



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

JANAILSON QUEIROZ SOUSA

**MODELAGEM MICROSCÓPICA APLICADA NA AVALIAÇÃO DO
DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA EM
INTERSEÇÕES URBANAS**

**FORTALEZA
2012**

JANAILSON QUEIROZ SOUSA

**MODELAGEM MICROSCÓPICA APLICADA NA AVALIAÇÃO DO
DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA
EM INTERSEÇÕES URBANAS**

Dissertação submetida ao Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências (M. Sc.) em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transporte.

Orientador: Prof. Flávio José Craveiro Cunto, Ph.D.

**FORTALEZA
2012**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós Graduação em Engenharia

-
- S697m Sousa, Janailson Queiroz.
 Modelagem microscópica aplicada na avaliação do desempenho da segurança viária em
interseções urbanas / Janailson Queiroz Sousa. – 2012.
 110 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Mestrado em Engenharia de
Transportes, Fortaleza, 2012.
- Área de Concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transporte.
 Orientação: Prof. Dr. Flávio José Craveiro Cunto.
1. Transportes. 2. Acidentes de trânsito. 3. Segurança de trânsito. I. Título.

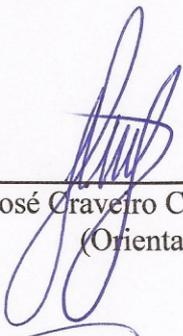
CDD 388

JANAILSON QUEIROZ SOUSA

**MODELAGEM MICROSCÓPICA APLICADA NA AVALIAÇÃO DO
DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA EM
INTERSEÇÕES URBANAS**

Dissertação submetida ao Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências (M. Sc.) em Engenharia de Transportes.

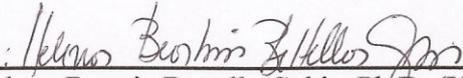
Aprovada em: 17 / 07 / 2012.



Flávio José Craveiro Cunto, Ph.D. (UFC)
(Orientador)



Manoel Mendonça de Castro Neto, Ph.D. (UFC)
(Examinador Interno)



Helena Beatriz Bettella Cybis, Ph.D. (UFRGS)
(Examinadora Externa)

DEDICATÓRIA

Era uma vez, um menino que precisava estudar sob a luz de uma lamparina para reforçar as lições do dia e fazer as tarefas de casa com sua professora “particular”.

...

Entre uma lição e outra este menino sonhava acordado acompanhando a fumaça que saía das chamas daquela lamparina.

...

Nestes momentos o menino usava o seu pensamento de criança para imaginar qual seria o resultado daquele seu esforço noturno, já que sua professora sempre lhe dizia que um dia ele iria entender que aquele esforço seria recompensado e que o caminho para ele se tornar um grande homem seria iluminado pelas chamas dessa lamparina que brilhava nos seus atentos olhos.

...

Não sei se aquele menino conseguiu se tornar um grande homem, mas acredito que agora ele entende a magnitude e a importância dos conselhos de sua professora e a ela dedica todo este esforço.

Obrigado por tudo Mamãe.

AGRADECIMENTOS

À Deus e a minha querida e amada Mãe, pela vida, inspiração, educação e formação de caráter que estão me proporcionando esta conquista. Aos meus queridos irmãos e irmãs. Ao meu avô Lourenço e a minha avó Nair pelo apoio e pela compreensão com a redução das agradáveis visitas que nos proporcionam alegria e contentamento mútuo.

Ao meu orientador Prof. Flávio Cunto pela paciência, ensinamentos e estímulo em todos os momentos.

À Universidade Federal do Ceará (UFC-CE), e a todos os professores do Departamento de Engenharia de Transportes, em especial aos professores Felipe, Manoel, Bruno e os demais que contribuíram no meu desenvolvimento acadêmico. A querida Ivone pela solicitude e disposição de sempre que me auxiliam ao longo dessa jornada.

À Autarquia Municipal de Trânsito, Serviços Públicos e Cidadania de Fortaleza (AMC), através dos seus profissionais Rosina Lopes, Glauber Melo, Elton Tavares, Marco Antônio, e os demais pela ajuda ao longo do processo de elaboração desta pesquisa.

Aos colegas e amigos de trabalho pelo apoio e companheirismo, em especial aos amigos Rubens Araújo e Erica Vanessa. E aos amigos e companheiros de todas as horas Hélio Henrique, Rafael Araújo, Daniel Alan, Iderlan Medeiros, Américo Farias e Allisson Cordeiro pela força, amizade e incentivos de sempre.

Aos amigos e colegas de mestrado Eduardo Aquino, André Medeiros, André Lopes, Carolina Lopes e Marília Gouveia pela agradável convivência e apoio mútuo ao longo dos anos de mestrado. Nós sabemos o quanto é difícil.

À Érica Rodrigues, pelo carinho, paciência, compreensão e companheirismo nos momentos fáceis e principalmente nos difíceis, que me mantiveram com forças para seguir em frente e concluir este trabalho.

E a todas as demais pessoas que não foram citadas, mas que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

A todos o meu Muito Obrigado!

“Se quiser fazer algo bem feito. O faça com o apoio dos amigos, pois no mínimo terá alguém para lhe dizer, sinceramente, que você pode estar errado.”

(Janailson Sousa)

Resumo da Dissertação submetida ao PETRAN/UFC como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências (M. Sc.) em Engenharia de Transportes.

MODELAGEM MICROSCÓPICA APLICADA NA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA EM INTERSEÇÕES URBANAS

Janailson Queiroz Sousa

Julho/2012

Orientador: Flávio José Craveiro Cunto

A modelagem microscópica do fluxo de veículos na infraestrutura viária urbana tem se constituído uma potencial ferramenta para a análise do desempenho da segurança viária (DSV) frente aos tradicionais métodos de análise com base nos estudos observacionais. Para consolidar essa abordagem existem desafios práticos e metodológicos que foram tratados como objetivos nesta pesquisa, dentre os quais se destacam: (i) a identificação de indicadores *proxy* eficientes para as análises de segurança nesse ambiente; (ii) a análise dos algoritmos de microsimulação quanto a sua eficácia de representação dos processos de condução no meio urbano, (iii) a definição de um procedimento sistemático de estimação do DSV com o uso de microsimuladores de tráfego e (iv) a validação dos indicadores sintéticos usados para medir o DSV. Diante deste contexto, esta pesquisa tem como objetivo geral apresentar uma contribuição metodológica para a utilização da microsimulação de tráfego nas análises do DSV no processo de planejamento tático operacional dos sistemas de transporte com foco nas interseções urbanas. O procedimento metodológico proposto considerou a realização de cinco etapas: 1) seleção e caracterização do local de estudo, 2) codificação do local no microsimulador, 3) planejamento da simulação, 4) calibração e validação do modelo e 5) estimação dos indicadores. A aplicação do procedimento considerou três interseções semaforizadas da cidade de Fortaleza, utilizando a plataforma de microsimulação de tráfego VISSIM. Os resultados alcançados indicaram que foi possível estimar o DSV com relativo nível de confiança e um procedimento complementar de validação dos indicadores revelou um nível de consistência entre o número estimado de conflitos de interações longitudinais e o número observado de colisões traseiras observadas em campo.

Palavras-chave: Microsimulação de Tráfego, Segurança viária, Indicadores *Proxy* e Tráfego urbano.

Abstract of Thesis submitted to PETRAN/UFC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.) in Transportation Engineering

MICROSCOPIC MODELING TO ANALYZE SAFETY PERFORMANCE IN URBAN INTERSECTIONS

Janailson Queiroz Sousa
July/2012

Aadvisor: Flávio José Craveiro Cunto

The microscopic modeling of traffic flow in urban road infrastructure has proven to be a potential tool for analyzing the performance of road safety (DSV) compared to traditional methods of analysis based on observational studies. To consolidate this approach there are practical and methodological challenges that have been treated as objectives in this research, among which are: (i) the identification of efficient synthetic indicators for the analysis of safety in this environment, (ii) the analysis of the microscopic algorithms and their effectiveness in the representation of the driving processes in urban areas, (iii) the definition of a systematic procedure for estimating the DSV using a microscopic platform and (iv) concerning the validation of synthetic indicators used to measure the DSV. Given this context, this research intended to provide a general methodological contribution to the use of microscopic traffic simulators for the analysis of the DSV in tactical and operational transportation systems planning process with focus on urban intersections. The proposed methodological procedure considered the completion of five steps: 1) selection and site characterization study, 2) coding the site in microsimulator 3) planning of the simulation, 4) calibration and validation of the model and 5) estimation of the indicators. The procedure considered three signalized intersections in the city of Fortaleza, using VISSIM © as simulation platform. The results indicated that it was possible to estimate the DSV with relative confidence level and a complementary procedure for validation of the indicators showed a consistent level of consistency between the estimated number of conflicts of longitudinal interactions and observed number of rear end collisions observed in the field.

Keywords: Microscopic simulation traffic, Road safety, Proxy indicators and Urban traffic.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 2.1 – Processo decisório de análise de alternativas do planejamento tático operacional (PTO) considerando a SV.....	10
Figura 2.2 – Organização do HSM.....	17
Figura 2.3 – Representação do <i>continuum</i> da segurança viária.....	19
Figura 2.4 – Gráfico para estimação da severidade dos conflitos.	20
Figura 2.5 – Local e trechos considerados no estudo.	22
Figura 2.6 – (a) Local da pesquisa com a projeção do “grid” de coordenadas e (b) Mapa de distribuição espacial dos conflitos detectados pelo TTC	23
Figura 2.7 – Representação de exemplos de simuladores de condução.	25
Figura 2.8 – Elementos do sistema viário e suas relações com os níveis de planejamento e com os modelos de simulação.	26
Figura 3.1 – Representação da curva empírica do TTC	33
Figura 3.2 – Exemplo de medição do PET.....	34
Figura 3.3 – Exemplo de medição do ET	35
Figura 3.4 – Exemplo de medição do GT.....	36
Figura 3.5 – Função densidade de probabilidade da MADR	43
Figura 3.6 – Representação de uma colisão de abalroamento lateral	44
Figura 3.7 – Visão geral do processo de modelagem microscópica.....	46
Figura 3.8 – Ilustração dos processos opcional e obrigatório de mudança de faixa.....	51
Figura 3.9 – Disposições de estacionamento.....	54
Figura 3.10 – Disposições dos pontos de parada.....	55
Figura 3.11 – Ilustração do processo de ultrapassagem de motocicletas durante o sinal vermelho.	56
Figura 3.12 – Visualização em 3D de uma simulação no VISSIM.....	58
Figura 3.13 – Ângulo para cada tipo de conflito	59
Figura 4.1 – Tomada de Decisão no Planejamento Tático e Operacional (PTO) considerando a microssimulação na análise do DSV.....	66
Figura 4.2 – Fluxograma das etapas metodológicas.....	68
Figura 4.3 – Codificação dos atributos geométricos no simulador.	73
Figura 4.4 – Fluxograma de validação dos indicadores <i>proxy</i>	75
Figura 5.1 – Disposição da Interseção #168 (Av. Dedé Brasil x Av. dos Expedic.).....	78

Figura 5.2 – Disposição da Interseção #243 (Av. Gen. M. Borges x Av. Rogac. Leite) ..	79
Figura 5.3 – Disposição da Interseção #250 (Av. Gen. M. Borges x Av. G. R. Barbosa)	79
Figura 5.4 – Área de controle do CTAFOR com a locação das inters. do experimento. ..	80
Figura 5.5 – Codificação dos dados geométricos da Int. 250.....	85
Figura 5.6 – Codificação dos dados fluxo e de classificacão veicular.....	85
Figura 5.7 – Codificação dos dados semaforicos.	86
Figura 5.8 – Gráficos de Fluxo x Conflitos.....	90
Figura 5.9 – Comparação dos Números de Conflitos x Acidentes.....	95

LISTAS DE TABELAS

Tabela 2.1 – Modelos de previsão para interseções.....	14
Tabela 2.2 – Modelos de previsão para segmentos.	14
Tabela 2.3 – Escopos de aplicação dos Modelos de Simulação.	27
Tabela 3.1 – Graus de severidade e intervalos de desaceleração.....	38
Tabela 3.2 – Níveis de desaceleração	38
Tabela 3.3 – Valores base de brechas críticas (s)	52
Tabela 5.1 – Características geométricas das interseções.....	82
Tabela 5.2 – Amostra de atributos de tráfego para interseção # 168.....	82
Tabela 5.3 – Resumo dos atributos de trafego.....	83
Tabela 5.4 – Calibração dos parâmetros de entrada do VISSIM.....	87
Tabela 5.5 – Assumindo parâmetros truncados da distribuição normal para MADR	87
Tabela 5.6 – Resultados da estimação do indicador TTC na interseção #168 (<i>continua</i>)	88
Tabela 5.7 – Resultados da estimação dos indicadores para as três interseções	89
Tabela 5.8 – Número de simulações para confirmar diferenças no DSV.....	91
Tabela 5.9 – Amostra dos dados de acidentes obtidos na base do SIAT-FOR.....	93
Tabela 5.10 – Total de colisões registradas e “válidas” (2007-2009)	94
Tabela 5.11 – Colisões traseiras observadas e conflitos simulados.	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- **CPI:** *Crash Potential Index.*
- **CTAFOR:** Divisão de Controle de Tráfego em Área de Fortaleza.
- **DENATRAN:** Departamento Nacional de Trânsito.
- **DRAC:** *maximum deceleration rate to avoid a crash.*
- **DSV:** Desempenho da Segurança Viária.
- **EIVSIN:** Estimador de Interações Veiculares Sintéticas.
- **ET:** *Encroachment Time.*
- **FHWA:** *Federal Highway Administration.*
- **GT -** *Gap Time.*
- **HCM:** *Highway Capacity Manual*
- **HSM:** *Highway Safety Manual.*
- **IPEA:** Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.
- **ITE:** *Institute of Transportation Engineers.*
- **ITS:** *Intelligent Transportation Systems.*
- **MADR:** *Maximum Available Deceleration Rate.*
- **MLG:** Modelos Lineares Generalizados.
- **MPA:** Modelo de Previsão de Acidentes.
- **MS:** Ministério da Saúde.
- **OMS:** Organização Mundial de Saúde.
- **PET:** *Post-Encroachment Time.*
- **PGV:** Polo Gerador de Viagem.
- **PNT:** Política Nacional de Trânsito.
- **PSD:** *Proportion of Stopping Distance*

- **PST**: Planejamento dos Sistemas de Transporte.
- **PTO**: Planejamento Tático Operacional.
- **SCOOT**: *Split Cycle Offset Optimisation Technique*.
- **SGT**: Sistema de Gerenciamento de Tráfego.
- **SPM** – *Safety Performance Measure* (Indicadores proxy).
- **SV**: Segurança Viária.
- **TACT**: Técnica de Análise de Conflitos de Tráfego.
- **TD**: Tomada de Decisão.
- **TET**: *Time Exposed Time to Collision*.
- **TIT**: *Time Integrated Time to Collision*.
- **TPH**: *Transportation Planning Handbook*.
- **TRB**: *Transportation Research Board*.
- **TTA**: *Time to Accident*.
- **TTC**: *Time to Collision*.
- **UD**: *Unsafty Density Parameter*.
- **VDMA**: *Volume Médio Diário Anual*

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos da pesquisa.....	4
1.2.1. <i>Objetivo geral</i>	4
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	4
1.3. Estrutura da pesquisa	5
CAPÍTULO 2	7
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1. Introdução.....	7
2.2. A segurança viária no planejamento de transportes do meio urbano.....	7
2.3. Desempenho operacional da segurança viária.....	12
2.3.1. <i>Estudos observacionais tradicionais</i>	12
2.3.1.1. <i>Hsm - highway safety manual</i>	16
2.3.2. <i>Técnica de análise de conflitos de tráfego</i>	18
2.3.3. <i>Outras técnicas</i>	24
2.4. Considerações finais	28
CAPITULO 3	29
3. MICROSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO APLICADA A SEGURANÇA VIÁRIA	29
3.1. Introdução.....	29
3.2. Aplicação da microsimulação de tráfego na segurança viária	29
3.2.1. <i>Indicadores baseados no tempo</i>	31
3.2.1.1. <i>Tempo para a colisão (TTC – time to collision)</i>	31
3.2.1.2. <i>Tempo para o acidente (TTA - time to accident)</i>	33
3.2.1.3. <i>Tempo após a invasão (PET - post-encroachment time)</i>	34
3.2.1.4. <i>Tempo de invasão (ET - encroachment time)</i>	35
3.2.1.5. <i>Tempo de intervalo (GT – gap time)</i>	35
3.2.2. <i>Indicadores baseados na energia de frenagem</i>	36

3.2.2.1. Taxa de desaceleração necessária para evitar a colisão (<i>drac</i> - deceleration rate to avoid the crash).....	37
3.2.2.2. Proporção de distância de parada (<i>psd</i> - proportion of stopping distance).....	39
3.2.3. Índices de segurança	39
3.2.3.1. Tempo de exposição do tempo para a colisão (<i>TET</i> - time exposed time to collision).....	40
3.2.3.2. Tempo integrado do tempo para a colisão (<i>TIT</i> - time integrated time to collision).....	40
3.2.3.3. Parâmetro de densidade de insegurança (<i>ud</i> - unsafety density parameter).....	41
3.2.3.4. Índice de potencial para acidentes (<i>cpi</i> - crash potential index).....	42
3.3. Aspectos da modelagem de tráfego para análise do dsv	45
3.3.1. Entrada de dados	46
3.3.1.1. Aspectos geométricos	47
3.3.1.2. Controle do tráfego	47
3.3.1.3. Dados de demanda	48
3.3.2. Algoritmos de modelagem	48
3.3.2.1. Perseguição veicular	48
3.3.2.2. Mudança de faixa	51
3.3.2.3. Aceitação de brecha	52
3.3.2.4. Modelos e fatores complementares	53
3.3.3. Saída de dados	59
3.3.4. Plataforma de microsimulação	60
3.3.5. Calibração/validação	61
3.3.6. Validação do desempenho da segurança viária	63
3.4. Considerações finais	63
CAPÍTULO 4	65
4. METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA COM USO DA MICROSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO	65
4.1. Introdução.....	65
4.2. Avaliação do DSV no processo de planejamento.....	65
4.3. Metodologia de obtenção do DSV	67

4.3.1.	<i>Seleção e caracterização do local de estudo</i>	68
4.3.1.1.	<i>Aspectos geométricos</i>	69
4.3.1.2.	<i>Aspectos de operação do tráfego</i>	69
4.3.1.3.	<i>Aspectos da demanda</i>	69
4.3.2.	<i>Planejamento da simulação</i>	70
4.3.3.	<i>Codificação da rede no microssimulador</i>	72
4.3.4.	<i>Calibração e validação do modelo de microssimulação</i>	73
4.3.5.	<i>Estimação dos indicadores proxy</i>	74
4.4.	Validação dos indicadores obtidos na microssimulação	74
4.5.	Considerações finais	76
	 CAPÍTULO 5	 77
5.	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA EM TRÊS INTERSEÇÕES URBANAS DA CIDADE DE FORTALEZA - CE	77
5.1.	Introdução	77
5.2.	Aplicação piloto	77
5.2.1.	<i>Definição das interseções</i>	77
5.2.2.	<i>Caracterização das interseções</i>	80
5.2.2.1.	<i>Aspectos geométricos</i>	81
5.2.2.2.	<i>Aspectos do controle de tráfego e do fluxo veicular</i>	82
5.2.3.	<i>Codificação das interseções no simulador</i>	84
5.2.4.	<i>Calibração dos parâmetros e preparativos finais</i>	86
5.2.5.	<i>Resultados da estimação dos indicadores proxy</i>	88
5.3.	Validação relativa dos indicadores proxy	92
5.6.1.	<i>Coleta dos dados de acidentes</i>	92
5.6.2.	<i>Análise comparativa dos acidentes x conflitos</i>	94
5.4.	Considerações finais	95
	 CAPÍTULO 6	 97
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	97
6.1.	Conclusões	97
6.2.	Recomendações	101

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
APÊNDICES	108
APÊNDICE A – Resultados globais da simulação para a interseção #168.	108
APÊNDICE B – Resultados globais da simulação para a interseção #243.	109
APÊNDICE C – Resultados globais da simulação para a interseção #250.	110

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS, 2008) os acidentes de trânsito são responsáveis por mais de um milhão de óbitos e ainda por 50 milhões feridos anualmente em todo o mundo. Apesar da OMS reconhecer o problema, como uma importante questão de saúde pública, a nível mundial, o problema tem aumentado consideravelmente. No Brasil, segundo dados do Ministério da Saúde, somente no ano de 2010 mais de 40 mil pessoas perderam a vida em decorrência dos acidentes de trânsito (MS, 2011) o que representa um aumento de 24% em relação ao ano de 2002 quando ocorreram cerca de 32 mil mortes. De acordo com o IPEA (2006) são gastos aproximadamente 22 bilhões de reais por ano para custear as externalidades negativas causadas pelos acidentes de trânsito no Brasil e a tendência é que este quadro se agrave ainda mais nos próximos anos.

No ambiente urbano as interseções viárias concentram grande parte dos acidentes de trânsito em virtude do elevado grau de interação entre usuários, veículos e via. No caso das cidades brasileiras, este quadro é ainda mais crítico quando se trata das interseções de vias arteriais, pois segundo Paula (2006) a maior parte dos deslocamentos urbanos é feita nessas vias, tendo em vista a escassez de vias com características expressas. Este fato faz com que a gestão municipal, sob uma ótica do planejamento tático operacional, aloque mais recursos para avaliar e planejar a circulação nesses ambientes com o objetivo de diminuir os custos no sistema de transporte.

Segundo Meyer e Miller (2001) o planejamento dos sistemas de transporte deve funcionar como um catalisador das alternativas que vão propiciar o desenvolvimento sustentável de uma comunidade. Para tornar possível essa tarefa é necessária a definição de critérios que, por sua vez, façam uso de indicadores (diretos ou indiretos) dos sistemas de transporte que tenham os seus impactos sociais e econômicos mensuráveis. Sob esta ótica, Ferreira (2010) aponta que há várias décadas já se identificou o potencial da Segurança Viária (SV) como um desses indicadores que possuem influência social e econômica negativa para a sociedade, deste modo, o autor defende que não é mais aceitável se planejar uma ação no

sistema de transporte sem considerar a análise do desempenho da segurança viária (DSV) e seus impactos.

Apesar da referida importância da SV, percebe-se que, na prática, ela não vem sendo um fator determinante no processo de tomada de decisão dos gestores públicos permanecendo, desta forma, com o seu potencial para auxiliar no processo de planejamento dos sistemas de transportes explorado de modo muito incipiente. Ferreira (2010) aponta que este quadro pode ser consequência da deficiência das ferramentas de avaliação do desempenho da segurança viária (DSV) em cenários futuros ou ainda o despreparo e desconhecimento acerca do modo como tais ferramentas podem ser incluídas no processo habitual de Tomada de Decisão (TD).

A abordagem mais tradicional de avaliação do DSV consiste na aplicação dos chamados “estudos observacionais” que podem ser considerados como um processo de aprendizagem passivo em que o conhecimento é gerado a partir da análise meticulosa dos resultados de eventos que não foram formalmente projetados para investigar o problema (CUNTO, 2008). Apesar de ser bastante difundida a técnica dos estudos observacionais apresenta alguns desafios metodológicos relacionados à natureza da medida de desempenho utilizada em seus métodos que é o número de acidentes de trânsito:

- a) Os estudos observacionais compreendem uma abordagem de natureza reativa, ou seja, conclusões significativas só podem ser obtidas após a ocorrência de vários acidentes em certo local (BARCELÓ *et al.*, 2003; DARZENTAS *et al.*, 1980);
- b) Os métodos estão sujeitos a uma série de falhas ligadas a sua fonte primária de dados (acidentes de trânsito), tais como: o baixo índice de acidentes reportados, informações incompletas ou incorretas, erros de tabulação entre outros (DAVIS, 2004; HAUER, 2002; HIRST *et al.*, 2004);
- c) Os acidentes de trânsito são eventos aleatórios e raros que, normalmente, possuem uma dispersão excessiva nos dados (heteroscedasticidade) ficando, deste modo, sujeitos a ocorrência do excesso de zeros na base de dados e ao fenômeno de regressão a média. (LORD, 2006; MIRANDA-MORENO, 2006; ABDEL-ATY *et al.*, 2005).

Estes desafios metodológicos tornam os modelos estatísticos aplicados nos estudos observacionais menos confiáveis o que, por sua vez, dificulta a aplicação da técnica e consequentemente a inserção de modo sistêmico da análise do DSV no processo de planejamento dos sistemas de transporte. Neste contexto, apresenta-se a seguir o problema de pesquisa que foi o grande motivador do desenvolvimento desta pesquisa:

As metodologias tradicionais de análise do DSV não tem tornado possível a inserção da segurança viária (SV) como um indicador determinante no processo de tomada de decisão do planejamento dos sistemas de transporte.

No o âmbito da contextualização apresentada, esta pesquisa sugere que a análise do DSV através da ferramenta de simulação microscópica de tráfego pode ser um processo alternativo para elevar as discussões sobre a SV no processo de planejamento. Inicialmente, a técnica foi usada de forma pioneira, com relativo sucesso, como ferramenta de análise do desempenho operacional de sistemas de transporte. Entretanto, com o desenvolvimento computacional e com a evolução dos métodos de coleta de dados o seu uso ganhou uma maior aplicabilidade nos estudos de segurança viária e passou a ser estudada sistematicamente ao longo da última década (ARCHER, 2005; BARCELÓ *et al.*, 2003; CUNTO, 2008).

A aplicação da microssimulação de tráfego nos estudos de segurança viária baseia-se na análise dos indicadores *proxy* de segurança obtidos sinteticamente através dos resultados das interações veiculares simuladas em uma plataforma computacional. Estes indicadores tomam como base o conceito do *continuum* da segurança viária, ou seja, esses indicadores procuram representar de maneira contínua o nível de interação espaço temporal entre os veículos da rede simulada (HYDÉN, 1987; GETTMAN e HEAD, 2003; ARCHER, 2005; HUGUENIN *et al.*, 2005). Dentre os principais desafios para consolidação dessa abordagem são apontados: a) a escolha dos indicadores *proxy* e a necessidade de informações detalhadas para o seu cálculo no mundo real; b) a definição de uma plataforma de simulação que atenda os requisitos mínimos para uma análise de SV com base em indicadores *proxy*; c) a necessidade de um processo diferenciado de calibração e validação que considere medidas de desempenho operacional e de segurança e d) a necessidade de validação do indicador proposto com situações comprovadas de elevado risco de colisão (HAUER, 1978; ARCHER, 2005; SAUNIER e SAYED, 2007; CUNTO, 2008).

Diante do que foi apresentado, destaca-se a seguir algumas questões de pesquisa a serem investigadas no desenvolvimento desta pesquisa para análise do DSV no meio urbano brasileiro:

- a) É possível aperfeiçoar a avaliação do desempenho de segurança viária utilizando indicadores obtidos com microssimulação de tráfego como alternativa ao uso da frequência de acidentes de trânsito associado a um determinado local?
- b) Quais são os indicadores sintéticos de segurança viária que refletem de forma mais satisfatória o desempenho da segurança?
- c) Quais as principais características dos modelos de condução e representação da rede das plataformas de simulação?
- d) É possível validar os indicadores de desempenho obtidos sinteticamente com outros indicadores que representem o DSV?

A partir do desenvolvimento das questões de pesquisa foi possível definir os objetivos da pesquisa que são apresentados a seguir.

1.2. Objetivos da pesquisa

1.2.1. Objetivo geral

Apresentar uma contribuição metodológica para a utilização da microssimulação de tráfego nas análises do DSV no processo de planejamento tático operacional dos sistemas de transporte com foco nas interseções urbanas.

1.2.2. Objetivos específicos

- a) Investigar quais indicadores, obtidos sinteticamente com o uso da microssimulação são os mais eficientes para medir o desempenho de segurança viária no ambiente urbano.
- b) Avaliar os principais modelos comportamentais e de construção da rede das plataformas de microssimulação em relação à qualidade e ao nível de

representação do processo de condução para sua aplicação em análises do DSV no meio urbano.

- c) Propor um procedimento sistemático para estimar o DSV em interseções urbanas com o uso da microssimulação de tráfego.
- d) Validar a modelagem do DSV obtido com os indicadores do modelo de microssimulação com séries históricas de acidentes.
- e) Investigar a adequabilidade da metodologia de análise do DSV através de uma aplicação piloto em interseções urbanas da cidade de Fortaleza.

1.3. Estrutura da pesquisa

Esta pesquisa de mestrado foi desenvolvida em seis capítulos, a contar com uma introdução realizada no presente capítulo. Este conjunto de capítulos busca apresentar uma sequência lógica de definição dos conceitos e métodos envolvidos na realização desta pesquisa.

O Capítulo 2 trata da fundamentação teórica do papel da SV no processo de planejamento dos sistemas de transportes e da análise do desempenho da segurança viária. Este capítulo apresenta conceitos, características e metodologias de obtenção dessa análise com um enfoque crítico em relação as suas aplicações.

Em seguida, o Capítulo 3 apresenta os principais aspectos do emprego da ferramenta de microssimulação de tráfego na medição do DSV. Além de um breve histórico a respeito do emprego da microssimulação em estudos de segurança viária o capítulo também pretende apresentar um esforço de investigação das medidas sintéticas de DSV, bem como das principais características dos algoritmos de modelagem com um enfoque na qualidade da representação do processo de condução para as análises do DSV no meio urbano.

Por sua vez, o Capítulo 4 descreve a metodologia desenvolvida para análise do DSV de interseções viárias do meio urbano com a qual se espera contribuir na inserção da SV no processo de planejamento dos sistemas de transporte. Posteriormente, o Capítulo 5 apresenta os resultados da aplicação piloto da metodologia descrita no Capítulo 4 para um conjunto de três interseções específicas da cidade de Fortaleza.

Por fim, no Capítulo 6 consta a apresentação e análise crítica geral dos resultados obtidos nesta pesquisa, bem como as considerações finais acerca do seu objetivo. Também neste capítulo são listadas as recomendações para novas pesquisas a respeito do tema estudado.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Introdução

O Capítulo 2 apresenta uma base teórica a respeito da integração da segurança viária no processo de planejamento de transportes e ainda as metodologias empregadas para análise tradicional do desempenho da segurança viária (DSV). De modo complementar é apresentada uma sucinta discussão sobre o enquadramento dessa pesquisa no contexto dos níveis de planejamento, nos níveis de agregação do sistema viário e nos tipos de modelos de análise. O objetivo é apresentar os principais conceitos relacionados às análises de segurança e a sua aplicabilidade no planejamento de transportes, de modo a facilitar o entendimento dos métodos empregados ao longo desta pesquisa.

2.2. A segurança viária no planejamento de transportes do meio urbano

Nas últimas décadas os sistemas de transportes do meio urbano tem recebido uma crescente atenção política motivada pela necessidade de se promover um desenvolvimento sustentável que propicie uma qualidade de vida para os seus usuários. Neste sentido a aplicação do processo de planejamento nesses sistemas tem se tornado uma atividade necessária para os órgãos públicos que têm o dever de garantir o desenvolvimento e a qualidade de vida das comunidades urbanas.

Tradicionalmente o processo de planejamento tem sido abordado em três níveis hierárquicos: estratégico, tático e operacional. Sendo o nível estratégico responsável pela identificação dos problemas e definição das diretrizes, objetivos e dos requisitos que deverão nortear as soluções a serem desenvolvidas, tem uma nuance fortemente política. Já no nível tático se desenvolvem as soluções para os problemas e requisitos impostos pelas decisões do nível estratégico, ainda sofre influência de aspectos políticos, porém os aspectos técnicos tem mais relevância. Por fim, o nível operacional contempla as atividades de execução do que foi estabelecido nos níveis estratégico e tático. Este nível também é responsável pelo fornecimento de elementos para o acompanhamento e avaliação do plano pelos mais diversos níveis (MAGALHÃES e YAMASHITA, 2009).

O planejamento do sistema de transportes (PST) é uma atividade importante que permite antecipar as consequências e avaliar os impactos de decisões que vão alterar este sistema. Para tornar possível essa atividade é necessária a definição de critérios que, por sua vez, farão uso de indicadores (diretos ou indiretos) dos sistemas de transporte que tenham os seus impactos social e economicamente mensuráveis. Sob esta ótica, Ferreira (2010) aponta que há várias décadas já se identificou o potencial da segurança viária (SV) como um desses indicadores que possuem influência social e econômica negativa para a sociedade. Deste modo, o autor defende que não é mais aceitável se planejar uma ação no sistema de transporte sem considerar a SV e seus impactos.

Apesar da referida importância da SV, tem se observado que o seu potencial para auxiliar o processo de planejamento dos sistemas de transporte tem sido explorado de modo muito incipiente. Ferreira (2010) e Sayed e Leur (2000) apontam que este quadro pode ser consequência da ausência de ferramentas de avaliação do DSV em cenários futuros ou ainda a inexistência de um procedimento prático ou estrutura de inclusão de tais ferramentas no processo habitual de Tomada de Decisão do planejamento.

No âmbito regulatório brasileiro, no ano de 2004 o governo federal através do Ministério das Cidades e do seu Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN, 2004) publicou a Política Nacional de Trânsito (PNT) que, dentre outras atividades, estabeleceu objetivos, diretrizes e metas para se reverter o grave quadro de acidentes e mortes no trânsito das cidades brasileiras. A PNT se tornou um marco para as ações do governo federal e dos órgãos integrantes do Sistema Nacional de Trânsito. Entretanto, não revelou grandes avanços para a integração da SV no processo decisório, tendo em vista que apenas indicou a necessidade de investimentos em pesquisas, mas não estabeleceu nenhum marco regulatório claro de apoio as análises de segurança.

A experiência norte americana relatada na terceira edição do Manual de Planejamento de Transporte (TPH - *Transportation Planning Handbook*) (ITE, 2009) aponta que desde a década de 60 a SV vem sendo tratada pelo governo federal americano como um problema nacional, tanto que desde o ano de 1966 vem se estabelecendo leis e marcos regulatórios aplicados a essa questão. Estas ações têm contribuído para a melhoria da segurança tendo em vista as reduções observadas no número de óbitos por milha percorrida (ITE, 2009). Entretanto, apesar de muitas medidas terem sido tomadas, até hoje não se estabeleceu de forma prática como a SV pode ser considerada nos processos de planejamento

estaduais ou das metrópoles. Neste contexto, o TPH apresenta uma proposta de inserção da SV no processo de planejamento através de seis etapas:

- a) Criar parcerias, especialmente com a comunidade de segurança;
- b) Compreender e articular o problema;
- c) Criar uma visão que considere a integração da SV no processo de planejamento da região;
- d) Desenvolver metas, objetivos e medidas de desempenho;
- e) Analisar projetos e estratégias alternativas;
- f) Monitorar a implementação e avaliar os resultados.

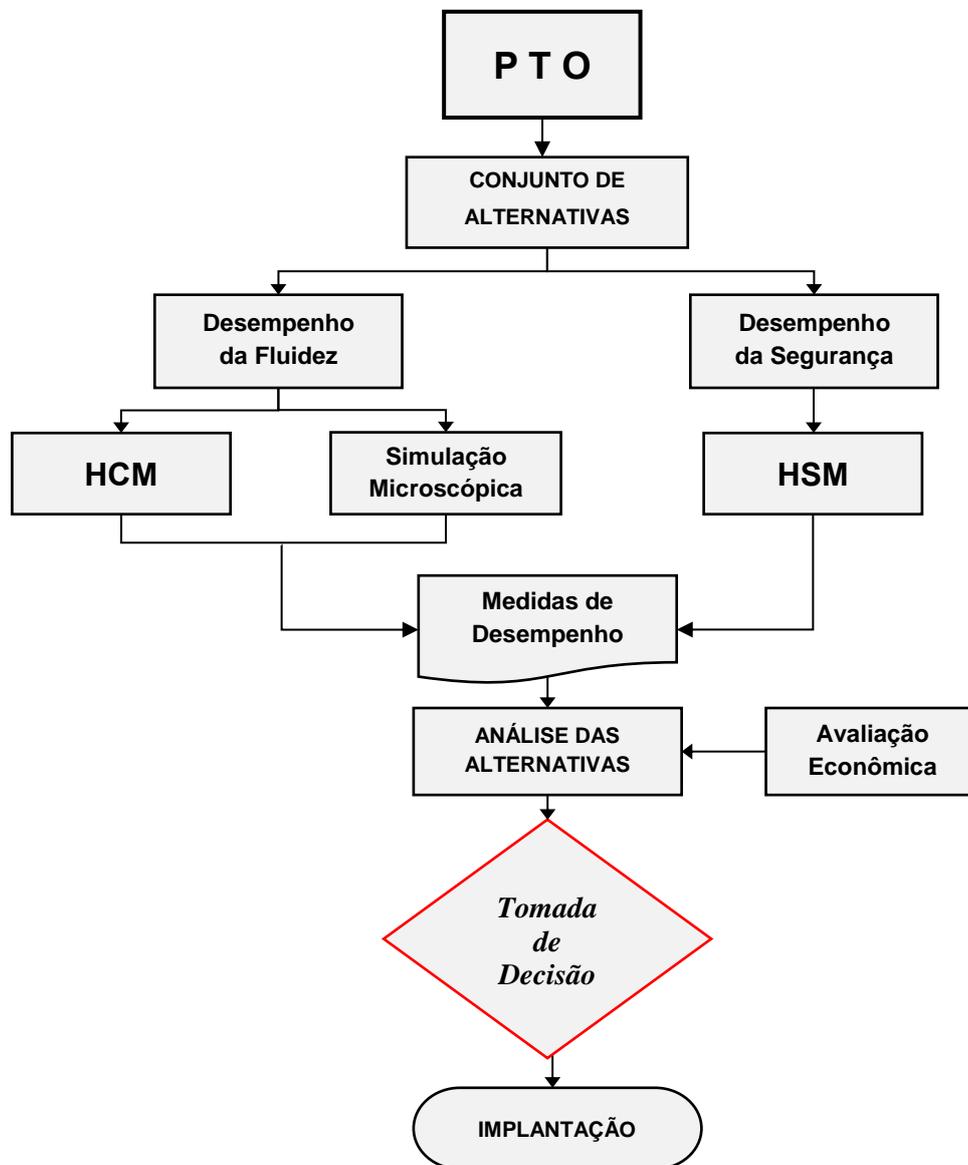
Dentre as etapas da metodologia proposta no TPH, ressalta-se a importância da etapa de desenvolvimento de metas, objetivos e de medidas de desempenho. Pois visando apresentar contribuições para o processo de planejamento o TPH apresenta uma extensa lista de medidas de desempenho relacionadas com a redução de acidentes e com a monetarização dessas reduções.

Tradicionalmente as análises de segurança viária são focadas basicamente na aplicação de modelos de previsão de acidentes (MPA) e não raro são restritas apenas ao período pós-implantação e consolidação de alguma medida de alteração do sistema viário. Neste contexto, durante a realização de uma seção técnica da reunião anual do TRB (*Transportation Research Board*), em janeiro de 1999 nos EUA, que discutia os impactos dos MPA no projeto e na operação de rodovias os participantes chegaram à conclusão de que estes modelos não estavam sendo aplicados de forma atuante no processo de tomada de decisão dessas tarefas. Sendo o principal motivo para esta constatação o fato de não existir um documento oficial para ser usado na estimativa quantitativa da segurança viária. A partir de então houve uma mobilização para, de modo inicial, determinar a necessidade, a natureza, e a viabilidade da produção de um manual de segurança viária que culminou com a publicação do *Highway Safety Manual* (HSM) em 2010. Mais detalhes sobre a estrutura do HSM serão apresentados na próxima seção.

Com a consolidação do HSM é possível observar uma mudança na estrutura do processo decisório de análise de alternativas, passando a considerar não só os “*inputs*” das análises do desempenho operacional da Fluidez, tradicionalmente efetuadas como o uso do *Highway Capacity Manual* (HCM) ou da modelagem microscópica, mas também considerando as análises do desempenho da segurança viária através da aplicação dos

métodos do HSM. Esta nova estrutura é apresentada na Figura 2.1 a seguir.

Figura 2.1 – Processo decisório de análise de alternativas do planejamento tático operacional (PTO) considerando a SV.



Fonte: Autor.

A estrutura apresentada no fluxograma da Figura 2.1 demonstra uma evolução na forma como a SV pode ser empregada no processo de planejamento. Contudo, a avaliação da segurança viária efetuada apenas pela aplicação dos MPA, que são a base do HSM, tem sofrido críticas relacionadas à natureza pouco frequente, aleatória e dispersiva dos acidentes de trânsito que torna esta medida sujeita à ocorrência de excesso de zeros na base de dados e ao fenômeno de regressão a média (LORD, 2006; MIRANDA-MORENO, 2006; ABDEL-

ATY *et al.*, 2005). Além disso, falhas no processo de coleta dos dados de acidentes tais como: o baixo índice de acidentes reportados, a existência de informações incompletas ou incorretas e ainda os erros de tabulação (DAVIS, 2004; HAUER, 2002; HIRST *et al.*, 2004) dificultam ainda mais a consolidação dessa abordagem.

Sayed e Leur (2000) reconhecem que metodologias que utilizam medidas de desempenho com base no número de acidentes são importantes e tem demonstrado bons resultados, contudo salientam que é importante evoluir para abordagens mais proativas da análise do DSV. Assim eles definiram, inicialmente, que a atuação proativa deve ser abordada ao nível de três elementos: exposição, probabilidade e consequências. Em seguida os autores identificaram os fatores que são definidos em fase de planejamento que podem afetar os três elementos:

- a) Exposição:
 - Uso do solo;
 - Estrutura e eficiência da rede viária;
 - Escolha modal;

- b) Probabilidade:
 - Capacidade de manobra dos veículos;
 - Elementos geométricos do projeto;
 - Funcionalidade viária;
 - Conflitos de tráfego;
 - Fricção da rede viária;
 - Previsibilidade da via;

- c) Consequências:
 - Proteção dos usuários vulneráveis;
 - Redução das velocidades em áreas de risco;
 - Envolvente viária.

Apesar de necessário esta pesquisa reconhece que considerar a SV em todo o processo de planejamento não é uma tarefa trivial, tendo em vista a necessidade de proposição de uma série de métodos para os diversos momentos do processo de planejamento como: definição do problema; identificação dos problemas, caracterização, diagnóstico, proposição de alternativas e análise de alternativas. Neste sentido, seguindo os princípios propostos por

Sayed e Leur (2000) para o elemento “Probabilidade” essa pesquisa pretende apresentar uma contribuição metodológica para que a SV possa ser utilizada de modo mais atuante no processo decisório do planejamento tático e operacional, com foco na etapa de análise de alternativas, conforme a estrutura apresentada na Figura 2.1.

Observa-se pelo fluxograma apresentado na Figura 2.1, que os modelos de microsimulação juntamente com os métodos do HCM vêm sendo empregados apenas para medir a influência do desempenho operacional da fluidez dos sistemas de transporte no processo inicial de tomada de decisão por parte dos gestores públicos. Porém, acredita-se que estes modelos também são capazes de possibilitar a investigação do desempenho da segurança viária (DSV) no ambiente urbano. Neste sentido, esta pesquisa pretende apresentar um esforço de consolidação dessa abordagem como uma potencial ferramenta de inclusão da SV na etapa de análise de alternativas do tradicional processo de planejamento. Contudo, antes de apresentar as premissas desta abordagem julga-se necessária a discussão dos métodos tradicionais de investigação do DSV.

2.3. Desempenho operacional da segurança viária

2.3.1. Estudos observacionais tradicionais

A técnica dos estudos observacionais pode ser considerada como um processo de aprendizagem passivo em que o conhecimento é gerado a partir da análise meticulosa dos resultados de eventos que não foram formalmente projetados para investigar o problema (CUNTO, 2008). Segundo Hauer (2002) os estudos observacionais têm como suposição básica que cada componente de uma rede de transporte tem o seu nível de segurança como uma propriedade que pode ser definida a partir do número esperado de acidentes por tipo e severidade durante certo intervalo de tempo.

Segundo Cunto (2008) existem algumas técnicas de estudos observacionais (Ex.: as tabelas de contingência, análise log-linear, modelos *logit*, árvores de regressão, redes neurais, entre outras). Entretanto, o desempenho da segurança viária (DSV) com base nos estudos observacionais tem sido investigado, com maior frequência, através da aplicação dos MPA, ou funções de desempenho de segurança viária. Os MPA consistem na aplicação de estatística de regressão relacionando o número de acidentes de trânsito com atributos geométricos e operacionais da via como: volume veicular, número de faixas de tráfego,

número e comprimento das aproximações, etc. O objetivo é obter um número esperado de acidentes de um determinado local com base nas suas informações históricas e características físicas e operacionais.

Nas tentativas iniciais de elaboração dos modelos de previsão foram utilizados modelos de regressão linear, entretanto, estes modelos foram considerados inconsistentes devido à incompatibilidade das suposições deste tipo de modelo com a natureza e frequência dos acidentes de trânsito (HAUER *et al.*, 1988). Neste sentido, observa-se que enquanto os modelos de regressão linear se aplicam de forma adequada a fenômenos que tenham uma distribuição normal dos erros e certa homoscedasticidade, o fenômeno acidentes de trânsito, por ser considerado aleatório e raro, possui uma forte dispersão que o caracteriza como um fenômeno que sofre heteroscedasticidade.

Deste modo, evidenciou-se um potencial para o uso de modelos lineares generalizados (MLG) que relacionam a distribuição de probabilidade da variável dependente com uma ou mais variáveis preditoras por meio de uma função de ligação. Em casos onde os acidentes apresentam um padrão consideravelmente disperso (variância superior a média) entre entidades similares os MLG podem assumir uma distribuição não normal de erros, como por exemplo, os modelos de Poisson ou Poisson-Gama (Binomial Negativa) (LEUR e SAYED, 2001; HAUER, 2002; MAHER e SUMMERSGILL, 1996)

Os modelos lineares generalizados se mostram eficazes na representação desse fenômeno uma vez que sua estrutura permite a suposição de distribuições estatísticas diferentes da distribuição normal. Sawalha e Sayed (2006) relatam que expressões matemáticas de modelos de previsão de acidentes devem satisfazer dois requisitos básicos: i) o modelo deve produzir resultados lógicos e ii) a expressão deve ser linear com o objetivo de estimar o coeficiente usando a regressão linear generalizada. A calibração dos modelos é feita com base em bancos de dados de acidentes de locais com características similares. Os modelos podem ser desenvolvidos para cruzamentos ou para segmentos, sendo que para segmentos o valor do comprimento deve ser contabilizado pela variável dependente (acidentes/km-ano) ou incluída como uma variável independente (CUNTO, 2008).

Cunto (2008) relatou alguns estudos voltados para o desenvolvimento de modelos de previsão de acidentes para interseções e para segmentos, a seguir nas tabelas 2.1 e 2.2 são apresentados os resultados da sua pesquisa.

Tabela 2.1 – Modelos de previsão para interseções.

Pesquisador	Local	Anos de dados	# acidentes	Interseção			Variáveis Explicativas
				# Int.	Controle	Configuração	
Hauer <i>et al.</i> (1988)	Toronto/CA	3	2,573	145	Semafórico	4 aproximações	Fluxo de tráfego por movimento ou hora do dia
Bélanger, C. (1994)	Quebec/CA	-	1,084	149	Parada obrigatória	4 aproximações	Total, maior e menor VDMA, farol piscando, a distância de visibilidade, pistas de saída, Limite de velocidade
Kulmala, R. (1995)	Finlândia	5	-	1,762	-	3 e 4 aproximações	VDMA
Montain <i>et al.</i> (1996)	7 cidades/ Reino Unido	5 to 10	25,983	5,359	Parada obrigatória	3 e 4 aproximações	VDMA, menor # interseções no link, comprimento do link
Sayed and Rodrigues (1999)	Vancouver/CA	3	2,160	419	Parada obrigatória	3 e 4 aproximações	Maior e menor VDMA rodoviário

* VDMA – Volume Médio Diário Anual.

Fonte: Adaptado de Cunto (2008)

Tabela 2.2 – Modelos de previsão para segmentos.

Pesquisador	Local	Anos de dados	# acidentes	Atributos de Segmento	Variáveis Explicativas
Vogt and Bared (1998)	Minnesota e Washington/EUA	8	3,400	Rodovias estaduais de pista dupla	VDM, largura total da rodovia, classificação de risco na estrada, a densidade de garagem, os atributos horizontal / vertical
Sawalha and Sayed (2001)	Vancouver e Richmond/CA	3	-	392 segmentos de via arterial	VDMA, comprimento do segmento e densidade de interseção não semaforizadas
Greibe (2003)	Dinamarca	5	1,058	345 segmentos com vários atributos	VDMA, velocidade permitida, menor lado rodovia/km, estacionamento, uso do solo, largura

Fonte: Adaptado de Cunto (2008)

Um exemplo recente de MPA foi proposto por Cunto *et al.* (2011) que desenvolveu modelos de previsão de acidentes de trânsito para interseções semaforizadas da cidade de Fortaleza Os modelos foram estimados com uma amostra de 101 interseções em função das variáveis volume médio diário anual, número de faixas, número de aproximações e tipo de separador central. O modelo contendo o fluxo e número de faixas apresentou desempenho satisfatório para a predição do número total de acidentes de trânsito nas interseções semaforizadas avaliadas.

Segundo Hauer (2002) apesar dos MPA serem bastante promissores se aplicados isoladamente a locais específicos eles podem levar a estimativas imprecisas, principalmente por causa da forte dispersão dos dados de acidentes. Para melhorar as estimativas de acidentes

conhecidas tem sido aplicado um método relativamente recente denominado de método empírico de *Bayes* (EB). Este método utiliza conceitos de probabilidade condicional aplicada tanto nos locais de referência (representada pelo MPA) quanto no local de análise para estimar um valor ponderado do número esperado de acidentes. Conforme Hauer (2002) a estimação do método é dada por:

$$E\{\kappa | K\} = \alpha E\{\kappa\} + (1 - \alpha)K \quad (2.1)$$

Onde:

$E\{k/K\}$ = valor “esperado” do número de acidentes (k) para a entidade de interesse (sabendo que a entidade apresentou K acidentes em um certo período);

α = peso atribuído ao $E\{k\}$ ($0 \leq \alpha \leq 1$);

$E\{k\}$ = número esperado de acidentes em entidades similares (população de referência);

K = número de acidentes observados na entidade.

Apesar das técnicas dos estudos observacionais terem evoluído bastante durante as últimas décadas, no caso dos estudos observacionais com base no número de acidentes, o método ainda está sujeito a uma série de falhas ligadas a sua fonte primária de dados, tais como: a falta de treinamento dos agentes de trânsito, o baixo índice de acidentes reportados, informações incompletas ou incorretas sobre o local e a severidade dos acidentes (erros no preenchimento dos formulários), erros na alimentação, edição e recuperação dos bancos de dados de acidentes entre outros (DAVIS, 2004; HAUER, 2002; HIRST *et al.*, 2004).

O fato do fenômeno acidentes de trânsito ser um evento aleatório raro aliado a problemas como a dispersão excessiva nos dados, que por sua vez, gera o fenômeno de regressão a média e o excesso de zeros na base de dados tornam os modelos estatísticos menos confiáveis (LORD, 2006; MIRANDA-MORENO, 2006; ABDEL-ATY *et al.*, 2005). Por fim, mesmo que a etapa de coleta dos dados de acidentes seja feita de forma minuciosa, ainda assim, não será possível descrever com precisão a sequência de eventos que precedeu a ocorrência do acidente de trânsito. Além disso, segundo a literatura, os estudos observacionais compreendem uma abordagem de natureza reativa, ou seja, conclusões significativas só podem ser obtidas após a ocorrência de vários acidentes em determinado local (BARCELÓ *et al.*, 2003; DARZENTAS *et al.*, 1980).

2.3.1.1. HSM - Highway safety manual

Desenvolvido com base nas técnicas dos estudos observacionais o HSM foi concebido no ano de 2010 com a proposta de ser uma ferramenta para prover o conhecimento da segurança viária e para auxiliar o processo de tomada de decisão com base na análise do DSV. Para prover esse auxílio o HSM reúne os mais novos métodos e informações para medir, estimar e avaliar a segurança viária em termos de frequência (ocorrências por ano) e severidade (nível de gravidade das ocorrências) dos acidentes. Desta forma, o manual pretende apresentar para os profissionais da engenharia de transportes o estado da arte dos métodos quantitativos da SV de modo a ser utilizado nas mais diversas etapas de gerenciamento do sistema: planejamento, projeto, construção, operação e manutenção.

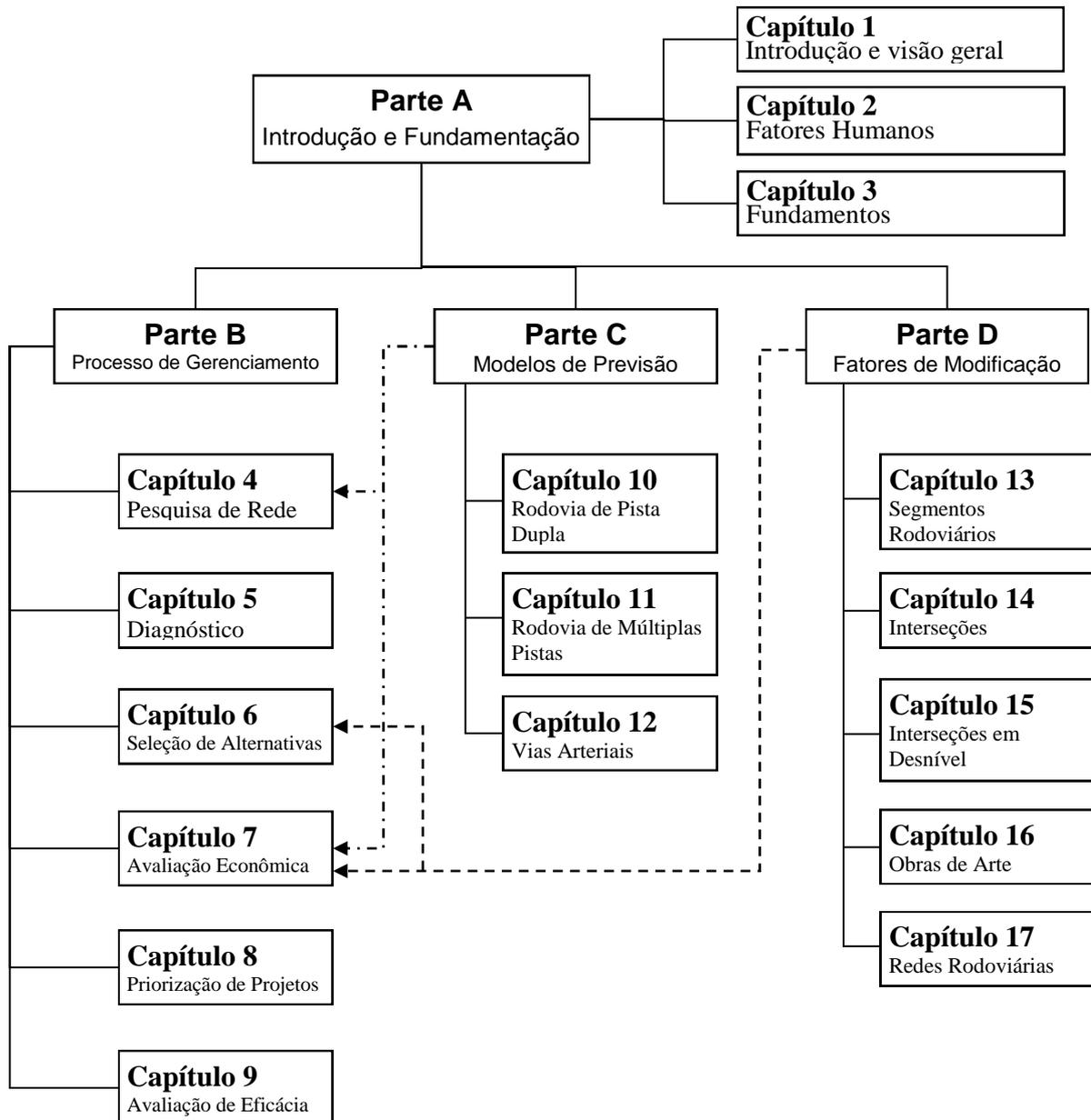
O HSM apresenta como um de seus principais argumentos para o seu uso o fato de que o seu maior rigor estatístico dos seus métodos reduz a vulnerabilidade das series históricas de acidentes que estão sujeitas a fenômenos de dispersão e aleatoriedade. Com isto o manual destaca duas de suas principais funcionalidades práticas: 1) Promover com confiança a execução de atividades comuns como, por exemplo, a definição de lugares mais propensos à redução do número e severidade de acidentes; 2) Expandir as análises de definição de novos projetos ou de seleção de alternativas geométricas e operacionais de projetos existentes.

Quanto à organização, o HSM se encontra dividido em quatro partes: a) introdução, fatores humanos e fundamentos; b) processos de gerenciamento da segurança viária; c) metodologia de previsão e d) fatores modificadores. A seguir na Figura 2.3 é apresentada a organização geral do manual e o modo como suas partes se inter-relacionam.

Na Parte A são apresentadas as bases para as demais informações no HSM. Esta parte apresenta os conhecimentos fundamentais úteis em todo o manual. Partes B, C e D podem ser usados em qualquer momento do gerenciamento do sistema, de acordo com a finalidade do projeto ou análise. Os capítulos dentro de cada parte também podem ser usados em uma ordem mais aplicável a um projeto específico sem a necessidade de se trabalhar na ordem de apresentação do HSM. A linha que liga a parte C com os capítulos 4 e 7 indica que as funções de desempenho da segurança da parte C podem ser calibradas e aplicadas na identificação de lugares propensos a redução de acidentes e na avaliação econômica dos projetos e alternativas. Já a linha tracejada ligando a Parte D aos capítulos 6 e 7 indica que os

fatores modificação de acidentes são usados para os cálculos de seleção de medidas mitigadoras e na avaliação econômica dessas medidas.

Figura 2.2 – Organização do HSM



Fonte: Adaptado de HSM (2010)

Na utilização do HSM não se faz necessária a aplicação formal da sequência de etapas proposta no manual. Entretanto, é importante destacar que além do manual ter como premissa os estudos observacionais que já estão sujeitos a uma série de falhas, para aplicação do manual fora da área de jurisdição em que foi concebido é necessária a existência de um consistente banco de dados de acidentes que permita a aplicação de métodos adicionais de calibração/validação dos modelos. Este processo é necessário tendo em vista a diferença entre

fatores como: as características da população de motoristas; as condições locais das vias e do ambiente de estudo; a composição do tráfego; a geometria típica e os métodos de controle do tráfego.

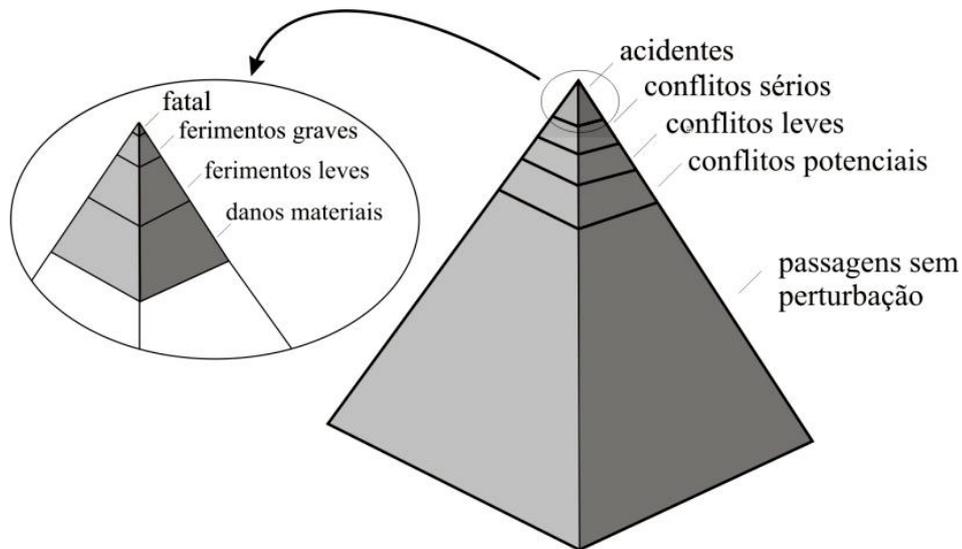
2.3.2. Técnica de análise de conflitos de tráfego

Inicialmente propostos por Perkins e Harris (1967) a técnica de análise de conflitos de tráfego (TACT) surgiu como uma abordagem alternativa para superar alguns problemas metodológicos dos estudos observacionais. A técnica veio tentar responder uma questão elementar para os estudos de segurança viária: Como medir o potencial para a ocorrência de acidentes de um local sem fazer uso do histórico de ocorrências do mesmo?

A técnica de conflito de tráfego envolve um grupo devidamente treinado de pesquisadores que têm o objetivo de observar, registrar e avaliar a frequência e a severidade dos conflitos de tráfego de determinado local. Deste modo, a técnica torna possível para os engenheiros de tráfego a observação e a análise das manobras inseguras dos condutores em determinados cruzamentos, sendo assim, é possível investigar a relação dessas manobras com as características geométricas do local de estudo.

Uma forte característica da técnica é o fato dela abordar o desempenho da segurança viária de acordo com o conceito do *continuum* da segurança viária, ou seja, o desempenho é materializado através de uma série de eventos temporais que variam de passagens sem perturbação pelo tráfego à ocorrência de acidentes de trânsito (HYDÉN, 1987; HAUER, 2002).

Figura 2.3 – Representação do *continuum* da segurança viária



Fonte: Hydén (1987)

A pirâmide da Figura 2.3 procura representar, em linhas gerais, as classes de evento que podem ocorrer durante as interações veiculares, sendo a magnitude dessas classes associada ao volume que as representa na pirâmide. As classes extremas da pirâmide são de fácil detecção, entretanto as classes intermediárias necessitam de definições claras e procedimentos objetivos de identificação.

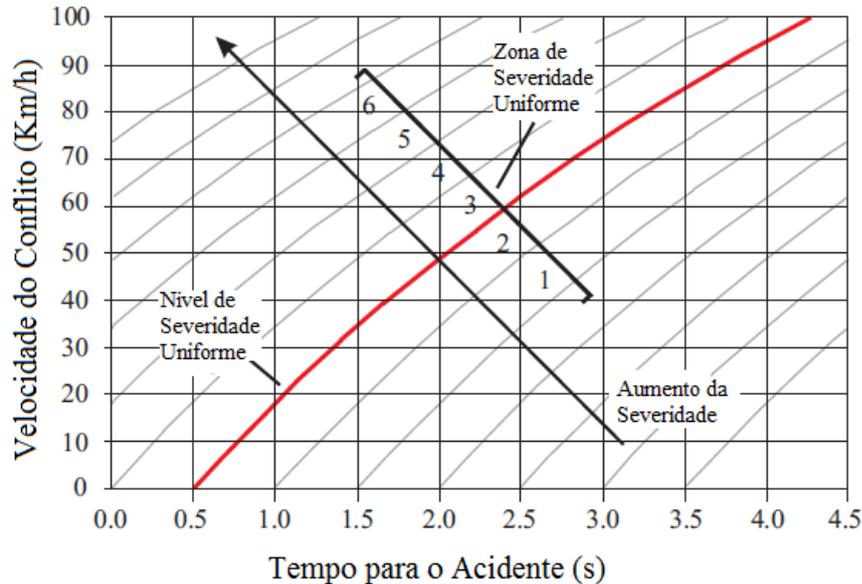
A medida de desempenho usada na TACT são os números de conflitos de tráfego que nesse contexto podem ser definidos como “uma situação observável em que dois ou mais usuários de uma via se aproximam no espaço e no tempo de tal forma que existe um risco de colisão se os seus movimentos permanecem inalterados” (AMUNDSON e HYDEN, 1977). Tradicionalmente os conflitos de tráfego são classificados em duas classes: interações longitudinais (conflitos traseiros - *rear-end*), e interações transversais (conflitos de cruzamento - *crossing*). Esta abordagem tem sido defendida por possibilitar a avaliação da segurança viária de uma forma mais abrangente do que os estudos observacionais tradicionais, uma vez que ela se dispõe a investigar os momentos de passagem com perturbação na corrente de tráfego que poderão ou não incorrer em um acidente de trânsito.

Cunto (2008) relata que após os primeiros esforços de concepção da técnica feitos por Perkins e Harris (1968) diversos estudos com esta abordagem foram desenvolvidos ao redor do mundo. O empenho dos pesquisadores foi focado no desenvolvimento de medidas objetivas e confiáveis de conflitos de tráfego e ainda a busca para validar essas medidas com relação taxas reais de acidentes.

Um das aplicações mais bem sucedidas das TACT refere-se a versão sueca que baseia-se na estimação de um valor do indicador tempo para o acidente (TTA *time to accident*). Este indicador é calculado com base em um momento denominado de ponto de ação evasiva que, por sua vez, ocorre quando em situações eminentes de colisão entre veículos, um deles muda de trajetória e evita o acidente. Esta medida representa o intervalo de tempo decorrente do ponto de ação evasiva até o momento em que ocorreria o acidente, se não fosse pela manobra evasiva. O TTA é calculado com base na razão entre o valor estimado da velocidade dos envolvidos e o valor estimado da distância entre eles (HYDÉN, 1987).

Para estimar a severidade dos conflitos Hydén (1987) propôs uma série de "níveis uniformes de severidade" e "zonas uniformes de severidade" para fornecer categorias de conflitos diferentes que variam de "não severos" a "severos". Estas categorias foram baseadas em funções não-lineares equidistantes e paralelas, considerando a taxa média de desaceleração necessária para evitar a colisão para diferentes velocidades e coeficiente de atrito padrão (Figura 2.4).

Figura 2.4 – Gráfico para estimação da severidade dos conflitos.



Fonte: Hydén (1987)

Sayed e Zein (1999) aplicaram a técnica de conflito de tráfego para investigar a segurança viária de 94 interseções estimando a frequência e severidade dos conflitos nas interseções sinalizadas e não sinalizadas. De posse desses dados, foi desenvolvida uma medida para resumir o risco dos conflitos e poder indicar o risco relativo de se envolver em um conflito em determinado cruzamento. De modo complementar ainda usaram uma análise

de regressão para desenvolver modelos de previsão que relacionam o número de conflitos de tráfego com o volume de tráfego e com os acidentes. Os resultados dessa validação indicaram fortes relações entre os conflitos e os acidentes das interseções semaforizadas, já para as interseções não semaforizadas as correlações não obtiveram o mesmo sucesso. De qualquer modo, o estudo concluiu que se existir indisponibilidade ou dúvidas quanto à confiança nos dados de acidentes de um local há um grande potencial para a medição do DSV através de dados de conflitos de tráfego.

De forma semelhante ao trabalho de Sayed e Zein (1999) os pesquisadores Robles e Raia Jr. (2008) investigaram a correlação entre conflitos de tráfego e acidentes de trânsito, com dados coletados em vinte interseções na cidade de São Carlos, sendo dez interseções controladas por “PARE” e demais controladas por semáforos. Os autores usaram a técnica sueca de análise de conflitos de tráfego para levantar os dados sobre conflitos e os dados de acidentes foram coletados junto à prefeitura de São Carlos para o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2003. A pesquisa obteve sucesso na coleta dos conflitos e a correlação com os acidentes foi avaliada através do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). Os resultados apresentaram valores médios de r de 0,77 (correlação forte) para interseções controladas por PARE e de 0,53 (correlação moderada) para as semaforizadas.

Sobre a abordagem tradicional, de um modo geral, pode-se indicar como desafios para a aplicação da técnica os seguintes pontos (CUNTO, 2008):

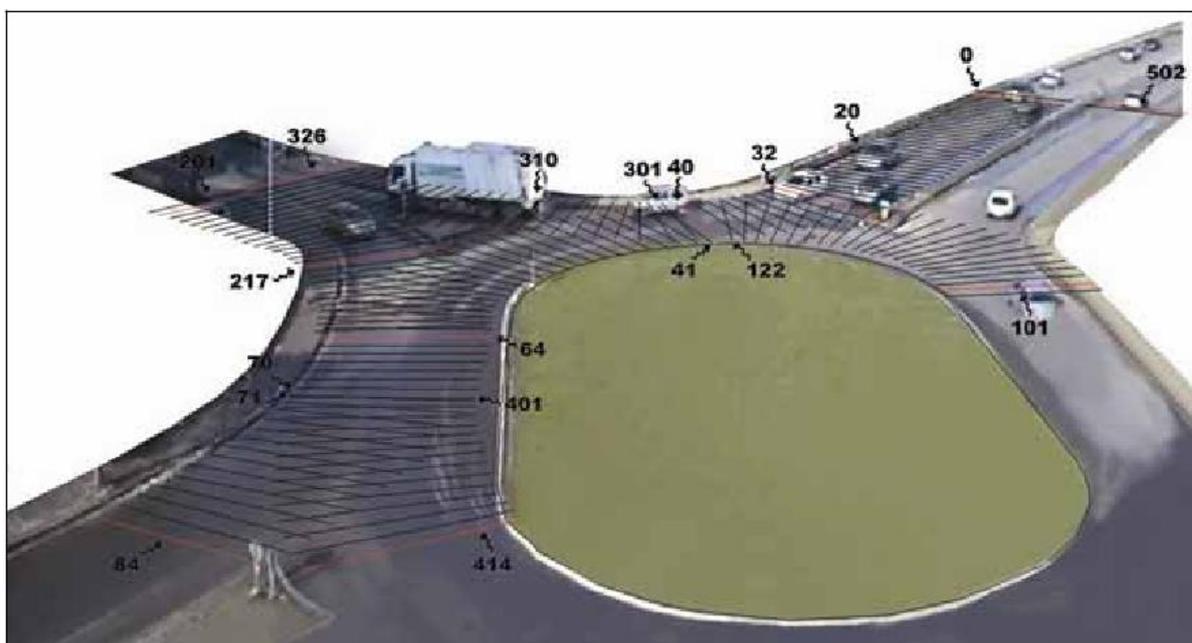
- a) Treinamento adequado dos observadores;
- b) A subjetividade das medições (espaçamento e velocidade dos veículos);
- c) A definição de indicadores de conflito a serem utilizados (TTC, TTA);
- d) A definição do tempo de observação necessário;
- e) A validação dos resultados da técnica.

Os últimos avanços relacionados à técnica de análise de conflitos de tráfego são basicamente voltados para as metodologias de detecção veicular com o uso de filmagens e posterior tratamento computacional. Neste sentido, Saunier e Sayed (2007) relatam que este tipo de abordagem pode ser denominada de visão computacional e que tradicionalmente é composta por dois módulos: (i) Um módulo de processamento de vídeo para a detecção e rastreamento de veículo e (ii) Um módulo de interpretação para a detecção de conflitos de tráfego.

Nesta linha, Guido *et al.* (2009) investigaram a detecção de conflitos de tráfego por uma abordagem semiautomática em uma rotatória com uso da aplicação de avançados algoritmos de rastreamento veicular usando dados de vídeo gravados. Estes dados foram examinados, “frame por frame”, para extrair a posição e o tempo de cada veículo ao longo do seu percurso. A estimação do DSV foi feita para diferentes segmentos da rotatória utilizando diferentes indicadores, tais como, o tempo para a colisão (TTC – *time to collision*), a taxa de desaceleração necessária para evitar o acidente (DRAC - *maximum deceleration rate to avoid a crash*) e o do índice de potencial para acidentes (CPI - *Crash Potential Index*).

A calibração das estimativas de tráfego foi realizada por comparação de perfis de velocidade do veículo obtidos a partir do seu rastreamento no vídeo com perfis de velocidade obtidos com uma pistola de velocidade a laser no mesmo local. Os resultados deste estudo fornecem indicadores significativos de potenciais problemas de segurança nas rotatórias considerando diferentes comportamentos de direção para diferentes condições de tráfego.

Figura 2.5 – Local e trechos considerados no estudo.

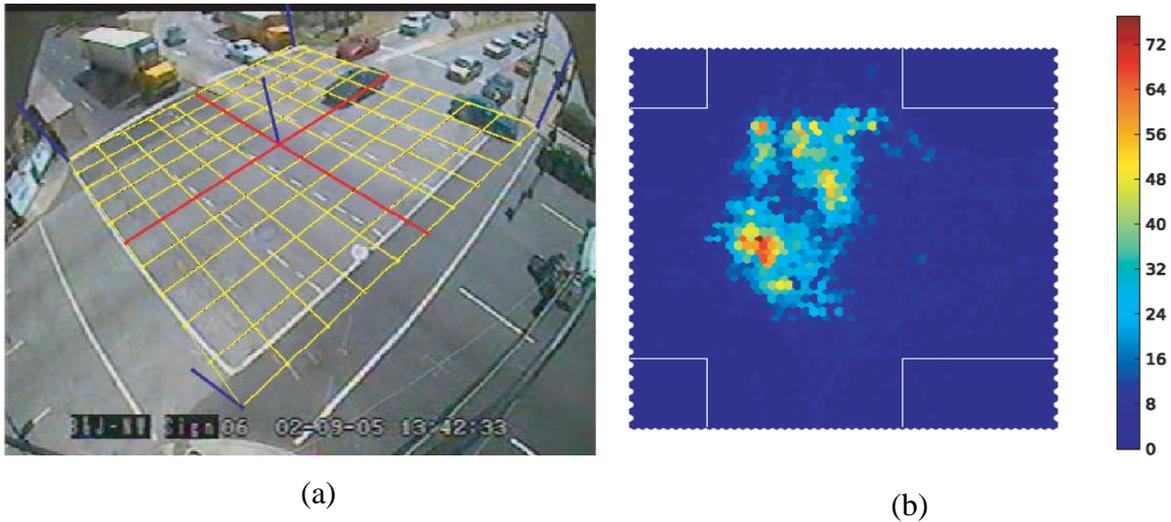


Fonte: Guido *et al.* (2009)

Saunier *et al.* (2010) apresentaram os esforços de detecção dos conflitos de tráfego de forma totalmente automática. O procedimento foi aplicado a um grande conjunto de dados de gravações em vídeo coletadas em Kentucky-EUA que contém mais de 300 interações graves e colisões. Para cada instante foram calculados uma probabilidade de colisão, um índice de severidade e o indicador TTC. Os resultados demonstram a utilidade da

abordagem para o estudo mais aprofundado do comportamento dos usuários e dos mecanismos das interações que podem levar a colisões.

Figura 2.6 – (a) Local da pesquisa com a projeção do “grid” de coordenadas e (b) Mapa de distribuição espacial dos conflitos detectados pelo TTC.



Fonte: Saunier *et al.* (2010)

Um dos principais desafios dessa nova abordagem é apontado na literatura como a dificuldade de aplicação de forma prática do método, tendo em vista que a detecção com detalhes sobre os veículos envolvidos e suas trajetórias é uma tarefa difícil e não pode ser alcançado com precisão suficiente para uso prático. Apesar dos avanços significativos em sensores de tráfego, algoritmos e nos sistemas de monitoramento o método não é capaz de lidar de forma efetiva com cruzamentos muito movimentados. Além disso, um alto nível de representação da cena e necessidade de avançados recursos computacionais dificultam ainda mais a aplicação de modo prático e trivial do método (SAUNIER *et al.* 2010) o

Vale destacar que os resultados da pesquisa de Guido *et al.* (2009) e Saunier *et al.* (2010), são avanços significativos para os desafios metodológicos relativos a subjetividade da abordagem tradicional, conforme apontados por Cunto (2008). Contudo, o fato da TACT ainda ser largamente difundida e aplicada tradicionalmente reforça a importância dos desafios apontados. E com as pesquisas apresentadas por Sayed e Zein (1999) e Robles e Raia Jr. (2008), tem-se observado esforços relevantes para validação dos resultados da TACT.

2.3.3. Outras técnicas

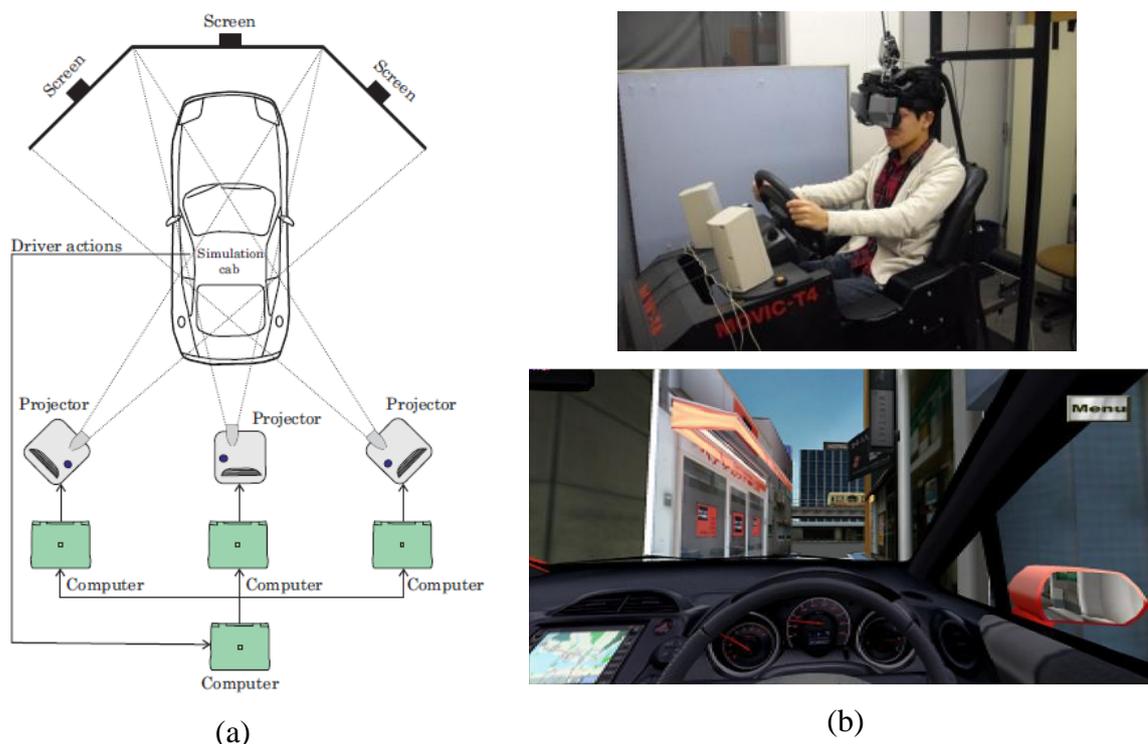
Além da técnica dos estudos observacionais e da análise de conflitos de tráfego outras técnicas têm sido desenvolvidas para estudar e gerenciar a segurança viária dentre as quais pode se destacar os estudos de segurança com informações do tráfego em tempo real e os estudos de segurança com simuladores de condução.

Os estudos de segurança com base em informações em tempo real baseiam-se no contínuo monitoramento da corrente de tráfego em auto-estradas através de sistemas de gerenciamento do tráfego (SGT). Estes sistemas fazem uso de laços detectores, câmeras de vigilância, algoritmos de detecção automática de incidentes, sinais de rampa e painéis de mensagens variadas (LEE *et al.*, 2002). Os SGT utilizam as informações do tráfego em tempo real para identificar situações de turbulência, com isto o sistema intervém no controle do tráfego a fim de evitar que estas situações de alto risco possam resultar em acidentes.

Apesar de bem sucedidos os estudos de segurança com base nas informações de tráfego em tempo real tem a limitação de aplicação em segmentos de auto-estrada. Este fato torna a sua aplicação bastante limitada para a análise da segurança viária nas grandes cidades brasileiras tendo em vista o número bastante reduzido de vias expressas que poderiam viabilizar esse tipo de abordagem.

Outra abordagem possível refere-se aos estudos de segurança através dos simuladores de condução. A técnica foi desenvolvida inicialmente para investigar os aspectos psicológicos e ergonômicos dos condutores. De modo recente, a técnica tem sido estudada com o objetivo de investigar a segurança no que diz respeito a alterações de comportamento do condutor, dos sistemas do veículo, dos aspectos geométricos da via ou ainda na análise das condições do tráfego (CHRISTOFOROU *et al.*, 2011; ABELE E MØLLER; 2011; BERTHELON *et al.*, 2011). Em geral os simuladores consistem na disposição de uma série de projetores ligados a computadores que fornecem imagens de alta resolução para simular o ambiente (Figura 2.7 (a)). Entretanto, o simulador pode ser formado por um “*cokpit*” sendo as imagens projetadas em óculos especiais (Figura 2.7 (b)).

Figura 2.7 – Representação de exemplos de simuladores de condução.



Fonte: (a) Cunto, (2008); (b) Susuki et al. (2011)

Bella (2011) relata que simuladores avançados e interativos de condução são considerados ferramentas úteis e confiáveis para avaliar o comportamento do condutor, que é induzida pelo ambiente rodoviário. Entretanto, é importante ressaltar que os resultados da aplicação dos simuladores prescindem de alguma forma de validação tendo em vista que os aspectos do ambiente virtual, por mais avançado que seja o simulador, podem produzir resultados distorcidos do que seria esperado no mundo real.

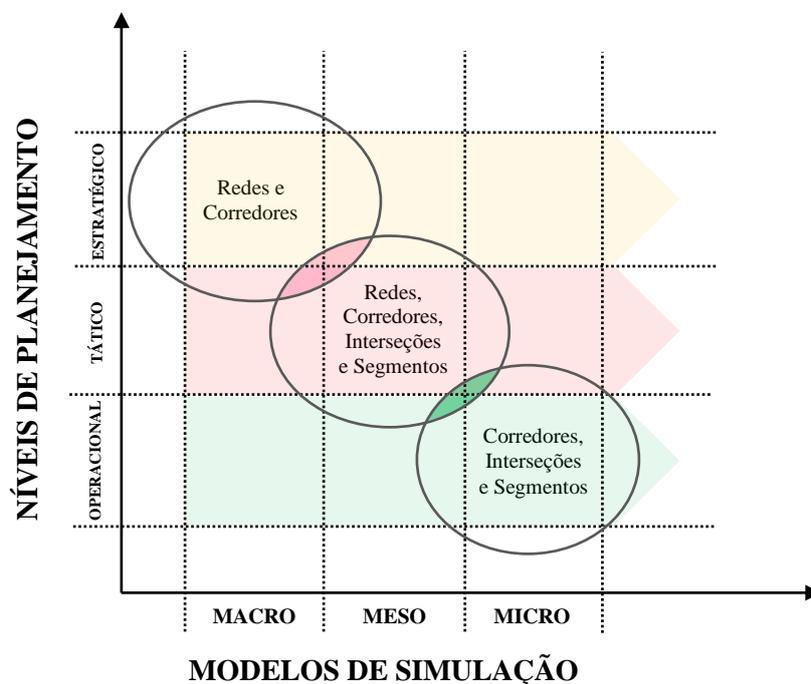
Além das técnicas apresentadas nesta revisão existe uma nova abordagem promissora para análise do DSV que é a microssimulação de tráfego. Este tipo de técnica foi concebido inicialmente para investigação da eficiência operacional da fluidez das redes de tráfego. Entretanto, tem sido estudada sistematicamente ao longo da última década com foco nas análises de segurança viária. Por se tratar da técnica que é objeto de estudo desta pesquisa, discussões sobre a microssimulação além de uma contextualização sobre a ferramenta aplicada no contexto da segurança viária, serão apresentadas com mais detalhes no Capítulo 3.

Conforme foi estabelecido nos objetivos, esta pesquisa pretende analisar o desempenho da segurança de sistemas viários no ambiente urbano e de modo mais específico nas interseções viárias destes sistemas. O ambiente urbano têm algumas características

peculiares que o torna diferenciado para este tipo de análise. A principal destas características se refere ao grande adensamento do uso do solo que juntamente com o alto nível de motorização da população o torna um ambiente bastante suscetível à ocorrência de conflitos de tráfego e, por conseguinte de acidentes de trânsito.

O sistema viário de uma cidade pode ser organizado em três níveis de agregação que se inter-relacionam. No nível mais alto o sistema viário pode ser definido como uma grande rede de tráfego que é formada por um conjunto de vias (2º nível) que, por sua vez, são constituídas de interseções e segmentos (3º nível). No que diz respeito ao planejamento este sistema está sujeito a uma série de intervenções que podem ser de natureza estratégica, tática ou operacional em cada um dos seus níveis de agregação. E para cada tipo de intervenção podem-se aplicar diferentes modelos de simulação e análise que também podem ser classificados em três níveis, como: micro, meso e macro (MAIA, 2007). Na Figura 2.2 é ilustrada uma representação dos elementos supracitados e suas inter-relações.

Figura 2.8 – Elementos do sistema viário e suas relações com os níveis de planejamento e com os modelos de simulação.



Fonte: Autor.

De acordo com a Figura 2.2 é possível destacar que existe uma relação aparentemente objetiva entre os níveis de planejamento e os modelos de simulação, contudo

percebe-se que os níveis de agregação do sistema viário, apesar de possuírem um direcionamento central de análise, podem ser analisados nos três níveis de planejamento e simulação. Contudo, vale destacar que para qualquer análise do sistema viário é necessário uma previa definição do escopo de aplicação dessa análise que, por sua vez, poderá indicar qual nível de planejamento ela estará associada e em qual modelo de simulação ela poderá ser avaliada. Neste contexto, a seguir na Tabela 2.3 é apresentado o escopo de algumas aplicações e suas respectivas associações aos modelos de simulação conforme proposto por Maia (2007).

Tabela 2.3 – Escopos de aplicação dos Modelos de Simulação.

MODELO DE SIMULAÇÃO	ESCOPO DE APLICAÇÃO
Macroscópicos	Planejamentos de intervenções estratégicas
	Simulação de médias/grandes áreas
	Implementação de novas vias
	Duplicação de vias
Mesoscópicos	Análises de intervenções táticas
	Simulação de médias/grandes áreas
	Implementação de novas vias
	Duplicação de vias
	Definição de rotas de veículos
Microscópicos	Verificação das mudanças de rotas de veículos por causa de estímulos
	Análises de intervenções operacionais
	Simulação de pequenas/médias áreas
	Análises de esquemas alternativos de controle de tráfego
	Alteração na operação semafórica
	Entrada e saída de rampas
	Definição de rotas de veículos
	Análise de esquemas de operação de tráfego em área
Verificação das mudanças de rotas de veículos por causa de estímulos	

Fonte: Maia (2007).

Esta pesquisa pretende apresentar contribuições para os níveis de planejamento tático e operacionais através da aplicação da microssimulação de tráfego para análise do DSV de interseções viárias do meio urbano. De modo mais específico pretende-se analisar interseções que estejam inseridas em ambientes propensos a ocorrência de conflitos de tráfego. No ambiente urbano, as principais vias onde se observa este tipo de ambiente são os corredores arteriais de tráfego que possuem um grande volume de tráfego e um uso do solo adensado repleto de polos geradores de viagem (PGV).

Segundo o CTB as vias arteriais urbanas são caracterizadas por ambientes com interseções em nível, geralmente controladas por semáforo, com acessibilidade aos lotes lindeiros e às vias secundárias e locais, possibilitando o trânsito dentro das regiões da cidade. Sob uma ótica que vá além dessa definição padrão é possível destacar como características relevantes desses locais as técnicas de gerenciamento e de controle do tráfego como, por exemplo, o controle e regulamentação da velocidade, a proibição de circulação de certos tipos de veículos, a priorização da circulação de transportes e o controle de tráfego em tempo real.

2.4. Considerações finais

Este capítulo buscou apresentar discussões para três importantes pontos desta pesquisa. Inicialmente, discutiu-se a relação da segurança viária com o processo tradicional de planejamento dos sistemas de transporte. Neste momento foi possível observar que a literatura aponta dificuldades de considerar as análises de SV de forma decisiva nos processos de planejamento, dentre estas dificuldades pontua-se a ausência de ferramentas que possam atribuir a essas análises um caráter mais dinâmico. De modo mais específico, ainda, foi apontada uma percepção geral de como as análises de SV vêm sendo consideradas no processo de tomada de decisão da etapa de análise de alternativas dos planejamentos de transporte.

Além disso, também foram discutidos os principais métodos de análise DSV, dentre os quais foram destacados com mais ênfase os estudos observacionais e a técnica de conflitos de tráfego. Neste momento buscou-se relatar uma breve revisão conceitual de cada método e as principais limitações de suas aplicações. De modo complementar, ainda foi apresentada uma sucinta discussão a respeito do escopo de enquadramento desta pesquisa no que diz respeito a três aspectos: o nível de agregação do sistema viário, o nível de planejamento e os tipos de modelos de análise. Como conclusão apontou-se que esta pesquisa pretende apresentar contribuições para os níveis de planejamento tático e operacionais através da aplicação da microssimulação de tráfego para análise do DSV de interseções viárias do meio urbano.

CAPITULO 3

3. MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO APLICADA A SEGURANÇA VIÁRIA

3.1. Introdução

O Capítulo 3 constitui a segunda parte da revisão bibliográfica desta pesquisa. Inicialmente é apresentada uma fundamentação teórica sobre a aplicação da microssimulação de tráfego nas análises do DSV e sobre os indicadores de proximidade espaço temporal (indicadores *proxy*) que constituem a base para esse tipo de abordagem. Serão apresentados alguns desses indicadores com objetivo de explorar as suas principais qualidades e restrições. O capítulo ainda apresenta uma discussão sobre as principais características desejáveis dos algoritmos de modelagem dos simuladores para a sua utilização como ferramenta de análise do DSV. Além disso, serão discutidas algumas etapas inerentes ao processo de simulação como a codificação da rede, a inserção dos dados de demanda e de controle do tráfego, a saída de dados e os processos de calibração/validação dos modelos. Por fim, serão discutidos aspectos da validação relativa dos resultados obtidos com a ferramenta de microssimulação de tráfego.

3.2. Aplicação da microssimulação de tráfego na segurança viária

Ao longo das últimas três décadas com o advento e frequente evolução da ciência da computação têm se observado uma revolução tecnológica nas mais diversas áreas de estudo e conhecimento. Na engenharia de transportes essa revolução teve início em meados dos anos 1980 quando, num esforço conjunto, planejadores e engenheiros de transportes passaram a fazer uso de novas técnicas computacionais para aumentar a eficiência e a segurança dos sistemas de transporte existentes (CUNTO, 2008). A partir desse esforço se desenvolveram os primeiros sistemas inteligentes de transporte também conhecidos como tecnologias ITS (*Intelligent Transportation Systems*). Uma dessas novas tecnologias consistiu no desenvolvimento e aplicação das ferramentas de simulação computacional do tráfego.

As ferramentas de simulação de tráfego foram aplicadas de forma pioneira na investigação da eficiência operacional da fluidez das redes de tráfego considerando medidas de desempenho como: velocidade média, tempos de viagem, atraso médio, comprimento de

filas, etc (MAY, 1990). Entretanto, com o contínuo desenvolvimento computacional e com a evolução dos métodos de coleta de dados, o uso da ferramenta ganhou uma maior aplicabilidade nos estudos de segurança viária e passou a ser estudada sistematicamente ao longo da última década (BARCELÓ *et al.*, 2003; ARCHER, 2005; CUNTO, 2008).

O uso da ferramenta de simulação computacional aplicada na avaliação do DSV foi reconhecido de modo pioneiro por Cooper e Ferguson (1976) e Darzentas *et al.* (1980). Este tipo de abordagem permite o planejamento do experimento, ou seja, torna possível a investigação de diferentes estratégias de intervenção em um ambiente virtual, evitando-se a perturbação do tráfego e diminuindo os gastos com implantações. De modo diferente dos modelos estatísticos de previsão de acidentes, os modelos de microssimulação representam uma abordagem proativa, assim, não necessitam da ocorrência de certo número de acidentes para a detecção de problemas de segurança viária (BARCELÓ *et al.*, 2003; DARZENTAS *et al.*, 1980).

Archer (2005) apontou que o controle das características físicas e operacionais é outra vantagem fundamental da aplicação da microssimulação para a segurança viária. Dentre estas características constam: a exata disposição geométrica do local; o tipo de controle de tráfego empregado; a interação entre veículos e os demais usuários da via (pedestres e ciclistas); a representação precisa dos fluxos de tráfego (incluindo a sua trajetória); a velocidade e suas variações ao longo do tempo; as características dos tipos de veículos; sinalizações específicas de regulamentação, entre outras.

Já no âmbito do planejamento tático operacional dos sistemas de transporte a grande vantagem da aplicação da simulação de tráfego nas análises do DSV consiste no fato dela permitir a avaliação de cenários possíveis em um ambiente virtual evitando assim gastos com a implantação. Neste sentido, esse tipo de abordagem tem ganhado força, haja vista que por uma questão ética e financeira, engenheiros e pesquisadores não podem, deliberadamente, alterar as características geométricas e operacionais de um sistema para verificar a eficácia de medidas mitigadoras para a segurança.

A aplicação da microssimulação de tráfego nos estudos de segurança viária baseia-se na análise dos indicadores *proxy* de segurança que, por sua vez, seguem os preceitos da técnica de análise de conflitos de tráfego que toma como base o *continuum* da segurança viária proposto por Hydén (1987), ou seja, esses indicadores procuram representar de maneira

contínua o nível de interação espaço temporal entre os veículos da rede simulada (ver Figura 2.3), (GETTMAN e HEAD, 2003; ARCHER, 2005; HUGUENIN *et al.*, 2005).

Na representação proposta por Hydén (1987) a segurança viária passa a ser estudada sob um novo paradigma em que o seu desempenho deixa de ser uma medida estática (fatalidades por ano, por exemplo) e passa a ser vista como uma análise espaço temporal das interações veiculares que ocorrem na corrente de tráfego. Assim, o conceito da segurança no tráfego passa a ser visto como uma sequência de eventos cronologicamente dependentes que variam desde passagens sem distúrbio até a ocorrência de acidentes de trânsito (CUNTO E LOUREIRO, 2011).

Neste sentido, desde o advento desse novo paradigma pesquisadores vêm propondo diversos indicadores baseados na proximidade espaço-temporal entre veículos que possam refletir o alto risco das interações se transformarem em acidentes (GETTMAN e HEAD, 2003; ARCHER, 2005; CUNTO, 2008). Sob esta ótica, a seguir nas próximas seções são apresentados alguns dos principais indicadores encontrados na literatura.

3.2.1 Indicadores baseados no tempo

Essa classe refere-se a medidas que se propõem a medir o tempo previsto para uma colisão em potencial. Diversos indicadores dessa natureza podem ser encontrados na literatura, dentre os quais se destaca: tempo para colisão (TTC – *time to collision*), tempo para o acidente (TTA – *time to accident*), tempo após a invasão (PET – *post-encroachment time*), tempo de invasão (ET – *encroachment time*), e o tempo de intervalo (GT - *gap time*).

3.2.1.1. Tempo para a colisão (TTC – *time to collision*)

O TTC foi um dos primeiros indicadores *proxy* propostos baseados na proximidade temporal entre dois veículos. Por definição o TTC corresponde ao “tempo necessário para dois veículos colidirem, se mantidas as suas velocidades e trajetórias” (HAYWARD, 1972). Sua medição para veículos que viajam na mesma direção pode ser representada continuamente ao longo do tempo pela seguinte expressão:

$$TTC_{i,t} = \frac{(X_{i-1,t} - X_{i,t}) - L_{i-1,t}}{V_{i,t} - V_{i-1,t}} \quad (3.1)$$

Onde:

- t : intervalo de tempo considerado;
- $i-1$: veículo líder;
- i : veículo seguidor;
- X : posição dos veículos;
- L : comprimento do veículo; e
- V : velocidade.

Em situações de fluxos ortogonais convergindo para uma área de conflito de um cruzamento o tempo para colisão pode ser calculado de modo mais simples pela equação:

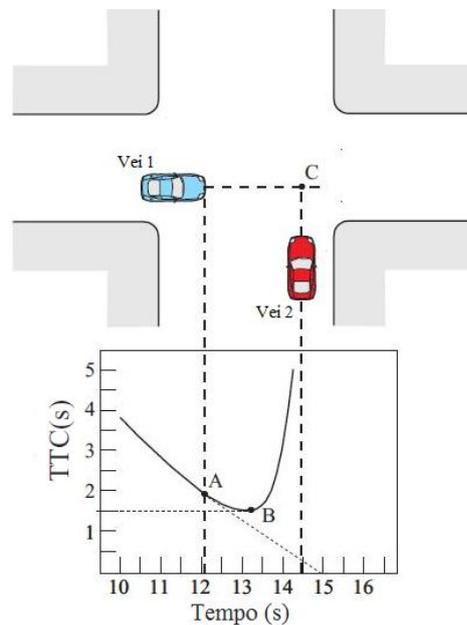
$$TTC_{i,t} = \frac{D_{i,t}}{V_{i,t}} \quad (3.2)$$

Onde:

$D_{i,t}$ = distância entre o ponto projetado de colisão e veículo i na aproximação preferencial.

Assim como a maioria dos indicadores *proxy* o TTC precisa ter uma escala arbitrária para definição da ocorrência ou não do conflito. Nesta escala o TTC pode variar de infinito, quando os veículos não estão em rota de colisão até valores mínimos definidos como os limites para o início da interação. No sentido de definir essa escala, vários pesquisadores têm arbitrado e testado um valor mínimo de TTC que possa ser usado para determinar o número de conflitos em campo (BROWN, 1994; HAYWARD, 1972; VAN DER HORST e BROWN, 1989; HORST e HOGEMA, 1993). van der Horst e Hogema (1993) apresentaram um valor comumente aceito de 1,5s. Cunto (2008) destaca que o TTC mínimo ocorre geralmente após a ação evasiva do condutor, deste modo não leva em consideração o seu tempo de reação. Para uma melhor compreensão na Figura 3.2 é ilustrada uma situação clássica do TTC com dois veículos na eminência de um conflito transversal.

Figura 3.1 – Representação da curva empírica do TTC



Fonte: Cunto (2008)

Um dos problemas que limitam a aplicação dos indicadores *proxy* temporais consiste na dificuldade de relacioná-los com uma escala de severidade, visto que diferentes combinações de espaçamento e velocidade podem resultar no mesmo valor do índice. Por exemplo, assumindo o conflito X, onde os veículos estejam 42m distantes e se aproximem a uma taxa de 100km/h, e o conflito Y, onde o espaçamento seja de 4,2m e a diferença de velocidade igual a 10km/h, pela Equação 3.1, ambos resultarão em TTC igual a 1,5s. Embora as duas situações sejam entendidas como um conflito de tráfego detectado pelo $TTC = 1,5s$ é razoável esperar que o conflito A, caso ocorra à colisão, tenha severidade maior por conta do momento linear e energia cinética dissipada durante o processo.

3.2.1.2. Tempo para o acidente (TTA - time to accident)

Tentando simplificar medições do TTC foi inicialmente proposto por Hayward (1972) o indicador tempo para o acidente (TTA) que foi definido como: “o tempo decorrido desde o momento em que um dos usuários da via reagiu e freou ou desviou até o momento em que o outro usuário envolvido teria alcançado o ponto de colisão, se os dois veículos envolvidos tivessem mantido a mesma direção e velocidade”. Em resumo refere-se a um registro do valor do TTC no momento inicial da ação evasiva.

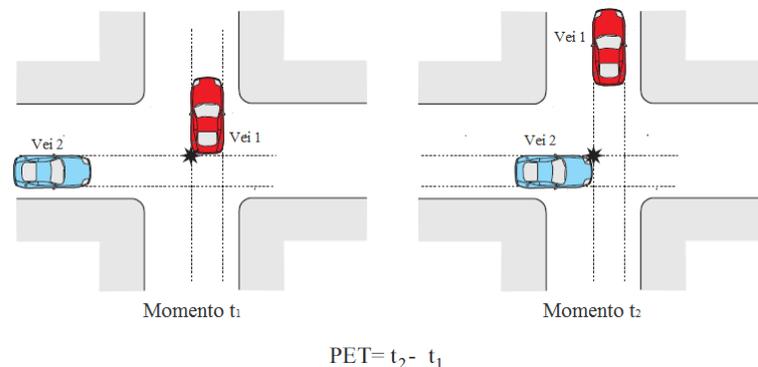
O TTA foi a medida básica para o desenvolvimento da técnica sueca de análise conflitos de tráfego (TACT). Conforme apresentada no capítulo 2 a TACT foi considerada

uma evolução em relação aos estudos observacionais tradicionais. Hydén (1987) melhorou o alcance da técnica quando introduziu uma série de “níveis uniformes de severidade” e “zonas uniformes de severidade” para fornecer categorias de conflitos diferentes que variam de “leves” a “graves” (Figura 2.4). Assim, o TTA pôde proporcionar uma melhor plataforma para a determinação da gravidade em estudos de segurança em comparação com TTC. No entanto, com a aplicação da técnica assume-se mais um componente subjetivo nas análises que é o juízo de valor por parte dos observadores com relação às velocidades e distâncias dos veículos.

3.2.1.3. Tempo após a invasão (PET - post-encroachment time)

Numa situação de risco, este indicador é definido como o tempo entre a saída do veículo 1 da zona de conflito e a chegada do veículo 2 a esta zona, ver Figura 3.2. Esta medida tem vantagens em relação ao TTC e ao TTA no processo de aquisição dos dados já que a velocidade relativa e o espaçamento não são necessários. Isto se deve a não necessidade da rota de colisão para determinar esse indicador.

Figura 3.2 – Exemplo de medição do PET



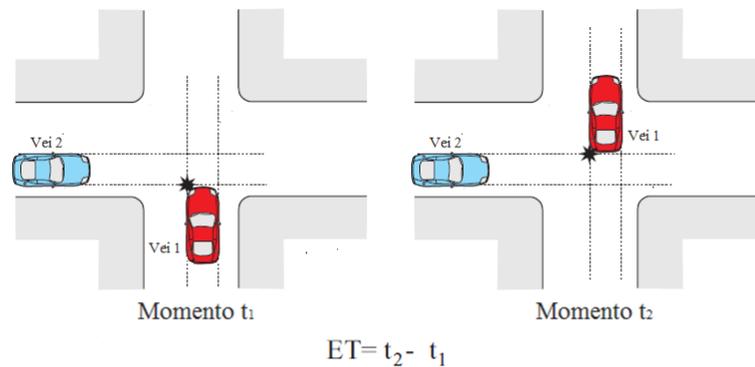
Fonte: Cunto (2008)

As principais críticas à aplicação do indicador PET são: 1) pode não ser possível a comparação do evento básico utilizado para a definição do PET com processos que levam a ocorrência dos acidentes, tornando difícil a sua validação, 2) ainda existe, assim como no TTC, a ineficiência da identificação da severidade dos conflitos, e 3) A medida não é adequada para medição de conflitos em interações longitudinais, ficando restrita a interações transversais.

3.2.1.4. Tempo de invasão (ET - encroachment time)

Este indicador reflete o tempo de ocupação da zona de conflito pelo veículo oriundo da via secundária, ver Figura 3.3. Para ser usado o ET necessita de definições objetivas das áreas de conflito de cada manobra, bem como de medições precisas do real tempo de ocupação dessas áreas pelo veículo da via secundária. Estas considerações dificultam a validação do indicador e, portanto limitam a sua aplicação.

Figura 3.3 – Exemplo de medição do ET



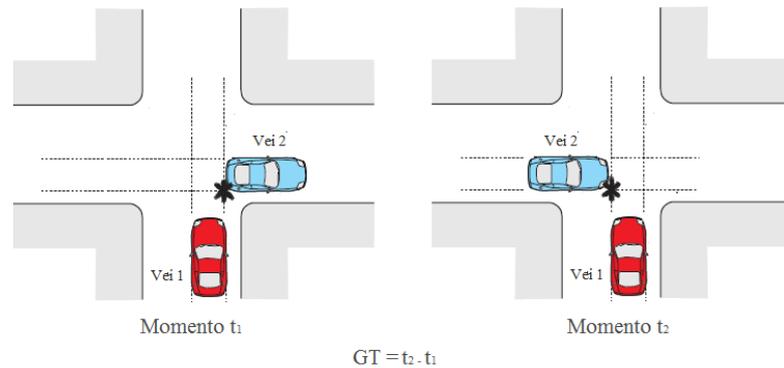
Fonte: Cunto (2008)

Este indicador seria uma boa medida de segurança para análise da severidade dos conflitos se a velocidade dos veículos da via principal seguisse uma distribuição contínua, pois isso significaria que quanto maior o ET maior a possibilidade de ocorrência de conflitos graves, pois os veículos da principal necessitariam de maiores taxas de desaceleração para evitar possíveis colisões (ALLEN *et al.*, 1978)

3.2.1.5. Tempo de intervalo (GT – gap time)

Este indicador reflete o tempo que a zona de conflito fica livre do tráfego da via principal, ou seja, é o intervalo de tempo que a zona de conflito fica livre da ocupação de um veículo da via principal, ver Figura 3.5. O indicador tem basicamente as mesmas restrições do ET.

Figura 3.4 – Exemplo de medição do GT



Fonte: Autor.

Apesar de ter surgido uma relevante quantidade de indicadores temporais, alguns deles representados aqui, o TTC ainda é o que, dinamicamente, representa melhor as interações veiculares ao longo da corrente de tráfego já que possibilita a medição dos conflitos a qualquer momento. Esta característica credencia este indicador a ser uma boa medida de desempenho global a ser estudada num processo de avaliação da SV com microsimuladores de tráfego. No entanto, foi verificado que este indicador não é suficiente para refletir o DSV, tendo em vista a sua ineficiência em atribuir um grau de severidade ao conflito identificado. Dessa forma, a seguir apresenta-se uma segunda classe de indicadores que procura inserir uma análise mais refinada da severidade no DSV.

3.2.2 Indicadores baseados na energia de frenagem

Para uma boa estimativa do componente de severidade dos conflitos de tráfego é ideal que se use indicadores que reflitam a energia cinética envolvida na interação imediatamente antes da colisão. Assim, as diferentes velocidades dos veículos envolvidos no conflito desempenham um papel fundamental na definição do seu grau de severidade. Nesta linha, os indicadores de segurança com base na taxa exigida de redução de velocidade ou no poder de frenagem dos veículos têm a melhor formulação teórica para fornecer boas estimativas de potenciais conflitos que, por sua vez, possam ser usados em estudos de segurança em que a gravidade é um fator importante (CUNTO, 2008).

Neste contexto, dois indicadores foram encontrados na literatura para medir o DSV considerando o poder de frenagem dos veículos, são eles: a taxa de desaceleração

necessária para evitar a colisão (DRAC - *Deceleration Rate to Avoid the Crash*) e a proporção de distância de parada (PSD - *proportion of stopping distance*).

3.2.2.1. Taxa de desaceleração necessária para evitar a colisão (DRAC - *Deceleration Rate to Avoid the Crash*)

Em uma definição mais simplista, a DRAC pode ser entendida como a taxa de desaceleração que um veículo deve aplicar para evitar a colisão com outro veículo conflitante (ARCHER, 2005; GETTMAN e HEAD, 2003). Uma definição mais complexa exige pressupostos acerca do veículo que inicia o conflito (veículo agressor). Uma das tentativas pioneiras de usar a DRAC como medida de conflito foi proposta no trabalho de Cooper e Ferguson (1976)

Para veículos que interagem na mesma direção a DRAC pode ser expressa como:

$$DRAC_{i,t+1} = \frac{(V_{i,t} - V_{i-1,t})^2}{2[(X_{i-1,t} - X_{i,t}) - L_{i-1,t}]} \quad (3.3)$$

Onde:

t = intervalo de tempo

X = posição dos veículos (i = veículo seguidor, $i-1$ = veículo líder)

L = comprimento do veículo

V = velocidade

Para conflitos transversais, as estimativas da DRAC são obtidas por:

$$DRAC_{i,t+1} = \frac{V_{i,t}^2}{2D_{i,t}} \quad (3.4)$$

Onde:

$D_{i,t}$ = distância entre o ponto projetado de colisão e o veículo i na via principal

Para a definição dos conflitos com o uso da DRAC pode-se adotar intervalos de valores do indicador e associá-los a um determinado grau de severidade. Estes limites são baseados no esforço de reação do condutor em imprimir a taxa de desaceleração necessária para evitar o conflito. Em um estudo de simulação de conflitos para a aceitação de brechas McDowell *et al.* (1983) definiu cinco intervalos de desaceleração e os associou a respectivos graus de severidade, neste estudo foi definido como grau de severidade baixo os intervalos 1 e

2 enquanto os intervalos de 3 a 5 foram definidos como de elevada gravidade (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Graus de severidade e intervalos de desaceleração

Graus de Severidade	1	2	3	4	5
DRAC (m/s ²)	< 1,5	1,5 < 3,0	3,0 < 4,5	4,5 < 6,0	> 6,0

Fonte: McDowell *et al.* (1983)

Outra classificação, sugerida por Hydén (1996), considerou a definição dos limites da DRAC baseada na reação esperada do motorista para atingir a desaceleração necessária.

Tabela 3.2 – Níveis de desaceleração

Nível do Conflito	DRAC (m/s ²)	Descrição
Sem conflito	0	Sem necessidade de uma ação evasiva
Sem conflito	0 a 1	Necessidade de adaptação
1	1 a 2	Necessidade de reação
2	2 a 4	Necessidade de uma reação considerável
3	4 a 6	Necessidade de uma forte reação
4	≥ 6	Necessidade de uma reação de emergência

Fonte: Hydén (1996)

Como ocorre em todas as medidas mais detalhadas das interações de tráfego a principal desvantagem da DRAC reside no processo de aquisição de dados para calculá-la em campo. Para este cálculo informações detalhadas de velocidade e espaçamento relacionadas aos veículos envolvidos no conflito devem estar disponíveis. Todavia, estas informações detalhadas não são de fácil obtenção no mundo real.

Apesar disto, há um grande potencial de aplicação da DRAC em avaliações de segurança que considere cenários com diferentes condições climáticas (pista seca, molhada ou com neve) e para diferentes composições de veículos como ocorre nos grandes centros urbanos (automóveis, ônibus, caminhões etc.). Nestes casos é importante considerar que a obtenção dos valores de referência da DRAC pode sofrer variações pelas condições da pista e pelo valor de massa dos veículos envolvidos (CUNTO, 2008).

3.2.2.2. *Proporção de distância de parada (PSD - proportion of stopping distance)*

Allen *et al.*, (1978) sugeriram este indicador como sendo a relação entre a distância restante até o ponto potencial de colisão e a distância mínima necessária para evitar a colisão. A PSD é expressa da seguinte forma:

$$PSD = \frac{RD}{MSD} \quad (3.5)$$

Onde:

RD = distância restante para o potencial ponto de colisão (m)

MSD = distância mínima necessária para frear a tempo = $V^2/2D$ (m)

V = velocidade de aproximação (m/s)

D = Taxa de desaceleração máxima aceitável (m/s^2)

Pela complexidade das análises de segurança viária no meio urbano é importante a utilização dos indicadores de desempenhos com base no esforço de frenagem, tendo em vista o potencial de associação desses indicadores à gravidade dos conflitos existentes. Neste caso, essa pesquisa reconhece como mais promissor o uso da DRAC para medição desses conflitos no meio urbano por ser uma medida já consolidada na literatura.

3.2.3 *Índices de segurança*

Dado os avanços dos sistemas inteligentes de transporte (ITS) associado aos recentes progressos nas técnicas de coleta de dados em tempo real foi possível o desenvolvimento de um novo grupo de indicadores que incorporam o tempo de exposição dos veículos a um determinado nível de conflito, para esses novos indicadores foi atribuído o nome de índices de segurança. A principal suposição desses indicadores é de que se acumulados ao longo do tempo eles representariam melhor os riscos de um veículo entrar em interações mais sérias durante todo o seu trajeto do que se fossem feitas apenas as medidas isoladas como o menor TTC ou a maior DRAC (CUNTO E LOUREIRO, 2011).

Quatro índices de segurança serão discutidos nesta seção: tempo de exposição do tempo para a colisão (TET - *time exposed time to collision*), tempo integrado do tempo para a colisão (TIT - *time integrated time to collision*), parâmetro de densidade de insegurança (UD - *unsafety density parameter*) e o índice de potencial para acidentes (CPI - *Crash Potential*

Index) (BARCELÓ *et al.*, 2003; MINDERHOUD e BOVY, 2001; CUNTO, 2008).

3.2.3.1. Tempo de exposição do tempo para a colisão (TET- time exposed time to collision)

O índice TET foi definido por Minderhoud e Bovy (2001) como a soma de todos os intervalos de tempo em que um dado veículo fica exposto a um TTC abaixo de um limite pré-estabelecido. Para a medição do TET também são necessárias as informações do tempo total observado (H) e do comprimento da seção analisada (L). O índice pode ser calculado como segue.

$$TET_i^* = \sum_{t=0}^T \delta_i(t) * T_{sc} \quad \delta_i(t) \begin{cases} 1 & \forall \quad 0 \leq TTC_i(t) \leq TTC^* \\ 0 & \text{outro} \end{cases} \quad (3.6)$$

Onde:

TET_i^* = tempo de exposição em TTC (s) para o veículo i dado o limite TTC*

$T = H/T_{sc}$ número total de intervalos de tempo observados

H = tempo total considerado no estudo (s)

T_{sc} = intervalo de tempo para assumir um TTC constante (por exemplo 0,1s)

O TET pode ser utilizado de modo agregado para todos os veículos observados, representando assim um valor global do cenário em análise, ou ainda pode ser calculado de modo separado para determinado tipo de veículo e condições climáticas o que melhora as suas análises de segurança aproximando-as das interações do mundo real.

3.2.3.2. Tempo integrado do tempo para a colisão (TIT - time integrated time to collision)

Também sugerido por Minderhoud e Bovy (2001) o TIT teve a pretensão de representar a gravidade dos conflitos com base em um valor limite para o TTC. O TIT mede a diferença entre o TTC observado e TTC limite (TTC*) para um dado intervalo de tempo acumulado durante o tempo em que o veículo percorre área de estudo. Com tempo contínuo pode ser medido da seguinte forma:

$$TET^* = \sum_{i=1}^N \int_T^0 [TTC^* - TTC_i(t)] dt \quad \forall 0 \leq TTC_i(t) \leq TTC^* \quad (3.7)$$

Os índices TET e TIT podem fornecer informações úteis para a determinação do desempenho de segurança viária em estudos com aplicação de microsimulação, no entanto é

importante lembrar que por serem obtidos com base no TTC esses índices também trazem consigo os mesmos problemas atribuídos a este indicador de referência. Deste modo, é importante definir sob que condições o cenário está sendo analisado, ou seja, sob que condições climáticas, que tipos de veículos estão envolvidos, quais as habilidades de frenagem dos condutores entre outros.

3.2.3.3. Parâmetro de densidade de insegurança (UD - *unsafety density parameter*)

Barceló *et al.* (2003) propôs uma medida para representar situações de insegurança nas interações de *car-following* baseada na velocidade dos veículos, posição relativa entre os veículos líder e seguidor e no tempo de reação do condutor do veículo seguidor. Assumindo um valor padrão de 2 segundos para o tempo de reação dos condutores, a medida usa as regras básicas da física newtoniana para verificar se um hipotético acidente teria acontecido caso o condutor do veículo líder fosse obrigado a parar o veículo em sua capacidade máxima de frenagem. Nesta situação, são calculadas a velocidade do veículo seguidor (S) e a diferença de velocidade (ΔS) no momento da colisão.

$$inseguro = \Delta S \cdot S \cdot R_d \quad (3.8)$$

Onde:

$$R_d = \begin{cases} b/b_{\max} & \text{se } b > 0 \\ 0 & \text{outra} \end{cases}$$

b = desaceleração do veículo líder

b_{\max} = máxima taxa de desaceleração possível do veículo líder

Para avaliar o nível de segurança de diferentes links da rede ao longo do tempo, foi proposto o índice de “densidade de insegurança” (UD – *unsafety density*) que é estimado usando o somatório do parâmetro de “insegurança” para todos os veículos da simulação nos links de comprimento (L) e período de tempo total considerado na análise (T).

$$UD = \frac{\sum_{s=1}^{S_i} \sum_{i=1}^N inseguro_{i,s} \cdot \Delta t}{T \cdot L} \quad (3.9)$$

Onde:

S_i = número de etapas de simulação

N = número total de veículos na simulação

Δt = duração da etapa de simulação

Cunto (2008) identificou alguns problemas conceituais que limitam a aplicação do UD como medida de DSV, são elas: 1) a adoção de um tempo de reação fixo para o condutor seguidor, 2) Os valores de UD são representativos apenas quando o veículo líder está em processo de frenagem, assim, alguns conflitos que podem ocorrer durante as situações de “parada e partida” não são considerados, 3) a medida se restringe a medição de conflitos de traseira, e 4) a expressão do fator de insegurança tem pouco significado matemático.

3.2.3.4. Índice de potencial para acidentes (CPI - *Crash Potential Index*)

Com o objetivo de modelar de forma mais detalhada os conflitos de tráfego entre os veículos Cunto (2008) propôs um índice de potencial para acidentes (CPI – *crash potential index*) que procura estimar o nível de turbulência do tráfego. Para tanto o autor definiu que turbulência pode ser representada pelo somatório das interações entre pares de veículos trafegando na rede ao longo do tempo. No referido estudo as interações foram definidas consideradas em duas classes: longitudinais (veículos na mesma direção) ou transversais (veículos em rota de colisão em ângulo).

O CPI é calculado com base na DRAC e incorpora um componente estocástico que considera o tipo de veículo (veículos leves/pesados) e as condições do pavimento (seco/molhado) na probabilidade da obtenção da DRAC. Este componente é representado pela taxa máxima de desaceleração disponível (MADR - *maximum available deceleration rate*). O CPI é obtido para cada veículo de acordo com a expressão:

$$CPI_i = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} P(MADR^{(a_1, a_2, \dots, a_n)} \leq DRAC_{i,t}) \cdot \Delta t \cdot b}{T_i} \quad (3.10)$$

Onde:

$MADR$: taxa máxima de desaceleração disponível para o veículo i

$DRAC_{i,t}$: taxa de desaceleração para evitar a colisão para o veículo i no instante t

t_{i_i} : intervalo de tempo inicial para o veículo i ;

t_{f_i} : intervalo de tempo final para o veículo i ;

a_1, a_2, \dots, a_n : variáveis representando o tipo de veículo, condições ambientais, etc;

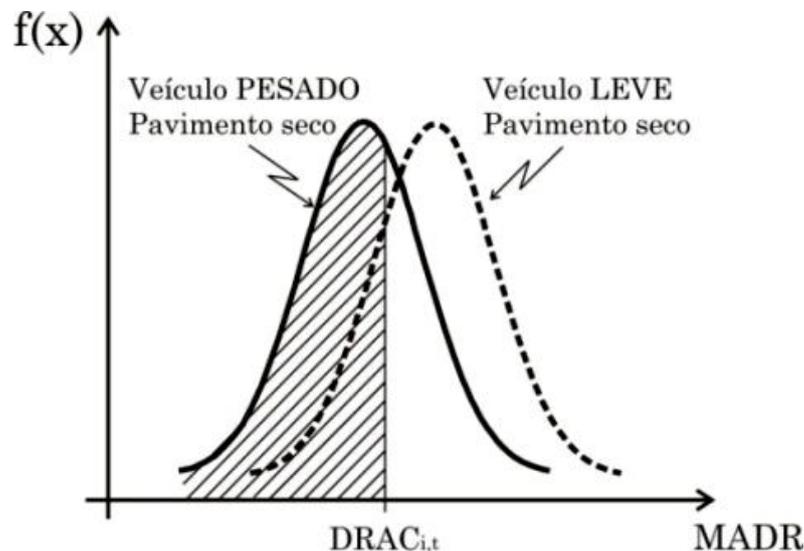
Δt : intervalo de tempo de observação [s];

T_i : tempo total observado para o veículo i [s]; e

b : variável de estado (0 = sem interação, 1 = veículos interagindo).

Para ilustração do componente estocástico na Figura 3.5 se apresenta uma situação hipotética para um dado nível da DRAC, nesta situação os veículos pesados terão maior dificuldade em evitar o conflito do que veículos os leves ($CPI_{veic.pesados,t} > CPI_{veic.leve,t}$).

Figura 3.5 – Função densidade de probabilidade da MADR



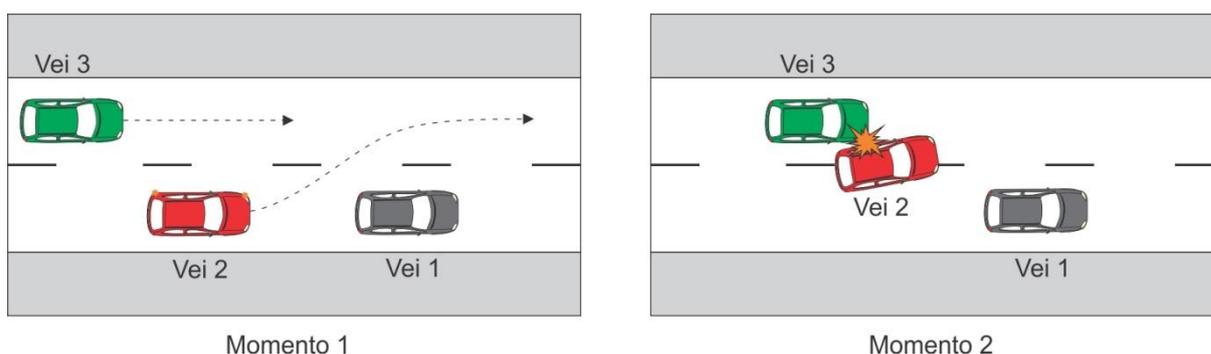
Fonte: Cunto (2008)

O componente estocástico da Equação 3.10 corresponde à área a esquerda da DRAC na função densidade de probabilidade da MADR (assumida normal), em um dado intervalo de tempo. Os parâmetros (distribuição) de MADR podem ser estimados a partir de experimentos de distância mínima de parada para veículos de certa categoria em condições específicas de pavimento (seco/molhado).

O CPI tem vários pontos positivos que o credencia a ser um relevante indicador para avaliação do DSV. Entretanto, o índice considera apenas as interações que podem

resultar em colisões traseiras e choques transversais, deste modo, ficam excluídas das análises as interações longitudinais que resultam em acidentes como abalroamentos laterais muito comuns no tráfego de grandes centros urbanos. Esta ausência pode ser creditada a dificuldade de se modelar esse tipo de situação.

Figura 3.6 – Representação de uma colisão de abalroamento lateral



Fonte: Autor.

Em resumo, os índices de segurança constituem uma evolução aos indicadores *proxy* tradicionais por considerar de modo contínuo a exposição temporal das interações veiculares ao longo dos períodos de análise. Sendo dessa forma potenciais medidas para representar de modo satisfatório os eventos que precedem a ocorrência de acidentes de trânsito. Neste sentido, Cunto e Loureiro (2011) estabeleceram algumas características que tentam esclarecer o que se espera de um bom indicadores *proxy*:

- a) Captar interações/conflitos de modo contínuo, ao longo do tempo e do espaço;
- b) Expressar vários níveis de interação/conflito em sua formulação;
- c) Possibilitar a representação de interações/conflitos transversais e longitudinais;
- d) Permitir a avaliação da severidade de possíveis acidentes;
- e) Considerar diferentes tipos de veículos e diferenças entre veículos do mesmo tipo;
- f) Considerar diferenças nas condições ambientais (pavimento seco, molhado, etc);
- g) Permitir o seu cálculo de forma simples a partir de levantamentos de campo.

Talvez a maior dificuldade de utilização dos indicadores *proxy* em estudos práticos de análise de conflitos de tráfego seja a coleta em nível bastante detalhado de informações para calculá-los, incluindo posição, velocidade e comprimento dos veículos envolvidos de maneira contínua. Além disso, para produzir resultados estatisticamente significantes é necessário considerar uma grande quantidade de observações para garantir um

número mínimo de ocorrências. Nesta linha, Cunto e Loureiro (2011) relatam que pela facilidade de obtenção de informações detalhadas e pela inúmera quantidade de repetições possíveis de cenários o ambiente de microssimulação pode ser uma importante ferramenta de obtenção desses indicadores de modo eficiente e com baixo custo.

Diante das discussões apresentadas é possível destacar que os indicadores *proxy* possuem um grande potencial para analisar sinteticamente o DSV com o uso de microssimuladores de tráfego, pois estes indicadores procuram representar de maneira contínua o nível de interação espaço temporal entre os veículos da rede simulada. Também foi possível verificar que a literatura classifica esses indicadores em três classes (tempo, energia cinética e os índices de segurança) e que apesar de algumas restrições, cada classe possui uma relativa importância para o estudo da segurança viária. Neste sentido, para análise do DSV esta pesquisa irá considerar um indicador *proxy* de cada classe, a saber: TTC, DRAC e CPI.

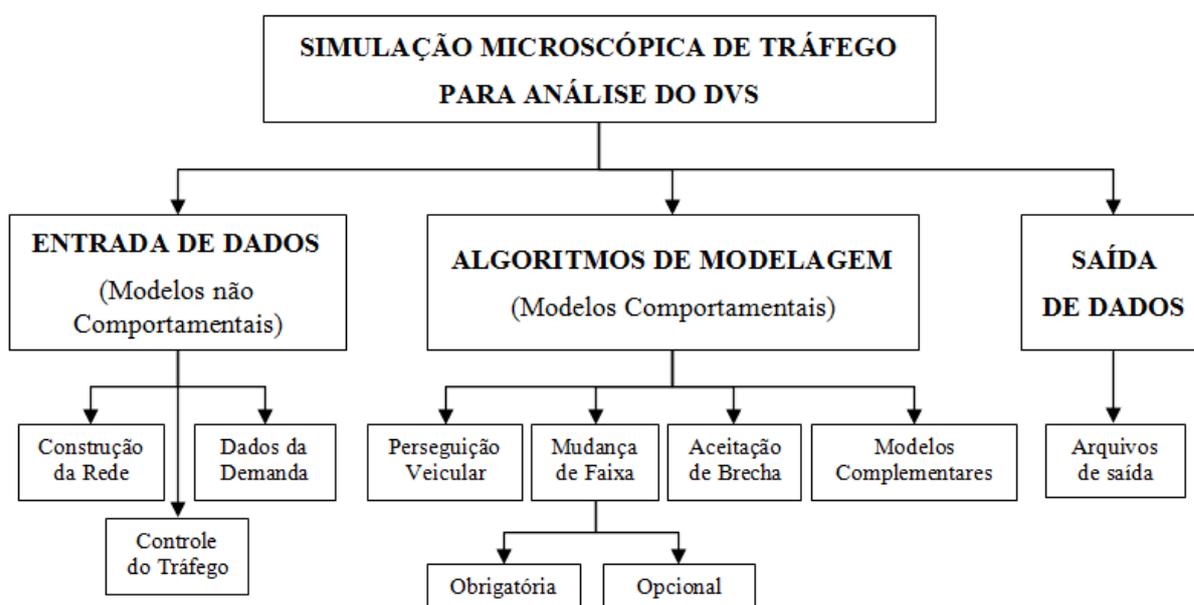
3.3. Aspectos da modelagem de tráfego para análise do dsv

De um modo geral, para análise da segurança Archer (2005) destaca como pontos de alta importância a representação do comportamento interativo entre os usuários da via (por exemplo, a distância mantida entre os veículos em condições normais) e interação dos usuários da via com os elementos do ambiente (por exemplo, a velocidade em uma curva, a distância de visibilidade etc.). É de conhecimento comum que o padrão destas interações não é igual para todos os usuários. Desta forma, modelos que assumem um comportamento normativo entre os usuários e o ambiente viário não são de muita utilidade para fins de análise da segurança viária, principalmente em se tratando do meio urbano onde essas interações ocorrem com maiores frequência e intensidade.

Plataformas de simulação microscópica de tráfego visam à representação dinâmica e individual dos veículos e pedestres na rede simulada. Os componentes básicos dessas plataformas podem ser divididos em duas categorias: modelos não comportamentais e comportamentais (MEHMOOD, 2003). Informações básicas sobre a geometria viária, dispositivos de controle de tráfego e as características dos veículos utilizados na simulação são atribuídas aos componentes não comportamentais e são inseridos no simulador como dados de entrada. Já os modelos comportamentais tentam replicar as ações mais importantes tomadas pelos usuários (condutores e pedestres), tais como aceleração e frenagem. Além

destas duas categorias básicas, quando se aplica a microsimulação para estudos de segurança viária outro aspecto importante refere-se aos componentes dos dados de saída dos microsimuladores, pois os indicadores de segurança são calculados a partir dessas informações. A seguir, na Figura 3.7 é apresentado um fluxograma estas categorias e nas próximas seções serão discutidos os componentes dos modelos de cada uma.

Figura 3.7 – Visão geral do processo de modelagem microscópica.



Fonte: Adaptado de Mehmood (2003)

3.3.1. Entrada de dados

Apesar de comumente se creditar aos modelos comportamentais a possibilidade de usar as plataformas de microsimulação para análise do DSV a revisão da literatura aponta que boa parte das informações inseridas nos modelos não comportamentais tem um impacto muito relevante para a segurança viária. A maioria dessas informações é inserida na fase de codificação, ou seja, na etapa de entrada dos dados que, conforme o fluxograma da Figura 3.7, consiste na alocação das informações de construção da rede, do controle do tráfego e da demanda. Nesta etapa é necessário que a interface do microsimulador apresente uma facilidade de inserção dos atributos geométricos, de controle do tráfego e da demanda veicular de modo que estes possam ser rapidamente visualizados após a sua inserção.

3.3.1.1. Aspectos geométricos

No que se refere aos aspectos geométricos, segue abaixo uma lista dos principais detalhes necessários para uma boa interface no que se refere a este tipo de entrada de dados (CUNTO e LOUREIRO, 2011):

- a) Extensão e Orientação de sentido de circulação dos Links;
- b) Número e largura das faixas de tráfego;
- c) Greides (%) ascendentes e descendentes;
- d) Posicionamento correto de faixas de retenção de tráfego;
- e) Possibilidade de inclusão de faixas de aceleração/desaceleração;
- f) Desenho de links com curvatura para representação de faixas de conversão;
- g) Desenho de links circulares (rotatórias);
- h) Definição dos movimentos de conversão possíveis nas interseções e
- i) Possibilidade de utilização de imagens do local em segundo plano para auxiliar durante a codificação da rede.

3.3.1.2. Controle do tráfego

Sobre os aspectos de controle do tráfego é esperado que o microssimulador seja capaz de representar todo tipo de regras de prioridade nas interseções, desde a sinalização de “PARE” ou “DÊ A PREFERÊNCIA” até o controle por semáforo, sendo que este último pode variar deste o controle semaforístico isolado com tempo fixo até o controle de tráfego centralizado e em tempo real. Além do controle do tráfego das interseções também é de grande importância a definição de aspectos do controle de tráfego como a velocidade máxima e mínima na rede e nos trechos (Ex.: inserção de áreas de redução de velocidade próximas a escolas e em curvas).

Segundo a avaliação da FHWA (*Federal Highway Administration*) o VISSIM possui uma interface que permite a inclusão de outros códigos externos como informações de controladores semaforísticos e pode facilmente permitir a análise da simulação em tempo real. Além disso, as regras de prioridade do VISSIM permitem uma complexa modelagem do comportamento dos condutores nas interseções, incluindo situações de facilitação de inserção na corrente de tráfego (onde um condutor na via principal cede o seu direito de preferência para a entrada de um condutor na secundária) tal como ocorre no mundo real (GETTMAN e HEAD, 2003).

3.3.1.3. *Dados de demanda*

Quanto aos dados de demanda é importante que seja possível a inserção de forma detalhada destes atributos de tráfego de modo que haja uma flexibilidade da forma como os dados serão inseridos. Neste contexto, algumas plataformas de microssimulação têm recebido críticas por possibilitar a inserção dos volumes de tráfego apenas por matrizes OD como é o caso do PARAMICS (ARCHER, 2005). Numa situação ideal deve-se permitir a inserção do fluxo veicular com opções de demanda individual por link, por percentual de rotas ou por matrizes OD. Ainda é importante salientar que, seja qual for o modo, deve-se observar flexibilidade na plataforma para alteração das composições do tráfego ao longo do tempo e por link (ARCHER, 2005).

3.3.2. *Algoritmos de modelagem*

A maioria dos modelos de microssimulação utilizam vários submodelos para representar o comportamento interativo dos usuários da rede em diferentes situações. E a variação individual desse comportamento é definida por algoritmos que possuem parâmetros e variáveis associadas a alguma distribuição para modelar de forma probabilística esse comportamento (ARCHER, 2005). Comumente se encontram três algoritmos no núcleo dos microssimuladores de tráfego: perseguição veicular (*car following*), aceitação de brecha (*gap acceptance*) e mudança de faixa (*lane change*).

3.3.2.1. *Perseguição veicular*

Este algoritmo tem particular importância na avaliação do desempenho da segurança viária. Os modelos de perseguição veicular são responsáveis pela variação da velocidade e espaçamento que os condutores mantêm dos veículos a sua frente, estando, deste modo, diretamente relacionados com a modelagem das interações veiculares longitudinais que, por sua vez, podem culminar na ocorrência de colisões traseiras. Conseqüentemente, a regulação dos espaçamentos disponíveis influencia o comportamento dos condutores das vias secundárias com relação à escolha de que momento se inserir no tráfego ou transpor o cruzamento com a via principal. De maneira similar, também influencia o comportamento de pedestres e ciclistas que desejam atravessar a via (ARCHER, 2005).

De uma maneira geral os modelos de perseguição veicular podem ser descritos

como um mecanismo de estímulo e resposta semelhante ao que segue (LIEBERMAN e RATHI, 2001 apud ARCHER, 2005):

$$a_f = F(v_l, v_f, s, d_l, d_f, R_f, P_i) \quad (3.11)$$

Onde, a_f representa uma resposta de aceleração do veículo seguidor que é dependente de uma função F que, por sua vez, é baseada em diversos fatores de estímulo, incluindo: v_l, v_f que representam as velocidades do veículo líder e seguidor, s que representa a distância de separação, d_l, d_f que representam a desaceleração prevista do veículo líder e seguidor, R_f que representa o tempo de reação do veículo seguidor e P_i que representa fatores adicionais.

A revisão da literatura indica que existem pelo menos quatro tipos de modelos de carro seguidor: (i) estímulo resposta (*stimulus-response*); (ii) distância de segurança ou comportamentais (*safety-distance or behavioural*); (iii) lógica fuzzy (*fuzzy logic-based*) e (iv) psicofísicos ou ponto de ação (*psycho-physical or action point*) (BRACKSTROKE e McDONALD, 1999; MEHMOOD, 2003). A pesquisa de Brackstroke e McDonald, (1999) apresenta uma revisão crítica sobre estes modelos com um enfoque na SV. O primeiro modelo (estímulo resposta) sofre críticas por não terem sido apresentadas provas conclusivas quanto ao comportamento da sua formulação. Já o segundo modelo (distância de segurança) apesar de ter facilidades no seu processo de calibração é criticado por não modelar algumas situações como, por exemplo, a percepção do condutor de que o veículo a sua frente vai desacelerar pelas condições observadas do tráfego à frente. Sobre o terceiro modelo (*lógica fuzzy*) os autores consideram que sua formulação é irrealista, sendo um dos motivos para essa consideração a baixa dependência linear da distância entre os veículos. Por fim, sobre o quarto modelo (psicofísicos) os autores argumentaram ser difícil provar ou refutar a sua validade, porém consideraram que a base (suposições) sobre a qual o modelo está construído é sem dúvida a mais coerente e a que melhor pode descrever a maioria das características observadas no comportamento de condução cotidiano.

Os modelos psicofísicos são baseados na suposição de que o condutor é capaz de verificar sua aproximação de um veículo líder pela percepção de mudança no tamanho aparente do veículo líder e percepção da velocidade relativa por mudanças no ângulo de visão deste veículo. O limiar para a percepção humana sobre este aspecto é geralmente chamado

ponto de ação, por isso estes modelos também são conhecidos por este nome.

Wiedemann e Reiter (1992) propuseram um modelo psicofísico, com base em estudos na área da psicologia, no qual a sua principal suposição é de que o condutor é capaz de perceber a aproximação do veículo a sua frente por meio da sensação de mudança do tamanho aparente deste veículo. No modelo são apresentados dez diferentes parâmetros que podem ser ajustados para fornecer o comportamento do condutor. As interações típicas do modelo são determinadas usando quatro situações de condução que variam desde uma condução sem influência de outros condutores até uma situação de desaceleração de emergência caso se ultrapasse os valores mínimos da distância de segurança. Os limites para cada situação são definidos na pesquisa de Wiedemann e Reiter (1992). O modelo proposto por Wiedemann e Reiter é um componente do programa de simulação de tráfego desenvolvida na Alemanha chamado VISSIM.

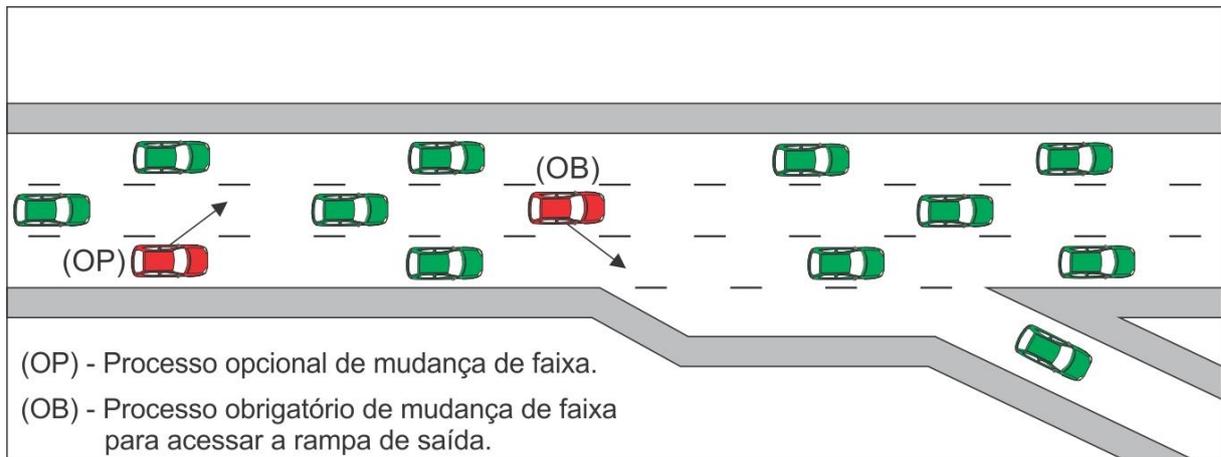
Em esforços mais recentes Xin *et al.* (2008) propuseram um novo modelo de perseguição veicular que ao contrário dos tradicionais procura simular o processo de condução humano de forma “menos perfeita” ou seja não impede que ocorram colisões entre os veículos e ainda procura captar o comportamento do condutor seguro e inseguro. No modelo proposto procura-se estimar a variação dos tempos de percepção dos condutores considerando não só as características individuais, mas também as condições instantâneas do tráfego tais como a velocidade e densidade.

Para testar a capacidade do modelo proposto em replicar colisões traseiras de autoestradas foram utilizadas 54 trajetórias de veículos detalhadas e precisas extraídas de 10 ocorrências de acidentes. Para validar o processo de condução “normal” foram usados dados de trajetória alta resolução, no total foram avaliadas mais de 700 horas de gravações. Os resultados dos testes indicam que o modelo proposto é capaz de reproduzir tanto o comportamento normal de condução quanto o comportamento nas condições que podem levar à colisão dos veículos. As restrições do modelo apresentado no tamanho da amostra considerada (10 acidentes) e no complexo processo de calibração para outros locais, tendo em vista que serão necessárias amostras de trajetórias de acidentes coletadas da mesma forma como apresentado na pesquisa. O advento desses tipos de modelo indica que a comunidade científica está caminhando para a incorporação definitiva das análises de segurança nos modelos de simulação.

3.3.2.2. Mudança de faixa

Na microssimulação a modelagem das ações de mudança de faixa é feita sob a luz de um processo de decisão hierárquico que, por sua vez, considera que o desejo de mudar de faixa ocorre em virtude de obstruções ou veículos lentos na faixa atual que tornam mais atrativa a faixa de destino (processo opcional) ou pela necessidade de ajuste na rota para acessar um determinado link da rede (processo obrigatório).

Figura 3.8 – Ilustração dos processos opcional e obrigatório de mudança de faixa



Fonte: Adaptado de Al-Kaisy *et al.* (1999).

Apesar de serem coerentes os motivos das mudanças de faixa a sua modelagem é particularmente difícil devido a alguns fatores (ARCHER, 2005):

- (OB) a) As diferenças dos comportamentos de mudança de faixa opcionais e obrigatórias, o efeito das manobras bruscas dos veículos seguidores e a identificação de limites acima do qual o motorista será acionado para mudar de faixa, se existe uma abertura apropriada;
- b) A antecipação das brechas nos lados direito ou esquerdo do corredor;
- c) Os comportamentos de conceder uma brecha ou de "forçar" uma;
- d) A urgência de uma manobra de mudança de faixa devido à necessidade de sair da via ou por veículos em movimento lento que causam atraso em condutores mais experiente;
- e) A tendência do condutor de manter a direita dependendo do nível de velocidade predominante, as preferências individuais de velocidade em condições normais de condução, e a tendência para ocupar todas as faixas em situações de filas;

- f) O respeito dos motoristas em relação aos limites de velocidade e às regras de trânsito, como ultrapassagens pela direita.

Além dos fatores supracitados, quando se trata da circulação no meio urbano existe um fator complicador para modelagem do processo de mudança de faixa. Trata-se do comportamento dos condutores de motocicletas que comumente circulam entre os pelotões de veículos e mudam de faixa quando os automóveis estão parados em aproximações de cruzamentos semaforizados ou por ocorrência de congestionamentos. Este comportamento torna tarefa difícil à modelagem do processo de mudança de faixa dos motociclistas, e ainda afeta o processo de modelagem da mudança de faixa dos condutores de automóveis, uma vez que estes precisam de uma atenção maior quando decidem mudar de faixa, pois nem sempre os motociclistas são claramente visualizados pelos espelhos retrovisores. Sobre esta ponderação serão apresentadas algumas discussões na seção dos algoritmos complementares.

3.3.2.3. Aceitação de brecha

Estes modelos são usados para representar o processo de decisão dos condutores em vias secundárias com o desejo de cruzar ou se inserir na corrente de tráfego principal, ou ainda de efetuar a mudança de faixa de tráfego na via principal. Em situações do mundo real, uma má interpretação da velocidade e distância do veículo na principal por parte do condutor da via secundária pode ter consequências graves. Segundo ARCHER (2005) normalmente, os microsimuladores utilizam o valor da brecha crítica derivado de observações empíricas, ou, alternativamente, a partir da literatura pertinente. Na Tabela 3.1 se apresenta alguns tempos de brecha crítica de acordo com o manual de capacidade sueco (SRA, 1995).

Tabela 3.3 – Valores base de brechas críticas (s)

Fluxo de Tráfego		Velocidade na via principal					
Via	Direção seguida	50 km/h		70 km/h		90 km/h	
		Dê a preferencia	Parada obrigatória	Dê a preferencia	Parada obrigatória	Dê a preferencia	Parada obrigatória
Principal	Esquerda	4,8	4,8	5,7	5,7	6,7	6,7
	Esquerda	5,3	6,0	6,2	6,9	7,2	7,8
Secundária	Frente	5,1	5,8	6,0	6,7	7,0	7,6
	Direita	5,0	5,7	5,9	6,6	6,9	7,5

Fonte: SRA, (1995)

Apesar de causar falhas na modelagem como a geração de filas que podem não ocorrer na realidade essa abordagem é comumente usada para análises de capacidade. No entanto, nas análises de segurança não faz sentido usar os parâmetros de brecha crítica como fatores determinísticos, pois existem diferenças individuais na avaliação dessas brechas críticas pelos condutores. Deste modo, faz mais sentido a adoção de uma abordagem probabilística, pois isso vai permitir que os valores aceitáveis das brechas críticas possam variar em torno de uma média, representando assim de modo mais real a escolha desses intervalos pelos condutores.

Neste contexto, Pollatschek, *et al.*, (2002), propuseram um modelo microscópico de decisão probabilística que considerou as diferenças individuais de agressividade entre os diversos tipos de condutores (cauteloso, normal, agressivo), a sua predisposição em assumir riscos e ainda o efeito do tempo de espera a frente da fila. Esse modelo apresentou uma boa capacidade de predição na estimativa da capacidade com base na probabilidade de aceitação de uma brecha aleatória gerada de acordo com uma distribuição exponencial em torno de um valor médio.

O microssimulador VISSIM modela o processo de aceitação de brecha por meio de duas estratégias, a saber: "regras de prioridade" e as "áreas de conflito". Nas "regras de prioridade", devem-se definir os movimentos prioritários (pode-se definir o ponto de parada dos veículos na via secundária) e um tempo mínimo abaixo do qual a brecha é rejeitada. Neste caso o processo é essencialmente determinístico o que não é observado no mundo real.

Já as "áreas de conflito" foram introduzidas para produzir um comportamento mais realista e "inteligente" do veículo no processo de aceitação de brecha (processo probabilístico). Com base nas características geométricas da interseção o VISSIM detecta automaticamente áreas de sobreposição (áreas de conflito) e o pesquisador deve estabelecer qual movimento tem o direito de passagem. Um parâmetro de visibilidade determina o ponto mais próximo ao cruzamento onde os condutores devem observar os outros condutores que se aproximam dos movimentos conflitantes. O motorista em uma aproximação secundária avalia as brechas no fluxo da via principal, a situação atrás da área de conflito, e seu perfil de velocidade / aceleração atual antes de decidir continuar ou parar no cruzamento.

3.3.2.4. Modelos e fatores complementares

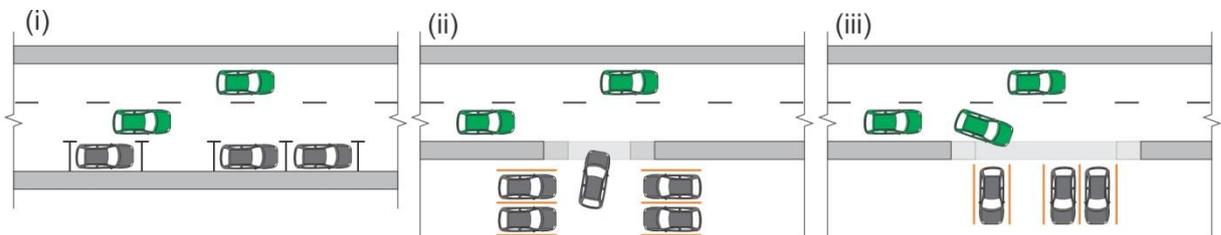
Para aplicação da modelagem microscópica na representação redes viárias do

meio urbano alguns algoritmos complementares são fundamentais para a representação de forma mais completa da circulação de tráfego neste tipo de ambiente. Esses algoritmos devem considerar aspectos como: a presença de estacionamentos (ao longo da via, internos ao lote ou lindeiros à via), a existência de Linhas de Transporte Público e seus pontos de parada, bem como a circulação de pedestres, ciclistas e motociclistas e a interação de todos estes usuários com a corrente de tráfego de automóveis e com os elementos da rede. Além desses aspectos a revisão da literatura ainda considera outros fatores essenciais para a modelagem da segurança, são eles: o tempo de resolução da simulação, o número de simulações, a visualização da simulação, entre outros (ARCHER, 2005; FHWA; 2004).

Estacionamentos

A tarefa de modelagem dos estacionamentos das grandes cidades brasileiras não é simples tendo em vista as diversas variações que podem ocorrer ao longo de uma via deste tipo de uso do solo, dentre as quais se destacam: (i) longitudinais ao longo da via, (ii) internos aos lotes e (iii) transversais na própria via ou lindeiros.

Figura 3.9 – Disposições de estacionamento



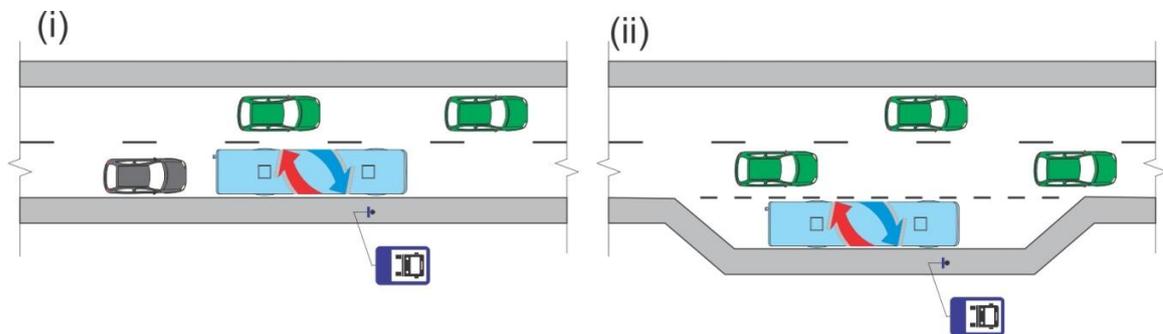
Fonte: Autor.

Para aplicação da modelagem microscópica de tráfego nesses ambientes é importante que as plataformas sejam capazes de representar os diversos tipos de estacionamentos tanto nas disposições geométricas quanto nos parâmetros de utilização dos mesmos. Normalmente, os microssimuladores como o VISSIM possibilitam a definição da utilização dos estacionamentos através de uma distribuição “Normal” do tempo de permanência ou através de uma ferramenta de alocação dinâmica. Outro destaque do VISSIM refere-se ao fato da plataforma ser capaz de simular a entrada/saída de garagens residenciais ou comerciais com maior facilidade que as outras plataformas, pois não cria um nó, sendo o direito de passagem definido por regras de prioridade entre seus links e conectores.

Transporte Público

A grande maioria das cidades brasileiras tem a sua matriz principal de transporte público formada por ônibus urbanos. De modo semelhante aos estacionamentos a modelagem deste tipo de componente é efetuada sob dois aspectos. Inicialmente é necessária a definição das disposições geométricas dos pontos de parada, que poderão ser (i) ao longo da via ou (ii) recuadas em baias específicas. Além disso, também é necessária a simulação dos tempos de permanência dos veículos que, por sua vez, deve ser baseado nos tempos de embarque e desembarque dos passageiros.

Figura 3.10 – Disposições dos pontos de parada.



Fonte: Autor.

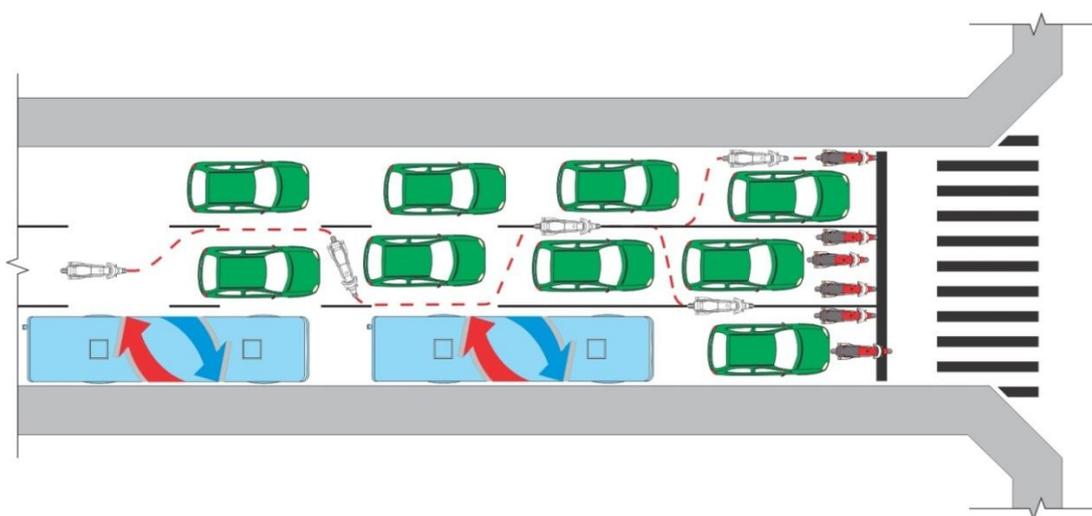
Pedestres, ciclistas e motociclistas

A circulação de pedestres no meio urbano é um importante fator que afeta o desempenho operacional e a segurança das redes viárias tendo em vista as interações causadas por suas travessias em nível. Uma recente pesquisa desenvolvida por Jacobsen (2011) apresentou importantes contribuições para a compreensão dos modelos que regem o comportamento dos pedestres durante as suas travessias no ambiente urbano. O referido autor apresentou uma revisão sobre os modelos do comportamento de pedestres utilizados na representação das travessias (i) movimentação de pedestres, (ii) aceitação de brechas de pedestres, (iii) aceitação de brechas de veículos, (iv) escolha do local de travessia e (v) decisão sobre ignorar o semáforo. Sendo uma das principais críticas do autor o fato das plataformas de microsimulação ainda representarem o processo de travessia dos pedestres de modo determinístico e relativamente simplista quando já existem modelos bem mais avançados neste campo, como os modelos Logit Binomiais, que poderiam ser incorporados aos algoritmos.

Outro importante aspecto característico do meio urbano brasileiro refere-se à

circulação de bicicletas e motocicletas no mesmo espaço viário que os automóveis. No caso das bicicletas, muitas vezes sem a demarcação de ciclofaixas. Esta característica gera uma preocupação a mais com relação à microssimulação do tráfego no meio urbano brasileiro, sobretudo pelo comportamento dos condutores de motocicletas que comumente trafegam entre os automóveis na corrente de tráfego (Figura 3.11). Para representação deste comportamento é importante verificar se as plataformas de simulação possuem recursos que permitam a ultrapassagem de veículos na mesma faixa de tráfego. No caso do VISSIM esse comportamento pode ser modelado alterando-se os parâmetros de distância lateral mínima entre os veículos e estabelecendo-se permissões específicas de ultrapassagens para certos tipos de veículo nas condições de veículos líder e seguidor. Entretanto, não foram encontrados na literatura modelos mais desenvolvidos de representação desse tipo de comportamento, ficando apenas a opção de utilizar os parâmetros dos simuladores de modo determinístico como é o caso do VISSIM.

Figura 3.11 – Ilustração do processo de ultrapassagem de motocicletas durante o sinal vermelho.



Fonte: Autor.

Condições Ambientais

As condições ambientais interferem de forma significativa nos resultados da simulação, uma vez que podem interferir diretamente nas condições de condução dos usuários e nas características dos veículos e dos pavimentos. Por exemplo, quando na ocorrência de precipitações a tendência é que haja uma diminuição nas condições de visibilidade e no poder de frenagem dos veículos em decorrência do pavimento molhado, por outro lado, existe a

tendência de o condutor trafegar em velocidades mais baixas que o habitual diminuindo assim a severidade de uma possível colisão.

Outro importante exemplo relativo às condições ambientais refere-se às condições de iluminação. Este fator é comumente apontado como um potencial causa de acidentes ocorridos nos períodos noturnos. Contudo, a luminosidade pode interferir nas condições de direção mesmo durante o dia, quando se observa a ocorrência de vias alinhadas o movimento de rotação da terra. Nessas condições, pode ocorrer o ofuscamento dos condutores durante os horários do início da manhã e do final da tarde, aumentando assim os riscos de acidentes. Estas e outras condições são de extrema importância nas análises de segurança, devendo os microsimuladores ser capazes de considerá-las caso necessário, ou pelo menos o analista fazer as devidas ressalvas e considerações caso isto não seja possível.

Tempo de Resolução da Simulação

Um parâmetro importante da simulação que tem demonstrado ter um efeito significativo sobre os resultados de qualquer modelo baseado no tempo é o tempo de resolução ou frequência de atualização. Este tempo corresponde ao intervalo que será considerado no simulador para o cálculo das medidas de desempenho. Segundo Archer (2005) os submodelos que regem a interação entre os veículos tendem a ser mais eficazes e representativos do comportamento do mundo real se forem operados com um maior tempo de resolução (ou seja, décimos de segundos). Por outro lado, um efeito colateral relacionado com a utilização dos altos tempos de resolução é a necessidade de aumento de capacidade de processamento e de armazenamento quando forem extraídos os dados da simulação.

A decisão de qual deve ser o tempo de resolução de um experimento deve estar relacionada com os objetivos e com o foco da pesquisa que se deseja realizar, bem como com o tamanho da rede simulada, pois quanto maior a rede maior será o seu esforço de simulação, processamento e de armazenamento de dados caso aumente-se o tempo de resolução. Considerando-se este parâmetro em décimos de segundo a circulação do tráfego será considerada de maneira mais contínua o que pode afetar de forma significativa as análises de segurança (ARCHER, 2005).

Número de Simulações

Outro importante fator refere-se ao número de simulações que são necessárias para garantir resultados confiáveis estatisticamente. Em modelos de simulação estocástica, como é o caso do VISSIM, são usados números aleatórios para definir as opções de geração do tráfego, para definição de parâmetros de valores diferentes de rotas e para definir os vários aspectos do comportamento do condutor e do desempenho do veículo (ARCHER, 2005). Deste modo, para evitar que os resultados sejam baseados em um único padrão relacionado a um número aleatório é importante que sejam realizadas diversas simulações com diferentes números sementes. O cálculo dos indicadores *proxy* deve ser feito com base em uma medida de tendência central da amostra simulada. Para definir o número ideal de simulações é necessária a realização de experimentos que analisem as variações das médias e desvios padrões até que eles estejam dentro de limites pré-estabelecidos (FHWA, 2004).

Visualização da Simulação

Antes de iniciar o processo de extração dos dados do simulador destaca-se a relevância de uma inspeção visual preliminar sobre o comportamento do tráfego modelado, para tanto é importante que as plataformas de microssimulação representem com fidelidade a animação do processo em 2D e 3D. Já nesta etapa podem-se verificar inconsistências com relação à representação dos fluxos, conversões e manobras dos condutores, bem como o correto posicionamento de elementos como as linhas de retenção, pontos de travessia de pedestres entre outros. A seguir na Figura 3.11 é apresentada uma janela de visualização em 3D do VISSIM.

Figura 3.12 – Visualização em 3D de uma simulação no VISSIM.



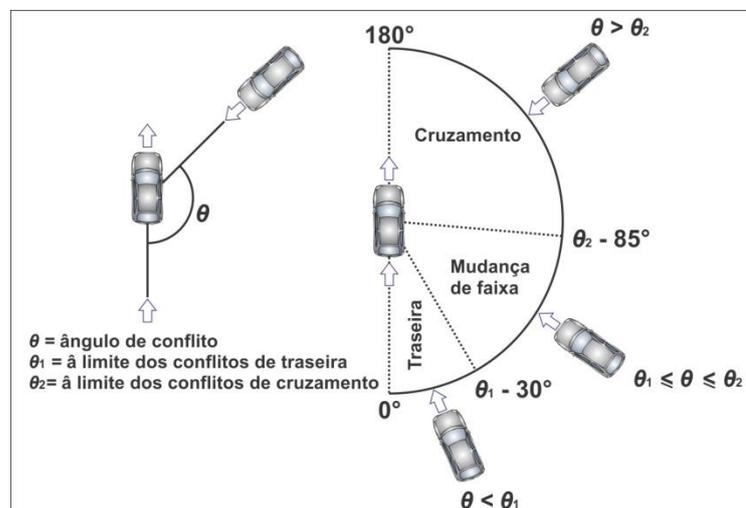
Fonte: Autor.

3.3.3. Saída de dados

Infelizmente as atuais plataformas de microssimulação não têm incorporados nos seus algoritmos de simulação modelos como o desenvolvido por Xin *et al.* (2008) que permitem a detecção de forma automática os conflitos de tráfego. Desta forma a estimação dos conflitos de tráfego é efetuada em aplicativos complementares que realizam esta atividade com base nas informações extraídas dos microssimuladores. Assim, no que se refere aos dados do tráfego é esperado que a plataforma forneça todas as variáveis de estado dos veículos individualmente ao longo de todos os instantes da simulação. Também é de alta importância o acesso aos dados de posicionamento espacial dos veículos ao longo da rede de modo a tornar possível a verificação das trajetórias realizadas.

Dentre os aplicativos existentes para estimação de interações veiculares o mais bem documentado é o SSAM (*Surrogate Safety Assessment Model*). O *software* é resultado de um projeto da FHWA e tem sido largamente utilizado para estimar indicadores *proxy* de segurança através dos dados de saída dos modelos de microssimulação de tráfego (STEVANOVIC *et al.*, 2011, GUO *et al.*, 2011, LEE *et al.*, 2011). A estimação dos indicadores no SSAM se baseia na identificação, classificação e avaliação dos conflitos de tráfego que ocorrem no modelo de microssimulação. Um padrão aberto de arquivo de dados de trajetória veicular foi projetado, e um suporte para esse formato foi adicionada como uma opção de saída por quatro modelos de simulação - PTV (VISSIM), TSS (AIMSUN), Quadstone (Paramics), e Rioux Engineering (TEXAS) (GETTMAN *et al.*, 2008). A seguir na Figura 3.12 são ilustrados os tipos de interação considerados no SSAM.

Figura 3.13 – Ângulo para cada tipo de conflito



Fonte: Adaptado de Gettman *et al.* (2008).

Apesar dos consideráveis avanços observados no SSAM o mesmo não permite o cálculo de indicadores como DRAC e CPI considerados nesta pesquisa como importantes para estimação dos conflitos de tráfego. Deste modo, uma alternativa para estimação dos conflitos de tráfego consiste no uso do aplicativo EIVSIN (estimador de interações veiculares sintéticas) que foi desenvolvido por Cunto (2008).

3.3.4. Plataforma de microsimulação

Em 2003, a FHWA apresentou os resultados de um estudo que teve como um dos objetivos avaliar a capacidade de produção de indicadores *proxy* de segurança para interseções, utilizando nove microsimuladores de tráfego: CORSIM, SIMTRAFFIC, VISSIM, HUTSIM, PARAMICS, TEXAS, AIMSUN, WATSIM e INTEGRATION. A avaliação dos microsimuladores foi realizada sob a luz dos seguintes critérios preponderantes: capacidade dos seus algoritmos para modelar as interações condutor/veículo, potencial para extração de dados, flexibilidade para calibração dos parâmetros do modelo e esforço para modificação do programa fonte ou resultados de saída para o cálculo do indicador *proxy*.

As conclusões do estudo da FHWA destacaram que os microsimuladores PARAMICS, AIMSUN e VISSIM têm uma posição de destaque, pois dispõem de grande parte dos requisitos para a geração de indicadores *proxy* com um nível razoável de fidelidade (GETTMAN e HEAD, 2003). Archer (2005) destacou que o PARAMICS e o VISSIM são dois pacotes comerciais mais usados em países europeus e que parece ser um consenso geral de que o PARAMICS é mais indicado para grandes redes e autoestradas enquanto que o VISSIM se adapta melhor as condições mais detalhadas da condução em redes urbanas.

Archer (2005) pesquisou dentre os simuladores PARAMICS, VISSIM e HUTSIM qual deles apresentavam as características mais relevantes para aplicação nos seus estudos de segurança viária. O autor concluiu que o VISSIM apresentou uma série de razões para a sua seleção, sendo a maioria destas razões relacionadas diretamente ao seu nível de detalhamento e flexibilidade no que se refere ao desenho da rede, desempenho dos veículos e comportamento dos usuários. Dentre os critérios de seleção indicados pelo autor destacam-se:

- a) A possibilidade de definir e utilizar diferentes parâmetros para o comportamento dos usuários e submodelos (*car following*, aceitação de

brecha e mudança de faixa) para diferentes tipos de veículos e/ou links no mesmo modelo de simulação;

- b) A possibilidade de definir parâmetros de desempenho de veículos como o máximo e o desejado poder de aceleração e desaceleração por tipo de veículo e por classe;
- c) A possibilidade de definir por momento específico os dados de entrada do tráfego, como: os fluxos de entrada, percentagens de conversão ou matrizes origem-destino, definição de rotas e composições de veículos detalhadas;
- d) A possibilidade de definir regras para a interação de diferentes tipos de usuários;
- e) A possibilidade de extrair informações muito detalhadas para cada usuário da rede e em alta resolução de tempo (um décimo de segundo);
- f) A possibilidade de usar detectores para registrar os dados de segurança relevantes;
- g) Uma interface de aplicação de programação (API - *Application Programmer Interface*) aberta que permite ao usuário definir funcionalidades adicionais e acessar objetos e dados do modelo durante a execução da simulação.

Em face dos argumentos apresentados nesta e nas seções anteriores, para esta pesquisa foi selecionada como plataforma de microssimulação o *software* VISSIM que possui uma grande capacidade de obter informações detalhadas de cada veículo e sua interação com os demais em escalas de tempo menores que um segundo e também possui os requisitos básicos para a geração de indicadores *proxy* com um nível razoável de fidelidade (ARCHER, 2005; GETTMAN e HEAD, 2003)

Um grande desafio relacionado à utilização da microssimulação, seja qual for a sua aplicação, consiste na definição de um procedimento de calibração/validação dos parâmetros dos modelos da plataforma de microssimulação. No caso específico da aplicação nos estudos de segurança viária ainda é necessária a confirmação de que os indicadores *proxy* utilizados possuem uma relação válida com o desempenho real da segurança viária. Neste sentido as próximas seções são dedicadas a essas duas reflexões.

3.3.5. Calibração/validação

O potencial de representação de um modelo das condições de tráfego do mundo

real está diretamente relacionado à qualidade do ajuste de seus parâmetros. Nos modelos de microsimulação isso não é diferente, neste sentido é imprescindível à aplicação de métodos de calibração e validação que possam garantir a confiabilidade do modelo. Segundo Hourdakís *et al.* (2003) o processo de calibração de simulador de tráfego consiste em alterar o valor dos dados de entrada, executando uma nova simulação a cada nova configuração, e comparar os resultados de saída do simulador para uma ou mais medidas de desempenho coletadas em campo. O modelo é considerado validado quando a diferença entre o valor simulado e observado encontra-se no limite estabelecido como aceitável (COLLELA e DEMARCHI, 2005).

Os esforços pioneiros de calibração e validação dos modelos de microsimulação encontrados na literatura são voltados para a modelagem do desempenho operacional da fluidez dos sistemas de transporte. Nesses esforços, normalmente, se utilizam medidas agregadas de desempenho operacional, tais como tempo médio de viagem, velocidade média, atraso médio, volume médio etc. (ARCHER, 2005; CUNHA e SETTI, 2006; MAIA e LOUREIRO, 2008). Entretanto, nas aplicações de segurança viária, não faz sentido a calibração dos modelos unicamente por medidas de desempenho da fluidez, tendo em vista que a variável de interesse é um indicador *proxy* que, por sua vez, é estimado a partir de expressões matemáticas que combinam parâmetros como diferença de velocidade e espaçamento veicular captados de forma desagregada. Deste modo, as abordagens tradicionais de calibração e validação podem não garantir a eficiência dos modelos de microsimulação para as análises de desempenho da segurança viária.

Apesar de ser mais coerente, a calibração/validação efetuada com base nos indicadores *proxy* não é uma tarefa trivial, tendo em vista as dificuldades de obtenção desses indicadores no mundo real. Cunto (2008) propôs uma metodologia de calibração/validação do microsimulador VISSIM utilizando um indicador *proxy* de segurança (o índice médio de potencial para acidentes - CPI) como medida de desempenho. A metodologia foi aplicada em uma via arterial com quatro semáforos atuados e coordenados, assim como em um trecho de 640m de extensão da rodovia HWY101, ambos na Califórnia. Apesar dos resultados promissores, o procedimento utilizou dados bastante desagregados normalmente não disponíveis e, em virtude da área bastante reduzida, não se sabe ao certo se o mesmo procedimento pode ser aplicado em redes maiores.

Para as análises de segurança considera-se que o procedimento ideal para a etapa de calibração/validação deva considerar um método multicritério que seja capaz de ajustar os parâmetros dos modelos com base em medidas de desempenho de segurança e de fluidez. Por outro lado, para a realidade brasileira, esta pesquisa reconhece que esta tarefa não seja de fácil execução, tendo em vista as dificuldades de obtenção em campo de indicadores *proxy*. Diante dessa constatação, indica-se que o procedimento de calibração/validação voltado para as análises de segurança considere pelo menos medidas de desempenho da fluidez que tenham uma relação mais próxima com a segurança viária como, por exemplo, a variável número de paradas.

3.3.6. Validação do desempenho da segurança viária

O fato dos indicadores sintéticos serem produzidos por modelos computacionais que não foram devidamente associados a eventos de risco no mundo real tem instigado a busca por uma forma de avaliar a capacidade desses indicadores em refletir o real desempenho da segurança viária (DSV). Neste sentido, têm se buscado uma espécie de validação do DSV obtido sinteticamente através da comparação dos resultados obtidos com os indicadores com outras medidas do DSV já consolidadas. Apesar disto, alguns autores defendem que o indicador simulado não precisa estar diretamente relacionado com o DSV refletido por medidas como o número de acidentes registrados em um determinado local, tendo em vista que se trata de um fenômeno aleatório raro não sendo possível o conhecimento preciso de sua distribuição estatística. Contudo, a diferença relativa entre o desempenho de diferentes alternativas de investigação da SV deve ser consistente com estudos tradicionais que consideram o número de conflitos ou acidentes obtidos no “mundo real” Gettman e Head (2003).

3.4. Considerações finais

Pelo exposto neste capítulo, verificou-se que a aplicação da microssimulação de tráfego nos estudos de segurança viária baseia-se na análise dos indicadores *proxy* de segurança que, por sua vez, procuram representar de maneira contínua o nível de interação espaço temporal entre os veículos da rede simulada. Assim, foram apresentados alguns exemplos desses indicadores associados a três classes (tempo, energia cinética e os índices de segurança). Foi possível concluir que, apesar das respectivas limitações, cada classe tem a sua

importância para análise do DSV, portanto neste estudo serão considerados um indicador *proxy* de cada uma dessas classes, a saber: TTC, DRAC e CPI.

Outro importante ponto abordado neste capítulo tratou das características necessárias para uma plataforma de microssimulação de tráfego se adequar às análises de segurança viária. Neste sentido, foi possível concluir que o microssimulador VISSIM dispõe de grande parte dos requisitos necessários para o uso neste tipo de abordagem. Além disso, o fator preponderante para a escolha do referido microssimulador foi a sua capacidade de adaptação às características e situações do tráfego urbano.

Outros desafios identificados para consolidação dessa abordagem foi a necessidade de um processo diferenciado de calibração e validação que considere medidas de desempenho operacional e de segurança, bem como a necessidade de um procedimento de validação do indicador proposto com situações comprovadas de elevado risco de colisão.

CAPÍTULO 4

4. METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA COM USO DA MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

4.1. Introdução

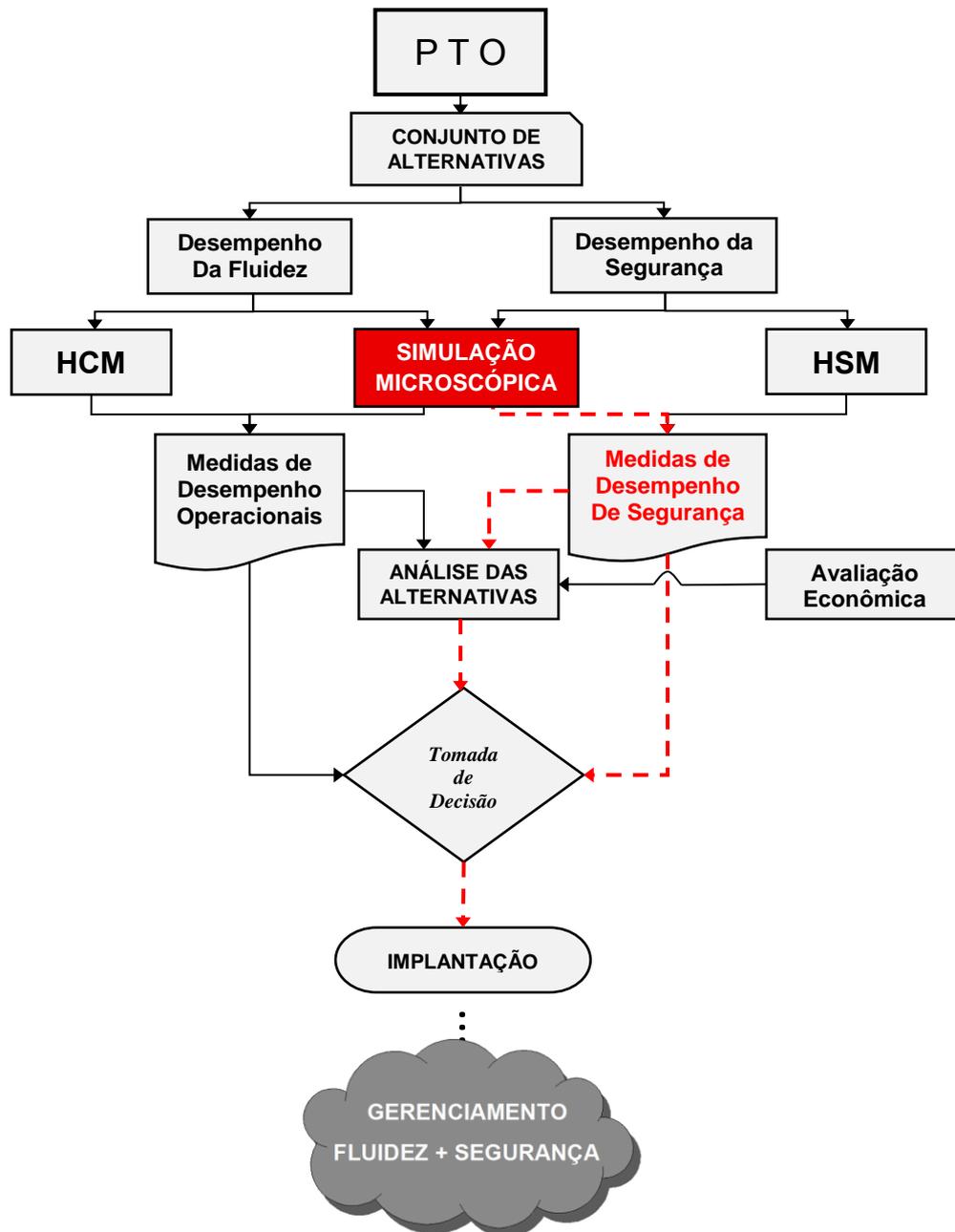
Após a apresentação das bases conceituais sobre o atual estado da arte da avaliação da segurança viária no processo de planejamento e as implicações sobre os principais desafios para avaliar o seu desempenho através de microsimuladores de tráfego, este capítulo apresenta a metodologia proposta para realizar a análise do desempenho da segurança viária (DSV) no meio urbano, com foco nas interseções urbanas.

4.2. Avaliação do DSV no processo de planejamento

Entende-se que a segurança viária (SV) deve ser um fator determinante no processo de tomada de decisão dos gestores públicos. Para tanto, ela deve ser aplicada como um componente agregado ao planejamento e às operações de tráfego antes de qualquer intervenção nos sistemas de transporte. A revisão apresentada no capítulo 2 apontou que com a publicação do HSM houve avanços na aplicação das análises de segurança viária no processo de planejamento tático e operacional dos sistemas de transporte. No entanto, falhas no processo de coleta dos acidentes e a sua natureza pouco frequente, aleatória e dispersiva, tem dificultado a consolidação da abordagem proativa das análises de segurança viária.

O fluxograma apresentado na Figura 2.1, mostrou que os modelos de microsimulação de tráfego têm sido tradicionalmente empregados apenas para medir a influência do desempenho operacional da fluidez dos sistemas de transporte. No entanto, em face dos argumentos apresentados nos capítulos 2 e 3, esta pesquisa pretende apresentar um esforço de consolidação dessa abordagem como uma potencial ferramenta para fortalecer as análises de SV no tradicional processo de planejamento dos sistemas de transporte do meio urbano, com foco na etapa de análise de alternativas. A seguir na Figura 4.1 é apresentada a estrutura de análise do processo decisório considerando os “*inputs*” das ferramentas de microsimulação de tráfego para a SV.

Figura 4.1 – Tomada de Decisão no Planejamento Tático e Operacional (PTO) considerando a microssimulação na análise do DSV.



Fonte: Autor.

Conforme relatado na revisão bibliográfica, uma das principais dificuldades de visualização do processo de planejamento considerando de forma efetiva as análises de SV consistia na ausência de ferramentas que pudessem ofertar um maior dinamismo a estas análises. Outro ponto consistia na dificuldade de entendimento de como essas análises poderiam se enquadrar nesse processo. Com a estrutura apresentada na Figura 4.1 pretende-se contribuir nos aspectos dessa importante lacuna apresentada na revisão bibliográfica.

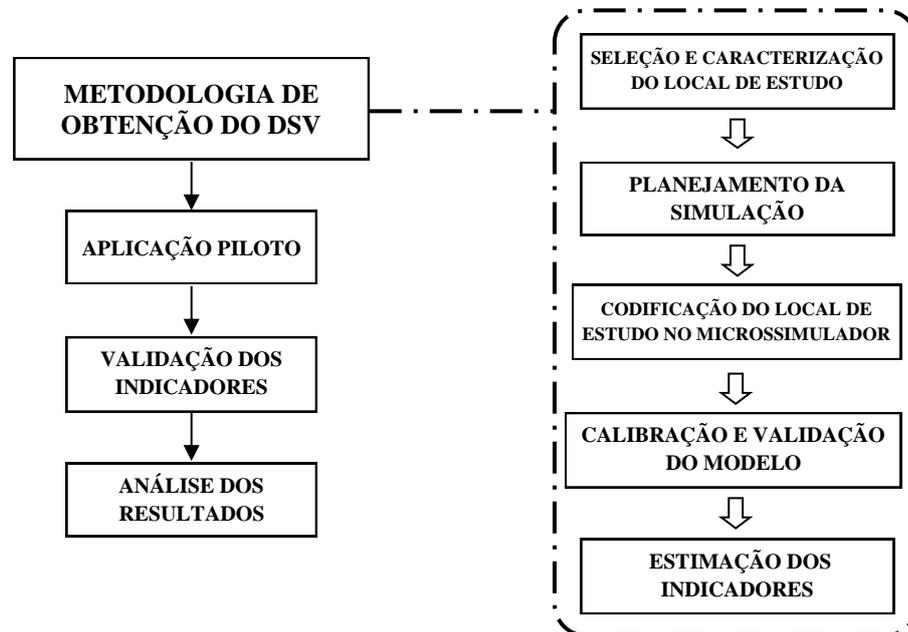
Historicamente os métodos do HSM têm sido aplicados em abordagens reativas como, por exemplo, a definição de pontos críticos ou para estimar os benefícios de uma alteração já consolidada. Contudo, esta pesquisa reconhece que estes métodos também podem e devem ser usados como ferramenta de previsão para ajudar a inserir as análises de segurança viária no processo de planejamento. No entanto, por uma série de desafios metodológicos relacionados aos estudos observacionais que constituem a base do HSM esta pesquisa defende que a microssimulação de tráfego tem um maior potencial para auxiliar nesta inserção pelo fato de tornar possível a análise da mecânica dos conflitos de tráfego e assim considerar um escopo maior de análise. Além disso, é importante ressaltar que esta ferramenta ainda tem a vantagem considerável de poder ser aplicada como uma interface comum para as análises de segurança e de capacidade conforme mostrado na Figura 4.1.

4.3. Metodologia de obtenção do DSV

A metodologia proposta foi concebida para ser aplicada no meio urbano, em especial em interseções viárias de tráfego de vias arteriais dadas as complexas condições de circulação nestes locais que os coloca em uma posição de destaque no que se refere à quantidade de conflitos de tráfego. Para consolidar a metodologia proposta, o capítulo 5 apresentará uma aplicação da mesma em três interseções de corredores arteriais de tráfego na cidade de Fortaleza, entretanto ressalta-se que a metodologia pode ser adaptada a uma aplicação em corredores ou mesmo redes de tráfego do meio urbano. Vale lembrar, conforme indicado no Capítulo 3, que a plataforma de microssimulação usada nesta pesquisa será o VISSIM.

A proposta metodológica de obtenção do DSV em ambiente urbano é composta de cinco etapas: 1) seleção e caracterização do local de estudo, 2) codificação do local no microssimulador, 3) planejamento da simulação, 4) calibração e validação do modelo e 5) estimação dos indicadores. Estas etapas estão resumidas a seguir na Figura 4.2, na qual também se apresentam três processos necessários para a consolidação da abordagem: aplicação piloto, validação dos indicadores e uma análise dos resultados.

Figura 4.2 – Fluxograma das etapas metodológicas



Fonte: Autor.

4.3.1. Seleção e caracterização do local de estudo

Recomenda-se que a motivação para escolha dos locais a serem estudados leve em consideração as duas principais questões mais comuns nos estudos de segurança viária:

- a) Quais os locais mais propensos à maximização da segurança que justifiquem esforços de intervenções de engenharia de segurança viária?
- b) Quais intervenções produzirão a maior relação custo/benefício após serem implantadas?

Estas duas questões são comumente as maiores preocupações do corpo técnico gestor do trânsito responsável pela SV de uma cidade. Entretanto, pode-se aplicar a metodologia para análises de auditoria de segurança viária de intervenções em fase de projeto ou já consolidadas. E em qualquer análise de intervenções táticas e/ou operacionais como o comportamento das interseções de uma via que sofrerá a inversão do seu sentido de circulação (intervenção tática) ou a investigação de uma interseção que esteja propensa a mudanças significativas no seu controle como, por exemplo, a implantação do controle de tráfego em tempo real (intervenção operacional), neste caso, pode se investigar cenários atuais e futuros para avaliar quais as consequências das alterações propostas para o DSV da interseção.

Após a definição do local de aplicação da metodologia, deve-se implementar uma etapa de caracterização do referido local de estudo com a investigação dos atributos geométricos, operação do tráfego e de demanda.

4.3.1.1. Aspectos geométricos

A investigação dos atributos geométricos pode ser realizada inicialmente com o uso do *software* Google Earth ® e complementadas com inspeções de campo par verificar os elementos geométricos importantes a serem codificados no simulador, tais como: o número a largura e a quantidade de faixas das pistas de rolamento, a existência e largura dos separadores centrais, a existência e declividade de rampas, a existência e posicionamento de baias de estacionamento ou embarque e desembarque, a existência de movimentos protegidos por separadores físicos (Ex.: direita livre), os ângulos das interseções, entre outros.

4.3.1.2. Aspectos de operação do tráfego

Dentre as características gerais de operação do local pode-se destacar a existência de pontos de parada de transporte público, o tipo de controle das interseções, presença de estacionamento, restrições/liberações de conversões à esquerda, restrições à circulação de caminhões, existência de retornos, existência de operações regulares ou não de carga e descarga e de embarque e desembarque, entre outras. A lista não é exaustiva, devendo o pesquisador investigar e coletar qualquer informação que jogue ser importante para a análise da SV do local e para a sua representação no modelo de microssimulação.

Outra importante informação da operação do tráfego a ser coletada refere-se à obtenção dos dados do controle semafórico do local (ciclos, repartições de verde, defasagens etc.), caso existam. Estas informações podem ser coletadas/disponibilizadas com diferentes níveis de agregação de tempo e espaço e são de extrema importância para a fase de codificação da rede no simulador. Nas cidades onde existe um centro de Controle de Tráfego em Área (sistema CTA) estas e outras informações podem ser obtidas junto à divisão de comando desses sistemas.

4.3.1.3. Aspectos da demanda

Dentre as características do fluxo veicular pode-se destacar: volume de tráfego, tempos de viagem, velocidade média, atraso médio, número de paradas, tamanho de fila, entre

outros que, por sua vez, também podem ser úteis para a etapa de calibração/validação do modelo. Assim como os dados de controle semafórico estas informações podem ser obtidas junto às divisões de controle do tráfego, no entanto deverão ser confirmadas e complementadas por inspeções de campo, tendo em vista que informações como percentuais de conversão, bem como a composição do tráfego na rede (automóvel, caminhão, ônibus etc.) não são disponibilizadas de forma automática pelos sistemas CTA. Estas inspeções de campo devem ser realizadas através da aplicação de pesquisas de contagem volumétrica, classificatória e direcional em cada interseção ou trecho de interesse.

4.3.2. Planejamento da simulação

A etapa de planejamento da simulação compreende todas as predefinições a serem empregadas no simulador para preparar os arquivos de saída que serão usados para estimar os indicadores *proxy*, dentre essas definições destacam-se as seguintes:

- a) Definição das medidas de desempenho e dos limites de definição dos conflitos de tráfego – Devem-se definir medidas capazes de informar a quantidade de conflitos que ocorrem na simulação, a severidade desses conflitos e que elas sejam capazes de considerar diferentes tipos de usuários e condições ambientais. Recomenda-se que a definição dos limites de conflitos de tráfego das medidas de desempenho selecionadas leve em consideração os valores comumente encontrados na literatura (ex.: TTC = 1,5s), mas nada impede que o pesquisador/técnico possa estabelecer de forma arbitrária valores mais ou menos restritivos, ficando essa definição a caráter dos objetivos da análise.
- b) Definição do Número de simulações – Deve se considerar um valor mínimo para as simulações iniciais, normalmente a partir de seis simulações FHWA (2004). Para verificar a representatividade da amostra do número de simulações serão utilizadas as diretrizes do Manual da FHWA (2004) para aplicação de modelagem microscópica do tráfego. Segundo o Manual, para estimar o número mínimo de simulações necessárias para realizar um experimento são necessárias três informações básicas: 1. Desvio padrão da medida de desempenho procurada na amostra; 2. O comprimento do intervalo de confiança e 3. O nível de confiança;

O número de simulações necessárias para estimar uma medida de desempenho deve ser realizado por um processo iterativo em que deve ser calculado o desvio padrão de uma amostra inicial dessa medida (pelos menos seis simulações), em seguida deve ser determinado o grau de confiança (normalmente 95%) e se estabelecer a amplitude de um intervalo de confiança que deve ser definido pelo analista de acordo com objetivo do experimento. Definidas as informações preliminares aplica-se a Equação (1) a seguir para determinar o número mínimo de simulações:

$$CI_{1-\alpha\%} = 2 * t_{(1-\alpha/2), N-1} \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (4.1)$$

Em que:

$CI_{(1-\alpha)\%}$ = $(1-\alpha)\%$ intervalo de confiança para a média verdadeira, onde alfa é igual a probabilidade do intervalo de confiança não conter o valor verdadeiro;

$t_{(1-\alpha/2), N-1}$ = estatística t de *Student* para a probabilidade da soma dos erros de dois lados da curva para alfa com N-1 graus de liberdade, onde N é igual ao número de repetições;

S = desvio padrão da amostra;

- c) Nível de agregação espaço-temporal dos dados de entrada - Todos os atributos de tráfego devem ser inseridos na plataforma de microssimulação da forma mais desagregada possível. Um nível de agregação muito comum nos estudos de tráfego são intervalos de 15 minutos, esse intervalo é normalmente o nível de agregação fornecido pelos sistemas CTA;
- d) Intervalos de simulação ou tempo de resolução – Esta medida refere-se ao intervalo de tempo que o simulador irá armazenar as informações de saída de cada veículo para estimar os indicadores. Conforme as discussões do capítulo 3 verificou-se que este fator tem papel determinante nas análises de SV, sendo que definições de valores menores tendem a tornar a análise mais precisa, no entanto esta decisão afeta diretamente o processamento da simulação e o tamanho dos arquivos de saída. Assim, a definição deste intervalo deve levar em consideração o objetivo da análise, o tempo disponível, o tamanho da rede e a capacidade de processamento e armazenamento.
- e) Tempo de aquecimento – Este fator é o tempo necessário para que a plataforma

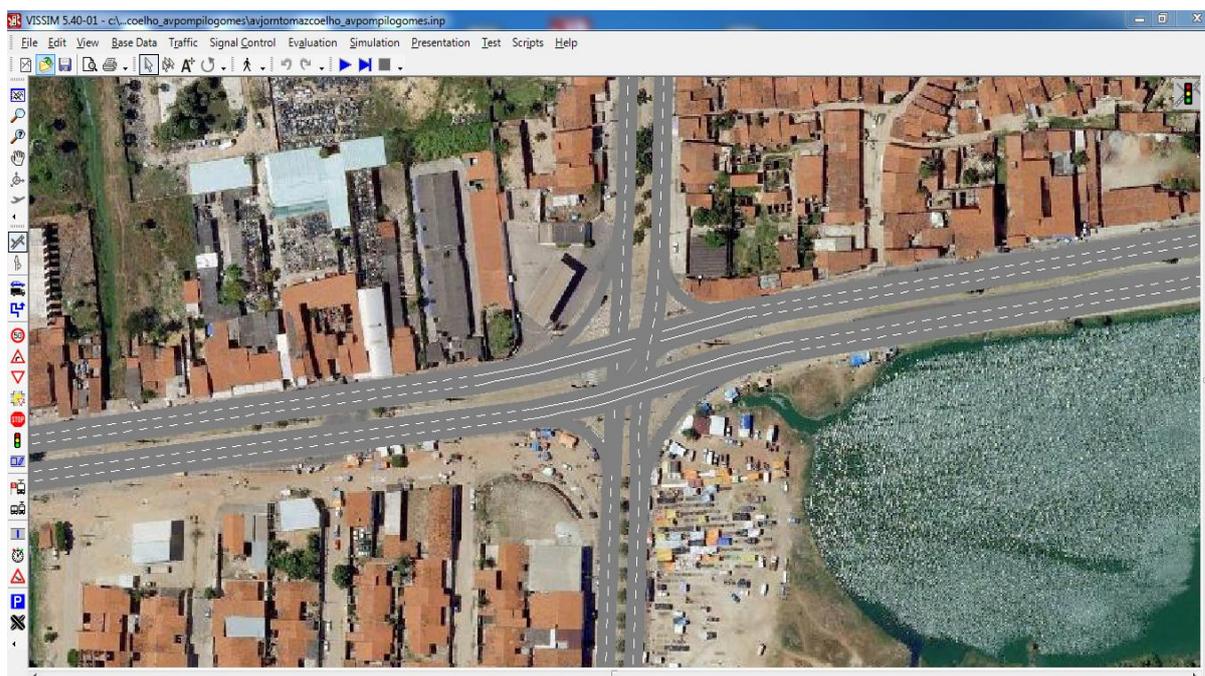
possa iniciar a simulação antes de serem coletados os parâmetros que irão subsidiar o cálculo das medidas de desempenho. Para este período é aconselhável que os dados de entrada do simulador sejam os mesmos do primeiro intervalo de tempo normal a ser considerado;

- f) Tempo total da simulação – Este tempo vai variar de acordo com o escopo da análise aplicada, mas sempre será formado pelo tempo de aquecimento somado ao tempo efetivamente considerado para o cálculo dos indicadores;
- g) Informação de saída – Deve ser exportado um conjunto de dados que permita calcular os indicadores selecionados para representar o DSV, dentre os quais: a identificação dos veículos, o número e as coordenadas dos links, o número das faixas, a identificação do veículo líder e seguidor e os dados operacionais de cada veículo como a velocidade, a aceleração, o espaçamento, o comprimento o tipo de veículo, entre outros.

4.3.3. Codificação da rede no microssimulador

A etapa de codificação da rede no microssimulador consiste na alocação das características geométricas, operacionais e de demanda do local selecionado. Para inserir as características geométricas, recomenda-se usar uma imagem do *software* Google Earth® como plano de fundo para auxiliar o desenho dos links e conectores. Os links devem ser desenhados separadamente e depois interligados por um conector que além dessa função também tem o objetivo de indicar para o microssimulador quais são os possíveis movimentos de conversão que podem ser realizados pelos veículos e também os limites da trajetória que estes poderão realizar para fazer tais movimentos. A seguir na Figura 4.3 é apresentada uma ilustração dessa fase de codificação.

Figura 4.3 – Codificação dos atributos geométricos no simulador.



Fonte: Autor.

Conforme previsto na seção anterior as características operacionais e de fluxo a serem codificadas constam dos atributos possíveis de serem coletados em campo e com o auxílio dos sistemas CTA, dentre as quais pode se exemplificar: fluxo veicular, plano semaforico das interseções, paradas de transporte coletivo, velocidade regulamentar das vias, presença de estacionamentos, restrições/liberações de conversões à esquerda, percentuais de conversão, classificação dos veículos da rede etc. A codificação dos atributos operacionais deve ser feita usando os dados mais desagregados possíveis.

4.3.4. Calibração e validação do modelo de microssimulação

Conforme discutido no capítulo 3, idealmente o processo de calibração/validação deve ser feito usando metodologias de multicritério que realizem o processo à luz de medidas de desempenho de fluidez e de segurança viária. No caso da medida de segurança, o cenário ideal seria a calibração dos indicadores selecionados para a análise. No entanto, pelas dificuldades de obtenção dos indicadores de segurança no campo na realidade brasileira, indica-se que o procedimento de calibração/validação considere pelo menos medidas de desempenho da fluidez que tenham uma relação mais próxima com a segurança viária como, por exemplo, a variável número de paradas. Uma alternativa a ser considerada para implementar o processo de calibração pode ser a revisão da literatura especializada a fim de

encontrar procedimentos utilizados em outros locais que possam ser aplicados na nossa realidade, desde que apontadas as ressalvas necessárias.

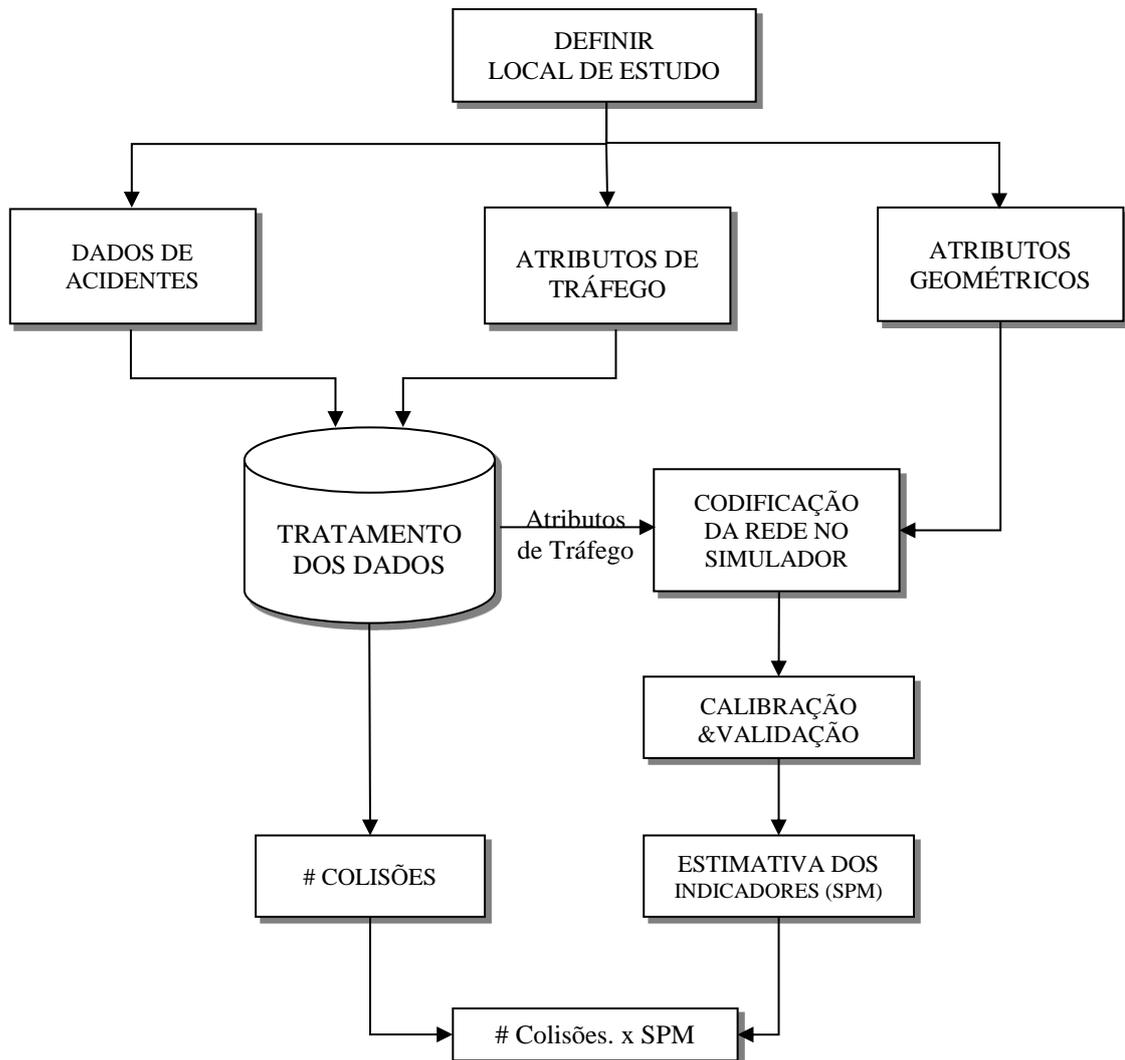
4.3.5. Estimação dos indicadores proxy

A revisão da literatura apontou que apesar de existirem modelos comportamentais que permitem à detecção de forma automática dos conflitos de tráfego as plataformas de simulação ainda não incorporaram esses modelos. Deste modo, a estimação das medidas de desempenho da segurança viária, atualmente, só pode ser feita de duas formas: projetando-se um experimento para calcular os indicadores a partir das informações de saída do simulador ou utilizando alguma plataforma já desenvolvida como o SSAM ou o EIVSIN.

4.4. Validação dos indicadores obtidos na microssimulação

A metodologia proposta para os testes de exploração da validação relativa entre acidentes observados e o desempenho de segurança simulado está sintetizada pelo fluxograma ilustrado na Figura 4.4. A execução das etapas deste método são basicamente as mesmas da metodologia proposta para avaliação do DSV com o acréscimo das etapas de coleta de informações sobre os acidentes que ocorreram no local, o tratamento dos dados de acidentes e de tráfego e a etapa comparativa entre os indicadores *proxy* (SPM – *Safety Performance Measure*) e os acidentes de trânsito observados.

Figura 4.4 – Fluxograma de validação dos indicadores *proxy*.



Fonte: Autor.

Vale ressaltar a importância da etapa de tratamento dos dados, pois é neste momento que se deve definir que tipos de acidentes serão considerados para a análise e qual o escopo temporal será considerado. Por exemplo, pode-se selecionar apenas acidentes do tipo colisão traseira que ocorreram durante as madrugadas de sábado para domingo do último ano. Neste caso, nesta etapa também deverão ser selecionados apenas os dados de tráfego compatíveis com a definição apontada. A etapa de validação do método consiste na estimação e comparação dos indicadores *proxy* obtidos na simulação com a medida de desempenho de acidentes. Esta comparação deve ser feita observando se a variação dos indicadores *proxy* acompanha a variação da medida de desempenho dos acidentes.

4.5. Considerações finais

Este capítulo apresentou, inicialmente, uma proposta de estrutura para consolidar as análises de SV no processo de tomada de decisão da etapa de avaliação de alternativas do planejamento tático e operacional de sistemas de transportes, com o uso da ferramenta de microssimulação de tráfego. Em seguida, foram apresentadas de forma detalhada, as etapas da metodologia proposta para obter o DSV de interseções urbanas com o uso de microssimuladores de tráfego. Como etapas preliminares apresentaram-se: i) a seleção e caracterização da área de estudo a ser explorada; ii) a estruturação e consolidação da base de dados necessária para codificar a área de estudo no microssimulador de tráfego VISSIM e iii) as definições do planejamento da simulação. E por fim, foram apresentadas as duas etapas finais de aplicação da metodologia proposta: iv) calibração e validação dos parâmetros do microssimulador e v) o processo de estimação dos indicadores *proxy* usados para avaliar o DSV.

De modo complementar, ainda foi apresentado uma proposta de esforço para a validação relativa dos indicadores *proxy* estimados com a medida de desempenho acidentes de trânsito. Visando consolidar os métodos e proposições apresentadas neste capítulo, a seguir o capítulo 5 apresenta os resultados de uma aplicação piloto da metodologia proposta para três interseções de tráfego da cidade de Fortaleza.

CAPÍTULO 5

5. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA EM TRÊS INTERSEÇÕES URBANAS DA CIDADE DE FORTALEZA - CE

5.1. Introdução

Uma vez apresentadas as etapas metodológicas para análise do DSV em ambiente urbano, apresenta-se neste capítulo uma aplicação para três interseções viárias de corredores arteriais da cidade de Fortaleza. Este capítulo tem como objetivos investigar a adequabilidade da metodologia de análise do DSV e apresentar um esforço de validação do desempenho de segurança viária obtido para as três simulações com séries históricas de acidentes. Para tanto, serão estimados os DSV de três interseções isoladas em relação aos conflitos longitudinais (de traseira).

5.2. Aplicação piloto

5.2.1. Definição das interseções

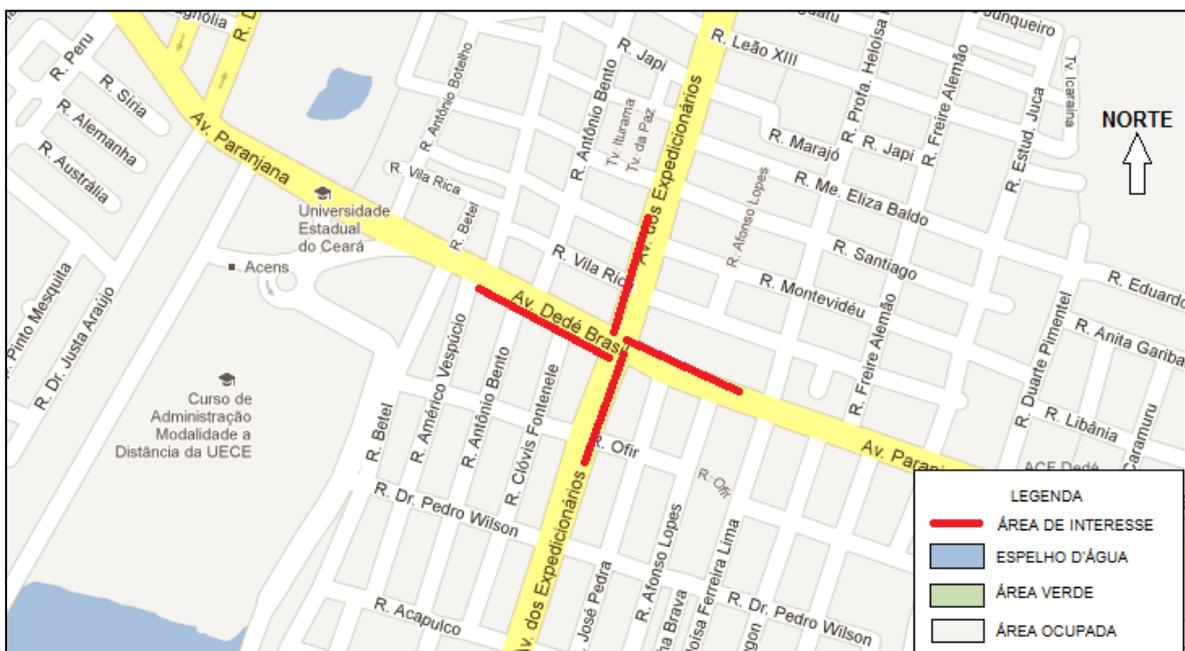
Para testar a aplicabilidade da metodologia proposta três interseções foram selecionadas com base em três critérios, a saber: tipo de controle de tráfego, condições de estacionamento e influência de outros cruzamentos. As interseções selecionadas são controladas por semáforos de dois e três estágios que ordenam os fluxos das vias alternando a preferência de passagem entre elas. Em virtude das dificuldades do simulador em simular manobras de avanço semaforizado este experimento não considerou as colisões transversais. Assim, todos os conflitos considerados neste experimento foram relativos às interações de traseira, por sua vez, ocasionadas pela alternância do direito de passagem do controle semaforizado. Este fator foi importante para testar o procedimento complementar que consistiu na validação relativa dos indicadores *proxy*.

A influência das condições de estacionamento nas colisões traseiras foi considerada uma fonte potencial de viés desses acidentes. Os atuais algoritmos microscópicos não consideram explicitamente estas manobras em sua formulação, portanto, um importante critério para selecionar cruzamentos candidatos foi a não ocorrência de estacionamentos dentro a área de interesse em cada aproximação.

O terceiro critério de seleção foi relacionado à dependência espacial das interseções. Neste caso, foram selecionadas interseções com uma distância considerável de outros cruzamentos sinalizados ($> 200\text{m}$) para evitar o agrupamento de veículos da interseção a jusante e a introdução de uma dependência espacial entre as entidades.

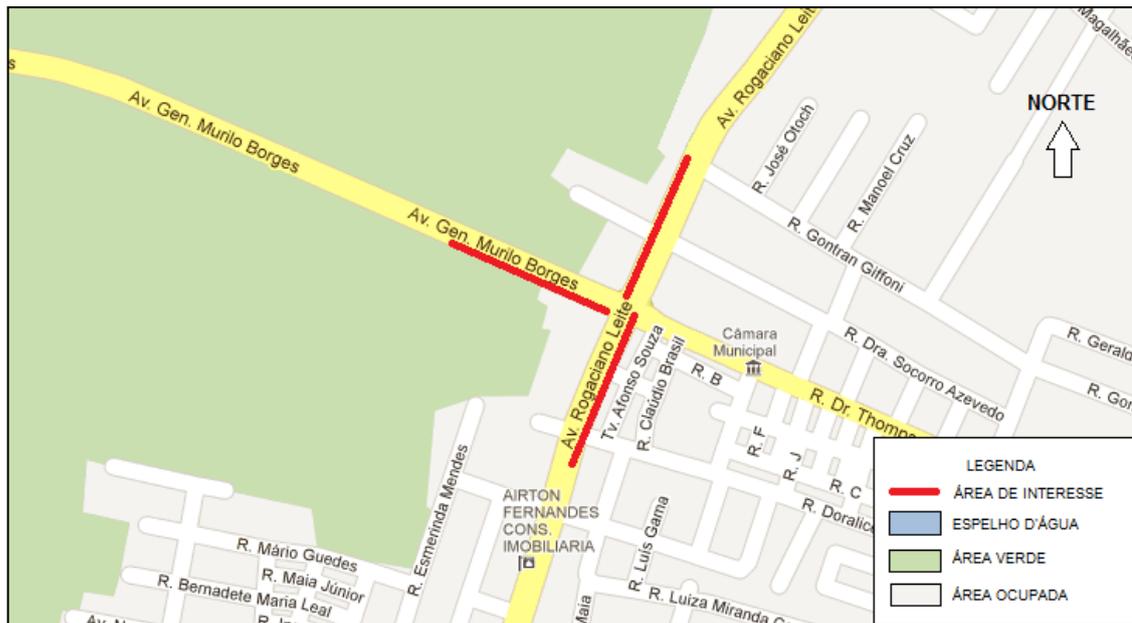
Tomando como base estes critérios as Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 ilustram as três interseções selecionadas: Int. 168 (av. Dedé Brasil x av. dos Expedicionários), Int. 243 (av. Gen. Murilo Borges x av. Rogaciano Leite) e Int. 250 (av. Gen. Murilo Borges x av. Gov. Raul Barbosa). Todas as interseções são formadas por vias arteriais com canteiro central (exceto a av. Gen. Murilo Borges) e as aproximações variam de duas a três faixas de tráfego por pista de rolamento.

Figura 5.1 – Disposição da Interseção #168 (Av. Dedé Brasil x Av. dos Expedicionários)



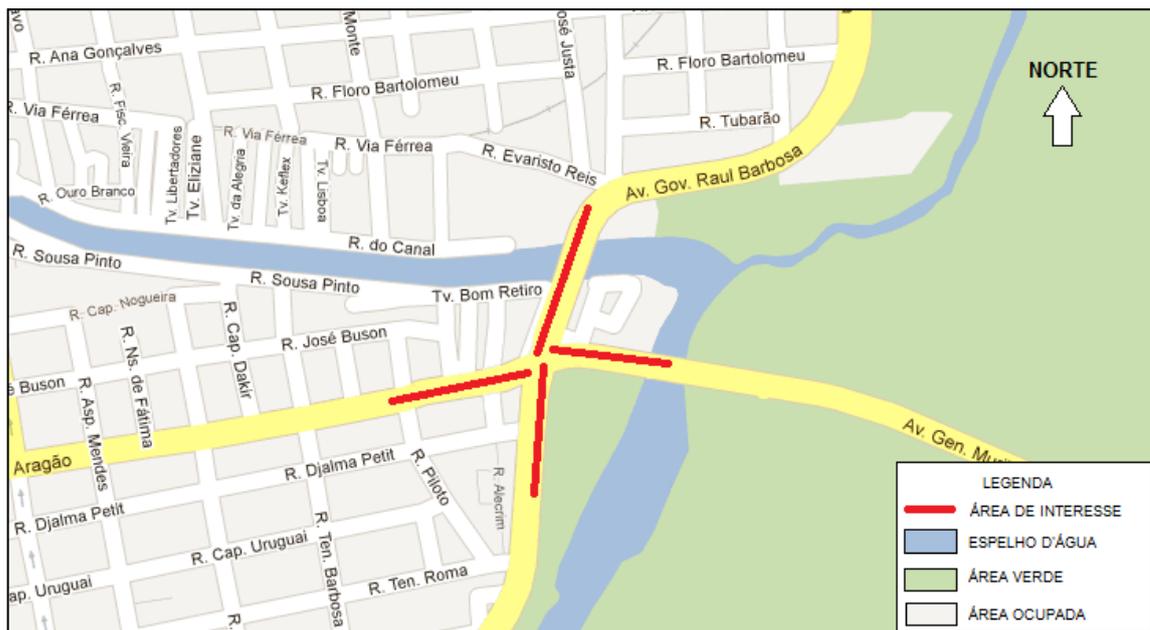
Fonte: Autor.

Figura 5.2 – Disposição da Interseção #243 (Av. Gen. M. Borges x Av. Rogaciano Leite)



Fonte: Autor.

Figura 5.3 – Disposição da Interseção #250 (Av. Gen. M. Borges x Av. G. Raul. Barbosa)



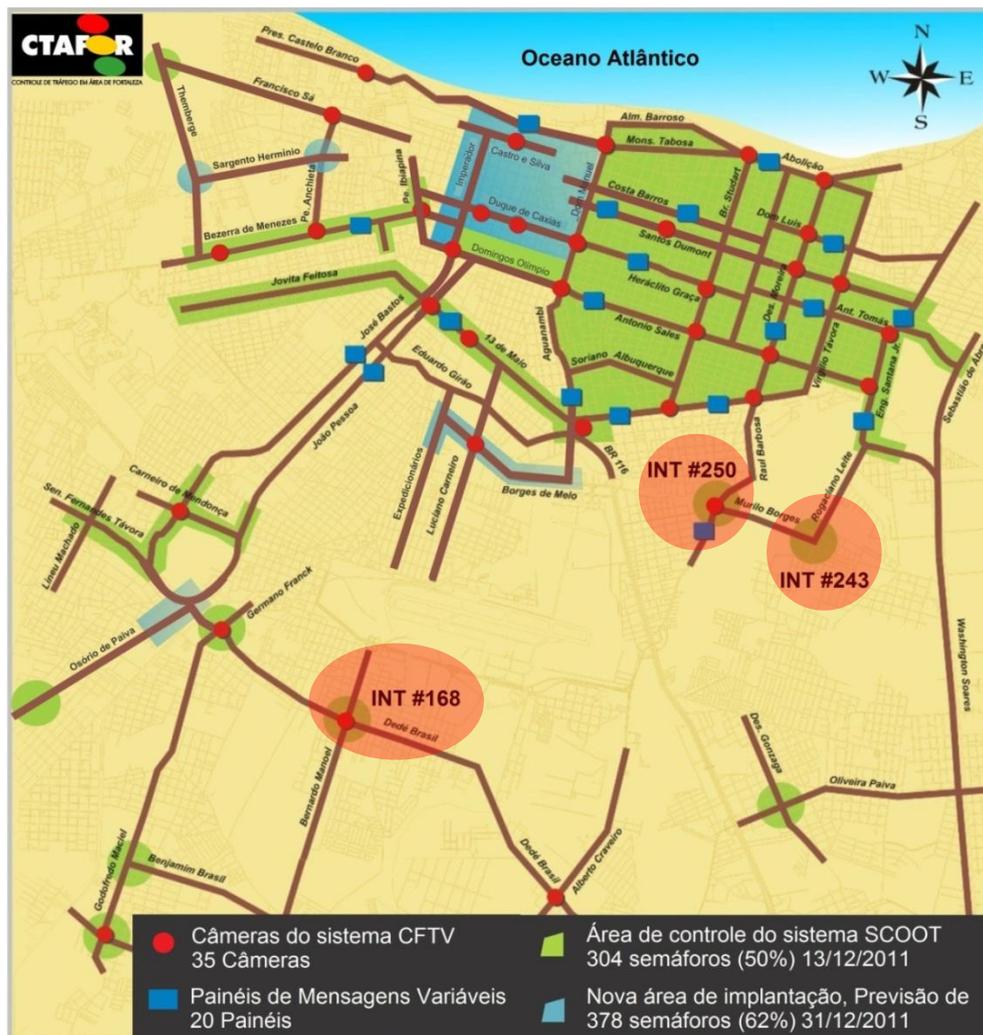
Fonte: Autor.

As áreas destacadas em vermelho nas Figuras 5.1 a 5.3 são as áreas de interesse para coleta e análise dos dados. Estas áreas foram definidas para cada cruzamento com o intuito de abranger o comprimento médio da fila medido, a partir da linha de retenção. O comprimento da fila média foi obtido a partir do histórico do banco de dados da divisão de controle de tráfego em área de Fortaleza (CTAFOR) e por medições em campo, os valores variaram entre 80 e 200 metros.

5.2.2. Caracterização das interseções

As três interseções selecionadas para análise neste estudo são compostas por cinco corredores arteriais de tráfego que fazem importantes ligações entre bairros de Fortaleza. Conforme o esperado foi observado um intenso fluxo veicular nas interseções e ainda a existência de uso do solo bastante misto que alterna entre residências e comércios ao longo das vias que as compõem. No que se referem ao controle operacional do fluxo, as três interseções possuem controle de tráfego semafórico centralizado interligado a rede da divisão de controle de tráfego em área de Fortaleza (CTAFOR). O sistema foi implantado em Fortaleza, a partir de agosto de 2000, com o objetivo de propiciar uma sobriedade ao sistema viário da área mais adensada e saturada de Fortaleza (LOUREIRO *et al.*, 2002). A seguir na Figura 5.4 é apresentada a área sob o controle do CTAFOR e a localização das interseções selecionadas para este experimento.

Figura 5.4 – Área de controle do CTAFOR com a localização das interseções do experimento.



Fonte: Adaptado de Loureiro *et al.* (2002)

Conforme Loureiro *et al.* (2002) o funcionamento do sistema CTAFOR é composto pela atuação de três subsistemas distintos que atuam de forma integrada. O primeiro denominado de CFTV propicia o monitoramento das principais interseções semaforizadas da malha viária da cidade, por meio de 35 câmeras de vídeo. O segundo subsistema possibilita a comunicação com os usuários do sistema viário, através de 20 painéis de mensagens variadas, distribuídos nos principais corredores de tráfego da cidade. Por fim, o terceiro subsistema, denominado sistema SCOOT (*Split Cycle Offset Optimisation Technique*), otimiza a operação semafórica de 304 cruzamentos (50% da rede semafórica, dados de 13/12/2011), a partir de informações coletadas em campo por uma rede de detectores veiculares instaladas a montante das aproximações semaforizadas.

Pela observação da Figura 5.4 é possível destacar que espacialmente as interseções estão localizadas em uma área intermediária entre a zona periférica, caracterizada pelo uso do solo predominantemente residencial, e a região central, onde estão localizadas as maiores concentrações de emprego e comércio de Fortaleza. Este fato lhes confere uma relevante importância do ponto estratégico de deslocamento na cidade.

De um ponto de vista menos abrangente, as interseções também se destacam por comporem importantes vetores de acesso a grandes Polos Geradores de Viagens (PGV) da cidade como, tais como: o Aeroporto Internacional (Pinto Martins), Estádio de Futebol (“Castelão”), Terminal de Passageiros do Sistema de Transporte Público (Terminal da Parangaba) e o Porto Marítimo de Passageiros e de Carga (Porto do Mucuripe). Por sua vez, este fato aliado à ausência de qualquer tipo de restrição à circulação de veículos influencia na composição do tráfego destes locais, tornando-a bastante mista.

Apresenta-se a seguir com maiores detalhes alguns aspectos da caracterização física e operacional das interseções que são baseados em pesquisas de campo e no banco de dados do CTAFOR. Vale destacar que o período selecionado para aplicação desta pesquisa foi o da manhã das 7h00 as 11h00 de dias úteis. Dessa forma, todas as medidas coletadas para a fase de caracterização tomarão como base essa prévia definição de dias e horário.

5.2.2.1. Aspectos Geométricos

Para caracterizar as interseções quanto aos seus aspectos geométricos foram coletadas informações a respeito sobre o número a largura e a quantidade de faixas das pistas de rolamento, a existência e largura dos separadores centrais e os ângulos das interseções.

Neste contexto, a seguir a Tabela 5.1 apresenta os resultados deste levantamento.

Tabela 5.1 – Características geométricas das interseções

INTERSEÇÃO	APROXIMAÇÃO	LARGURA	Nº DE FAIXAS	SEPARADOR CENTRAL	ÂNGULO DE INTERSEÇÃO	OBSERVAÇÃO
168	NORTE (00168:a)	9,0	3	SIM	80°	-
	LESTE (00168:b)	6,0	2	SIM	105°	-
	SUL (00168:c)	9,0	3	SIM	80°	-
	OESTE (00168:d)	6,0	2	SIM	95°	-
243	NORTE (00243:a)	10,0	3	SIM	90°	DIREITA LIVRE
	SUL (00243:c)	8,0	2	SIM	90°	-
	OESTE (00243:d)	7,0	2	NÃO	90°	-
250'	NORTE (00250:a)	10,5	3	SIM	130°	-
	LESTE (00250:b)	7,0	2	NÃO	60°	-
	SUL (00250:c)	10,5	3	SIM	110°	-
	OESTE (00250:d)	6,0	2	SIM	70°	-

5.2.2.2. Aspectos do controle de tráfego e do fluxo veicular

Conforme já comentado, as três interseções possuem controle do tráfego centralizado e em tempo real pelo CTAFOR o que permitiu a coleta de dados com maior agilidade. Segundo as informações coletadas do sistema adaptativo de controle de tráfego do CTAFOR (outubro de 2009) as interseções possuem um VDMA de aproximadamente 64.000 (#168), 41.000 (#243) e 80.000 (#250), este dado demonstra a referida importância das vias que compõem os cruzamentos como importantes corredores arteriais de tráfego da cidade de Fortaleza.

Dentre os dados coletados incluem-se o fluxo de tráfego médio agregado em amostras de 15 minutos por aproximação, duração do ciclo, atraso médio, tamanho de fila etc. A Tabela 5.2 apresenta uma amostra dos atributos de tráfego obtidos junto ao CTAFOR para a interseção # 168.

Tabela 5.2 – Amostra de atributos de tráfego para interseção # 168

Int. aproximação	Dia e Data (dd-mmm-yyyy)	Tempo Inicial (hh:mm)	Tempo Final (hh:mm)	Fluxo Médio (veh/h)	Atraso Médio (veh)	Atraso Médio (s)
00168:a	FR 6-Mar-2009	07:00	07:15	688	21,9	114,5
00168:a	MO 9-Mar-2009	07:00	07:15	735	21,9	107,2
00168:a	TU 10-Mar-2009	07:00	07:15	762	20,5	96,8
00168:a	WE 11-Mar-2009	07:00	07:15	785	20,9	95,8

Vale ressaltar que nesta aplicação os fluxos de tráfego estão sendo usados como dados de entrada do simulador porque os locais de estudo são de interseções. Entretanto, para aplicação desta metodologia em corredores de tráfego ou em uma rede urbana será necessária à alocação de uma matriz OD no simulador. Neste caso, para codificação das interseções no simulador foi necessária além dos volumes de tráfego a informação dos percentuais de conversão e da classificação veicular do fluxo.

O conjunto de dados utilizados para estimar atributos do tráfego foi obtido a partir de uma amostra de 80 dias típicos do ano de 2009. Conforme o previsto a amostra dos dados de tráfego foi filtrada e compilada para os dias e horas de pesquisa de interesse (Dias úteis de 7h00 as 11h00 da manhã). Além disso, o conjunto de dados foi estatisticamente tratado para identificar *outliers* e observações em falta utilizando a ferramenta de *box-plot* como proposto por Oliveira (2004). Para complementar as informações básicas fornecidas pelo SCOOT foram usadas câmeras do circuito interno de TV do CTAFOR e ainda inspeções em campo no período de interesse. Estas inspeções tiveram como objetivo estimar a porcentagem de veículos pesados (caminhões e ônibus), bem como classificação direcional do tráfego de cada interseção. A seguir na Tabela 5.3 são apresentados os dados básicos do tráfego coletados para os locais de estudo.

Tabela 5.3 – Resumo dos atributos de trafego

Aproximação	Fluxo Médio (veh/h)	% Conversão			% Caminhões e Ônibus	Tempo de Ciclo (s)
		Esq.	Frente	Dir.		
00168:a	811	21	72	7	6	176
00168:b	793	-	82	18	14	176
00168:c	1309	20	75	5	8	176
00168:d	733	-	86	14	16	176
00243:a	1095	27	30	43	2	160
00243:c	874	34	64	2	6	160
00243:d	705	35	59	6	4	160
00250:a	1610	-	86	14	6	176
00250:b	910	35	53	12	4	176
00250:c	1017	-	78	22	10	176
00250:d	768	35	64	1	7	176

Conforme podem ser observados na Tabela 5.3 os percentuais de veículos pesados são mais significativos nas interseções #168 e #250. Este fato decorre do fato de que as vias que compõem essas interseções são vetores de acesso a importantes PGV, além de se interligam diretamente com a BR 116 uma das principais rodovias de acesso a Fortaleza. Neste caso, a Int. 168 compõe umas das principais rotas de acesso ao terminal público de ônibus da Parangaba (Av. Dedé Brasil) e a Int. 250 compõe a principal rota de acesso ao porto de cargas e passageiros do Mucuripe (Av. Gov. Raul Barbosa).

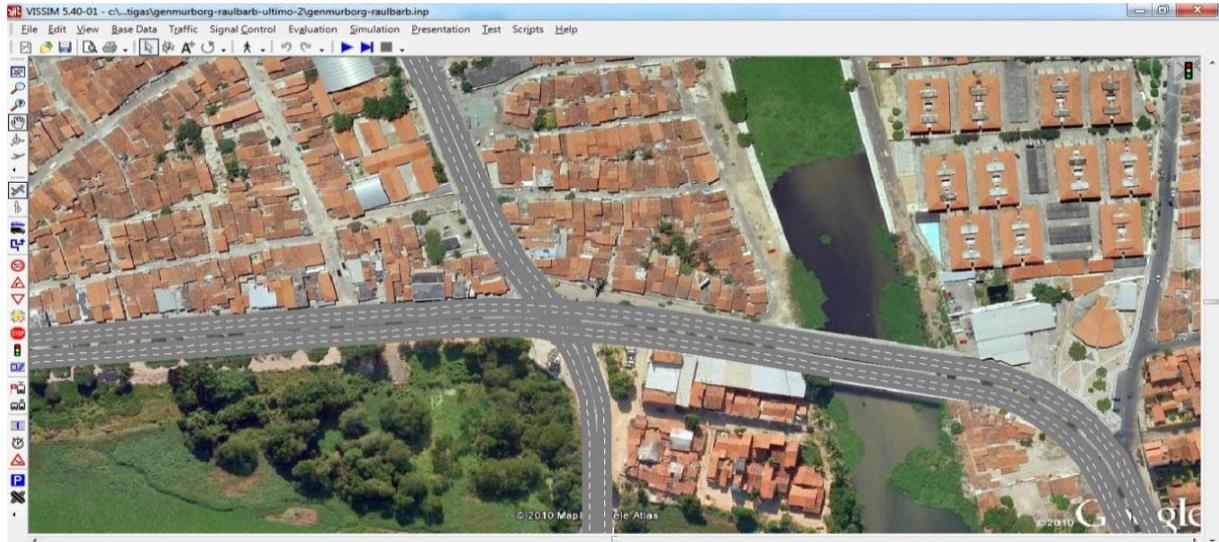
Dados referentes aos movimentos de pedestres, ciclistas e motociclistas não foram coletados tendo em vista a complexidade do esforço de modelagem necessário para simulá-los simultaneamente no mesmo experimento. Além disso, os algoritmos do microssimulador de tráfego VISSIM não foram projetados originalmente para modelar o comportamento urbano dos usuários de motocicletas das grandes cidades brasileiras, sendo possível apenas a definição, por meio de um modelo determinístico, de um processo de permissão de ultrapassagens entre veículos na mesma faixa.

Os mesmos argumentos usados para exclusão dos motociclistas também são válidos para os ciclistas tendo em vista a reduzida malha viária de ciclovias na maioria das grandes cidades brasileiras, isso provoca a circulação deste tipo de usuário no mesmo espaço dos veículos motorizados, situação que não é bem modelada pelos algoritmos de simulação atuais. Desta forma, caso estes tipos de usuários fossem inseridos na modelagem haveria uma redução significativa do nível de representatividade do ambiente simulado.

5.2.3. Codificação das interseções no simulador

A etapa de codificação da rede no simulador consistiu na alocação dos dados de geometria e de tráfego no simulador. Conforme previsto, os dados relativos à geometria (links e conectores) foram inseridos com o auxílio de uma imagem do *software* Google Earth®. A seguir na Figura 5.6 são apresentados os resultados da codificação dos links e conectores da interseção 250.

Figura 5.5 – Codificação dos dados geométricos da Int. 250



Fonte: Autor.

Os dados de tráfego codificados no simulador foram os fluxos de tráfego de cada link com seus respectivos percentuais de conversão e de veículos pesados e ainda a programação semafórica de cada local. Os dados foram codificados para intervalos de 15 minutos conforme ilustrado na Figura 5.6. Os valores dos fluxos estão em destaque pelo retângulo vermelho, já a composição veicular é predefinida em outro campo no qual se estabelece as distribuições que se pretende usar e só então é apontada nos campos indicados pelo retângulo verde. Por fim, a informação dos percentuais de conversão é inserida na definição de rotas de cada link.

Figura 5.6 – Codificação dos dados fluxo e de classificação veicular

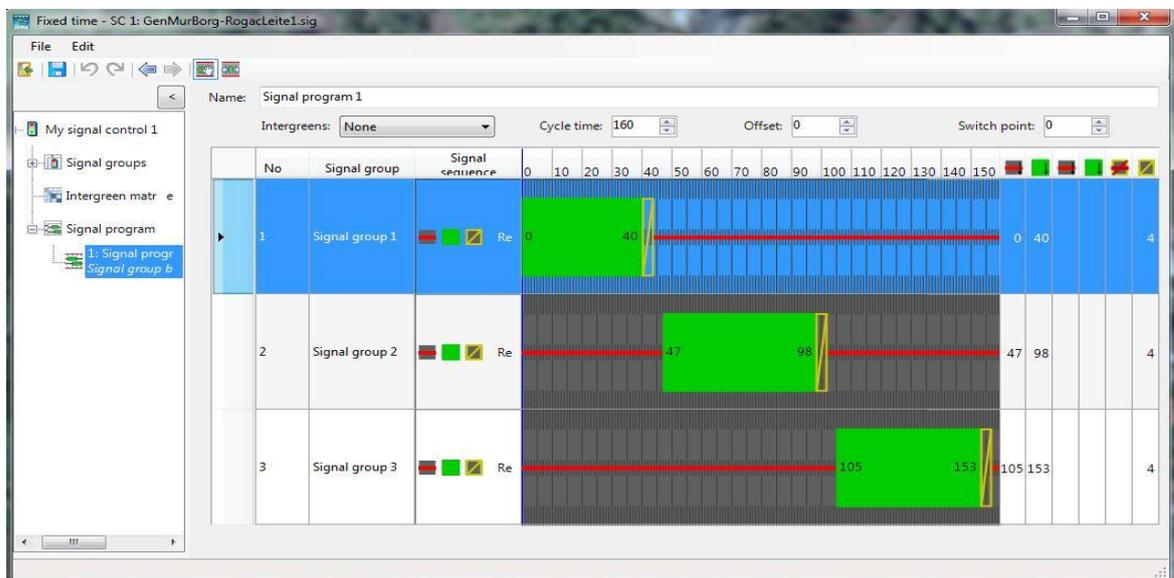
Vehicle Inputs		Link Number	Link Name	Input Name	Show Label	0 - 900	900 - 1800	1800 - 2700	2700 - 3600	3600 - 4500	4500 - 5400	5400 - 6300	6300 - 7200	7200 - 8100
		2	Av. Gen. Murilo Borges	B	<input checked="" type="checkbox"/>	892	892	889	924	927	880	880	901	953
						1:B	1:B	1:B	1:B	1:B	1:B	1:B	1:B	1:B
		3	Av. Gov. Raul Barbosa	A	<input checked="" type="checkbox"/>	1647	1647	1591	1685	1733	1716	1673	1679	1635
						2:A	2:A	2:A	2:A	2:A	2:A	2:A	2:A	2:A
		1	Av. Gen. Murilo Borges	D	<input checked="" type="checkbox"/>	741	741	717	725	711	705	716	747	762
						4:D	4:D	4:D	4:D	4:D	4:D	4:D	4:D	4:D
		4	Av. Gov. Raul Barbosa	C	<input checked="" type="checkbox"/>	995	995	973	994	986	927	916	928	913
						3:C	3:C	3:C	3:C	3:C	3:C	3:C	3:C	3:C

Fonte: Autor.

As informações sobre a programação semafórica foram inseridas no VISSIM definindo a quantidade de estágios e suas amplitudes, bem como a dos ciclos de cada

interseção conforme pode ser observado na Figura 5.7 que mostra os dados inseridos para a interseção #250. Esta interseção assim como a #168 possui três estágios, mas tem o diferencial de ter um movimento de direita livre da aproximação sul durante o estágio de liberação do fluxo da aproximação leste. Já a interseção #243, apesar de ter apenas dois estágios, possui um movimento de direita livre desprotegido, ou seja, sem estágio, neste caso o controle dos fluxos convergentes no simulador é feito apenas pela indicação do direito preferencial de passagem da via principal. Vale ressaltar que apesar das interseções serem controladas em tempo real, a programação considerada para a pesquisa foi de tempo fixo, pois não se dispunha do módulo do SCOOT na versão do VISSIM considerada na pesquisa.

Figura 5.7 – Codificação dos dados semafóricos.



Fonte: Autor.

5.2.4. Calibração dos parâmetros e preparativos finais

O processo de calibração desta pesquisa tomou como base a pesquisa realizada por Cunto e Saccomanno (2008), na qual apresentaram um esforço para calibrar e validar os parâmetros do VISSIM dos modelos de carro seguidor, aceitação de brecha, e mudança de faixa com base em observações do CPI obtidos a partir de dados de rastreamento veicular. Os resultados deste exercício de calibração/validação permitiram uma melhor estimativa para os parâmetros que foram identificados como estatisticamente significativos para explicar o desempenho da segurança viária obtida a partir da microsimulação. Estes valores foram assumidos para esta pesquisa e encontram-se resumidos na Tabela 5.4. Valores padrões do

VISSIM foram usados para os parâmetros de entrada que não foram considerados como estatisticamente significativos para a simulação do desempenho da segurança viária.

Tabela 5.4 – Calibração dos parâmetros de entrada do VISSIM

Parâmetro de entrada	Valor Calibrado	Descrição
<i>Desired deceleration</i>	-2,6	Máxima desaceleração (m/s ²) que os condutores estão dispostos a aplicar em condições normais (sem emergência).
CC0	3,0	Distancia de parada (m); define a distância desejada entre os carros parados.
CC1	1,5	Tempo de <i>Headway</i> (s); definido como o tempo mínimo que o condutor deseja manter do veículo líder; quanto maior o valor mais cauteloso é o condutor; CC0 e CC1 são combinados para expressar a distância de segurança.

Fonte: Cunto (2008).

Conforme indicações do Capítulo 3, serão investigados um indicador de cada categoria de SPM (*Safety Performance Measure*) estimando o número de conflitos obtidos a partir de medidas do TTC, DRAC e CPI simulados para o local de estudo. Os Limites para a definição de um conflito de tráfego de traseira foram assumidos de acordo com estudos de outros lugares (VAN DER HORST, 1990; HYDEN, 1996 e CUNTO, 2008). Para TTC e DRAC, um conflito de tráfego será atribuído a interações veiculares resultantes em valores de TTC inferiores a 1,5s e DRAC superiores a 3,35m/s².

A definição de conflitos usando o índice CPI requer uma suposição sobre a taxa de desaceleração máxima disponível (MADR) para cada veículo e estimativas (ambiente de simulação) do DRAC ao longo do tempo. Para cada veículo na simulação um valor MADR individual é atribuído a partir de uma distribuição normal truncada para carros e caminhões em separado. Os valores na Tabela 5.5 foram obtidos a partir de testes de campo para veículos diferentes, com velocidades iniciais de 80 a 100 km/h chegando à parada completa (NEILSEN, 2007; MOVIT, 2007). Os valores de DRAC, por outro lado, foram obtidos a partir de interações traseiras de veículos como representado pela combinação de atributos geométricos e de tráfego e as relações com os algoritmos microscópicos de *car-following*, aceitação de brecha e mudança de faixa. Neste caso, um conflito de tráfego é detectado quando um determinado veículo tem um esforço de frenagem necessária para evitar a colisão maior do que sua capacidade máxima de frenagem, ou seja, DRAC > MADR.

Tabela 5.5 – Assumindo parâmetros truncados da distribuição normal para MADR

Parâmetros da distribuição MADR	Carros	Ônibus e Caminhões
Média (m/sec ²)	8,45	5,01
Desvio Padrão (m/sec ²)	1,40	1,40
Limite superior (m/sec ²)	13,45	7,98
Limite inferior (m/sec ²)	3,45	2,05
Distância Máxima de Conflito (m)	100	100

Fonte: Cunto (2008).

Para estimação dos indicadores *proxy* será usado o aplicativo EIVSIN que usa o arquivo de saída “*.fzp” do aplicativo VISSIM. Tomou-se ainda o cuidado de selecionar apenas o tempo de simulação efetivamente válido, ou seja, excluíram-se das análises as informações referentes ao tempo de aquecimento que foi de 900 segundos. Após a codificação de todos os dados no simulador e definidas as informações importantes para os arquivos de saída, procedeu-se com a estimação dos indicadores *proxy*.

5.2.5. Resultados da estimação dos indicadores *proxy*

Para cada interseção foram realizadas 10 simulações com diferentes números sementes para estimar a variabilidade entre as medidas de TTC, DRAC e CPI. Informações de cada veículo como coordenadas do veículo, tipo de veículo, velocidade, distância, aceleração / desaceleração taxa, *headway*, veículo da frente, o veículo anterior e outros foram registrados a cada 0,1 s (tempo de resolução) para estimar as SPM. Estas variáveis individuais foram compiladas e processadas no aplicativo EIVSIN para o cálculo dos indicadores, bem como dos conflitos de tráfego derivados de cada uma. A seguir na Tabela 5.6 é apresentada uma amostra dos resultados obtidos com o aplicativo EIVSIN para o indicador TTC referente às quatro horas de simulação (7h00 às 11h00) da interseção #168.

Tabela 5.6 – Resultados da estimação do indicador TTC na interseção #168 (*continua*)

# Simulação	# Veículos Gerados	# Veículos em Conflito	% Veículos em Conflito	Tempo de Exposição (veic.s)	Tipo de conflito
1	14199	402	2,83	1,03	C. Traseira
2	14237	411	2,89	1,01	C. Traseira
3	14206	373	2,63	0,99	C. Traseira
4	14326	395	2,76	1,01	C. Traseira
5	14389	383	2,66	1,03	C. Traseira
6	14370	359	2,50	1,05	C. Traseira

Tabela 5.6: Resultados da estimação do indicador TTC na interseção #168 (*conclusão*)

# Simulação	# Veículos Gerados	# Veículos em Conflito	% Veículos em Conflito	Tempo de Exposição (veic.s)	Tipo de conflito
7	14376	383	2,66	1,00	C. Traseira
8	14339	405	2,82	0,89	C. Traseira
9	14409	395	2,74	0,99	C. Traseira
10	14418	380	2,64	0,98	C. Traseira
MÉDIA	14326,9	388,6	2,71	1,00	-

O valor considerado para representar a estimativa do indicador TTC é a média da coluna “# Veículos em Conflito”. O valor apresentado como média dessa coluna indica que para quatro horas do período da manhã (7h:00 as 11h:00) de um dia típico (segunda a sexta), são esperados cerca de 390 veículos em conflito de acordo com o indicador TTC. De modo semelhante ao cálculo do indicador TTC, conforme apresentado na Tabela 5.6, procederam-se as estimativas dos demais indicadores para todas as interseções. A seguir na Tabela 5.7 são apresentados os resultados obtidos para esta etapa.

Tabela 5.7 – Resultados da estimação dos indicadores para as três interseções

Interseção	Fluxo Médio (veic./h)	# Veículos Gerados (média)	Nº Conflitos (média)			Desvio Padrão		
			TTC	DRAC	CPI	TTC	DRAC	CPI
<i>INT#168</i>	3646	14327	388,6	69,1	8,2	15,9	9,3	3,1
<i>INT#243</i>	2673	9763	219,4	44,6	3,5	15,3	5,3	2,5
<i>INT#250</i>	4307	16550	446,6	120,7	17,8	18,6	7,5	3,9

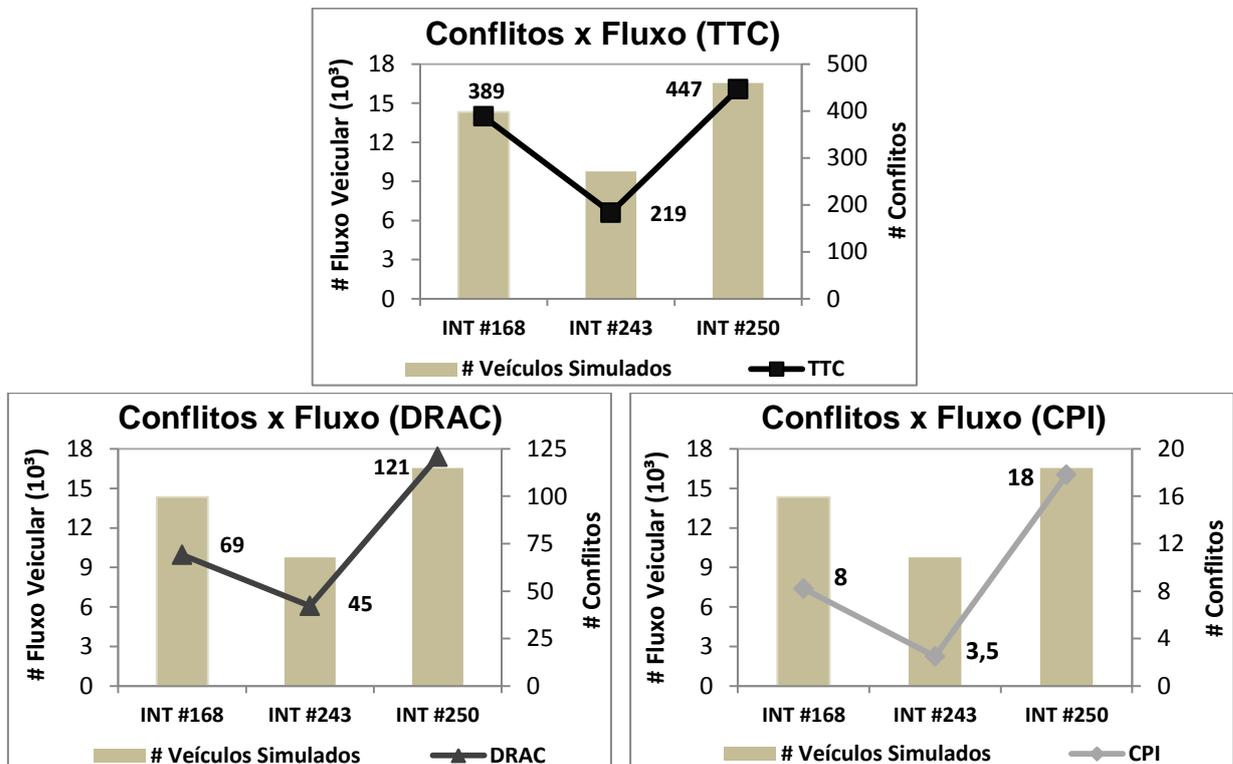
De um modo geral, foi possível apresentar de forma satisfatória o DSV para as três interseções. Diante dos resultados apresentados na Tabela 5.7, uma comparação entre os três locais observando os três indicadores propostos indica a existência de um “*ranking*” no qual a interseção #250 possui o ambiente com maior turbulência e ocorrência de conflitos de tráfego seguida pelas interseções #168 e #243.

Confrontando-se os resultados das três SPM observa-se que os limites dos indicadores TTC e DRAC (1,5 s e 3,35 m/s², respectivamente) produziram consideravelmente mais veículos em conflitos em relação ao indicador CPI. Além disso, pela Tabela 5.5, também é possível observar que os conflitos estimados pelo CPI apresentaram a maior variabilidade entre os indicadores. Esta variabilidade pode ser atribuída ao fato deste indicador possuir dois componentes de aleatoriedade, sendo o primeiro associado ao processo de geração de veículos na simulação (geração de semente aleatória) e o segundo associado à distribuição normal truncada apresentada na Tabela 4.2.

De acordo com os valores apresentados na Tabela 5.7 é possível verificar que há um percentual de veículos inseridos na fase de codificação que não são considerados na análise, pois o número de veículos simulados em cada cenário é um pouco menor que o observado em campo. Esta situação ocorre devido ao fato das interseções consideradas trabalharem sob a sua capacidade máxima no horário simulado (pico da manhã), o que provoca a existência de filas que superam o tamanho dos links desenhados no VISSIM, como há um tempo limite de espera dos veículos para entrarem nos links ocorre essa perda de veículos. Este problema foi detectado previamente de modo mais severo na fase de testes, porém os links foram aumentados resultando na diminuição dessa perda para valores aceitáveis.

Pela análise do gráfico da Figura 5.8, é possível verificar que os resultados também indicam uma consistência quando se confrontam os resultados dos indicadores com os valores de fluxo médio de cada interseção. Essa comparação sugeriu que os indicadores *proxy* foram capazes de seguir o comportamento dos fluxos de tráfego conforme os seus valores variaram. Este comportamento pode fundamentar a noção de que o risco de conflitos de tráfego tende a aumentar conforme a exposição.

Figura 5.8 – Gráficos de Fluxo x Conflitos.



Fonte: Autor.

Os resultados da simulação apontaram que a interseção #243 apresentou o menor número de conflitos por veículo, independentemente do indicador de segurança, quando comparada com as outras interseções. Este fato foi investigado através de um teste de comparação de médias que indicou ser possível refutar a hipótese nula de que a média dos conflitos da interseção #243 é igual à média das demais interseções. Além da variação do volume apontada anteriormente, isto também pode ser explicado por dois fatores, a saber: 1) A existência de apenas três aproximações na interseção, resultando em menos interações na área de estudo, e 2) Um movimento de conversão à direita livre na aproximação norte, portanto, resultando em um menor número de conflitos de traseira na faixa da direita dessa aproximação.

As diferenças entre o número médio de conflitos e sua variabilidade (desvio padrão) em função do indicador mostram indícios de que o número mínimo de simulações necessárias para detectar (estatisticamente) diferenças no desempenho da segurança viária pode variar consideravelmente entre os indicadores TTC, DRAC e CPI. Desta forma, conforme previsto na etapa de planejamento da metodologia, um experimento complementar foi planejado para cada uma das interseções do presente estudo no intuito de investigar a sensibilidade dos indicadores em termos do número de simulações necessárias para confirmar alterações de 5%, 10% e 20% no valor médio de conflitos. Para realizar essa verificação foram utilizadas as diretrizes do Manual da FHWA (2004) para aplicação de modelagem microscópica do tráfego.

Com base na amostra inicial das dez simulações efetuadas estimou-se o número mínimo de simulações necessário para inferir os resultados das SPM testadas neste trabalho (TTC, DRAC e CPI) para um nível de confiança de 95% e um intervalo de confiança de 5, 10 e 20%, a seguir apresentam-se os resultados desta análise na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Número de simulações para confirmar diferenças no DSV

#INT	MÉDIA (DESVIO PADRÃO)			# SIMULAÇÕES $CI_{(1-\alpha)\%} = 5\%$			# SIMULAÇÕES $CI_{(1-\alpha)\%} = 10\%$			# SIMULAÇÕES $CI_{(1-\alpha)\%} = 20\%$		
	TTC	DRAC	CPI	TTC	DRAC	CPI	TTC	DRAC	CPI	TTC	DRAC	CPI
#168	388,6 (15,9)	69,1 (9,3)	8,2 (3,1)	17	148	1150	6	39	280	3	12	74
#243	219,4 (15,3)	44,6 (5,3)	3,5 (2,5)	42	118	3900	13	32	1000	5	10	251
#250	446,6 (18,6)	120,7 (7,5)	17,8 (3,9)	16	35	390	7	11	100	4	5	28

Os resultados apresentados na Tabela 5.8, considerando o número de simulações realizadas neste trabalho (10), indicam que para um intervalo de confiança de 5% não é possível estabelecer inferências confiáveis para nenhuma das três SPM testadas, sendo, portanto necessárias um número maior de simulações para este intervalo. Já para o segundo intervalo de confiança (10%) os resultados indicam que já são possíveis inferências confiáveis para o indicador TTC, entretanto ainda sendo necessário um número maior de simulações para os demais indicadores.

O terceiro intervalo de confiança (20%) “acomodou”, de maneira geral, os indicadores TTC e DRAC obtidos com apenas 10 simulações. Em outras palavras, pode-se afirmar que cenários testados com apenas 10 simulações devem ter valores médios de conflitos com diferença superior a 20% para serem detectados estatisticamente. Os resultados, ainda, indicam que inferências confiáveis sobre o desempenho da segurança viária com o indicador *proxy* CPI, para as três interseções analisadas, só são possíveis com um grande número de simulações, chegando a ordem de 4000 simulações para a interseção 243 com um intervalo de confiança de 5%. Esta constatação era esperada tendo em vista a alta variabilidade observada nos resultados deste indicador, conforme apresentados na tabela 5.5. Desta forma, os resultados apresentados, sugerem que o CPI é o indicador menos suscetível a detectar pequenas diferenças no DSV quando utilizado na comparação de diferentes cenários em se tratando de interseções urbanas.

5.3. Validação relativa dos indicadores *proxy*

Conforme definições do capítulo 4, o método sugerido para validação dos indicadores *proxy* possui etapas semelhantes às da metodologia de análise do DSV, sendo apenas acrescidas das atividades de coleta dos dados de acidentes e da análise comparativa das medidas de desempenho. Como se pretende aplicar o método de validação nas mesmas interseções já simuladas, apresenta-se a seguir os resultados das etapas complementares.

5.6.1. Coleta dos dados de acidentes

Para testar a validade relativa dos indicadores *proxy* foram coletados dados de acidentes de três anos (2007-2009) junto ao SIAT-FOR. Vale ressaltar que as interseções selecionadas para este experimento são controladas por semáforos de dois e três estágios que ordenam os fluxos das vias alternando a preferência de passagem entre elas. Partindo da

premissa de que serão consideradas apenas interações longitudinais neste experimento admite-se que as colisões observadas nessas interseções tiveram como fator preponderante as paradas ocasionadas pela alternância do direito de passagem. Diante desta premissa selecionou-se como medida de desempenho para comparação e validação dos indicadores *proxy* as colisões traseiras destas interseções ocorrida nos três anos de referência pré-definidos.

Apesar da prévia definição da medida de desempenho, inicialmente, foram extraídos relatórios completos de acidentes independentemente da definição do tipo de acidente, dia da semana e os veículos envolvidos. Assim como nos dados de tráfego uma série de filtros foi então aplicada para considerar apenas os acidentes que ocorreram nos horários e condições específicas para as análises da etapa de validação. Na Tabela 5.7 é apresentada uma amostra dos dados brutos retirados do SIAT-FOR para a interseção #243.

Tabela 5.9 – Amostra dos dados de acidentes obtidos na base do SIAT-FOR

Data	Dia da Semana	Hora	Tipo de Acidentes	# Fatalidades	# Feridos	# Ilesos	Tipo de Veículo
24/07/2007	Terça-feira	07:21	Colisão Traseira	-	-	2	2 AUT
13/05/2009	Sábado	07:30	Colisão Traseira	-	-	2	2 AUT
27/04/2009	Sexta-feira	07:50	Queda	-	1	-	1 MOT
09/03/2007	Quinta-feira	08:15	Abalroamento	-	-	3	2 AUT
29/10/2008	Domingo	08:26	Choque c/ Obstáculo	-	-	4	1 CAM

Fonte: SIAT-FOR

A fim de minimizar as flutuações aleatórias devido ao comportamento diferenciado de condução nos fins de semana, acidentes registrados nos sábados e domingos foram removidos do conjunto de dados. Os acidentes envolvendo as motocicletas e as bicicletas também foram removidos do conjunto de dados, devido à dificuldade de representação do processo de condução desses usuários pelo simulador. Assim, para um acidente ser considerado como válido para esta análise ele deve pertencer a classe de colisões traseiras, ter ocorrido em um dia útil entre o horário de 7h:00 as 11h:00 e ter ocorrido entre dois ou mais automóveis (veículos de passeio, ônibus, caminhões, vans, entre outros).

Por fim, para coleta dos acidentes dentro das áreas de interesse, foram considerados dois tipos de localização, como segue: 1) Os acidentes dentro da área da interseção e 2) Os acidentes dentro da área abrangida pelo comprimento médio da fila (segmentos). Para identificar a localização real de acidentes observados em segmentos, dois

tipos de relatórios foram solicitados: o relatório com base no número da residência ou comércio e o relatório com base nos pontos de referência fornecidos pelo sistema SIAT-FOR. A Tabela 5.10 apresenta o resumo das colisões registradas, bem como os valores considerados para análise nos três anos de coleta.

Tabela 5.10 – Total de colisões registradas e “válidas” (2007-2009)

	# TOTAL DE COLISÕES	# COLISÕES TRASEIRAS
<i>INT #168_{Manhã}</i>	127	46
<i>INT #243_{Manhã}</i>	34	14
<i>INT #250_{Manhã}</i>	112	56

5.6.2. Análise comparativa dos acidentes x conflitos

Para o exercício de validação, o número médio de conflitos de traseira resultantes da experiência de simulação (4 horas de simulação) foi comparado com o número de colisões traseiras ocorridas nas mesmas horas de interesse durante três anos (2007-2009) para cada interseção. Para efetuar a comparação, o número médio de conflitos foi expandido considerando o número de dias da semana, exceto feriados, dos três anos de referência. Assim, o valor do indicador final conflitos obtidos para cada período de análise foi multiplicado por um valor constante de 739, que representa a soma do número de dias dos três anos de referência excluindo fins de semana e feriados. Na Tabela 5.11 são apresentados os dados de acidentes válidos e o número médio de conflitos estimados para o período de três anos. A tabela apresenta ainda os coeficientes de variação para cada SPM.

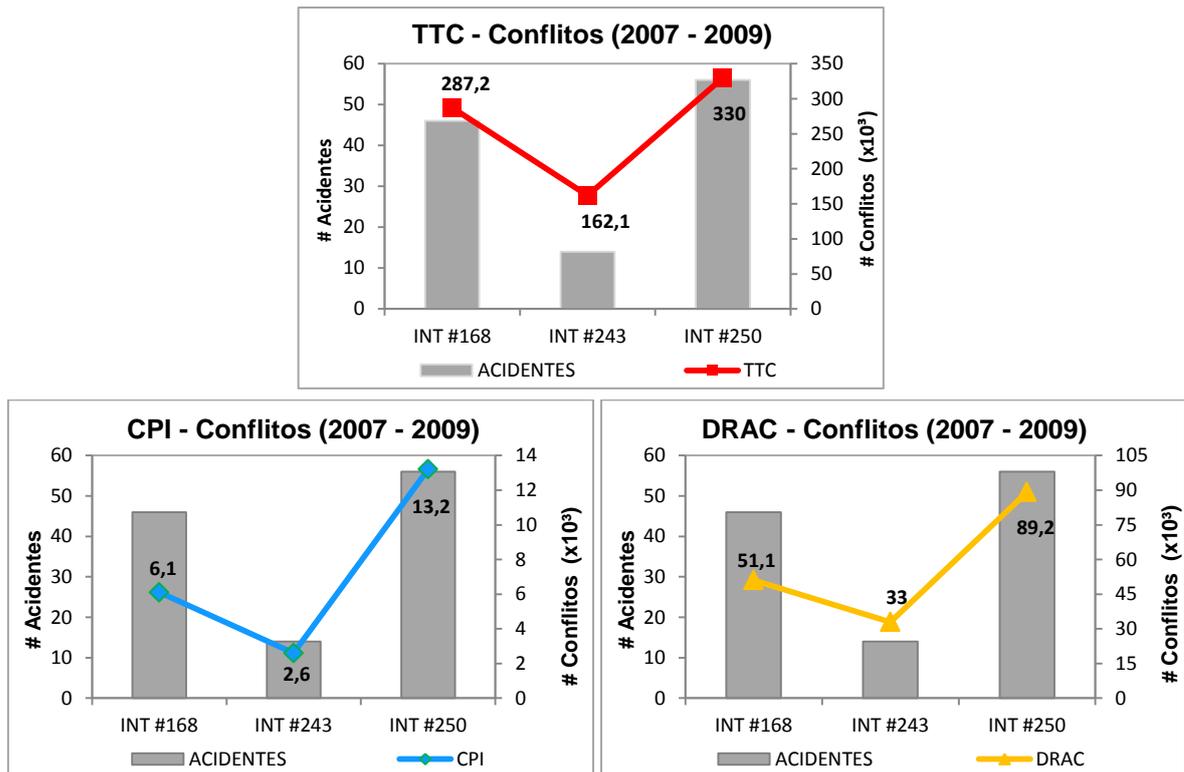
Tabela 5.11 – Colisões traseiras observadas e conflitos simulados.

Interseção	# Colisões Traseiras	# Veículos gerados	# Conflitos x 10 ³ (média)			Coeficiente de variação		
			TTC	DRAC	CPI	TTC	DRAC	CPI
<i>INT#168</i>	46	14327	287,2	51,1	6,1	0,04	0,13	0,38
<i>INT#243</i>	14	9763	162,1	33	2,6	0,07	0,12	0,70
<i>INT#250</i>	56	16550	330	89,2	13,2	0,04	0,06	0,22

A análise comparativa entre cruzamentos sugere uma consistência entre o número estimado de conflitos e número observado de acidentes. Em geral, níveis mais altos de acidentes observados implicaram em maiores números de conflitos de tráfego para todas as SPM testadas. Conforme já comentado, essa tendência também foi observada com relação ao

fluxo médio, acidentes e valores das SPM, reforçando a noção geralmente aceita de que os acidentes e conflitos de tráfego tendem a aumentar com a exposição. Complementando as informações apresentadas na Tabela 5.11, na Figura 3 é apresentada uma comparação gráfica entre os acidentes e os indicadores obtidos.

Figura 5.9 – Comparação dos Números de Conflitos x Acidentes.



Fonte: Autor.

O gráfico apresentado na Figura 5.9 ilustra de forma mais clara a correlação observada entre os indicadores *proxy* (TTC, DRAC e CPI) e as colisões traseiras observadas. Pela observação da Figura 5.9 é possível constatar que as frequências de acidentes confirmaram o “*ranking*” apresentado na seção 5.2.5. Assim, nota-se que a interseção que apresentou uma maior frequência de acidentes (Int. #250) obteve também o maior número de conflitos, o mesmo ocorrendo nas interseções com segunda e terceira frequência. Este comportamento foi observado para as três medidas sintéticas de DSV testadas (TTC, DRAC e CPI) e representa um importante indício para a validade do experimento proposto.

5.4. Considerações finais

O Capítulo 5 apresentou os procedimentos de aplicação da metodologia

desenvolvida para medir o desempenho da segurança viária em interseções viárias urbanas. Além disso, foi aplicado um procedimento de avaliação desse desempenho no qual foi possível validar os resultados obtidos com a aplicação da microsimulação de tráfego. A seguir serão apresentadas as conclusões finais dessa pesquisa de dissertação.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. Conclusões

Tradicionalmente o desempenho da segurança viária tem sido avaliado no processo de planejamento dos sistemas de transportes com a utilização de estudos observacionais envolvendo séries históricas de acidentes de trânsito. Esse tipo de abordagem tem sofrido críticas relacionadas à natureza pouco frequente, aleatória e dispersiva dos acidentes de trânsito. Além disso, outros aspectos relacionados ao processo de coleta dos dados de acidentes tais como o baixo índice de acidentes reportados e a qualidade das informações, dificultam ainda mais a consolidação dessa abordagem.

A modelagem microscópica do fluxo de veículos na infraestrutura viária urbana se consolidou nas últimas décadas como uma importante ferramenta para o auxílio do trabalho dos engenheiros de transportes, sobretudo na análise do desempenho operacional de novas estratégias e políticas de gerência e controle de tráfego. Com o contínuo desenvolvimento computacional e com a evolução dos métodos de coleta de dados de tráfego o uso desta ferramenta também ganhou importância nos estudos de segurança viária e passou a ser estudada sistematicamente ao longo da última década.

Neste contexto, esta pesquisa de dissertação de mestrado teve como objetivo geral apresentar uma contribuição metodológica para a utilização da microssimulação de tráfego nas análises do DSV no processo de planejamento tático operacional dos sistemas de transporte com foco nas interseções urbanas.

Inicialmente, foi realizada uma revisão dos principais indicadores utilizados para avaliar o DSV e também uma investigação do poder de representação do processo de condução urbano propiciado pelos algoritmos de simulação. Em um segundo momento, foi proposto um procedimento metodológico para a investigação do DSV na avaliação de intervenções táticas e operacionais no ambiente urbano, com foco nas interseções viárias. De modo complementar ainda foi proposto um método para validar o DSV obtido sinteticamente comparando-o com séries históricas de acidentes.

Antes de iniciar as etapas de investigação dos objetivos desta pesquisa foi apresentada uma fundamentação teórica a respeito da integração da segurança viária no processo de planejamento de transportes e ainda as metodologias empregadas para análise do DSV. O objetivo foi apresentar os principais conceitos relacionados às análises de segurança, bem como a sua aplicabilidade e enquadramento no processo de planejamento dos sistemas de transporte.

As análises das medidas de desempenho da segurança viária (SPM – *Safety Performance Measure*) indicaram que estas medidas devem ser capazes de informar a quantidade e a severidade dos conflitos que ocorrem na simulação, e ainda considerar diferentes tipos de usuários e condições ambientais. Ao final dessas análises foi possível identificar quais dessas medidas tinham potencial para aplicação nesta pesquisa, cumprindo assim o primeiro objetivo específico proposto no trabalho. Esta fase culminou com a escolha dos indicadores *proxy*: tempo para a colisão (TTC – *time to collision*), taxa de desaceleração para evitar a colisão (DRAC – *deceleration rate to avoid the crash*) e o índice de potencial para acidentes (CPI - *crash potencial index*).

Na investigação do segundo objetivo específico avaliaram-se os principais modelos comportamentais e de construção da rede das plataformas de microssimulação no que se refere à qualidade e ao nível de representação do processo de condução para as análises do DSV no meio urbano. As análises dos modelos de construção da rede (não comportamentais) indicaram ser importante que a interface do microssimulador apresente uma facilidade de inserção dos diversos atributos geométricos, de controle do tráfego e da demanda veicular com relativa facilidade de visualização.

Já quanto aos modelos comportamentais identificou-se que comumente se encontram três algoritmos no núcleo dos microssimuladores de tráfego: perseguição veicular (*car following*), mudança de faixa e aceitação de brecha. Foram apresentados e discutidos aspectos de cada um desses algoritmos que são necessários para a modelagem do processo de condução, principalmente, dos usuários de automóveis. Entretanto, dada a complexidade do ambiente urbano brasileiro, identificou-se a necessidade de uma discussão sobre os denominados algoritmos complementares que são necessários para implementar a modelagem dos demais usuários da rede (pedestres, ciclistas e motociclistas) e suas inter-relações.

Neste sentido, ainda foi discutida a importância dos algoritmos complementares

para a modelagem de aspectos características do meio urbano como: a circulação de veículos de transporte coletivo; a presença de estacionamentos; as atividades de embarque e desembarque e de carga e descarga, entre outros. Além disso, relatou-se a importância desses algoritmos para a modelagem das condições ambientais de circulação como, por exemplo, as condições de luminosidade e de ocorrência de precipitações.

Dentre as plataformas de simulação disponíveis verificou-se que os microssimuladores PARAMICS, AIMSUN e VISSIM têm uma posição de destaque, pois dispõem de grande parte dos requisitos para a geração de indicadores *proxy* com um nível razoável de fidelidade. Para esta pesquisa foi selecionada como plataforma de microssimulação o *software* VISSIM que além da característica supracitada possui um diferenciado nível de qualidade de representação do processo de condução urbano, podendo obter informações detalhadas de cada veículo e sua interação com os demais em escalas de tempo menores que um segundo.

Uma vez estabelecida às bases conceituais e definida a plataforma de microssimulação que seria empregada nas análises do DSV iniciou-se o desenvolvimento da metodologia de avaliação do DSV. O procedimento proposto considerou cinco etapas: 1) seleção e caracterização do local de estudo, 2) codificação do local no microssimulador, 3) planejamento da simulação, 4) calibração e validação do modelo e 5) estimação dos indicadores.

A metodologia proposta foi aplicada em três interseções viárias semaforizadas da cidade de Fortaleza. Em virtude de algumas restrições dos simuladores de tráfego, o experimento focou suas análises nos conflitos de tráfego oriundos de interações longitudinais (conflitos de traseira) observadas ao longo da simulação apenas entre veículos automotores. Assim, procedeu-se a aplicação das etapas de caracterização e codificação das interseções e após as definições finais relativas aos processos de calibração e planejamento da simulação os indicadores foram finalmente estimados para refletir o DSV dos locais. Os resultados comprovaram a eficácia do método proposto em detectar os conflitos de tráfego ocorridos nas situações de “turbulência”.

Uma importante análise realizada neste trabalho discorreu sobre o número de simulações necessárias para inferir com relativa confiança sobre o desempenho da segurança viária (DSV) obtido com o uso das SPM. Esta análise demonstrou que os resultados obtidos

neste experimento para os indicadores TTC e DRAC devem ser apontados como representativos sob um intervalo de confiança de 20%. Outro fator importante nesta análise foi o comportamento do índice CPI, o qual, por seu baixo valor médio de conflitos e elevada variabilidade normalmente vai requerer um elevado número de simulações para se garantirem inferências confiáveis para o DSV no ambiente pesquisado (interseções). Acredita-se que este comportamento pode ser atribuído ao fato do indicador CPI considerar em seu cálculo dois distintos componentes aleatórios (DRAC e MADR).

Para testar o método de validação relativa do DSV foi realizado um esforço de comparação entre colisões traseiras observadas e os conflitos de tráfego simulados obtidos com a aplicação da metodologia de avaliação do DSV. O procedimento considerou três anos de dados de acidentes (2007-2009) para quatro horas do período da manhã (7h00 - 11h00). Os resultados globais desse experimento indicaram um relativo nível de consistência entre o número estimado de conflitos e o número observado de colisões traseiras. Foi possível verificar que os indicadores *proxy* utilizados (TTC, DRAC e CPI) foram capazes de acompanhar as variações da frequência de acidentes entre os locais estudados, de modo que os indicadores apresentaram o mesmo “*ranking*” relativo dessas frequências.

A análise dos modelos dos microssimuladores e o desenho do experimento revelaram ainda aspectos operacionais e comportamentais do ambiente urbano nacional como a representação das manobras de estacionamento e o uso da motocicleta os quais carecem de um esforço de modelagem mais aprofundado. Acredita-se que os resultados apresentados aliados ao aperfeiçoamento das técnicas de coleta de dados veiculares e ao aumento da capacidade computacional, tornarão a utilização de plataformas de microssimulação na modelagem do desempenho da segurança viária cada vez frequente no cenário Brasileiro.

A metodologia proposta pode ser aplicada em outros locais, desde que os resultados encontrados nas etapas de calibração e validação do modelo sejam considerados satisfatórios. O procedimento proposto mostrou-se bastante prático, tendo em vista os resultados alcançados com a sua aplicação em três interseções da cidade de Fortaleza. Os resultados obtidos nesta pesquisa de mestrado indicam um potencial considerável para a utilização de ferramentas de microssimulação de tráfego na avaliação do desempenho da segurança viária no processo de planejamento de transportes nos níveis tático e operacional.

6.2. Recomendações

Ao longo do desenvolvimento do procedimento metodológico para avaliação do desempenho da segurança viária com uso da microssimulação de tráfego para análise de intervenções tático-operacionais em interseções viárias urbanas, alguns tópicos foram identificados para extensões e desenvolvimentos futuros. Dentre estes, recomenda-se:

- a) Investigar uma amostra maior de interseções e considerar um período maior de análise para obtenção de resultados mais robustos;
- b) Utilizar o procedimento proposto para análise do DSV em ambientes mais complexos como corredores viários de tráfego e redes urbanas de maior porte;
- c) Investigar modelos comportamentais que possam considerar de forma mais abrangente o comportamento dos condutores veiculares no processo de condução do meio urbano;
- d) Investigar a aplicação de modelos comportamentais que considerem a ocorrência de conflitos de tráfego e de acidentes viários durante o processo de microssimulação do tráfego;
- e) Desenvolver modelos complementares para o ambiente urbano que considerem a existência de atividades de estacionamento, operações de carga e descarga, e de transporte público;
- f) Analisar o DSV considerando o processo de condução de outros tipos de usuários como pedestres, ciclistas e motociclistas. E investigar e/ou propor modelos que representem o processo de interação desses usuários com os condutores de automóveis;
- g) Desenvolver metodologias de calibração/validação que considerem de forma simultânea medidas de desempenho operacional da fluidez e da Segurança Viária;
- h) Implementar uma confirmação experimental (validação relativa) dos indicadores *proxy* para as interações veiculares transversais e de mudança de faixa, bem como a investigação de outros tipos de acidentes como colisões entre diferentes usuários como atropelamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-ATY, M., J. KELLER, P. A. BRADY (2005). Analysis of types of crashes at signalized intersections by using complete crash data and treebased regression. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1908, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p.37–45.
- ABELE, L. e M. MØLLER (2011) The Relationship Between Road Design And Driving behavior a Simulator Study. 3rd International Conference on Road Safety and Simulation, Indianapolis, USA.
- AL-KAISY, A. F., STEWART, J. A., VAN AERDE, M. (1999) Microscopic simulation of lane changing behaviour at freeway weaving sections. *Canadian Journal of Civil Engineering*, p. 840-851.
- ALLEN, B. L., SHIN B. T. e P. J. COOPER (1978) Analysis of traffic conflicts and collisions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 667:67–74.
- AMUNDSON, F. e C. HYDEN (1977). *Proceedings of First Workshop on Traffic Conflicts*, Institute of Economics, Oslo.
- ARCHER, J. (2005) Indicators for traffic safety assessment and prediction and their application in micro-simulation modelling: A study of urban and suburban intersections. Tese de Doutorado, Department of Infrastructure. Royal Institute of Technology, Sweden.
- BARCELÓ, J., A. DUMONT, L. MONTERO, J. PERARNAU e A. TORDAY (2003) Safety indicators for microsimulation–based assessments. In *Proceedings of the 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., USA.
- BÉLANGER, C. (1994) Estimation of safety of four-legged unsignalized intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1467:23–29.
- BELLA, F. (2011) How traffic conditions affect driver behavior in Passing maneuver. 3rd International Conference on Road Safety and Simulation, Indianapolis, USA.
- BERTHELON, C., I. AILLERIE, C. PERRIN e S. ESPIÉ (2011) Methodology to Introduce Scenarios of Accident in Driving Simulators Interest for the Analysis of Drivers' Behavior. 3rd International Conference on Road Safety and Simulation, Indianapolis, USA.
- BRACKSTONE, M., MCDONALD, M. 1999. Car-following: a historical review. *Transportation Research Part F*. Vol 2. p. 181-196.
- BROW, G. R. (1994). Traffic conflicts for road user safety studies. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21:1–15.
- CHRISTOFOROU, Z., M. G. KARLAFTIS, G. YANNIS (2011) Young drivers and alcohol impaired driving: A driving simulator experiment 3rd International Conference on Road Safety and Simulation, Indianapolis, USA.

- COLELLA, D. A. T. e DEMARCHI, S. H. (2005) Calibração da Curva Fluxo-velocidade
- COOPER, D. F e N. FERGUSON (1976). Traffic studies at t-junctions - a conflict simulation model. *Traffic Engineering and Control*, 17: 306–309.
- CUNHA, A. B. L. N. e J. R. SETTI (2006) Calibração do modelo de desempenho de caminhões do CORSIM através de um algoritmo genético. *Anais do XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Rio de Janeiro, v. 1. p. 88-99.*
- CUNTO, F. J. C. (2008) Assessing Safety Performance of Transportation Systems using Microscopic Simulation. Tese de Doutorado, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Waterloo, Ontário, Canadá.
- CUNTO, F. J. C. e C. F. G. LOUREIRO (2011) O uso da microssimulação na avaliação do desempenho da segurança viária. *Revista Transportes*.
- CUNTO, F. J. C., M. M. CASTRO NETO e D. S. BARREIRA (2011) Modelos de Previsão de Acidentes de Trânsito em Interseções SemafORIZADAS de Fortaleza. *XXV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*. ANPET, Belo Horizonte, MG.
- CUNTO, F.J.C. e SACCOMANNO, F.F. (2008) “Calibration and validation of simulated vehicle safety performance at signalized intersections”. *Accident Analysis and Prevention*, 40:1171–1179.
- DARZENTAS, J. D. F. COOPER, P. A. STORR e M. R. McDOWELL (1980) Simulation of road traffic conflicts at T-junctions. *Simulation*. p. 155-164.
- DAVIS, G.A. (2004) Possible Aggregation Biases in Road Safety Research and a Mechanism Approach to Accident Modeling. *Accident Analysis and Prevention*, v. 36, p. 1119-1127.
- FERREIRA, S. M. P. (2010) A Segurança Rodoviária no Processo de Planejamento de Redes de Transporte em Meio Urbano. Tese de Doutorado em Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- FHWA (2004) Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software, Final Report, Publication No FHWA-HRT-04-040, Federal Highway Administration, USA.
- GETTMAN, D. PU, L., SAYED, T., e SHELB, S. (2008), Surrogate safety assessment model and validation: final report, Report No. FHWA-HRT-08-051. Federal Highway Administration (FHWA): Washington, D.C.
- GETTMAN, D. e L. HEAD (2003) Surrogate safety measures from traffic simulation models. Federal Highway Administration report RD-03-050. McLean, VA, USA.
- GREIBE, P. (2003) Accident prediction models for urban roads. *Accident Analysis and Prevention*, 35:273–285.
- GUIDO G., F. SACCOMANNO, V. ASTARITA, A. VITALE (2009) Measuring Safety Performance at Roundabouts Using Videotaped Vehicle Tracking Data.
- GUO, T., LIU, Y. e DENG, W. (2011) A Disaggregate Speed Consistency Measure for the Safety Evaluation of Freeway Diverging Area. 3rd International Conference on Road Safety

and Simulation, Indianapolis, USA.

HAUER, E. (1978) Traffic conflict surveys: some study design considerations. Technical report, Transportation and Road Research Laboratory - TRRL, UK.

HAUER, E. (2002) *Observational Before-after Studies in Road Safety*. 1a ed.: Pergamon.

HAUER, E., C. N. Ng Jerry e J. Lovell (1988) Estimation of safety at signalized intersections. *Transportation Research Record*, No. 1185, TRB, Washington, D.C., p. 48-61.

HAYWARD, J. (1972) Near-miss determination through use of a scale of danger. *Highway Research Record*, 384:24–34.

HIRST, W.M., L.J. MOUNTAIN e M. J. MAHER (2004). Sources of error in road safety scheme evaluation: a method to deal with outdated accident prediction models. In *Accident Analysis and Prevention*, No. 36, pp. 717–727.

HOURLAKIS, J.; MICHALOPOULOS, P. G. e KOTTOMMANNIL, J. (2003) *Practical HSM (2010) Highway Safety Manual*. 1st Edition by the American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO.

HUGUENIN, F., A. TORDAY e A. G. DUMONT (2005) Evaluation of traffic safety using microsimulation. In *Proceeding of the 5th Swiss Transport Research Conference*.

HYDÉN, C. (1987) The development of a method for traffic safety evaluation: The Swedish traffic conflicts technique. *Bulletin 70*. Department of Traffic Planning and Engineering, Lund University, Lund, Sweden.

HYDÉN, C. (1996) Traffic safety work with video-processing. Technical report, Transportation Department, University Kaiserslautern.

IPEA (2006) *Impactos sociais e econômicos dos acidentes de trânsito nas rodovias brasileiras – Relatório Executivo*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA/Departamento Nacional de Trânsito – DENATRAN/Associação Nacional dos Transportes Públicos - ANTP, Brasília, 2006.

ITE (2009) *Transportation Planning Handbook*, 3rd Edition. Institute of Transportation Engineers.

JACOBSEN (2011) Andre Cademartori Jacobsen. *Microsimulação da Travessia de Pedestres*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

KULMALA, R. (1995) Safety at Rural Three- and Four-Arm Junctions. Development of Accident Prediction Models. PhD thesis, Technical Research Centre of Finland, VTT 233, 1995.

LEE, C., SACCOMANNO, F. e HELLINGA, B. (2002) Analysis of crash precursors on instrumented freeways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1784:1–8.

LEE, J., PARK, B., MALAKORN, K. e SO, J. (2011) Safety Assessment Of cooperative

Vehicle Infrastructure System-Based Urban Traffic Control. 3rd International Conference on Road Safety and Simulation, Indianapolis, USA.

LIEBERMAN E., e A. K. RATHI (2001). Traffic Simulation, in N. Gartner, C.J. Messner, and Rathi A.K. (Eds.) Traffic Flow Theory, Transportation Research Board Special Report.

LORD, D. (2006) Modeling motor vehicle crashes using poisson-gamma models: Examining the effects of low sample mean values and small sample size on the estimation of the fixed dispersion parameter. In Accident Analysis and Prevention, No. 38, pp. 751–766.

LOUREIRO, C. F. G., M. J. T. L. GOMES, C. H. P. LEANDRO (2002) Avaliação do desempenho nos períodos de pico do tráfego de interseções semaforizadas com controle centralizado em tempo fixo e real. Anais do XVI Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes, Natal, v. 1, p. 365-376.

MAGALHÃES, M. T. Q. e YAMASHITA, Y. (2009) Repensando o Planejamento. Texto para Discussão. Centro de Formação de Recursos Humanos em Transporte. Universidade de Brasília.

MAHER, M. J. e I. SUMMERSGILL (1996) A comprehensive methodology for the fitting of predictive accident models. Accident Analysis and Prevention, 28:281–296.

MAIA, F. V. B. (2007) Calibração e Validação de Modelos de Meso e Microsimulação do Tráfego para a Avaliação de Intervenções Tático-Operacionais na Malha Viária Urbana. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará.

MAIA, F.V.B e C. F. G. LOUREIRO (2008) Procedimento Sistemático para Simulação do Tráfego Veicular em Modelos Mesoscópicos e Microscópicos. Anais do XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Fortaleza, p. 589-600.

MAY (1990). Traffic Flow Fundamentals. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice Hall, first edition, 1990.

McDOWELL, M.R.C., J. WENNEL, P. A. STORR e J. DARZENTAS (1983) Gap acceptance and traffic conflict simulation as a measure of risk. Technical report, Transportation and Road Research Laboratory - Supplementary Report 776, 1983.

MEHMOOD, A. (2003) Integrated Simulation Model for Driver Behaviour Using System Dynamics. PhD Thesis, University of Waterloo, ON, Canada.

MEHMOOD, A. 2003. Integrated Simulation Model for Driver Behaviour Using System Dynamics. PhD Thesis, University of Waterloo, ON, Canada.

MEYER, M. D. e MILLER, E. J. (2001) Urban Transportation Planning, McGraw Hill.

MINDERHOUD, M. M., e BOVY, H. L.P. (2001) Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment. Accident Analysis and Prevention, 33:89–97.

MIRANDA-MORENO, L. F. (2006) Statistical models and methods for identifying hazardous locations for safety improvements. PhD Thesis, University of Waterloo, Canadá.

- MOUNTAIN, L., FAWAZ, B. e JARRET, D. (1986). Accident prediction models for roads with minor junctions. *Accident Analysis and Prevention*, 28:695–707.
- MOVIT (2007). Braking distances. <http://www.movit.de/rahmen/stoptbl.htm>.
- MS (2011) Acidentes de trânsito matam 1.965 pessoas no CE. Ministério da Saúde do Brasil. <http://portalsaude.saude.gov.br/portalsaude/noticia/2943/162/>, 2011. Acessado em 05 de Novembro de 2011.
- NEILSEN, J. (2007). Stopping distances. Defensive Driving - Safe Driving Training SDT <http://www.sdt.com.au/>.
- OMS (2008) Road safety: A public health issue. Organização Mundial de Saúde http://www.who.int/features/2004/road_safety/en/, 2008. Acessado em 01 de Março de 2011.
- OLIVEIRA (2004) Natureza dos Padrões de Variação Espaço-Temporal do Volume Veicular em Ambiente Urbano: Estudo de Caso em Fortaleza. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará.
- PAULA, F. S. M. (2006) *Proposta de Adaptação da Metodologia do Highway Capacity Manual 2000 para Análise de Vias Arteriais Urbanas em Fortaleza*. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará.
- PERKINS, S. e HARRIS J.. (1967) Criteria for traffic conflict characteristics. Report gmr 632. Technical report, General Motors Corporation, 1967.
- PERKINS, S. e J. HARRIS (1968) Traffic conflict characteristics - accident potential at intersections. *Highway Research Record*, 225:35–43.
- PERSAUD, B. e MUCSI, K. (1995). Microscopic accident potential models for two-lane rural roads. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1485:134–139.
- DENATRAN (2004) Política Nacional de Trânsito (PNT). Edição Departamento Nacional de Trânsito – Denatran. <http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/PNT.pdf>. Acessado em 10 de Setembro de 2011.
- POLLATSCHEK, M. A., A. POLUS, e M. LIVNEH (2002). A Decision Model for Gap-acceptance and Capacity at Intersections, *Transportation Research Part B*, No 36, pp. 649-663. USA.
- ROBLES, D. G. e RAIÁ, A. A. JR. (2008) Correlação Entre Conflitos e Acidentes Usando a Técnica Suéca de Análise de Conflitos de Tráfego. *XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*. ANPET, Fortaleza, CE.
- SAUNIER, N. e SAYED, T. (2007) Automated road safety analysis using video data. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2019, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 57-64.
- SAUNIER, N., SAYED, T., e ISMAIL, k. (2010) Large-Scale Automated Analysis of Vehicle Interactions and Collisions. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2147, TRB, National Academies, Washington, D. C., p. 42-50.

SAWALHA, Z. e SAYED, T. (2001) Evaluating safety of urban arterial roadways. *Journal of Transportation Engineering*, 127:151–158.

SAWALHA, Z. e T. SAYED (2006) Transferability of accident prediction models. *Safety Science*, 44:209–219.

SAYED, T. e P. D. LEUR (2000). Developing a systematic framework for proactive road safety planning. In: 13th ICTCT workshop - Traffic Safety Measures, Corfu - Greece.

SAYED, T. e RODRIGUEZ, F. (1999) Accident prediction models for urban signalized intersections in British Columbia. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1665:93–99.

SAYED, T. e S. ZEIN (1999) Traffic conflict standards for intersections. *Transportation Planning and Technology*, 22:309–323.

SRA (1995). CAPCAL, Model Description, Part 2: Intersection without Traffic Signals. Swedish Road Administration (Vägverket) Publication 1995:007E, Borlänge, Sweden

STEVANOVIC, A., KERGAYE, C., HAIGWOOD, J. (2011) Assessment of Surrogate Safety Benefits of an Adaptive Traffic Control System. 3rd International Conference on Road Safety and Simulation, Indianapolis, USA.

SUSUKI, M., K. MIYANOVE, T. TAKAGAWA e T. YAI (2011) Bicycle Collision Analysis Using Dricing Simulator “MOVIC-T4”. 3rd International Conference on Road Safety and Simulation, Indianapolis, USA.

VAN DER HORST A. R. A. e G. BROWN (1989) Time to collision and driver decision making in braking. Technical report, TNO Institute for Perception – Report IZF 1989 C-23.

VAN DER HORST, A. R. A. e J. HOGEMA (1993) Time-to-collision and collision avoidance systems. In Proceedings of the 6th ICTCT Workshop.

VOGT, A. e BARED, J (1998) Accident models for two-lane rural segments and intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1635:18–29.

WIEDEMANN, R. e U. REITER (1992) Microscopic traffic simulation: the simulation system mission, background and actual state. Technical report, CEC Project ICARUS (V1052), Final Report, Vol. 2, Appendix A. Brussels: CEC.

XIN, W., HOURDOS, J, MICHALOPOULOS, P., DAVIS, G. (2008) The Less-than-perfect Driver: A Model of Collision-inclusive Carfollowing Behavior. *Transportation Research Board, Annual Meeting, January 2008, Washington, D.C.*

APÊNDICES

APÊNDICE A – Resultados Globais da Simulação para a Interseção #168

TTC					
# Simulação	# Veículos Gerados	# Veículos em Conflito	% Veículos em Conflito	Tempo de Exposição (veic.s)	Tipo de Conflito
1	14199	402	2,83	1,03	C. Traseira
2	14237	411	2,89	1,01	C. Traseira
3	14206	373	2,63	0,99	C. Traseira
4	14326	395	2,76	1,01	C. Traseira
5	14389	383	2,66	1,03	C. Traseira
6	14370	359	2,50	1,05	C. Traseira
7	14376	383	2,66	1	C. Traseira
8	14339	405	2,82	0,89	C. Traseira
9	14409	395	2,74	0,99	C. Traseira
10	14418	380	2,64	0,98	C. Traseira
Média	14326,9	388,6	2,71	0,998	-

DRAC					
# Simulação	# Veículos Gerados	# Veículos em Conflito	% Veículos em Conflito	Tempo de Exposição (veic.s)	Tipo de Conflito
1	14199	65	0,46	0,59	C. Traseira
2	14237	88	0,62	0,58	C. Traseira
3	14206	60	0,42	0,62	C. Traseira
4	14326	77	0,54	0,58	C. Traseira
5	14389	77	0,54	0,6	C. Traseira
6	14370	63	0,44	0,64	C. Traseira
7	14376	69	0,48	0,53	C. Traseira
8	14339	68	0,47	0,57	C. Traseira
9	14409	67	0,46	0,67	C. Traseira
10	14418	57	0,40	0,73	C. Traseira
Média	14326,9	69,1	0,48	0,611	-

CPI					
# Simulação	# Veículos Gerados	# Veículos em Conflito	% Veículos em Conflito	Tempo de Exposição (veic.s)	Tipo de Conflito
1	14199	4	0,03	0,30	C. Traseira
2	14237	7	0,05	0,39	C. Traseira
3	14206	8	0,06	0,41	C. Traseira
4	14326	9	0,06	0,58	C. Traseira
5	14389	8	0,06	0,45	C. Traseira
6	14370	12	0,08	0,33	C. Traseira
7	14376	8	0,06	0,69	C. Traseira
8	14339	4	0,03	0,30	C. Traseira
9	14409	14	0,10	0,50	C. Traseira
10	14418	8	0,06	0,68	C. Traseira
Média	14326,9	8,2	0,06	0,46	-

APÊNDICE B – Resultados Globais da Simulação para a Interseção #243

TTC					
# Simulação	# Veículos Gerados	# Veículos em Conflito	% Veículos em Conflito	Tempo de Exposição (veic.s)	Tipo de Conflito
1	12275	230	1,87	0,94	C. Traseira
2	12406	208	1,68	0,84	C. Traseira
3	12158	197	1,62	0,91	C. Traseira
4	12380	242	1,95	0,85	C. Traseira
5	12393	234	1,89	0,96	C. Traseira
6	12335	224	1,82	0,92	C. Traseira
7	12381	234	1,89	0,9	C. Traseira
8	12394	209	1,69	0,86	C. Traseira
9	12350	213	1,72	0,91	C. Traseira
10	12329	203	1,65	0,79	C. Traseira
Média	12340,1	219,4	1,78	0,888	-

DRAC					
# Simulação	# Veículos Gerados	# Veículos em Conflito	% Veículos em Conflito	Tempo de Exposição (veic.s)	Tipo de Conflito
1	12275	46	0,37	0,5	C. Traseira
2	12406	49	0,39	0,49	C. Traseira
3	12158	42	0,35	0,51	C. Traseira
4	12380	40	0,32	0,55	C. Traseira
5	12393	55	0,44	0,56	C. Traseira
6	12335	44	0,36	0,56	C. Traseira
7	12381	49	0,40	0,56	C. Traseira
8	12394	44	0,36	0,44	C. Traseira
9	12350	39	0,32	0,51	C. Traseira
10	12329	38	0,31	0,58	C. Traseira
Média	12340,1	44,6	0,36	0,526	-

CPI					
# Simulação	# Veículos Gerados	# Veículos em Conflito	% Veículos em Conflito	Tempo de Exposição (veic.s)	Tipo de Conflito
1	12275	2	0,02	0,25	C. Traseira
2	12406	0	0,00	0,00	C. Traseira
3	12158	1	0,01	0,20	C. Traseira
4	12380	7	0,06	0,50	C. Traseira
5	12393	6	0,05	0,63	C. Traseira
6	12335	3	0,02	0,60	C. Traseira
7	12381	7	0,06	0,54	C. Traseira
8	12394	2	0,02	0,30	C. Traseira
9	12350	3	0,02	0,60	C. Traseira
10	12329	4	0,03	0,53	C. Traseira
Média	12340,1	3,5	0,03	0,42	-

APÊNDICE C – Resultados Globais da Simulação para a Interseção #250

TTC					
# Simulação	# Veículos Gerados	# Veículos em Conflito	% Veículos em Conflito	Tempo de Exposição (veic.s)	Tipo de Conflito
1	16551	438	2,65	0,98	C. Traseira
2	16637	462	2,78	0,99	C. Traseira
3	16553	461	2,78	0,96	C. Traseira
4	16665	442	2,65	1,02	C. Traseira
5	16529	470	2,84	0,98	C. Traseira
6	16347	425	2,60	0,97	C. Traseira
7	16541	458	2,77	0,95	C. Traseira
8	16509	458	2,77	0,96	C. Traseira
9	16683	411	2,46	0,99	C. Traseira
10	16488	441	2,67	1,01	C. Traseira
Média	16550,3	446,6	2,70	0,981	-

DRAC					
# Simulação	# Veículos Gerados	# Veículos em Conflito	% Veículos em Conflito	Tempo de Exposição (veic.s)	Tipo de Conflito
1	16551	120	0,73	0,58	C. Traseira
2	16637	120	0,72	0,58	C. Traseira
3	16553	112	0,68	0,64	C. Traseira
4	16665	114	0,68	0,74	C. Traseira
5	16529	130	0,79	0,62	C. Traseira
6	16347	127	0,78	0,65	C. Traseira
7	16541	126	0,76	0,61	C. Traseira
8	16509	110	0,67	0,63	C. Traseira
9	16683	117	0,70	0,62	C. Traseira
10	16488	131	0,79	0,62	C. Traseira
Média	16550,3	120,7	0,73	0,629	-

CPI					
# Simulação	# Veículos Gerados	# Veículos em Conflito	% Veículos em Conflito	Tempo de Exposição (veic.s)	Tipo de Conflito
1	16551	12	0,07	0,49	C. Traseira
2	16637	11	0,07	0,63	C. Traseira
3	16553	15	0,09	0,80	C. Traseira
4	16665	21	0,13	0,58	C. Traseira
5	16529	20	0,12	0,77	C. Traseira
6	16347	22	0,13	0,65	C. Traseira
7	16541	20	0,12	0,59	C. Traseira
8	16509	19	0,12	0,68	C. Traseira
9	16683	17	0,10	0,62	C. Traseira
10	16488	21	0,13	0,73	C. Traseira
Média	16550,3	17,8	0,11	0,65	-

