovia em aclave com faixa adicional e configuração semelhante às testadas anteriormente. Valores de velocidade de percurso e ocupação do trecho foram gerados por simulação para diferentes combinações de fatores como inclinação da rampa, percentual de caminhões no fluxo, extensão da rampa, entre outros. A partir de dados de entrada e dos indicadores de saída foram estimados modelos de regressão que possibilitaram a determinação dos fatores que mais afetam o desempenho operacional da via.

Como são vários os fatores representativos das características geométricas e operacionais da via, e muitos os possíveis níveis a eles associados, seria muito dispendioso, em termos de recurso e de tempo, realizar todas as combinações entre os níveis dos fatores. Por este motivo, neste estudo foi utilizada a metodologia de projeto de experimentos.

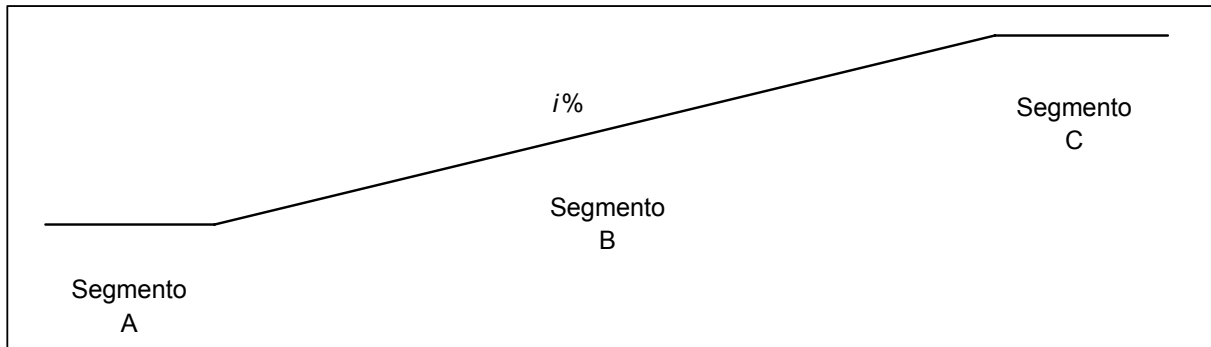
O capítulo inicia descrevendo o segmento viário simulado, os veículos que trafegam pela via e o comportamento dos motoristas. Em seguida, é feita uma descrição detalhada do



planejamento e execução do projeto de experimentos. Por fim, são apresentados os resultados obtidos e as conclusões.

## 5.2 AMBIENTE SIMULADO

O ambiente simulado é uma rodovia de pista simples com fluxo ininterrupto, com uma faixa num único sentido de tráfego. O segmento rodoviário destes experimentos é composto por dois trechos intercalados por um aclive, como mostra a Figura 5.1. Os segmentos A e C tem extensão fixa igual a 1000 m, enquanto a extensão do aclive é variada no experimento. Também são variados, no experimento, o fluxo de veículos na via, o percentual de caminhões (inclusive, estratificado por tipo de caminhão – relação massa/potência alta, média e baixa), a inclinação e o de rampa.



**Figura 5.1 – Segmento rodoviário para o projeto de experimentos.**

Os veículos, automóveis e caminhões leves, médios e pesados, apresentam as mesmas características dos experimentos anteriores. O trecho considerado para a realização das medições está compreendido entre os pontos de início da rampa e final da faixa adicional.

Aos automóveis são associadas velocidades desejadas normalmente distribuídas em torno de 90 km/h. Como os caminhões sofrem reduções importantes na velocidade, é correto afirmar que os motoristas procurem manter o veículo na maior velocidade possível. Desta forma, a velocidade desejada associada aos veículos pesados é a sua velocidade máxima de desempenho motriz. Os *headways* de geração seguiram uma distribuição exponencial negativa transladada, calculada a partir do fluxo e do percentual por tipo de veículo.

Para este cenário básico foi realizado um projeto de experimentos para serem rodados no modelo STIRO.

### 5.3 PROJETO DE EXPERIMENTOS

O método conhecido como projeto de experimentos, desenvolvido por Fisher a partir de 1935, é fortemente embasado em conceitos estatísticos. Trata-se de uma metodologia destinada a otimizar o planejamento, execução e análise de um experimento, reduzindo o esforço experimental para obter conclusões confiáveis. O planejamento refere-se ao projeto propriamente dito do experimento, sendo que, quando bem realizado, possibilita acesso a maiores informações a respeito dos fatores estudados e do erro experimental associado. A análise ou avaliação diz respeito ao levantamento da significância do efeito de um ou vários fatores sobre uma variável aleatória que mede ou caracteriza a resposta do experimento (Caten, 1995).

A vantagem do planejamento de um experimento sobre uma seqüência não estruturada de ensaios é, segundo Nanni e Ribeiro (1991):

- Obter maior quantidade de informações;
- Obter informações mais precisas e detalhadas;
- Reduzir o tempo do programa experimental;
- Reduzir custo do programa experimental.

Os itens seguintes mostram o desenvolvimento do projeto de experimentos e seus resultados.

### 5.4 VARIÁVEIS DE RESPOSTA

Variáveis de Resposta (VR) são aspectos do objeto em estudo que podem ser medidos. No projeto de experimentos realizado para este trabalho são avaliadas duas variáveis de resposta: a velocidade média de percurso (VMP) e a ocupação média do trecho (OMT). Estas variáveis foram escolhidas por fornecerem informações relativas ao desempenho operacional da rodovia.

A velocidade média de percurso é equivalente a razão entre a extensão do trecho analisado e o tempo médio que os veículos levam para percorrer o trecho. Considerar a VMP como variável de resposta, neste caso é imprescindível, pois a implantação de faixas adicionais busca a diminuição dos atrasos causados por veículos lentos no fluxo de tráfego e, conseqüentemente, aumento na velocidade de percurso. Na metodologia do HCM2000 (TRB, 2000) para análise de capacidade de rodovias de pista simples, juntamente com Percentual de Tempo Gasto em Pelotão, a VMP é um parâmetro chave.

A ocupação média do trecho (OMT) é uma medida que avalia o número de veículos que ocupam o trecho analisado, segundo a segundo. Esta ocupação equivale ao quociente entre o número de veículos que trafegam sobre o trecho de análise, nas faixas normal e adicional, multiplicados pelos seus respectivos comprimentos, e o comprimento total do trecho analisado (faixa normal e adicional) (ver Equação 15). O valor da OMT é dado em percentual do trecho que está ocupado com veículos. Esta variável foi escolhida para complementar o estudo da velocidade média de percurso.

$$OMT = \sum_{i=1}^4 \frac{l_i \cdot n_i}{L_A} \quad (15)$$

onde,

$l_i$ : comprimento do veículo  $i$ ;

$n_i$ : quantidade de veículos  $i$ ;

$L_A$ : extensão do trecho analisado, considerando faixa normal e adicional.

Abaixo, o Quadro 5.1 mostra em resumo as variáveis de resposta, suas unidades, características e intervalo de variação.

**Quadro 5.1 – Variáveis de Resposta para o experimento.**

| Variável de Resposta               | Unidade | Característica<br>Maior fluidez |
|------------------------------------|---------|---------------------------------|
| Velocidade média de percurso (VMP) | km/h    | Velocidade maior                |
| Ocupação média da trecho (OMT)     | veic/km | Ocupação menor                  |

O quadro acima mostra, resumidamente, que quanto maior a velocidade média de percurso usufruída pelos motoristas, melhor será o desempenho do sistema. Com relação à ocupação média do trecho, quanto menos ocupada a via, melhor fluidez terá a corrente de tráfego. No quadro pode-se ver, também, a faixa de variação das variáveis de resposta. O limite superior da velocidade de percurso é 90 km/h devido a ser esta a velocidade média desejada pelos motoristas. A ocupação do trecho é limitada em 30% pelo fato que, mesmo no

caso mais congestionado, no máximo 1/3 da via é ocupada pelos veículos. Os 2/3 restantes são espaçamentos entre veículos calculados para manter um fluxo horário de ~1800 uvp/h.

A seção seguinte apresenta os fatores que terão o efeito sobre as variáveis de resposta estudados neste capítulo.

## 5.5 FATORES CONTROLÁVEIS

As variáveis independentes da simulação são denominados Fatores Controláveis (FC). Os cinco fatores controláveis escolhidos para este experimento estão abaixo relacionados com seus respectivos símbolos e unidades:

**Quadro 5.2 – Fatores Controláveis do experimento.**

| <b>Fator</b>  | <b>Unidade</b>                        | <b>Abreviatura</b> |
|---|---------------------------------------|--------------------|
| Percentagem de caminhões                            | %                                     | percam             |
| Configuração da composição caminhões                | %-%-%                                 | compcam            |
| Inclinação da rampa                                 | %                                     | rampa              |
| Extensão do trecho em aclave                        | m                                     | extram             |
| Percentual da extensão da rampa sem faixa adicional | %<br>(em relação à extensão da rampa) | persemfad          |

Os fatores acima definidos foram escolhidos por serem tradicionalmente incluídos em metodologias de análise de capacidade, como o *Highway Capacity Manual*, por exemplo. A proporção de caminhões no fluxo de veículos é dada pelo fator percentagem de caminhões. Já a configuração da composição de caminhões se refere aos percentuais de cada tipo de caminhão, ou seja, quantos caminhões com relação massa/potência alta, média ou baixa (nesta ordem) formam o fluxo total de caminhões. Os caminhões são os mesmos utilizados nos capítulos anteriores. O comprimento crítico está definido como um percentual da extensão da rampa.

## 5.6 PLANEJAMENTO DA MATRIZ DO EXPERIMENTO

Dada a impossibilidade prática de executar um projeto fatorial completo que contenha todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores que influenciam a VMT e a OMT,

decidiu-se utilizar o projeto conhecido como PCSO (Projeto Composto de Segunda Ordem) (RIBEIRO e CATEN, 2002). O PCSO é utilizado para ajustar uma superfície de resposta contemplando, além de efeitos principais e efeitos de interação, os efeitos quadráticos. Outra aplicação do PCSO pode ser encontradas em Lindau *et al.*(1997).

O experimento foi proposto em 5 níveis (-2, -1, 0, 1, 2) para cada variável de entrada. Sendo que -2 é o nível em que os fatores (ou variável) mais prejudicam a velocidade média de percurso da via, e 2 é o nível em que as variáveis de entrada menos afetam a velocidade.

O estudo tem sua abrangência limitada à condição de fluxo não-saturado. Condições de fluxo saturadas podem comprometer a análise dos resultados, pois qualquer distúrbio na corrente de tráfego pode gerar um efeito exagerado e de difícil explicação. Além disso, determinar um modelo que represente dois regimes de fluxo não está no escopo deste trabalho.

Houve, entretanto, uma certa dificuldade em definir os padrões de demanda para o experimento. Além de valores de demanda muito elevados levarem a condições saturadas, as combinações entre os demais fatores podem, também, gerar uma situação com fluxo saturado. Por exemplo, um determinado fluxo de veículos com alto percentual de caminhões corresponde a um número de veículos equivalentes tanto maior quanto mais acentuado for o aclave. Desta maneira, a demanda de entrada, que é o fluxo de veículos gerados no período de simulação, foi considerada como uma co-variável, pois foi definida a partir da combinação dos demais fatores.

Os valores máximos e mínimos para cada fator foram determinados a partir da observação dos valores da norma (DAER, 1991; DNER, 1999) e do bom senso do pesquisador. O Quadro 5.3 contém as variáveis do projeto de experimentos em níveis codificados.

**Quadro 5.3 – Fatores de entrada em níveis codificados para o projeto de experimentos.**

| Níveis | dem   | percam | compcam  | rampa | extram | persemfad |
|--------|---|--------|----------|-------|--------|-----------|
| -2     | Fixado em função dos níveis dos demais fatores. | 40     | 60-40-0  | 8     | 2400   | 60        |
| -1     |   | 30     | 45-40-15 | 6     | 2000   | 45        |
| 0      |   | 20     | 30-40-30 | 4     | 1600   | 30        |
| 1      |   | 10     | 15-40-45 | 2     | 1200   | 15        |
| 2      |   | 0      | 0-40-60  | 0     | 800    | 0         |

O uso do PCSO permitiu reduzir consideravelmente o número de ensaios a serem realizados, pois o projeto fatorial completo seria composto por 3125 experimentos ( $5^5$ , ou seja, a combinação dos cinco fatores em seus cinco níveis). O PCSO é formado por:

- (i) uma porção fatorial, que permite estudar os efeitos principais e as interações entre os fatores ( $2^K = 2^5 = 32$  combinações nos níveis  $-1$  e  $+1$ )
- (ii) uma estrela, que permite estudar os efeitos não lineares ( $2 \times K = 2 \times 5 = 10$  combinações nos níveis  $-2$  e  $+2$ )
- (iii) pontos centrais, que permitem verificar a falta de ajuste do modelo linear ( $n = 3$ )

Foram, assim, determinados 45 experimentos. O termo de erro, ou seja, a variabilidade do experimento será estimada através das interações de mais alta ordem. Este procedimento para a estimativa do erro elimina a necessidade de realizar replicações.

O Quadro 5.4 contém a matriz de experimentos. Os valores das variáveis em cada experimento estão codificados em níveis conforme o Quadro 5.3. Os valores codificados em níveis são usados para estimar os modelos matemáticos possibilitando a comparação direta dos coeficientes entre as variáveis, eliminando o efeito da escala.

**Quadro 5.4 – Projeto de experimentos em níveis codificados com os níveis de demanda corrigidos e resultados dos experimentos.**

| EXP. | dem   | percam | rampa | extram | compcam | persemfad | VMP   | OMT   |
|------|-------|--------|-------|--------|---------|-----------|-------|-------|
| 1    | 1,96  | 1      | 1     | 1      | 1       | 1         | 77,96 | 1,38  |
| 2    | 1,87  | 1      | 1     | 1      | -1      | -1        | 75,71 | 1,25  |
| 3    | 1,82  | 1      | 1     | -1     | 1       | -1        | 74,37 | 1,26  |
| 4    | 1,70  | 1      | 1     | -1     | -1      | 1         | 73,82 | 1,84  |
| 5    | 1,76  | 1      | -1    | 1      | 1       | -1        | 70,61 | 1,63  |
| 6    | 1,63  | 1      | -1    | 1      | -1      | 1         | 70,94 | 2,43  |
| 7    | 1,54  | 1      | -1    | -1     | 1       | 1         | 69,31 | 2,51  |
| 8    | 1,34  | 1      | -1    | -1     | -1      | -1        | 58,08 | 2,73  |
| 9    | 1,70  | -1     | 1     | 1      | 1       | -1        | 75,21 | 1,75  |
| 10   | 1,54  | -1     | 1     | 1      | -1      | 1         | 74,52 | 2,61  |
| 11   | 1,45  | -1     | 1     | -1     | 1       | 1         | 72,56 | 2,68  |
| 12   | 1,21  | -1     | 1     | -1     | -1      | -1        | 69,39 | 2,68  |
| 13   | 1,34  | -1     | -1    | 1      | 1       | 1         | 64,41 | 4,19  |
| 14   | 1,06  | -1     | -1    | 1      | -1      | -1        | 50,41 | 4,80  |
| 15   | 0,88  | -1     | -1    | -1     | 1       | -1        | 46,58 | 5,26  |
| 16   | 0,39  | -1     | -1    | -1     | -1      | 1         | 51,71 | 8,62  |
| 17   | 2,00  | 1      | 1     | 1      | 1       | -1        | 77,65 | 1,05  |
| 18   | 1,88  | 1      | 1     | 1      | -1      | 1         | 76,24 | 1,55  |
| 19   | 1,82  | 1      | 1     | -1     | 1       | 1         | 75,11 | 1,58  |
| 20   | 1,64  | 1      | 1     | -1     | -1      | -1        | 71,89 | 1,57  |
| 21   | 1,73  | 1      | -1    | 1      | 1       | 1         | 73,26 | 2,04  |
| 22   | 1,53  | 1      | -1    | 1      | -1      | -1        | 66,21 | 2,19  |
| 23   | 1,40  | 1      | -1    | -1     | 1       | -1        | 62,09 | 2,42  |
| 24   | 1,04  | 1      | -1    | -1     | -1      | 1         | 65,41 | 3,84  |
| 25   | 1,64  | -1     | 1     | 1      | 1       | 1         | 76,25 | 2,30  |
| 26   | 1,40  | -1     | 1     | 1      | -1      | -1        | 72,71 | 2,33  |
| 27   | 1,24  | -1     | 1     | -1     | 1       | -1        | 71,28 | 2,47  |
| 28   | 0,77  | -1     | 1     | -1     | -1      | 1         | 69,87 | 4,30  |
| 29   | 1,04  | -1     | -1    | 1      | 1       | -1        | 55,83 | 4,34  |
| 30   | 0,43  | -1     | -1    | 1      | -1      | 1         | 55,49 | 8,11  |
| 31   | -0,06 | -1     | -1    | -1     | 1       | 1         | 53,58 | 9,46  |
| 32   | -2,00 | -1     | -1    | -1     | -1      | -1        | 28,38 | 19,00 |
| 33   | 1,14  | 0      | 0     | 0      | 0       | 0         | 66,95 | 3,22  |
| 34   | 1,92  | 0      | 0     | 0      | 0       | 0         | 71,55 | 1,65  |
| 35   | 0,36  | 0      | 0     | 0      | 0       | 0         | 62,82 | 5,09  |
| 36   | 1,88  | 2      | 0     | 0      | 0       | 0         | 74,78 | 1,21  |
| 37   | 0,57  | -2     | 0     | 0      | 0       | 0         | 58,39 | 5,92  |
| 38   | 1,82  | 0      | 2     | 0      | 0       | 0         | 78,69 | 1,47  |
| 39   | 0,84  | 0      | -2    | 0      | 0       | 0         | 50,24 | 5,86  |
| 40   | 1,75  | 0      | 0     | 2      | 0       | 0         | 74,30 | 1,93  |
| 41   | 1,05  | 0      | 0     | -2     | 0       | 0         | 64,02 | 3,51  |
| 42   | 1,68  | 0      | 0     | 0      | 2       | 0         | 71,41 | 1,98  |
| 43   | 1,22  | 0      | 0     | 0      | -2      | 0         | 65,76 | 3,26  |
| 44   | 1,49  | 0      | 0     | 0      | 0       | 2         | 75,94 | 3,06  |
| 45   | 1,49  | 0      | 0     | 0      | 0       | -2        | 62,54 | 2,17  |

### 5.6.1 Modelos estimados

A partir dos resultados dos experimentos executados, mostrados no Quadro 5.4 foram estimadas funções quadráticas por regressão múltipla (método dos mínimos quadrados) para a velocidade média de percurso e para a ocupação média da via. Os modelos estimados são os seguintes:

$$\begin{aligned}
 VMP = & 61,362 + 4,949 \cdot dem + 2,637 \cdot percam + 2,116 \cdot compcam + \\
 & + 5,874 \cdot greide + 1,766 \cdot extram + 2,375 \cdot persemfad - \\
 & - 0,960 \cdot greide^2 - 0,790 \cdot dem \cdot compcam - 2,551 \cdot percam \cdot grade - \\
 & - 0,509 \cdot percam \cdot persemfad - 0,779 \cdot greide \cdot extram - \\
 & - 1,570 \cdot greide \cdot persemfad - 0,493 \cdot extram \cdot persemfad
 \end{aligned} \tag{16}$$

Coefficiente de determinação ( $R^2_{ajustado}$ ) = 0,992

$$\begin{aligned}
 OMT = & 6,121 - 3,059 \cdot dem - 1,052 \cdot percam - 0,424 \cdot compcam - \\
 & - 1,716 \cdot greide - 0,080 \cdot extram + 0,594 \cdot persemfad + \\
 & + 0,434 \cdot dem^2 + 0,363 \cdot dem \cdot percam + 0,789 \cdot dem \cdot greide + \\
 & + 0,205 \cdot dem \cdot compcam - 0,242 \cdot dem \cdot persemfad + \\
 & + 0,118 \cdot percam \cdot greide
 \end{aligned} \tag{17}$$

Coefficiente de determinação ( $R^2_{ajustado}$ ) = 0,999

Ambos os modelos apresentaram o coeficiente de determinação superiores a 0,9, mostrando que a equação estimada pela regressão se ajusta bem aos dados da simulação. Os valores calculados da estatística F (Quadro 5.5) para os dois modelos são muito maiores que os valores tabelados, mostrando que pode-se rejeitar a hipótese de não haver relação entre as variáveis dependentes e independentes.

**Quadro 5.5 – Tabela ANOVA dos modelos estimados.**

|            |                  | <b>Graus de Liberdade</b> | <b>Soma dos Quadrados</b> | <b>Média Quadrada</b> | <b>F</b>  |
|------------|------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------|
| <b>VMP</b> | <b>Regressão</b> | 13                        | 4.663.632                 | 358.741               | 283.644   |
|            | <b>Resíduo</b>   | 31                        | 39.208                    | 1.265                 |           |
|            | <b>Total</b>     | 44                        | 4.702.839                 |                       |           |
| <b>OMT</b> | <b>Regressão</b> | 12                        | 417.019                   | 34.826                | 2.281.527 |
|            | <b>Resíduo</b>   | 32                        | 0.488                     | 0.015                 |           |
|            | <b>Total</b>     | 44                        | 418.401                   |                       |           |



Os Quadro 5.6 e Quadro 5.7 mostram as estatísticas para os coeficientes dos modelos estimados. Os coeficientes foram testados com relação ao seu efeito sobre as variáveis de resposta. Os termos quadráticos e os de interação entre fatores que apresentaram estatística  $t$  próxima do valor tabelado ( $\sim 2,00$ , a um nível de significância  $\alpha = 0,05\%$ ) foram suprimidos do modelo, pois não foi possível provar que estes coeficientes são diferentes de zero.

**Quadro 5.6 - Estatísticas da regressão para a Velocidade Média de Percurso.**

| VMP                 | Coefficientes | Estatística t |
|---------------------|---------------|---------------|
| constante           | 61,362        | 81,357        |
| dem                 | 4,949         | 9,404         |
| percam              | 2,637         | 10,223        |
| rampa               | 5,874         | 25,019        |
| extram              | 1,766         | 8,267         |
| compcam             | 2,116         | 3,999         |
| persemfad           | 2,375         | 13,323        |
| rampa2              | -0,960        | -4,552        |
| dem X compcam       | -0,790        | -2,337        |
| percam X rampa      | -2,551        | -12,001       |
| percam X persemfad  | -0,509        | -2,551        |
| rampa X extram      | -0,779        | -3,784        |
| grade X persemfad   | -1,570        | -7,855        |
| extram X persemfad  | -0,493        | -2,460        |
| <b>R - quadrado</b> | <b>0,992</b>  |               |

**Quadro 5.7 - Estatísticas da regressão para a variável Ocupação Média do Trecho.**

| OMT                 | Coefficientes | Estatística t |
|---------------------|---------------|---------------|
| constante           | 6,121         | 48,042        |
| dem                 | -3,059        | -26,491       |
| percam              | -1,052        | -10,965       |
| rampa               | -1,716        | -16,896       |
| extram              | -0,802        | -3,064        |
| compcam             | -0,424        | -6,713        |
| persemfad           | 0,594         | 8,336         |
| dem2                | 0,434         | 7,892         |
| dem X percam        | 0,363         | 5,606         |
| dem X rampa         | 0,789         | 11,014        |
| dem X compcam       | 0,205         | 4,677         |
| dem X persemfad     | -0,242        | -4,988        |
| percam X rampa      | 0,118         | 3,584         |
| <b>R - quadrado</b> | <b>0,999</b>  |               |

De acordo com as estatísticas de teste, os modelos estudados representam de forma bastante satisfatória o desempenho do modelo de simulação. A seguir apresenta-se uma análise de sensibilidade sobre os resultados obtidos.

### 5.6.2 Análise de sensibilidade

Uma vez ajustado modelo de regressão, realizou-se uma análise de sensibilidade para verificar o efeito de cada fator sobre a redução da VMP e o aumento da OMT. Nessa análise, o efeito de cada fator sobre as variáveis de resposta foi estudado levando em consideração a demanda de veículos.

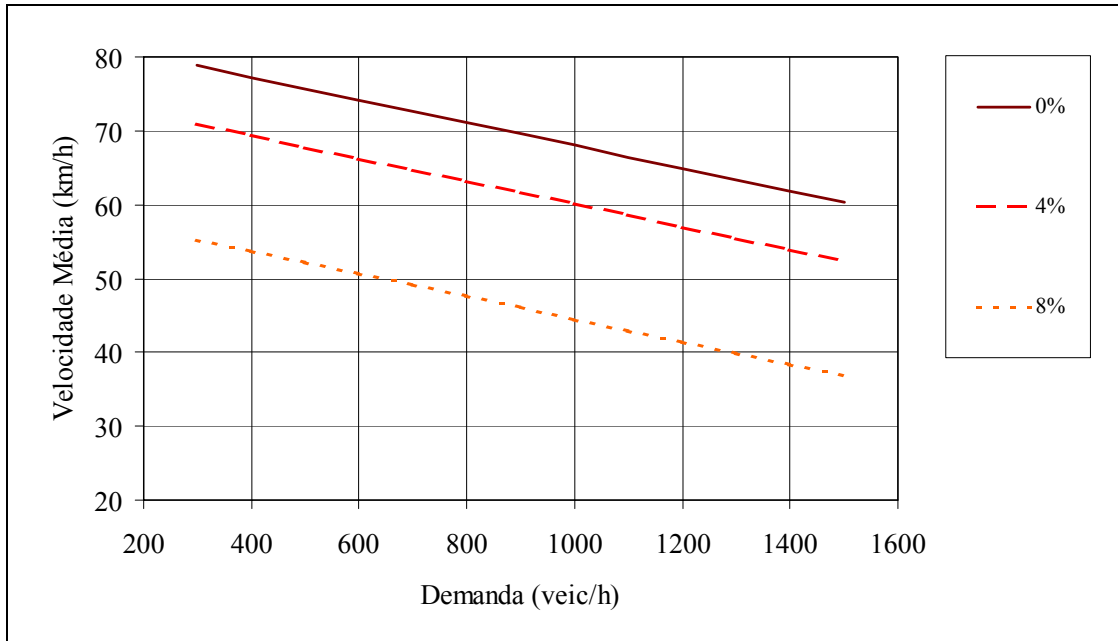
Pode-se observar que a demanda apresenta um dos maiores coeficientes da equação 16, revelando forte influência sobre a VMP. Analisando o modelo estimado para a VMP (Equação 16), ainda é possível notar que a inclinação da rampa é o fator que, considerado de forma individual, apresenta o maior impacto na VMP. Este efeito está ilustrado na figura 5.2.

A OMT é também bastante influenciada pela demanda, como visto na equação 17. Com relação ao modelo estimado para a OMT (Equação 17), pode-se observar que a demanda produz um efeito não-linear sobre esta variável.

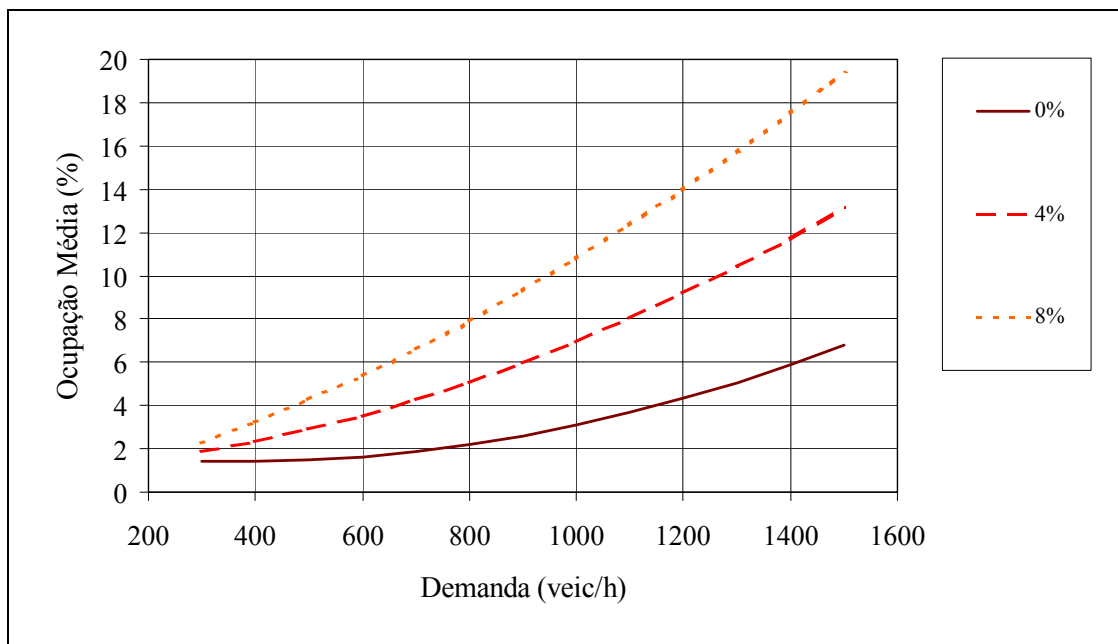
Os gráficos apresentados nas figuras 5.2 a 5.11 permitem avaliar o efeito dos diversos fatores sobre as variáveis de resposta. Nestes gráficos, todos os fatores não variados assumiram o nível intermediário do intervalo de variação.

Os dois primeiros gráficos (Figura 5.2 e Figura 5.3) mostram o efeito da inclinação da rampa sobre as variáveis de resposta. A Figura 5.2 revela que a inclinação da rampa produz um efeito não linear sobre a VMP, isto é, a redução de velocidade entre 0% e 4% é menor que a redução resultante entre 4% e 8%. Considerando uma demanda de 1000 veículos por hora, observa-se que o aumento da inclinação da rampa de 0% para 8% provoca uma redução de 35% na velocidade média de percurso.

A OMT, no entanto, cresce a medida que a inclinação da rampa aumenta. Neste caso, a taxa de crescimento é tanto maior quanto maior for a demanda. Isto pode ser visto com maior intensidade na figura 5.3, pois o aumento da ocupação entre os níveis de inclinação da rampa 0% e 4% é menor quando a demanda é igual a 600 veic/h que para uma demanda igual a 1200 veic/h.

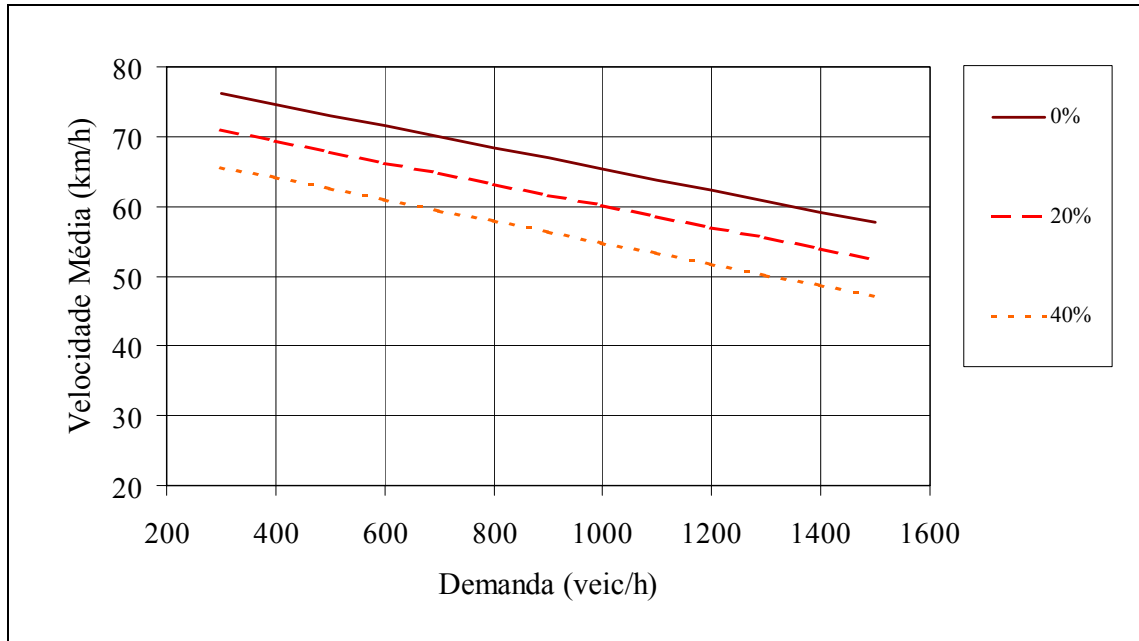


**Figura 5.2 – VMP X demanda X inclinação da rampa.**

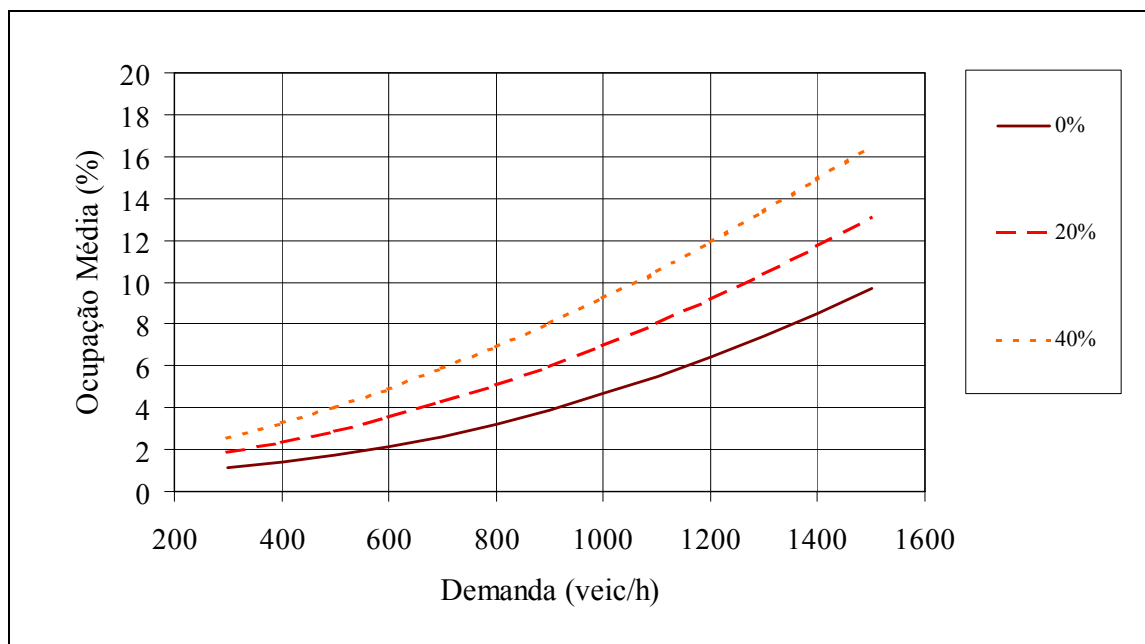


**Figura 5.3 – OMT X demanda X inclinação da rampa.**

As figuras 5.4 e 5.5 ilustram o efeito causado pelo aumento do percentual de caminhões no fluxo de tráfego sobre as variáveis de resposta. Pode-se observar que a taxa de decréscimo da VMP devido ao percentual de caminhões no fluxo de tráfego é sensivelmente menor que a redução devida à inclinação da rampa. Esta redução, de acordo com a equação 16, é linear. A OMT também tem seu efeito majorado pelo aumento da demanda, no entanto, diferentemente do efeito causado pela inclinação da rampa, a influência da demanda é menor neste caso.



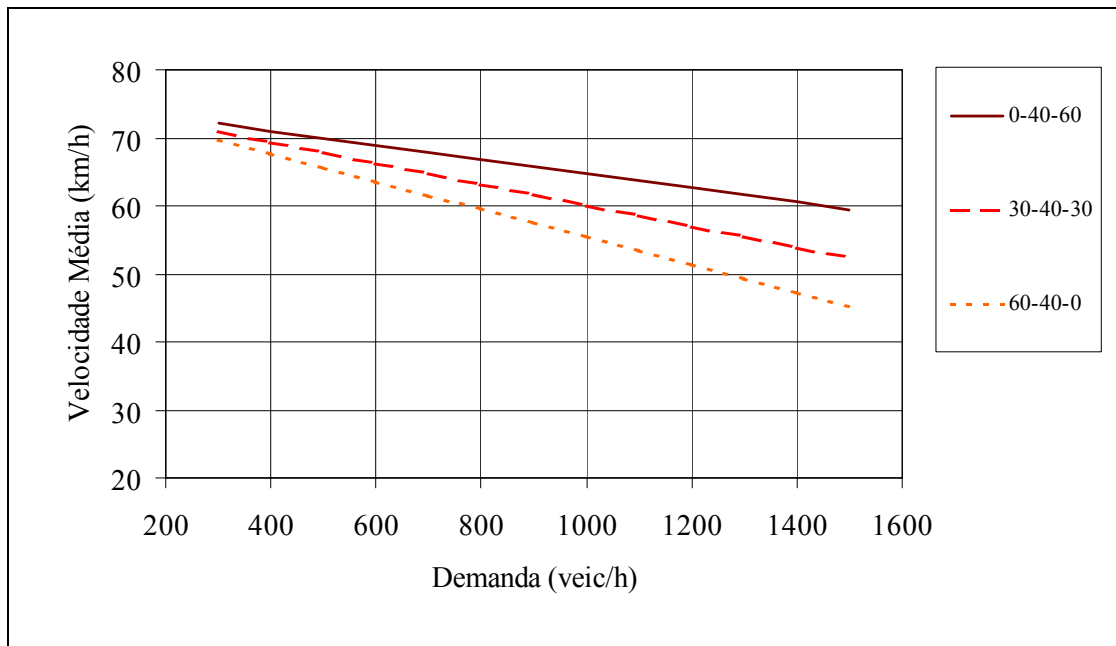
**Figura 5.4 – VMP X demanda X % caminhões.**



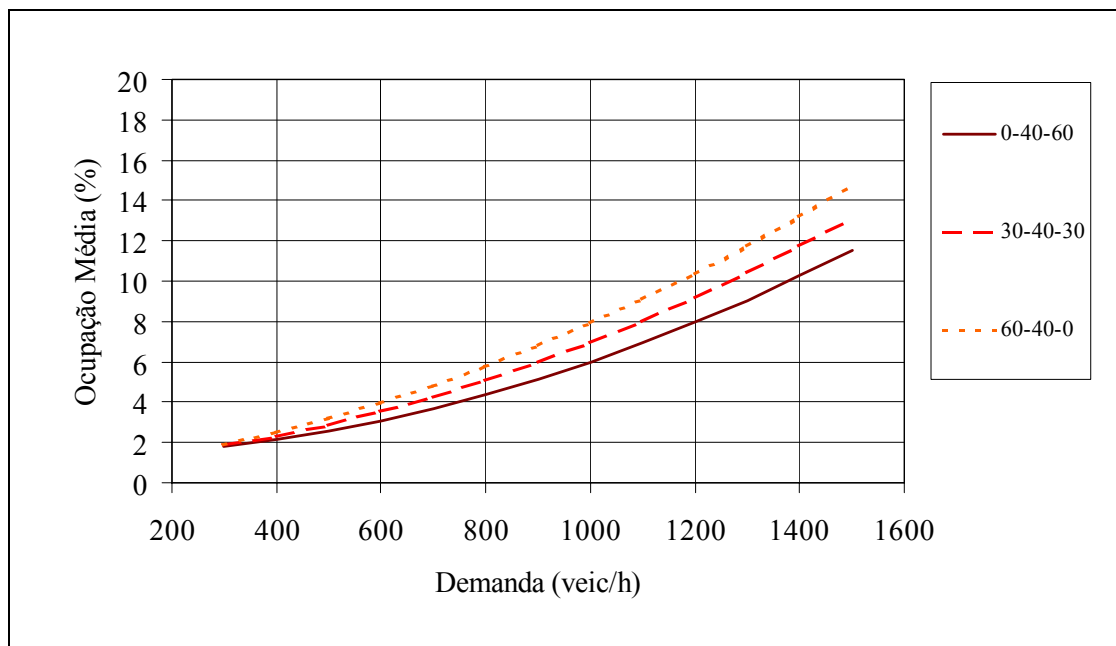
**Figura 5.5 – OMT X demanda X % caminhões.**

As figuras 5.6 e 5.7 representam o efeito da configuração do fluxo de caminhões na rodovia, em termos dos percentuais de caminhões com relação massa/potência alta, média e baixa, sobre as variáveis de resposta. A figura 5.6 mostra que a taxa de redução da velocidade difere entre os níveis. Para pequenas demandas, a configuração do fluxo caminhões não causa grande impacto. Isso ocorre devido à existência de um efeito de interação entre a demanda e a configuração do fluxo de caminhões. Desta forma, é possível observar que para uma demanda equivalente a 600 veículos por hora, a diferença entre velocidades médias de um cenário A,

onde 60% dos caminhões tem relação massa/potência alta, e um cenário B, com 60% de caminhões com relação massa/potência baixa, equivale a 7%. Considerando uma demanda correspondente a 1200 veículos por hora, esta diferença sobe para 25%. Na Figura 5.7 pode-se observar que o efeito da configuração do fluxo de caminhões também aumenta com a demanda, porém em menor escala.

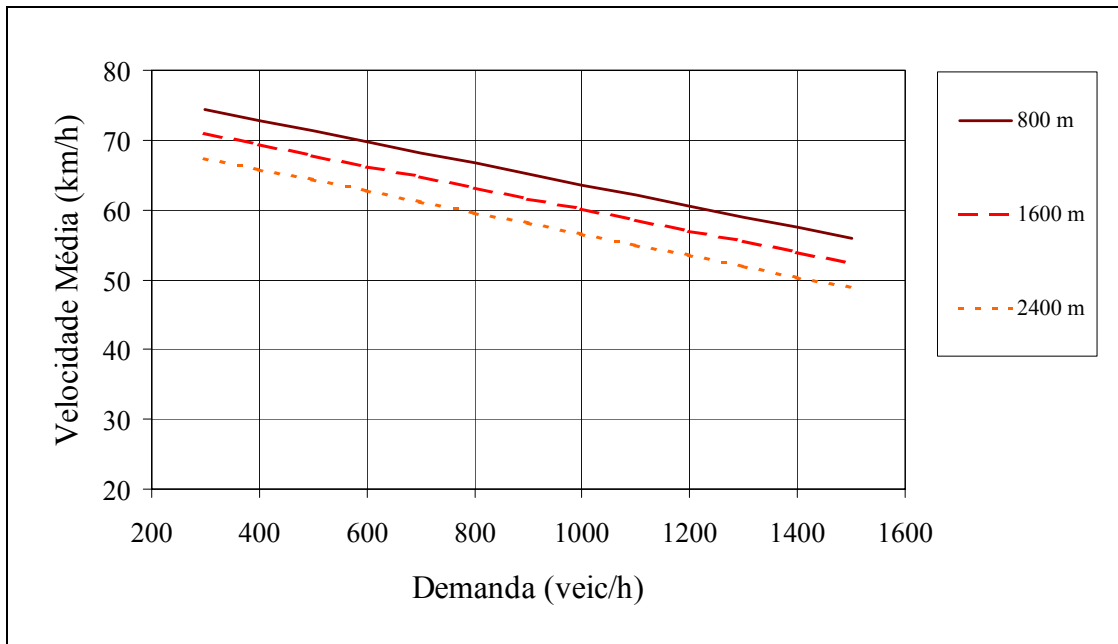


**Figura 5.6 – VMP X demanda X configuração do fluxo de caminhões.**

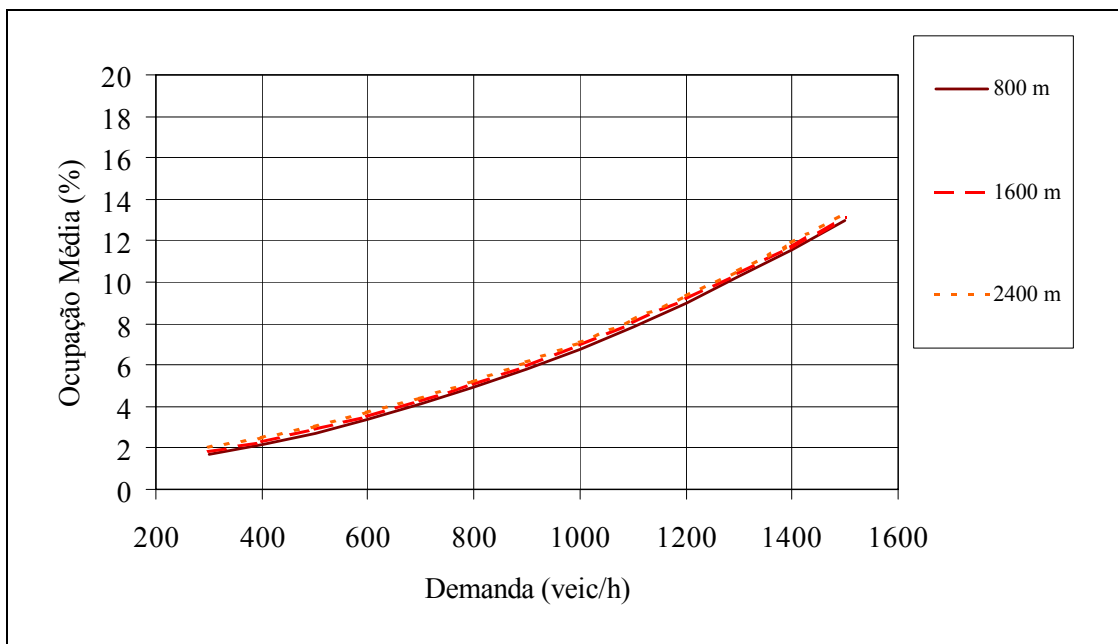


**Figura 5.7 – OMT X demanda X configuração do fluxo de caminhões.**

As Figura 5.8 e Figura 5.9 apresentam o efeito da extensão do trecho em aclive sobre as variáveis de resposta. Pode-se notar que, comparando com os demais fatores, a extensão do aclive causa as menores diferenças entre níveis. Com relação à ocupação média, o efeito é muito discreto, pois a ocupação da via pelos veículos é medida na extensão do trecho em aclive. É importante lembrar que a ocupação média é calculada para a extensão total da rampa (Equação 15).

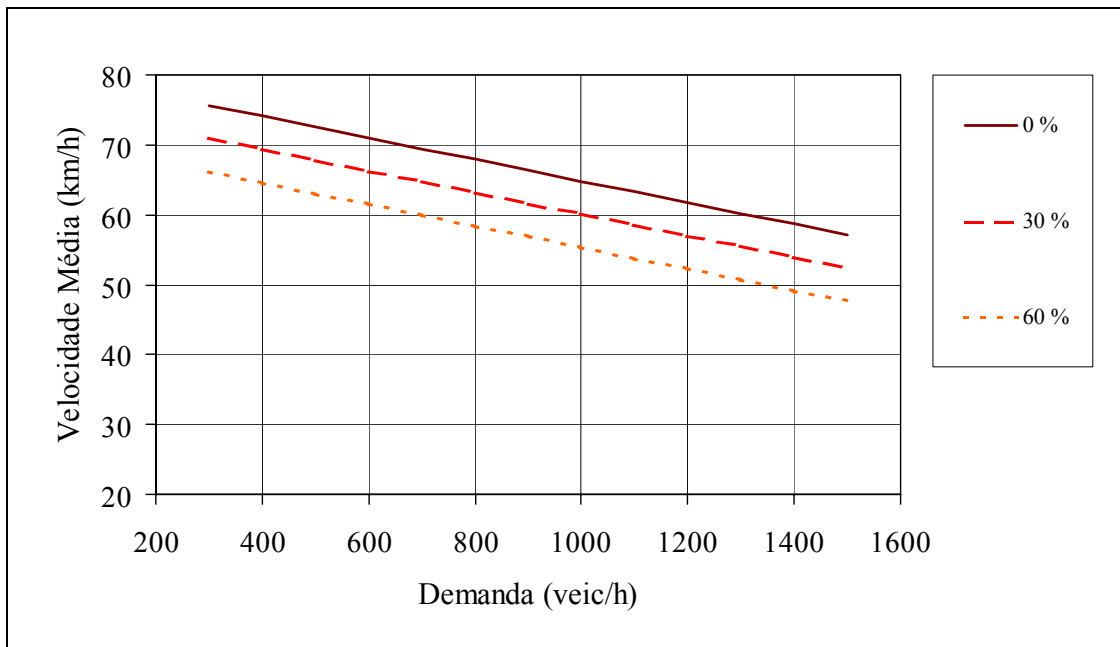


**Figura 5.8 – VMP X demanda X extensão da rampa.**

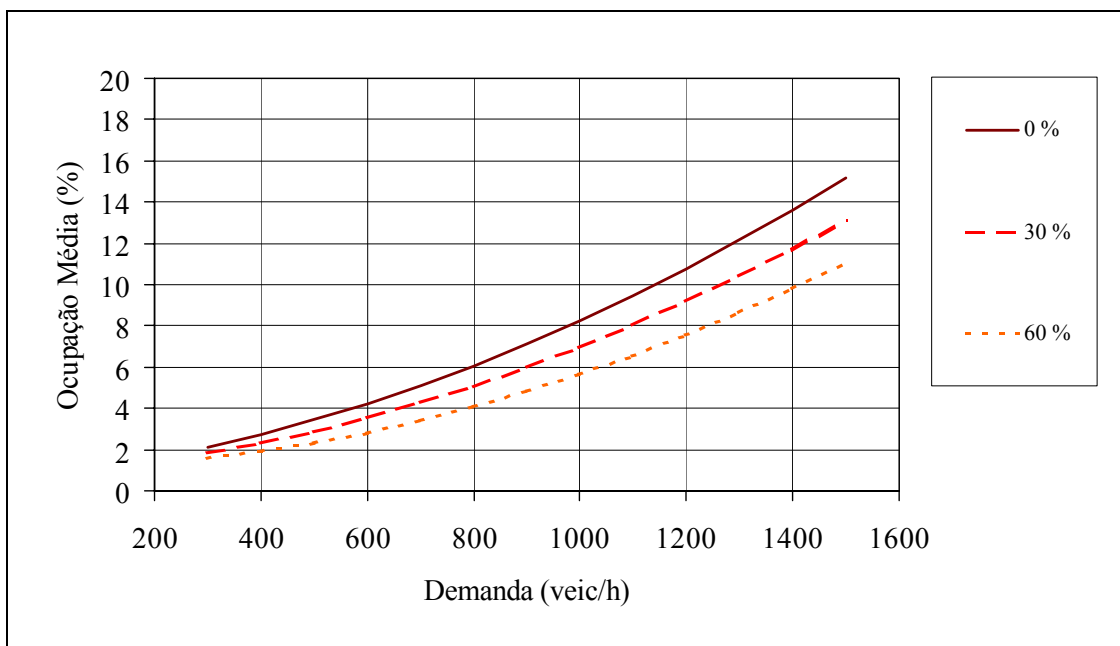


**Figura 5.9 – OMT X demanda X extensão da rampa.**

As figuras 5.10 e 5.11 mostram o comportamento da VMP e da OMT segundo a variação da extensão do segmento em aclave sem faixa adicional. A velocidade decresce linearmente com o aumento da demanda. Já a ocupação média do trecho aumenta com a demanda.



**Figura 5.10 – VMP X demanda X extensão em rampa sem faixa adicional.**



**Figura 5.11 – OMT X demanda X extensão em rampa sem faixa adicional.**

## 5.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentado o desenvolvimento e execução de um projeto de experimentos com a finalidade de determinar o grau de influência imposto pelas características geométricas da rodovia e a configuração da corrente de tráfego. A realização do projeto de experimentos buscou auxiliar na análise dos efeitos produzidos pelas variáveis consideradas na simulação. O projeto de experimentos empregado busca garantir a abrangência do estudo por toda a superfície de resposta considerada no trabalho. Ainda, reduz significativamente o número de ensaios, poupando tempo e reduzindo custos.

O capítulo seguinte apresenta as conclusões finais deste trabalho.



## **CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES**

---

Este trabalho apresentou o desenvolvimento do modelo de simulação microscópico de tráfego, STIRO (Simulador de Tráfego Ininterrupto ROdoviário). STIRO constitui uma ferramenta para representar o comportamento dos veículos em rodovias de pista simples e avaliar o desempenho operacional de faixas adicionais em aclives. O desenvolvimento desse modelo está voltado para a representação das condições de tráfego das rodovias brasileiras, quais sejam, grande percentual de veículos pesados trafegando em rodovias de pista simples.

Ao modelo de *car-following* empregado no simulador foi incorporado um modelo de desempenho motriz dinâmico em função da relação massa/potência dos veículos. Considerando a relação massa/potência dos veículos foi possível representar o comportamento de veículos típicos das rodovias brasileiras: baixa potência e sobrecarga. É interessante notar a diferença no desempenho dos veículos, mesmo em terreno plano.

Além disso, o modelo contempla a realização de manobras forçadas típicas de final de faixas adicionais, quando os veículos mais lentos nessas faixas são obrigados a retornar à faixa normal de tráfego. O modelo de mudança de faixas implantado no STIRO tenta emular o comportamento dos motoristas que trocam de faixa para dar passagem aos veículos mais rápidos. Neste sentido, foram determinadas três situações diferentes para mudança de faixas:

(i) veículos na faixa normal, (ii) veículos na faixa adicional, e (iii) veículos na zona de emergência. A zona de emergência é uma região crítica para mudança de faixas, que determina a proximidade do final da faixa adicional.

A validação conceitual do modelo de *car-following* demonstrou o grau de sensibilidade inerente aos parâmetros  $b$  e  $\hat{b}$ . Estes parâmetros afetam fortemente a capacidade do fluxo. Para determinar o melhor ajuste, simulações com diferentes combinações dos parâmetros foram comparadas com duas metodologias internacionais para avaliação de nível de serviço de rodovias. A comparação dos resultados demonstra que, além das curvas teóricas diferirem entre si, o modelo de *car-following* é bastante sensível à variação dos parâmetros  $b$  e  $\hat{b}$ . Desta comparação é possível concluir que:

- Quanto maior a disposição do veículo seguidor em desacelerar, mais próximo do veículo da frente ele se manterá, aumentando a capacidade da via.
- Quanto maior o valor estimado pelo veículo seguidor para a disposição do líder em desacelerar, mais distante o seguidor se manterá deste líder, diminuindo a capacidade da via.

Um estudo sobre as diferenças de velocidades entre automóveis e caminhões, e a influência da faixa adicional mostrou que a faixa adicional oferece uma melhora significativa no desempenho operacional dos automóveis. No entanto, nem a existência de faixa adicional, nem diferentes percentuais de caminhões causam grandes diferenças na velocidade dos veículos pesados.

Com o objetivo de avaliar o desempenho de segmentos viários submetidos a distintas condições de demanda e composição de tráfego foi desenvolvido um projeto de experimentos. Neste projeto foram estudados os efeitos causados por fatores tais como demanda, percentual de caminhões, configuração da composição de caminhões, inclinação da rampa, extensão da rampa e comprimento crítico da rampa, sobre a velocidade média do fluxo e a ocupação do trecho analisado. Os resultados mostraram que a inclinação da rampa é responsável pelos maiores índices de redução de velocidade e aumento na ocupação do trecho, este último devido à formação de pelotões que seguem os veículos lentos. No entanto, o fator relativo ao percentual de caminhões no fluxo de tráfego causa um aumento significativo na ocupação média do trecho.

## 6.1 RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para representar o comportamento de veículos no fluxo de tráfego, o modelo de *car-following* empregado no STIRO considera valores de desaceleração máxima dos veículos ( $b$ ,  $\hat{b}$ ), a distribuição de velocidades desejadas e o tempo de reação dos motoristas ( $\tau$ ). Neste trabalho somente foram estudados os efeitos sobre o comportamento dos veículos em relação a diferentes valores de  $b$  e  $\hat{b}$ . Entretanto, alguns estudos (do próprio autor do modelo e de outros pesquisadores) demonstraram que o tempo de reação afeta sensivelmente o formato da curva fluxo-velocidade. Desta forma, recomenda-se que novos testes sejam realizados com diferentes combinações entre  $b$ ,  $\hat{b}$  e  $\tau$ .

Os trechos em aclave geralmente seguem um traçado sinuoso, apresentando curvas horizontais na sua geometria. A existência de curvas horizontais nas rodovias exige que o motorista controle a velocidade de forma a manter a estabilidade do veículo. Um interessante desenvolvimento em estudos futuros deveria ser a incorporação do efeito das curvas horizontais sobre a velocidade dos veículos no modelo STIRO.

No seu estado atual, STIRO somente representa segmentos rodoviários de pista simples com proibição total de ultrapassagem pela faixa de fluxo oposto. Isto restringe demasiadamente o uso do simulador. Desta forma, um passo muito importante no desenvolvimento do STIRO seria incluir o fluxo de veículos nos dois sentidos de tráfego. Para isso, seria necessário implementar um novo modelo de trocas de faixa que represente o comportamento dos veículos em ultrapassagens. Este modelo deve considerar as distâncias entre dois veículos que se aproximam, incluindo distâncias de visibilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, K.I. **Modeling driver's acceleration and lane changing behaviour.** Cambridge, EUA, 1999. 189p. Tese de Doutorado em Transportation Systems and Decision Sciences – Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- ALGERS, S.; BERNAUER, E.; BOERO, M.; BREHERET, L.; DI TARANTO, C.; DOUGHERTY, M.; FOX, K.; GABARD J.F. **Review of micro-simulation models,** deliverable 3 of the SMARTTEST Project. 1997. 60p. Disponível em: < <http://www.its.leeds.ac.uk/smertest> >. Acesso em julho de 2000.
- AL-KAISY, A.; STEWART, J.A.; VAN AERDE, M. Examination of lane-changing behavior in INTEGRATION traffic simulation model. In: CANADIAN INSTITUTE OF TRANSPORTATION ENGINEERS ANNUAL CONFERENCE, 1999, Montreal. **Proceedings of Canadian Institute of Transportation Engineers Annual Conference.** 2000.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (ASSHTO) **A policy on geometric design of highways and streets.** 4ed. Washington, D.C., 2001. 905p.
- AYCIN, M. F.; BENEKOHAL, R.F. A linear acceleration car-following model development and validation. **Transportation Research Record**, n. 1644, p. 10-19, 1998.
- CASTILHO, R. A. **Análise e simulação da operação de ônibus em corredores exclusivos.** Porto Alegre, 1997. 113p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- CEDER, A.; MAY, A. Further evaluation of single and two regime traffic flow models. **Transportation Record**, n. 567, p. 1-15, 1976.
- CHANDLER, F. E.; HERMAN, R.; MONTROLL, E.W. Traffic dynamics: studies in car following. **Operations Research**, v. 6, p. 165-184, 1958.
- CHOWDHURY, D.; SANTEN, L.; SCHADSCHNEIDER, A. Statistical physics of vehicular traffic and some related systems. **Physics Reports**, v. 329, p. 199-329, 2000.
- DAER. Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. **Normas de projetos rodoviários.** Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1991. 173p.
- DEMARCHI, S. H. **Influência dos veículos pesados na capacidade e nível de serviço de rodovias de pista dupla.** São Carlos, 2000. 157p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil (Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais.** Rio de Janeiro, 1999. 195 p.

- EGAMI, C.Y.; SETTI, J.R.A. Recalibração do modelo TRARR para simulação de rodovias de pista simples no Brasil. In: XIV CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2000, Gramado. **Panorama nacional de pesquisa em transportes 2000**. Rio de Janeiro: ANPET, 2000. p. 101-112.
- GAZIS, D.C.; HERMAN, R.; POTTS, R.B. Car following theory of steady state traffic flow. **Operations Research**, v. 7, p. 499-510, 1959.
- GAZIS, D.C.; HERMAN, R.; ROTHERY, R. Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow. **Operations Research**, v. 9, n. 4, p. 545-567, 1961.
- GEIPOT. Empresa Brasileira de Planejamento dos Transportes. **Anuário estatístico dos transportes 2001**. Brasília, 2001. Não Paginado.
- GIPPS, P. G. A behavioural car-following model for computer simulation. **Transportation Research B**, v. 15, n. 2, p. 105-111, 1981.
- GIPPS, P.G. A model for the structure of lane-changing decisions. **Transportation Research B**, v. 20, n. 5, p. 403-414, 1986.
- HERMAN, R.; MONTROLL, E.; POTTS, R.; ROTHERY, R. Traffic dynamics: analysis of stability in car-following. **Operations Research**, v. 7, n. 1, p. 86-106, 1959.
- HEYES, M.P.; ASHWORTH, R. Further research on car-following models. **Transportation Research**, v. 6, p. 287-291, 1972.
- HIDAS, P. Modeling lane changing and merging in microscopic traffic simulation. **Transportation Research Part C**, v. 10, p. 352-372, 2002.
- HOBAN, C.J.; SHEPHERD, R.J.; FAWCETT, G.J., ROBINSON, G.K. **A model for simulating traffic on two-lane rural roads**; user guide and manual for TRARR version 3.2. Victoria, Austrália: ARRB, 1991. (Technical Manual ATM No. 10B)
- LAW, A.; KELTON, E.W. **Simulation modeling and analysis**. New York: McGraw Hill, 1991. 759p.
- LEUTZBACH, W. **Introduction to the theory of traffic flow**. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1988. 204p.
- LIBERMAN, E.; RATHI, A.K. Traffic simulation. In: GARTNER, N.; MESSER, C.M.; RATHI, A. K. (Eds.) **The revised monograph on traffic flow theory**. EUA: Federal Highway Administration, 1997. Cap. 10. Disponível em < <http://www.tfsrc.gov/>> Acesso em julho de 2001.
- LIFTECH CONSULTANTS INC. **Mos Win SDK 5.0**; Animated simulation software development kit for Windows. **Porto Alegre**, 1997. **157p**.
- LINDAU, L.A.; MICHEL, F.D.; KUHN, F.; RIBEIRO, J.L.D. Modelando o desempenho operacional de busways e tramways. **EGATEA**, v. 25, n. 3, p. 67-76, 1997.
- LIU, R. **DRACULA microscopic traffic simulator**. Leeds, UK: Institute for Transport Studies, University of Leeds, 1994. (ITS Working Paper n. 431).

- MANNERING, F.L.; KILARESKI, W.P. **Principles of highway engineering and traffic analysis**. 2ed. New York: John Wiley and Sons, 1998.
- MARSDEN, G.; BELL, M.; REYNOLDS, E.S. Towards a real-time microscopic emissions model. **Transportation Research Part D**, v. 6, n. 1, p. 37-60, 2001.
- MAY, A.D.; KELLER, H.R. Non-integer car-following models. **Highway Research Record**, v. 199, p. 19-31, 1967.
- MELO, R.A. **Faixas adicionais para aclives de rodovias brasileiras**. São Carlos, 2002. 175p. Tese de Doutorado em Engenharia (Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- NANNI, L.F.; RIBEIRO, J.L. **Planejamento e avaliação de experimentos**. Porto Alegre: CPEGEC/UFRGS, 1991. 134p. (Caderno de Engenharia 17/87).
- NEWELL, G. F. Nonlinear effects in the dynamics of car-following. **Operations Research**, v.9, n.2, p. 209-229, 1961.
- NOWOTNY, P.M.; HARDMAN, E.J. **Preliminary report on a computer simulation of car driven**. Crowthorne, UK: TRRL, 1977. 16p. (TRRL Supplementary Report 325).
- OLSIM (2003) Online Simulation Duisburg. Physik von Transport und Verkehr. Universidade de Duisburg, Alemanha. Disponível em: < <http://www.traffic.uni-duisburg.de> >. Acesso em: junho de 2003.
- OWEN, B.; BROCK, G.; MASTBROOK, P.; PAVLIK, R.; RAO, S.; STALLARD, C.; SUNKARI, Z.; ZHANG, Y. **A compendium of traffic model validation documentation and recommendations**. Phase I, Tasks A-H. EUA: Department of Transportation, 1996. 189p. Disponível em: < <http://www.itsdocs.fhwa.dot.gov> > Acesso em julho de 2001.
- PIPES, L. A. Car-following models and the fundamental diagram of road traffic. **Transportation Research**, v. 1, p. 21-29, 1967.
- PURSULA, M. Simulation of traffic systems: an overview. **Journal of Geographic Information and Decision Analysis**, v. 3, n. 1, p. 1-8, 1999.
- RIBEIRO, J.L.D.; TEN CATEN, C. **Projeto de experimentos**. Porto Alegre: FEENGE/UFRGS, 2002. 130p. (Serie monográfica qualidade).
- SCHADSCHNEIDER, A.; SCHERECKENBERG, M. Cellular automaton models and traffic flow. **Journal of Physics A**, v.26, 1993.
- SHANNON, R. **Systems simulation the art and science**. Englewood-Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1975. 387p.
- SILVA, P.C.M.; TYLER, N. Sobre a validação de modelos microscópicos de tráfego. **Transportes**, v. 10, n. 1, p. 49-64, 2002.

- SILVEIRA, A. Aplicação do modelo TRARR na simulação de tráfego em via rural. In: X CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 1996, Brasília. **Anais do Congresso De Pesquisa E Ensino Em Transportes** Rio de Janeiro: ANPET, 1996. p. 633-642.
- SULTAN, B.; MCDONALD, M. The lane changing process: data analysis and modelling behaviour. **Traffic Engineering + Control**, v. 42 , n. 7 , p. 202-207, 2001.
- TEN CATEN, C.S. **Método de otimização de produtos e processos medidos por múltiplas características de qualidade**. Porto Alegre, 1995. 154p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. (TRB). **Highway capacity manual 2000**. Washington, D.C.: National Research Council, 2000. 1134p.
- TRANSPORTATION RESEARCH GROUP AT THE UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON. (TRG). **Deployment of Interurban ATT Test Scenarios**; final report of the DIATS Project. 1999. 63p. Disponível em < <http://www.trg.soton.ac.uk/diats/diats.htm> > Acesso em dezembro de 2001.
- UKDOT. Department for Transport. **Design manual for roads and bridges**. Reino Unido, 2002. v. 13, Section 1, Part 5: Speed on links. Disponível em < <http://www.official-documents.co.uk/> > Acesso em agosto de 2002.
- WILSON, R.E. An analysis of Gipps' car-following model of highway traffic. **IMA Journal on Applied Mathematics**, v. 66, n. 5, p. 509-537, 2001.
- WOLFRAM, S. Statistical Mechanics of Cellular Automata. **Reviews of Modern Physics**, v.55, p.601-644, 1983.
- YANG, Q.; KOUTSOPOULOS, H. A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems. **Transportation Research C**, v. 4, n. 3, p. 113-129, 1996.
- YOUSIF, S.; HUNT, J. Modelling lane utilization on British dual-carriageway roads: effects on lane changing. **Traffic Engineering + Control**, v. 36 , n.12 , p. 680-687, 1995.

**ANEXO**



```

//*****
//
//    SIMULAÇÃO DE UMA RODOVIA RURAL DE PISTA SIMPLES C/ 3a. FAIXA
//
//*****

//-----
// headers
//-----
#include <MosWin.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <assert.h>
#include <time.h>
#include "resource.h"

//-----
// constants
//-----
#define TAU                1           // intervalo de tempo entre atualizações
#define NTRECHOS          5           // quantidade de trechos na artéria
#define NMODELOS          4           // tipos dos veículos
#define IC_MEDIA          0
#define IC_ALTA           1
#define IC_BAIXA         2
#define IC_CARRO          3
#define MAXVEICTRECHO    10000
#define GAP                3           // gap mínimo aceitável = 3 segs

//-----
// estruturas
//-----
typedef struct tagVEICULO {
    ENT    *caminhao;           // caminhão que vai sair da 3a. faixa
    int    modelo;              // modelo do veículo
    int    trecho;              // trecho onde o veículo anda
    int    faixa;               // faixa em que o veículo está
    double vdes;                // velocidade desejada
    double amax;                // aceleração máxima
    double len;                 // tamanho do veículo
    double b;                    // desaceleração
    double bchapeu;             // desaceleração máxima
    double d0;                  // posição x no tempo t
    double d1;                  // posição x no tempo t + TAU
    double v0;                  // velocidade no tempo t
    double v1;                  // velocidade no tempo t + TAU
    double a0;                  // aceleração no tempo t
    double a1;                  // aceleração no tempo t + TAU
    double acc;                 // aceleração do desempenho
    double vcf;
    double vfl;
    double massa;
    double VMP;
    double potencia;
    double posinicial;
    double posfinal;
    int    seguindo;
    int    diminui;
    int    zemerg;              // informa se o veículo está na zona de emergencia
    int    troca;               // informa se o veículo pode trocar de faixa
    int    atrapalha;
    int    contatempo;
    int    coletado;
}

```

```

        int    tempocriacao;

} VEICULO;

typedef struct tagTRECHO {
    double len;           // comprimento do trecho
    double greide;       // greide no trecho
    double vmax;
    double xini;
    double xfim;
    int    nfaixas;      // no. de faixas no trecho
} TRECHO;

typedef struct tagMODELO {
    char    nome[100];    // nome do modelo
    int     icone;
    int     quant_trecho;
    double m;             // media da distribuicão exponencial (headway)
    double l;            // fator de transl. da distr. exponencial (headway)
    double vmax;         // velocidade máxima do modelo
    double jerk;         // jerk do modelo
    double b;            // desaceleração do modelo
    double bchapeu;     // desaceleração estimada dop veículo da frente
    double ni;
    double potencia;
    double mta;
    double cd;
    double A;
    double massa;
    double length;
    double percent;     // % deste veículo no fluxo para cálculo do headway
    double denskm;
} MODELO;

//-----
// variáveis globais
//-----
FILE    *f, *g, *k, *h;
QUE     *qArteria, *qColeta;    // fila que contém todos os veículos
TRECHO  Trecho[NTRECHOS];       // estrutura que contém os trechos da simulação
MODELO  Modelo[NMODELOS];      // estrutura que contém os modelos da simulação
char    arquivo[100];
int     x0, x1, x2, x3, x4, x5;
int     fluxo;
int     ext_rampa;
int     mont, jus;
int     compr_crit;
int     ext_compr_crit;
int     tmax;
int     nDestruídos = 0;
int     nCriados = 0;
int     warmup, cooloff;
int     hh, mm, ss;
int     temposim;
int     nEntidades = 0;
int     nCaminhao = 0;
int     nAuto = 0;
int     nfaixas;
int     nexp;
float   ap;
float   rp;
float   rl;

```

```

float truck;
float desacel, desacelest;
double greide;
double ArteriaLen; // comprimento total de trechos
double SomaVMP = 0;
double SomaVMPCaminhao = 0;
double SomaVMPAuto = 0;
double VMP = 0;
double VMPCaminhao = 0;
double VMPAuto = 0;
double denstotal = 0;
double densmedia = 0;

//-----
// protótipos
//-----
TIMETYPE Headway(int tipo);
ENT* adjacent_Lead(ENT *e);
ENT* adjacent_Lag(ENT *e);
ENT* Leader(ENT *e);
ENT* Follower(ENT *e);
void ScriptVeiculo(ENT* e);
void ScriptGerente(ENT* e);
void QualTrecho(ENT *e);
void mostra(ENT *e);
void atualiza(ENT *e);
void armazena(ENT *e);
void desacelera(ENT *e);
void MudaFaixa(ENT *e);
void atrapalha(ENT *e, ENT *eAtras);
void verificaGap(ENT *e, double gap1, double gap2);
void verificaDesacel(ENT *e, double aceLag, double aceMe);
double carfol(ENT *e, ENT *eOutro, double b, double bOutro);
double desempenho(ENT *e, double v);
double velocidade(ENT *e, ENT *eOutro, double b, double bOutro);
double aceleracao(ENT *eAtras, double v);

//-----
// funções
//-----

TIMETYPE Headway(int type) {

    double headway;

    // usa os parametros especificados para o modelo

    double m = Modelo[type].m;

    //double l = Modelo[type].l;

    double l = m * 0.80;//Modelo[type].l;

    // calcula headway como exponencial transladada, representa a probabilidade
    // revisar!

    headway = shiftexp(m, l);

    return (TIMETYPE)headway;
}

void mostra(ENT *e) {

    VEICULO *vMe = e->udat;

```

```

int x_ent, y_ent;

x_ent = (int) vMe->d0;

if(vMe->d0 >= 0)
{
    if(vMe->faixa == 1) y_ent = 585;

    else y_ent = 555;
}

ent_show(e, x_ent, y_ent, 1);
}

ENT* adjacent_Lead(ENT *e){ // acha o líder de vMe na faixa adjacente

    ENT *eLead;
    ENT *eTemp;
    VEICULO *vMe = e->udat; // o meu veículo
    VEICULO *vTemp; // veículo que pode estar na minha frente
    double dmin;
    int i = 0;

    dmin = 10000.0;

    // Para encontrar o vLead na outra faixa

    eLead = NULL;

    for(i = 0; i < (int)qpop(qArteria); i++)
    {
        eTemp = entinq(qArteria, i);
        vTemp = eTemp->udat;

        if(vTemp->faixa != vMe->faixa) // Está na mesma faixa?
        {
            if(vTemp->d0 > vMe->d0) // Está na frente?
            {
                if(vTemp->d0 < dmin) // É o mais próximo?
                {
                    dmin = vTemp->d0;
                    eLead = eTemp;
                }
            }
        }
    } // Fecha o for

    return eLead;
}

ENT* adjacent_Lag(ENT *e){ // acha o lag do vMe na faixa contrária

    ENT *eLag;
    ENT *eTemp;
    VEICULO *vMe = e->udat; // o meu veículo
    VEICULO *vTemp; // veículo que pode estar na minha frente
    double dmin;
    int i = 0;

    dmin = -10000.0;

    // Para encontrar o vLag na outra faixa

    eLag = NULL;

```

```

for(i = (int)qpop(qArteria)-1; i >= 0; i--)
{
    eTemp = entinq(qArteria, i);
    vTemp = eTemp->uDat;

    if(vTemp->faixa != vMe->faixa)           // Estão em faixas diferentes?
    {
        if(vTemp->d0 < vMe->d0)             // Está atrás?
        {
            if(vTemp->d0 > dmin)           // É o mais próximo?
            {
                dmin = vTemp->d0;
                eLag = eTemp;
            }
        }
    }
} // Fecha o for

return eLag;
}

ENT *Leader(ENT *e) { // Para identificar o veículo que está na minha frente

    ENT *eFrente;
    ENT *eTemp;
    VEICULO *vMe = e->uDat; // o meu veículo
    VEICULO *vTemp; // veículo que pode estar na minha frente
    double dmin;
    int i = 0;

    dmin = 10000.0;

    eFrente = NULL;

    // Para encontrar o vFrente na mesma faixa
    for(i = 0; i < (int)qpop(qArteria); i++)
    {
        eTemp = entinq(qArteria, i);
        vTemp = eTemp->uDat;

        if(vTemp->faixa == vMe->faixa) // Está na mesma faixa?
        {
            if(e->serial != eTemp->serial) // É diferente de vMe?
            {
                if(vTemp->d0 > vMe->d0) // Está na frente?
                {
                    if(vTemp->d0 < dmin) // É o mais próximo?
                    {
                        dmin = vTemp->d0;
                        eFrente = eTemp;
                    }
                }
            }
        }
    }
} // Fecha o for

if(eFrente) return eFrente;

else return NULL;
}

ENT *Follower(ENT *e) { // Para identificar o veículo que está atrás de vMe

```

```

ENT *eAtras;
ENT *eTemp;
VEICULO *vMe = e->udat;          // o meu veículo
VEICULO *vTemp;                  // veículo que pode estar atrás de mim
double dmin;
int i = 0;

// Acha o cara que está atrás de mim

dmin = -10000.0;

eAtras = NULL;

for(i = (int)qpop(qArteria)-1; i >= 0; i--)
{
    eTemp = entinq(qArteria, i);
    vTemp = eTemp->udat;

    if(vTemp->faixa == vMe->faixa)          // Estão na mesma faixa?
    {
        if(e->serial != eTemp->serial)     // É diferente de vMe?
        {
            if(vTemp->d0 < vMe->d0)         // Está atrás?
            {
                if(vTemp->d0 > dmin)        // É o mais próximo?
                {
                    dmin = vTemp->d0;
                    eAtras = eTemp;
                }
            }
        }
    }
} // Fecha o for

return eAtras;
}

void QualTrecho(ENT *e){

    VEICULO *vMe = e->udat;
    int i = 0;

    // atualiza TRECHO

    if(vMe->d0 > 0)
    {
        if(vMe->d0 < Trecho[0].xfim) vMe->trecho = 0;
        else
            if(NTRECHOS > 1)
            {
                for(i = 0; i<NTRECHOS; i++)
                {
                    if(vMe->d0 > Trecho[i].xfim
                        && vMe->d0 < Trecho[i+1].xfim)
                    {
                        vMe->trecho = i+1;
                    }
                }
            }
    }
}

double carfol_obst(ENT *e, double x, double xOutro,

```

```

        double vOutro, double lenOutro, double b) {

    VEICULO *vMe = e->udat;
    double rd;
    double vel;

    //////////////////////////////////////
    // Car-following //
    //////////////////////////////////////

    // calcula a redução de velocidade

    rd = b * b * (TAU) * (TAU) + b * (2.0 * ((x - xOutro) - (lenOutro + 1)) -
        vMe->v0 * (TAU) + vOutro * vOutro / 2);

    // se redução for menor que zero iguala a zero

    if (rd < 0.0) rd = 0.0;

    // calcula a velocidade

    vel = -b * TAU + sqrt(rd);

    return vel;
}

double carfol(ENT *e, ENT *eOutro, double b, double bOutro) {

    VEICULO *vMe = e->udat;           // o meu veículo
    VEICULO *vOutro;                 // o veículo da frente
    double rd;
    double dist, vel = 0;

    vOutro = NULL;

    vOutro = eOutro->udat;

    // calcula a distância entre v0 e v1

    dist = vOutro->d0 - vMe->d0;

    // calcula a redução de velocidade

    rd = b * b * TAU * TAU + b * (2.0 * (dist - (vOutro->len + 2.5)) -
        vMe->v0 * TAU + vOutro->v0 * vOutro->v0 / bOutro);

    // se redução for menor que zero iguala a zero

    if (rd < 0.0) rd = 0.0;

    // calcula a velocidade

    vel = -b * TAU + sqrt(rd);

    return vel;
}

double desempenho(ENT *e, double v) {

    VEICULO *vMe = e->udat;           // o meu veículo
    double vel = 0;
    double acc;

```

```

double F, Ft, Fmax, R, Ra, Rr, Rg, massa, mta, potencia, ni, cd, A, greide;

v = v*3.6;

// Calcula F

ni      = 0.87;
mta     = Modelo[vMe->modelo].mta;
potencia = Modelo[vMe->modelo].potencia;

Ft      = 3600.0*ni*potencia/(v);
Fmax    = mta*9.806*0.6;
F       = min(Ft, Fmax);

// Calcula Resistências

cd      = Modelo[vMe->modelo].cd;
A       = Modelo[vMe->modelo].A;
massa   = Modelo[vMe->modelo].massa;
greide  = Trecho[vMe->trecho].greide;

Ra      = 0.047285*cd*1.0*A*v*v;
Rr      = 1.2*(0.0125*v+7.6)*massa*9.806/1000;
Rg      = massa*9.806*greide;
R       = Ra + Rr + Rg;

// Calcula a aceleração

acc = (F-R)/massa;

acc = min(acc, vMe->amax);

// Calcula a velocidade

vel = vMe->v0 + acc*TAU;

return vel;
}

double aceleracao(ENT *e, double v) { // retorna a aceleração de desempenho do veículo

    VEICULO *vMe = e->uDat; // o meu veículo
    double acc;

    acc = (desempenho(e, vMe->v0) - vMe->v0)/TAU;

    return acc;
}

void atrapalha(ENT *e, ENT *eAtras) { // vMe na faixa 2 atrapalha se for para faixa 1

    ENT *eFrente;
    VEICULO *vMe = e->uDat;
    VEICULO *vFrente;
    VEICULO *vAtras;

    double velMe, posMe, dist;
    double velAtras, vflAtras, vcfAtras;

    eFrente = Leader(e);

    //eAtras = adjacent_Lag(e);

    if(eFrente)

```



```

{
    vFrente = eFrente->udat;

    // faz car-following com cara da frente na faixa 2 e acha a nova posição do vMe
    velMe = min(carfol(e, eFrente, vMe->b, vMe->bchapeu),
                desempenho(e, vMe->v0));

    posMe = vMe->d0 + velMe*TAU;
}
else
{
    velMe = desempenho(e, vMe->v0);
    posMe = vMe->d0 + velMe*TAU;
}

if(eAtras)
{
    vAtras = eAtras->udat;

    // faz car-following entre vAtras e o vMe na faixa 1 na sua nova posição
    vcfAtras = carfol_obst(eAtras, vAtras->d0, posMe, velMe, vMe->len,
                          vMe->bchapeu);

    // calcula velocidade de desempenho do vAtras

    vflAtras = desempenho(eAtras, vAtras->v0);
}

// se nova velocidade do vAtras for afetada pela entrada do vMe na faixa 1
// então vMe na faixa 1 ATRAPALHA vAtras
// senão vMe na faixa 1 NÃO ATRAPALHA vAtras

velAtras = min(vcfAtras, vflAtras);

dist = vMe->d0 - vMe->len - vAtras->d0;

// se a velocidade usada for a do car-following, o vMe irá atrapalhar
if(velAtras == vcfAtras && dist < 100) vMe->atrapalha = 1; r
else vMe->atrapalha = 0; // senão, o vMe não atrapalha o cara da faixa 1
}

void desacelera(ENT *e) {
    VEICULO *vMe = e->udat;
    ENT *eAux;
    VEICULO *vAux;
    double tMe, tAux;
    int i;

    for(i = 0; i < (int) qpop(qArteria);)
    {
        eAux = entinq(qArteria, i);

        vAux = eAux->udat;

        if(vAux->faixa == 1)
        {
            if(vAux->d0 < vMe->d0 && vAux->d0 > x3)
            {
                // tempo para o eAux chegar no fim
            }
        }
    }
}

```

```

        tAux = (x3-vAux->d0)/vAux->v0;

        // tempo para vMe chegar ao fim

        tMe = (x3-vMe->d0)/vMe->v0;
        if(tAux > tMe)
        {
            vAux->diminui = 1;           // vAux tem que diminuir
            vAux->caminhao = e;
            break;
        }
        else i++;
    }
    else i++;
}
}

void verificaDesacel(ENT *e, double aceLag, double aceMe)
{
    VEICULO *vMe = e->udat;
    VEICULO *vLag, *vLead;
    ENT *eLag, *eLead;

    double acel_Lag, acel_Me, velLag, velLead;
    double velMe = 0;

    eLag = NULL;
    eLead = NULL;

    // acha o lag
    eLag = adjacent_Lag(e);

    if(eLag)
    {
        vLag = eLag->udat;

        velLag = carfol(eLag, e, vLag->b, vLag->bchapeu);

        acel_Lag = (velLag - vLag->v0)/TAU;
    }
    else acel_Lag = 4;

    // acha o lead
    eLead = adjacent_Lead(e);

    if(eLead)
    {
        vLead = eLead->udat;

        velLead = carfol(e, eLead, vMe->b, vMe->bchapeu);

        acel_Me = (velMe - vMe->v0)/TAU;
    }
    else acel_Me = 4;

    // verifica se as desacelerações não serão maiores que 4
    MsgShow("\n desaceleracao = %8.2f", acel_Lag);
}

```

```

        if(accel_Lag > aceLag && accel_Me > aceMe) vMe->troca = 1;
        else vMe->troca = 0;
    }

void verificaGap(ENT *e, double gap1, double gap2) {

    VEICULO *vMe = e->udat;
    VEICULO *vLag, *vLead;
    ENT *eLag, *eLead;

    double gapLag, gapLead, Gap;

    eLag = NULL;
    eLead = NULL;

    // acha o lag
    eLag = adjacent_Lag(e);

    if(eLag)
    {
        vLag = eLag->udat;

        gapLag = (vMe->d0 - vMe->len - vLag->d0)/(vLag->v0);
    }
    else gapLag = 1000;

    // acha o lead
    eLead = adjacent_Lead(e);

    if(eLead)
    {
        vLead = eLead->udat;

        gapLead = (vLead->d0 - vLead->len - vMe->d0)/(vMe->v0);
    }
    else gapLead = 1000;

    // calcula o GAP total
    Gap = gapLead + gapLag + vMe->len;

    // verifica se há gap suficiente

    if(gapLead > gap1 && gapLag > gap2) vMe->troca = 1;
    else vMe->troca = 0;
}

void MudaFaixa(ENT *e) {

    VEICULO *vMe = e->udat;
    VEICULO *vAux;
    ENT *eAux;

    double accAux, accMe, dist;

    // se o trecho do vMe tem duas faixas
    if(Trecho[vMe->trecho].nfaixas == 2)
    {
        // se vMe não for o último da fila

        if(e != qtail(qArteria))

```

```

{
    // se vMe estiver na faixa 1
    if(vMe->faixa == 1)
    {
        // se o vMe não estiver na zona de emergência
        if(vMe->zemerg == 0)
        {
            // acha o veículo de trás e calcula a distância entre eles
            eAux = Follower(e);
            vAux = eAux->udat;
            dist = vMe->d0 - vMe->len - vAux->d0;
            // se a distância entre eles é menor que 30 m
            if(dist < 60)
            {
                // calcula as acelerações possíveis para o desempenho
                // dos dois veículos
                accMe = aceleracao(e, vMe->v0);
                accAux = aceleracao(eAux, vAux->v0);
                // se a aceleração do veículo de trás é maior
                // que a aceleração do vMe
                if(accMe < accAux)
                {
                    // se a velocidade atual do vMe é menor que
                    // a velocidade desejada do veículo de trás
                    if(vMe->v0 < vAux->vdes)
                    {
                        // verifica se há gap na faixa 2
                        verificaGap(e, 1, 1);
                        //verificaDesacel(e, -4, -4);
                        if(vMe->troca == 1)
                        {
                            vMe->faixa = 2;
                        }
                        else vMe->faixa = 1;
                    } // fim if(vMe->v0 < vAux->vdes)
                } // fim if(accMe < accAux)
            } // fim if(dist > 30)
        } // fim if(vMe->zemerg == 0)
        else vMe->faixa = 1;
    } // fim if(vMe->faixa == 1)
    else
    {
        // se o vMe estiver dentro da zona de emergência
        if(vMe->zemerg == 1)
        {
            // verifica se há gap na faixa 1
            verificaGap(e, 2, 3);
        }
    }
}

```

```

        //verificaDesacel(e, -4, -4);

        if(vMe->troca == 1)
        {
            vMe->faixa = 1;
        }
        else
        {
            vMe->faixa = 2;
            desacelera(e);
        }
    } // fim if(vMe->zemerg == 1)
    else
    {
        if(vMe->seguindo == 1)
        {
            verificaGap(e, 2, 3);

            //verificaDesacel(e, -4, -4);

            if(vMe->troca == 1)
            {
                vMe->faixa = 1;
            }
            else vMe->faixa = 2;
        }
        else vMe->faixa = 2;
    }
} // fim if(e != qtail(qArteria))
} // fim if(Trecho[vMe->trecho].nfaixas == 2)
else vMe->faixa = 1;
}

void atualiza(ENT *e) {

    VEICULO *vMe = e->udat;
    VEICULO *vFrente;
    ENT *eFrente;

    double velo, desacelGipps, desacel;

    // troca trecho

    QualTrecho(e);

    // troca faixa

    MudaFaixa(e);

    // faz car-following

    if(vMe->diminui == 1)
    {
        ENT *eCaminhao = vMe->caminhao;
        VEICULO *vCaminhao = eCaminhao->udat;
        velo = carfol(e, vMe->caminhao, vMe->b, vMe->bchapeu);
        desacelGipps = (velo - vMe->v0)/1;
        desacel = max(desacelGipps, - 3);
        vMe->v1 = vMe->v0 + desacel*TAU;
        vMe->diminui = 0;
    }
}

```

```

else
{
    if(vMe->faixa == 2 && vMe->d0 > x4 - 60 && vMe->d0 < x4)
        eFrente = adjacent_Lead(e);

    else eFrente = Leader(e);

    if(eFrente)
    {
        vFrente = eFrente->udat;

        vMe->vcf = carfol(e, eFrente, vMe->b, vMe->bchapeu);
        vMe->vfl = desempenho(e, vMe->v0);

        vMe->v1 = min(min(vMe->vcf, vMe->vfl), vMe->vdes);
    }
    else
    {
        vMe->vfl = desempenho(e, vMe->v0);
        vMe->vcf = vMe->vdes;

        vMe->v1 = min(min(vMe->vcf, vMe->vfl), vMe->vdes);
    }
}
}

void armazena(ENT *e) {

    VEICULO *vMe = e->udat;

    // conta o tempo que a entidade leva para atravessar o trecho com faixa
    // adicional

    if(vMe->d0 > x1 - 100 && vMe->d0 < x4 + 100)
    {
        vMe->contatempo++;
        if(vMe->coletado == 0)
        {
            vMe->posinicial = vMe->d0;
            vMe->coletado = 1;
        }
    }
    if(vMe->d0 > x4 + 100 && vMe->coletado == 1)
    {
        vMe->posfinal = vMe->d0;
        vMe->coletado = 2;
    }
}

//-----
// scripts
//-----
void ScriptVeiculo(ENT* e) {

    VEICULO* vMe = e->udat;
    double dmin, dlen;
    double m = Modelo[e->type].m;
    int aux = 0;
    int i = 0;

    long seed;

    SCRIPT (e)

```

```

nCriados++;

// inicializa variáveis

e->icon = Modelo[e->type].icone;

vMe->modelo = e->type;

seed = rand();

new_seed(seed);

MsgShow("\n%f", normal(28, 5)*3.6);

// gera velocidades desejadas aleatórias

(m/s) if(e->type == 3) vMe->vdes = normal(28, 5);           // velocidade desejada

else vMe->vdes = Modelo[e->type].vmax;

if(vMe->vdes < 70/3.6) vMe->vdes = 70/3.6;
if(vMe->vdes > 150/3.6) vMe->vdes = 120/3.6;

vMe->amax = 2;                // aceleração máxima (m/s/s)
vMe->len = Modelo[e->type].length; // tamanho do veículo
vMe->b = Modelo[e->type].b;
vMe->bchapeu = max(Modelo[e->type].bchapeu,
                   (vMe->b + Modelo[e->type].bchapeu)/2); // desacel. máxima

vMe->trecho = 0;
// trecho onde o veículo anda
vMe->d0 = 0;                // posição x no tempo t
vMe->d1 = 0;                // posição x no tempo t + tau
vMe->v0 = 60/3.6;          // velocidade no tempo t
vMe->v1 = 60/3.6;          // velocidade no tempo t + tau
vMe->a0 = vMe->amax;        // aceleração no tempo t
vMe->a1 = vMe->amax;        // aceleração no tempo t + tau
vMe->faixa = 1;            // faixa onde o veículo anda
vMe->seguindo = 0;
vMe->diminui = 0;
vMe->VMP = 0;
vMe->massa = Modelo[e->type].massa;
vMe->potencia = Modelo[e->type].potencia;
vMe->zemerg = 0;
vMe->troca = 0;
vMe->vcf = 60/3.6;
vMe->vfl = 0;
vMe->atrapalha = 0;
vMe->tempocriacao = 1;

// procura último veículo na artéria

dmin = 10000;
for (i = 0; i < (int)qpop(qArteria); i++)
{
    ENT* eOutro = entinq(qArteria, i);
    VEICULO* vOutro = eOutro->udat;
    if (vOutro->d0 <= dmin)
    {
        dmin = vOutro->d0;
        dlen = vOutro->len;
    }
}

```

```

// entra na artéria

new_seed(seed);

vMe->d0 = min(0 , dmin-dlen);

enterq(e, qArteria);

// viaja até o fim da artéria

while (vMe->d0 < ArteriaLen)
{
    vMe->seguindo = 0;

    if(min(desempenho(e, vMe->v0), vMe->vdes) > vMe->v0) vMe->seguindo = 1;
    else vMe->seguindo = 0;

    if(vMe->d0 > x4 - 60) vMe->zemerg = 1;

    if(vMe->d0 < x4 - 60 || vMe->d0 > x4) vMe->zemerg = 0;

    // atualiza velocidade

    atualiza(e);

    fprintf(f, "%4d %4d %4.2f\n",TimeNow, e->type, vMe->v1*3.6);

    if(vMe->v1 < 0.01) vMe->v1 = 0;

    // atualiza posição

    vMe->d1 = vMe->d0 + vMe->v1 * TAU;

    // calcula a aceleração/desaceleração

    vMe->a1 = (vMe->v1 - vMe->v0)/TAU;

    vMe = e->udat;

    // conta o tempo que a entidade leva para atravessar o trecho com faixa
    // adicional

    armazena(e);

    // o que é novo fica velho

    vMe->d0 = vMe->d1;
    vMe->v0 = vMe->v1;
    vMe->a0 = vMe->a1;

    // delay da entidade

    delayent(e, TAU);

    vMe = e->udat;

    // mostra os veículos na tela

    mostra(e);

    vMe->tempocriacao ++;
}
// TERMINA O WHILE

```



```

// realiza a contagem dos veículos e do tempo da simulação somente:
//   a) a partir do término do warming up, e
//   b) até o início do cooling off

// calcula a velocidade média de percurso para cada entidade
vMe->VMP = (vMe->posfinal - vMe->posinicial)/vMe->contatempo;

if (TimeNow > (TIMETYPE) warmup && TimeNow < (TIMETYPE) (warmup + tmax))
{
    temposim = TimeNow - (TIMETYPE) warmup;

    if(vMe->coletado == 2)
    {
        nEntidades++;
        SomaVMP = SomaVMP + vMe->VMP;
        VMP = SomaVMP/nEntidades;

        if(vMe->modelo < 3)
        {
            nCaminhao++;
            SomaVMPCaminhao = SomaVMPCaminhao + vMe->VMP;
            VMPCaminhao = SomaVMPCaminhao/nCaminhao;
        }
        if(vMe->modelo == 3)
        {
            nAuto++;
            SomaVMPAuto = SomaVMPAuto + vMe->VMP;
            VMPAuto = SomaVMPAuto/nAuto;
        }
    }
}

// imprime fluxo no tempo de simulação

setbrush(B_SOLID, DKGREEN, DKGREEN);
settextcolor(BLACK);
setfont("Arial", -14, TRUE, FALSE, 0);
showtext(1300, 400, TF_OPAQUE, "Número de Veículos: %04d veic", nEntidades);
showtext(1300, 300, TF_OPAQUE, "Tempo de Simulação: %04d s", temposim);
showtext(1300, 350, TF_OPAQUE, "Velocidade Média de Percurso: %8.2f km/h",
                                                VMP*3.6);

// sai da artéria

leaveq(e, qArteria);

// fim

dispose (e);

ENDSCRIPT
}

void ScriptGerente(ENT* e) {

    int i, j, k;

    SCRIPT(e)

    for(;;)
    {
        // mostra o tempo de simulação em hh:mm:ss

```

```

hh = (int)(TimeNow / 3600);
mm = (int)((TimeNow - 3600 * hh) / 60);
ss = (int)(TimeNow - 3600 * hh - 60 * mm);
settextcolor(BLACK);
setfont("Arial", -16, FALSE, FALSE, 0);
showtext(1300, 250, TF_OPAQUE, "Tempo: %02d:%02d:%02d", hh, mm, ss);

// coleta de densidade

for(k = 0; k < NMODELOS; k++) Modelo[k].quant_trecho = 0;

if (TimeNow >= (TIMETYPE) warmup
    && TimeNow <= (TIMETYPE) (warmup + tmax))
{
    for(i = 0; i < (int) qpop(qArteria); i++) {

        ENT *eAux = entinq(qArteria, i);
        VEICULO* vAux = eAux->udat;

        if(vAux->d0 > x1 - 10 && vAux->d0 < x4 + 10)
        {
            Modelo[eAux->type].quant_trecho++;
        }
    }

    for(j = 0; j < NMODELOS; j++) {

        denstotal = denstotal + Modelo[j].quant_trecho *
            (Modelo[j].length + 2.5);

    }
}

if(TimeNow == (TIMETYPE) (warmup + tmax) + 1)
{
    if(nfaixas == 2) densmedia = denstotal / ((2*(ext_rampa +
        compr_crit))*tmax);

    else densmedia = denstotal / ((x4 + 10) - (x1 - 10))*tmax);
}

// avança tempo de simulação

delayent(e, TAU);

}

// fim (na verdade, o programa nunca chega aqui !!!!)

dispose(e);

ENDSCRIPT
}

//-----
// funções MosWin
//-----
int MosWinRead (char* pszFile) {

    long ltime;
    int stime;
    int i = 0;
    int p1, p2, p3, p4;
    float fluxoInicial;

```

```

float vmax0 = 0;

greide = 0;

// abre arquivo de dados de inicialização

h = fopen (pszFile, "rt");
if (!h) err(CANTOPENFILE, pszFile);
ScanExact = TRUE;

MsgShow ("lendo dados...\n\n\n");

// lê dados do arquivo input

scandata(h, "no.faixas: %d", &nfaixas);
scandata(h, "experimento: %d", &nexp);
scandata(h, "fluxo: %d", &fluxo);
scandata(h, "truck: %f", &truck);
scandata(h, "rp: %f", &rp);
scandata(h, "ap: %f", &ap);
scandata(h, "rl: %f", &rl);

truck = (float) truck/100;
ap = (float) ap/100;
rp = (float) rp/100;
rl = (float) rl/100;

// dados da topologia da via

x0 = 0;

scandata(h, "EXT_RAMPA: %d", &ext_rampa); // extensão da rampa
scandata(h, "COMPR_CRIT: %d", &compr_crit);
scandata(h, "GREIDE: %lf", &greide); // greide na rampa
scandata(h, "MONTANTE: %d", &mont); // extensão a montante da rampa
scandata(h, "JUSANTE: %d", &jus); // extensão a jusante da rampa

compr_crit = ext_rampa * compr_crit/100; // no arquivo lê-se o percentual
// da rampa sem faixa adicional

x1 = x0 + mont;

x2 = x1 + compr_crit;

x3 = x1 + ext_rampa;

x4 = x3 + 120;

x5 = x3 + jus;

// Tempo de Simulação - B - Bchapeu

scandata(h, "tmax: %d", &tmax);
scandata(h, "warmup: %d", &warmup);
scandata(h, "cooloff: %d", &cooloff);
scandata(h, "desacel: %f", &desacel);
scandata(h, "desacelest: %f", &desacelest);

TimeEnd = warmup + tmax + 1; //warmup + tmax + cooloff;

nDestruídos = 0;
nCriados = 0;
temposim = 0;
nEntidades = 0;
SomaVMP = 0;

```

```

VMP = 0;
densmedia = 0;
denstotal = 0;

hh = 0;
mm = 0;
ss = 0;

// fecha data.txt

fclose(h);

// abre arquivo de dados

f = fopen("velocidade.txt", "wt" );           // arquivo com tempos de viagem
if (!f) err(CANTOPENFILE, "velocidade.txt");
ScanExact = TRUE;

// cria a fila

qArteria = new_queue ("Arteria", INFINITE_CAP, Q_STATS);

// cria trechos da artéria

Trecho[0].xini      = x0;
Trecho[0].xfim     = x1;
Trecho[0].len      = Trecho[0].xfim;
Trecho[0].greide   = 0.00;
Trecho[0].vmax     = 100/3.6;//Trecho[0].vmax/3.6;
Trecho[0].nfaixas  = 1;

Trecho[1].xini     = x1;
Trecho[1].xfim     = x2;
Trecho[1].len      = Trecho[1].xfim - Trecho[1].xini;
Trecho[1].greide   = (float) greide/100;
Trecho[1].vmax     = 100/3.6;//Trecho[1].vmax/3.6;
Trecho[1].nfaixas  = 1;

Trecho[2].xini     = x2;
Trecho[2].xfim     = x3;
Trecho[2].len      = Trecho[2].xfim - Trecho[2].xini;
Trecho[2].greide   = (float) greide/100;
Trecho[2].vmax     = 100/3.6;//Trecho[2].vmax/3.6;
Trecho[2].nfaixas  = nfaixas;

Trecho[3].xini     = x3;
Trecho[3].xfim     = x4;
Trecho[3].len      = Trecho[3].xfim - Trecho[3].xini;
Trecho[3].greide   = 0.00;
Trecho[3].vmax     = 100/3.6;//Trecho[3].vmax/3.6;
Trecho[3].nfaixas  = nfaixas;

Trecho[4].xini     = x4;
Trecho[4].xfim     = x5;
Trecho[4].len      = Trecho[4].xfim - Trecho[4].xini;
Trecho[4].greide   = 0.00;
Trecho[4].vmax     = 100.0/3.6;//Trecho[4].vmax/3.6;
Trecho[4].nfaixas  = 1;

// calcula comprimento da artéria

ArteriaLen = 0;
for (i = 0; i < NTRECHOS; i++) {
    ArteriaLen += Trecho[i].len;
}

```

```

}

// calcula o headway para cada veículo

fluxoInicial = (float)fluxo/3600; //fluxo em veic/segundo

// inicializa modelos

// Caminhão do tipo AP 174 kg/kW - AZUL
strcpy(Modelo[0].nome, "RelMedia");
Modelo[0].m = 1/(truck*ap*fluxoInicial);
Modelo[0].l = Modelo[0].m * 0.80;
Modelo[0].massa = 42120.0;
Modelo[0].mta = 10370.0;
Modelo[0].potencia = 242.7;
Modelo[0].cd = 0.8;
Modelo[0].A = 7.5;
Modelo[0].length = 17.0;
Modelo[0].vmax = 100/3.6;
Modelo[0].b = desacel;
Modelo[0].bchapeu = desacelest;
Modelo[0].icone = IC_MEDIA;

// Caminhão do tipo RP 197 kg/kW - VERDE
strcpy(Modelo[1].nome, "RelAlta");
Modelo[1].m = 1/(truck*rp*fluxoInicial);
Modelo[1].l = Modelo[1].m * 0.80;
Modelo[1].massa = 21850.0;
Modelo[1].mta = 8565.0;
Modelo[1].potencia = 111.2;
Modelo[1].cd = 0.7;
Modelo[1].A = 6.5;
Modelo[1].length = 9.0;
Modelo[1].vmax = 88/3.6;
Modelo[1].b = desacel;
Modelo[1].bchapeu = desacelest;
Modelo[1].icone = IC_BAIXA;

// Caminhão do tipo RL 101 kg/kW - ROSA
strcpy(Modelo[2].nome, "RelBaixa");
Modelo[2].m = 1/(truck*rl*fluxoInicial);
Modelo[2].l = Modelo[2].m * 0.80;
Modelo[2].massa = 10469.0;
Modelo[2].mta = 6965.0;
Modelo[2].potencia = 103.3;
Modelo[2].cd = 0.87;
Modelo[2].A = 7.7;
Modelo[2].length = 7.0;
Modelo[2].vmax = 90/3.6;
Modelo[2].b = desacel;
Modelo[2].bchapeu = desacelest;
Modelo[2].icone = IC_ALTA;

// Carro do tipo CPE 17 kg/kW - CARRO
strcpy(Modelo[3].nome, "Automovel");
Modelo[3].m = 1/((1 - truck)*fluxoInicial);
Modelo[3].l = Modelo[3].m * 0.80;
Modelo[3].massa = 1180.0;
Modelo[3].mta = 590;
Modelo[3].potencia = 68.0;
Modelo[3].cd = 0.3;
Modelo[3].A = 2.0;
Modelo[3].length = 4.0;
Modelo[3].vmax = 185/3.6;//195/3.6;

```

```

Modelo[3].b          = desacel;
Modelo[3].bchapeu   = desacelest;
Modelo[3].icone     = IC_CARRO;

// gera índices de veículos aleatoriamente

ltime = time(NULL);
stime = (unsigned) ltime/2;
srand(stime);

p1=rand() % 4;

p2=rand() % 4;
while (p1 == p2)
    p2= rand() % 4;
p3 = rand() % 4;
while (p1 == p3 || p2 == p3)
    p3 = rand() % 4;
p4 = rand() % 4;
while (p1 == p4 || p2 == p4 || p3 == p4)
    p4 = rand() % 4;

// cria os veículos

create(1,                                // # of entities to create
      0, tmax,                            // time interval
      NULL,                               // interarrival function
      0,                                  // entity type
      0,                                  // priority
      0,                                  // user-defined data structure
      ScriptGerente);                    // script

create (INFINITE_ENTS,                   // # of entities to create
      0, 10000,                           // time interval
      Headway,                             // interarrival function
      3,                                   // entity type
      0,                                   // priority
      sizeof (VEICULO),                   // user-defined data structure
      ScriptVeiculo);                    // script

create (INFINITE_ENTS,                   // # of entities to create ROSA
      1, 10000,                           // time interval
      Headway,                             // interarrival function
      2,                                   // entity type
      0,                                   // priority
      sizeof (VEICULO),                   // user-defined data structure
      ScriptVeiculo);                    // script

create (INFINITE_ENTS,                   // # of entities to create
      2, 10000,                           // time interval
      Headway,                             // interarrival function
      1,                                   // entity type
      0,                                   // priority
      sizeof (VEICULO),                   // user-defined data structure
      ScriptVeiculo);                    // script

create (INFINITE_ENTS,                   // # of entities to create
      3, 10000,                           // time interval
      Headway,                             // interarrival function
      0,                                   // entity type
      0,                                   // priority
      sizeof (VEICULO),                   // user-defined data structure
      ScriptVeiculo);                    // script

```

```

// fim
return TRUE;
}

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
// generate custom report
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
int MosWinReport (char* pszFile) {

    char pszReportFile[512];
    char *p;
    FILE *q;

    // cria arquivo de saída
    strcpy(pszReportFile, pszFile);
    p = strchr(pszReportFile, '.');
    if (p) *p = 0;
    strcat(pszReportFile, ".out");

    // abre arquivo de saída

    strcpy(arquivo, "relatorio");
    strcat(arquivo, ".out");

    q = fopen(arquivo, "a");
    if (!q) err(CANTOPENFILE, arquivo);
    ScanExact = TRUE;

    fprintf(q, "\n Arquivo de Dados: %s\n\n", pszFile);

    fprintf(q, "\n Experimento: %d\n", nexp);

    fprintf(q, "\n***** Dados de Entrada *****\n");

    fprintf(q, "\n Demanda de Entrada: %d veic/h\n Percentual de Caminhões: %.0f
%%\n Extensão da Rampa: %d m\n Extensão do Comprimento Crítico: %d m\n Inclinação do
Greide: %.1f %%\n", fluxo, truck*100, ext_rampa, ext_compr_crit, greide);

    fprintf(q, "\n***** Resultados Obtidos *****\n");

    fprintf(q, "\n Veículos Coletados || Tempo de Coleta (s) || Demanda
Total(veic/h) || Velocidade Média (km/h) || Ocupação do Trecho (%%) || Demanda
Automoveis (veic/h) || Velocidade Autos (km/h) || Demanda Caminhões (veic/h) ||
Velocidade Caminhões (km/h) ||\n");

    fprintf(q, "\n          %d          ||          %d          ||          %.0f
||          %.2f          ||          %.0f          ||          %.0f
||          %.2f          ||          %.0f          ||          %.2f
||\n", nEntidades, temposim, (float) nEntidades*3600/temposim, VMP*3.6, (float)
densmedia*100, (float) nAuto*3600/temposim, VMPAuto*3.6, (float)
nCaminhao*3600/temposim, VMPCaminhao*3.6);

    fclose(q);

    fclose(f);

    return TRUE;
}

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
// MosWinAnimSetup - prepare to animate (Windows version only!)
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
int MosWinAnimSetup (char* pszFile) {

```

```

int x, y, v;

// define the size of the animation in pixels and some scale unit

animbkg      (0,                                // background bitmap
              6500, 1000,                       // pixel dimensions
              DKGREEN,                          // background color
              -100, -100,                       // logical top, left, bottom, right
              6400, 900);

// Desenha a estrada

setbrush(B_SOLID, LTGRAY, LTGRAY);
setpen(P_NULL, 1, LTGRAY);
rect(x0, 569, x5, 600);

setpen(P_SOLID, 1, BLACK);
line(x0, 600, x5, 600);
line(x0, 570, x0, 600);
line(x5, 570, x5, 600);

if(nfaixas == 1)
{
    line(x0, 570, x5, 570);

    // Desenha o Título

    settextrcolor(BLACK);
    setfont("Arial", -20, TRUE, FALSE, 0);
    x = 1300;
    y = 800;
    v = showtext(x, y, TF_CENTER, "Simulação de uma Rodovia de Tráfego
                                Ininterrupto");
}
else
{
    // Desenha o Título

    settextrcolor(BLACK);
    setfont("Arial", -20, TRUE, FALSE, 0);
    x = 1300;
    y = 800;
    v = showtext(x, y, TF_CENTER, "Simulação de uma Rodovia de Tráfego
                                Ininterrupto \n com Faixa Adicional");

    line(x0, 570, x2, 570);
    line(x4, 570, x5, 570);
    setbrush(B_SOLID, LTGRAY, LTGRAY);
    setpen(P_NULL, 1, LTGRAY);
    rect(x2, 570, x4, 540);
    setpen(P_DASH, 1, BLACK);
    line(x2, 570, x4, 570);
    setpen(P_DOT, 1, DKGRAY);
    line(x1, 600, x1, 570);
    line(x3, 600, x3, 540);
    setpen(P_DOT, 1, RED);
    line(x4 - 60, 600, x4 - 60, 540);
    setpen(P_SOLID, 1, BLACK);
    line(x4, 570, x4, 540);
    line(x2, 570, x2, 540);
    line(x2, 540, x4, 540);

    settextrcolor(BLACK);
    setfont("Arial", -10, FALSE, FALSE, 90);
}

```



```

x = x1 - 10;
y = 630;
v = showtext(x, y, TF_LEFT, "Início da Rampa");
y -= textheight (v);

settextcolor(BLACK);
setbrush(B_SOLID, BLUE, BLUE);
setfont("Arial", -10, FALSE, FALSE, 90);
x = x3 - 10;
y = 630;
v = showtext(x, y, TF_LEFT, "Fim da Rampa");
y -= textheight (v);

// Zona de Emergência

settextcolor(RED);
setfont("Arial", -10, FALSE, FALSE, 90);
x = (x3 + 60) - 10; // a partir de x3 + 60 inicia o taper
y = 630;
v = showtext(x, y, TF_LEFT, "Emergência");
y -= textheight (v);
}

// estacas de 50 e 50

settextcolor(BLACK);
setbrush(B_SOLID, BLUE, BLUE);
setfont("Arial", -8, FALSE, FALSE, 90);
y = 500;
setpen(P_SOLID, 1, BLACK);
line(x0, y+10, x5, y+10);

x = 0;

for(x = 0; x <= x5; x+=50)
{
    v = showtext(x - 6, y, TF_RIGHT, "%d m", x);
    line(x, y+15, x, y+5);
}

// define icons

// Caminhão Grande
saveicon (0, // icon number (set e->icon to this value)
          IDB_MEDIA, // resource ID (define in the resource editor)
          17, 12, // dimension in scale unit
          17, 6, // reference point in scale unit
          1, // number of frames in image
          TRUE, // solid
          WHITE); // transparent color

// Caminhão Médio
saveicon (1, // icon number (set e->icon to this value)
          IDB_ALTA, // resource ID (define in the resource editor)
          9, 12, // dimension in scale unit
          9, 6, // reference point in scale unit
          1, // number of frames in image
          TRUE, // solid
          WHITE); // transparent color

// Caminhão Pequeno
saveicon (2, // icon number (set e->icon to this value)
          IDB_BAIXA, // resource ID (define in the resource editor)
          7, 12, // dimension in scale unit

```

```

        7, 6,           // reference point in scale unit
        1,             // number of frames in image
        TRUE,         // solid
        WHITE);      // transparent color

// Carro de Passeio
saveicon (3,           // icon number (set e->icon to this value)
         IDB_CARRO,   // resource ID (define in the resource editor)
         4, 8,        // dimension in scale unit
         4, 4,        // reference point in scale unit
         1,           // number of frames in image
         TRUE,        // solid
         WHITE);      // transparent color

// done!
return TRUE;
}

////////////////////////////////////
// MosWinInit - returns TRUE if initialization was ok (Windows version only!)
////////////////////////////////////
int MosWinInit (void) {
    return TRUE;
}

```