



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

CAIO ASSUNÇÃO TORRES

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA EM REDES URBANAS
DE TRANSPORTES COM UTILIZAÇÃO DE MODELOS DE PREVISÃO DE
ACIDENTES

FORTALEZA

2016

CAIO ASSUNÇÃO TORRES

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA EM REDES URBANAS DE
TRANSPORTES COM UTILIZAÇÃO DE MODELOS DE PREVISÃO DE ACIDENTES

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof. Flávio José Craveiro Cunto,
PhD

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- T644a Torres, Caio Assunção.
Avaliação do desempenho da segurança viária em redes urbanas de transportes com utilização de modelos de previsão de acidentes / Caio Assunção Torres. – 2016.
89 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2016.
Orientação: Prof. Dr. Flávio José Craveiro Cunto.
1. Segurança Viária. 2. Modelos de Previsão de Acidentes. 3. Redes Viárias Urbanas. I. Título.
CDD 388
-

CAIO ASSUNÇÃO TORRES

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA EM REDES URBANAS DE
TRANSPORTES COM UTILIZAÇÃO DE MODELOS DE PREVISÃO DE ACIDENTES

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Engenharia de Transportes.

Aprovada em: 14/04/2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Flávio José Craveiro Cunto, PhD. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Bruno Vieira Bertoncini, PhD.
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Christine Tessele Nodari, PhD.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Tereza e Manoel, que sempre investiram na minha formação, à minha irmã e aos meus verdadeiros AMIGOS.
DEDICO.

AGREDECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida que me foi concebido e pela perseverança necessária para a elaboração desta pesquisa.

Aos meus pais, Tereza Cristina e Manoel Torres, pelo carinho, amor e esforço para me fornecer a educação mais adequada.

À minha irmã Ariana, por todo o companheirismo e à minha sobrinha Júlia, por trazer alegria e união à nossa família.

Ao meu orientador, Prof. Flávio Cunto pelo estímulo, ensinamentos e por acreditar na minha capacidade acadêmica proporcionando as oportunidades necessárias para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores participantes das bancas examinadoras de qualificação e de defesa, Prof. Bruno Bertocini e Prof^a. Christine Nodari, pela valiosa atenção concedida, colaboração e interesse demonstrados.

À Universidade Federal do Ceará (UFC) e a todos os professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN).

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa durante todo o período de realização deste mestrado.

À Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania (AMC), pela disponibilização dos dados e pela oportunidade de poder contribuir nesta árdua tarefa de tornar o trânsito de nossa cidade mais seguro e consciente.

Aos amigos das turmas de 2014 e 2015 do PETRAN, pela agradável convivência e apoio mútuo ao longo dos anos de mestrado.

Ao meu parceiro de pesquisa e colega, Prof. Marcos Timbó, pelas reflexões, discussões e ajuda ao longo do processo de elaboração desta pesquisa.

Aos meus amigos Allyson, Renata e o demais da minha turma do ensino médio, pela constante presença em minha vida e pelos essenciais momentos de alegria.

Àquele que, com seu apoio direto e indireto, trouxe calma, certezas e muita esperança ao longo dessa árdua jornada.

RESUMO

Os principais esforços de avaliação do Desempenho da Segurança Viária (DSV) comumente aplicam técnicas de modelagem estatística da frequência de acidentes de trânsito com a utilização dos Modelos de Previsão de Acidentes (MPA). Essa abordagem tem sido útil quando focada em entidades viárias, como interseções e segmentos viários, principalmente por lidar com alguns dos problemas estocásticos relacionados a natureza rara e aleatória dos acidentes de trânsito. Avanços na coleta de dados, manipulação espacial e nas técnicas de modelagem tem auxiliado estudos para aprimorar o uso de MPA em redes de transportes. Diante deste contexto, esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar a utilização de MPA para estimar o DSV em redes urbanas de transportes, atuando como ferramenta essencial na etapa de avaliação de alternativas do processo de planejamento do sistema de transportes. Foram utilizados os dados da cidade de Fortaleza para a consolidação de uma base georreferenciada dos acidentes de trânsitos, do fluxo veicular e das características físicas e operacionais da rede. Utilizando esses dados, foram desenvolvidos oito MPA para diferentes entidades da rede viária aplicando técnicas de modelagem linear generalizada, assumindo a distribuição Binomial Negativa para os erros. Os modelos foram aplicados em uma rede piloto, de uma área da cidade, para explorar a sensibilidade do DSV avaliando diferentes cenários hipotéticos. Intervenções na demanda da rede viária impactaram significativamente na frequência de acidentes estimada pelos MPA desenvolvidos e não apresentaram uma relação direta com as variações dos acidentes. O incremento de aproximadamente 10% na demanda resultou em um aumento de 26,8% nos acidentes com vítimas e 23,8% nos acidentes totais. As alterações estabelecidas na oferta da rede, no geral, não foram estatisticamente significativas. Porém, quando foi realizada a análise desagregada por zonas e grupos de entidades, as variações tornam-se expressivas. As estimativas dos MPA tenderam a perder seu nível de sensibilidade na medida em que diminui o nível de agregação da análise, devido à natureza rara e aleatória do fenômeno. A aplicação da metodologia proposta contribuiu no aprimoramento das práticas para avaliar o DSV em redes urbanas de transportes. Desta forma, espera-se que seja possível prevenir determinados efeitos negativos, gerados pelos acidentes de trânsito, diminuindo os custos sociais e econômicos que geram para a sociedade.

Palavras-chaves: Desempenho da Segurança Viária, Modelos de Previsão de Acidentes, Redes Viárias Urbanas.

ABSTRACT

The main road safety performance evaluation efforts commonly apply statistical modeling techniques for the frequency of traffic crashes with the use of Safety Performance Functions (SPF). This type of statistical modeling approach has been very useful when focused on isolated road entities such as intersections and road segments, mostly because it can reasonably deal with some of the stochastic problems related to the rare and random nature of crashes. Advances in data collection and spatial manipulation as well as modeling techniques have been fostering studies to support the use of SPF for safety assessment of urban networks. Given this context, this research investigates aims the use of SPF to estimate the road safety performance in urban road networks. Initially, a geographic crash database, geometric and operational attributes of the network database and vehicular flow database were consolidated using data from Fortaleza (CE). Eight SPF, for different entities of the road network, were developed applying generalized linear modeling techniques, assuming the Negative Binomial distribution for the errors. The models were applied to a sample network, in an area of city, to explore the sensitivity of the safety performance and assessing different hypothetical scenarios. Interventions in demand significantly impacted the frequency of crashes estimated by developed SPF and did not present a direct relation with the variations of the accidents. The approximately 10% increase in demand resulted in an increase of 26.8% in crashes with victims and 23.8% in total crashes. The changes made in the network supply, in general, were not statistically significant. However, when the analysis was disaggregated by zones and groups of entities, the variations became significant. The SPF estimates tended to lose their sensitivity level to the extent that reduces the analysis aggregation level due to the rare and random nature of the phenomenon. The application of the proposed methodology contributed to the improvement of practices to evaluate the road safety performance in urban transport networks. Thus, it is expected that it is possible to prevent certain negative effects generated by road accidents, reducing social and economic costs to society.

Keywords: Safety Performance Functions, Road Safety Performance, Urban Road Networks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Organização do <i>Highway Safety Manual</i>	9
Figura 2	- Processo decisório de análise de alternativas considerando a segurança viária. ...	11
Figura 3	- Elementos do sistema viário e suas relações com os níveis de planejamento e os tipos de MPA.	13
Figura 4	- Relação entre o viés, variância e número de parâmetros dos MPA.	19
Figura 5	- Exemplo de CURE plot	24
Figura 6	- Estrutura bi-nível do processo de reconstrução da matriz OD sintética.....	30
Figura 7	- Fluxograma das etapas metodológicas e subatividades para obtenção do DSV. ...	33
Figura 8	- Atividades estabelecidas para a construção do banco de dados de volumes	37
Figura 9	- Método de desenvolvimento dos MPA	38
Figura 10	- Fluxograma do método utilizado para atualização da base viária.	46
Figura 11	- Distribuição espacial dos acidentes georreferenciados usando a base “antes” e “depois” da atualização.	47
Figura 12	- Base de dados georreferenciada e consolidada.....	48
Figura 13	- Localização dos dados disponíveis de volume de tráfego	49
Figura 14	- Agrupamento dos modelos.....	51
Figura 15	- <i>CURE plots</i> dos MPA para interseções	53
Figura 16	- <i>CURE plots</i> dos MPA em segmentos.....	55
Figura 17	- <i>CURE plot</i> dos MPA para interseções semaforizadas da amostra de validação ..	57
Figura 18	- <i>CURE plot</i> dos MPA para segmentos duplos da amostra de validação	58
Figura 19	- Delimitação da área de estudo (rede piloto)	59
Figura 20	- Mapa da rede selecionada para modelagem	60
Figura 21	- Centroides e conectores da rede piloto	62
Figura 22	- Resultado dos fluxos reconstruídos sinteticamente	62
Figura 23	- Comparação dos volumes nos arcos observados e estimado	63
Figura 24	- Configuração do cenário 01	65
Figura 25	- Configuração do cenário 02.....	66
Figura 26	- Mapa da frequência estimada de acidentes com vítimas nos cenários 01 e 02 e suas variações percentual em relação ao cenário 0.....	67
Figura 27	- Mapa da frequência estimada de acidentes totais nos cenários 01 e 02 e suas variações percentuais em relação ao cenário 0.....	68
Figura 28	- Mapa da frequência de acidentes com vítimas para cenários 0 e 1	71

Figura 29 - Mapa da frequência de acidentes com vítimas para cenários 0 e 2	72
Figura 30 - Mapa da frequência de acidentes totais para cenários 0 e 1.....	84
Figura 31 - Mapa da frequência de acidentes totais para cenários 0 e 2.....	84
Figura 32 - Distribuição percentual do fluxo veicular por faixa horária – CTAFOR.....	85
Figura 33 - Fatores de expansão diários – CTAFOR.....	86
Figura 34 - Fatores de expansão mensais – CTAFOR.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Referências bibliográficas de estudos com base em MPA desagregados	15
Tabela 2 - Referências bibliográficas de estudos com base em MPA agregados	16
Tabela 3 - Número de acidente georreferenciados de 2004 a 2011	47
Tabela 4 - Estatísticas descritiva das variáveis dependentes	51
Tabela 5 - Estatísticas descritiva das variáveis independentes	52
Tabela 6 - Parâmetros dos MPA para interseções	53
Tabela 7 - Parâmetros dos MPA para segmentos	54
Tabela 8 - Estatísticas descritiva das variáveis dependentes da amostra de validação	56
Tabela 9 - Estatísticas descritiva das variáveis independentes da amostra de validação	56
Tabela 10 - Erros da amostra de validação e ajuste	57
Tabela 11 - Estatísticas descritivas dos fluxos	63
Tabela 12 - Resultados gerais da aplicação dos MPA nos cenários hipotéticos	67
Tabela 13 - Diferença percentual da frequência de acidentes com vítimas em relação ao cenário 0 para as entidades da rede	69
Tabela 14 - Diferença percentual da frequência de acidentes totais em relação ao cenário 0 para as entidades da rede	70
Tabela 15 - Resumo dos valores médios e desvios padrões dos acidentes com vítimas	83
Tabela 16 - Resumo dos valores médios e desvios padrões dos acidentes totais	83
Tabela 17 - Valores médios dos fatores de expansão diários por classe da via - CTAFOR	86
Tabela 18 - Valores médios dos fatores de expansão mensais por classe da via - CTAFOR	87
Tabela 19 - Critérios propostos para a classificação das vias	88
Tabela 20 - Pontuação dos critérios para determinação das classes	88
Tabela 21 - Variáveis e parâmetros adotados para os grupos de vias no TransCAD	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

OMS	Organização Mundial de Saúde
WHO	<i>World Health Organization</i>
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada
ONU	Organização das Nações Unidas
DSV	Desempenho da Segurança Viária
MPA	Modelos De Previsão de Acidentes
VDMA	Volume Diário Médio Anual
ZT	Zonas de Tráfego
TPH	<i>Transportation Planning Handbook</i>
HSM	<i>Highway Safety Manual</i>
MLG	Modelos Lineares Generalizados
BN	Binomial Negativa
AIC	<i>Akaike Information Criterion</i>
CURE	<i>Cumulative Residuals</i>
EMA	Erro Médio Absoluto
REQM	Raiz Do Erro Quadrático Médio
OD	Origem-Destino
BPR	<i>Bureau of Public Roads</i>
SIG-T	Sistemas de Informações Geográficas para Transportes
SIAT	Sistemas de Informações de Acidentes de Trânsito
CTA	Controle de Tráfego em Área

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Questões de pesquisa	3
1.2	Objetivos de pesquisa	4
1.3	Estrutura da pesquisa	4
2	REVISÃO DA LITERATURA	6
2.1	Modelagem do desempenho da segurança viária	6
2.2	Modelos de Previsão de Acidentes (MPA)	11
2.2.1	<i>Estrutura dos MPA</i>	16
2.2.2	<i>Estimação dos parâmetros e qualidade de ajuste</i>	22
2.2.3	<i>Validação dos MPA</i>	25
2.3	O DSV e o processo de planejamento de transportes	26
2.3.1	<i>MPA na prática de avaliação de alternativas</i>	26
2.3.2	<i>Modelagem da demanda por transportes</i>	28
2.3.3	<i>Estimação sintética dos fluxos</i>	29
3	METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DO DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA EM REDES DE TRANSPORTES UTILIZANDO MODELOS DE PREVISÃO DE ACIDENTES	33
3.1	Consolidação do banco de dados da rede	34
3.1.1	<i>Banco de dados de acidentes de trânsito e das características físicas e operacionais da rede</i>	34
3.1.2	<i>Banco de dados de volumes de tráfego motorizado</i>	36
3.2	Desenvolvimento de Modelos de Previsão de Acidentes	38
3.2.1	<i>Análise e seleção das variáveis</i>	39
3.2.2	<i>Definição de grupos e estrutura dos MPA</i>	39
3.2.3	<i>Desenvolvimento dos MPA - Calibração</i>	40
3.2.4	<i>Análise dos resíduos - Validação</i>	41
3.3	Consolidação de uma rede piloto	41
3.3.1	<i>Definição e caracterização da Rede</i>	42
3.3.2	<i>Estimação do fluxo da rede</i>	43
3.4	Aplicação e análise de sensibilidade da modelagem do DSV na rede piloto ..	44

4	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA NA REDE DE TRANSPORTES DA CIDADE DE FORTALEZA-CE.....	45
4.1	Consolidação da base de dados georreferenciada.....	45
4.1.1	<i>Base geográfica de vias do município de Fortaleza</i>	<i>45</i>
4.1.2	<i>Banco de dados de volume de tráfego motorizado</i>	<i>48</i>
4.2	Desenvolvimento dos Modelos de Previsão de Acidentes	50
4.2.1	<i>Análise e seleção das variáveis e definição de grupos e estrutura dos MPA.....</i>	<i>50</i>
4.2.2	<i>Estimação dos parâmetros</i>	<i>52</i>
4.2.3	<i>Análise dos resíduos - Validação</i>	<i>56</i>
4.3	Consolidação da Rede Piloto.....	58
4.3.1	<i>Definição e caracterização da rede</i>	<i>58</i>
4.3.2	<i>Estimação dos fluxos da rede.....</i>	<i>60</i>
4.4	Avaliação de cenários e da sensibilidade dos MPA	64
4.4.1	<i>Cenário 01.....</i>	<i>64</i>
4.4.2	<i>Cenário 02.....</i>	<i>65</i>
4.4.3	<i>Resultados da aplicação dos MPA</i>	<i>67</i>
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	73
5.1	Conclusões	73
5.2	Sugestão para trabalhos futuros	77
	REFERÊNCIAS	78
	APÊNDICE A - VALOR MÉDIO E DESVIOS PADRÕES DA FREQUÊNCIA ESTIMADA DE ACIDENTES DE TRÂNSITO DAS ZT PARA OS GRUPOS DE ENTIDADES	83
	APÊNDICE B - MAPAS DA FREQUÊNCIA DE ACIDENTES TOTAIS ESTIMADOS PELOS MPA.....	84
	ANEXO A - FATORES DE EXPANSÃO E ESTIMAÇÃO DO VOLUME DIÁRIO MÉDIO ANUAL (VDMA)	85
	ANEXO B - METODOLOGIA DE CLASSIFICAÇÃO DAS VIAS DA REDE PILOTO.....	88
	ANEXO C - PARÂMETROS E VARIÁVEIS PARA ESTIMAÇÃO DO FLUXO DA REDE FORTALEZA	89

1 INTRODUÇÃO

A Organização Mundial de Saúde (WHO, 2015) estima que, anualmente, mais de 1,25 milhão de pessoas morrem e cerca de 50 milhões são feridas ou ficam incapacitadas em decorrência de acidentes de trânsito. Esses números concentram-se, predominantemente, nos países de média e baixa renda. Os acidentes de trânsito são a principal causa de morte entre jovens de 15 a 29 anos e, em muitos países, estima-se que consumam de 2% a 5% do seu Produto Interno Bruto (WHO, 2015). No Brasil, o custo social gerado pelos acidentes foi estimado em aproximadamente 50 bilhões de reais por ano, segundo as estimativas atualizadas do Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada (IPEA, 2015).

Com o objetivo de coordenar esforços globais e convocar os países para atuarem em prol da melhoria da segurança viária, a Organização das Nações Unidas (ONU) decretou, em 2010, o período de 2011 a 2020 como a “Década de Ação pela Segurança no Trânsito”. Desde então, relevantes iniciativas vêm sendo desenvolvidas por diversas nações com o objetivo de reduzir em 50% o número de óbitos devido à acidentes de trânsito e assim salvar mais de 5 milhões de vidas. Dentre as atividades propostas pela ONU, destaca-se a elevação da segurança inerente e qualidade de proteção das redes rodoviárias para o benefício de todos os usuários, através da avaliação das infraestruturas viárias e da consideração da segurança no planejamento, na concepção, construção e operação das vias.

Apesar da referida importância da segurança viária, 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 incipiente. Ferreira (2010) aponta que esse quadro pode ser consequência das limitações na aplicabilidade das ferramentas de avaliação do Desempenho da Segurança Viária (DSV).

Segundo Meyer e Miller (2001), o processo de 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. Segundo Ferreira (2010), há várias décadas já se identificou o potencial da segurança viária como um desses indicadores, possuindo influência social e econômica para a sociedade.

O desenvolvimento de ferramentas de monitoramento e avaliação dos indicadores do DSV tornou-se um tema de pesquisa atual e um componente essencial para ajudar no desenvolvimento de políticas públicas. Desta forma, é possível prevenir determinados efeitos negativos no sistema de transportes, diminuindo consideravelmente custos sociais e econômicos. Essa diminuição de custos advém não só da redução do número de acidentes, mas também da redução, ou até eliminação, da necessidade de implementação de medidas de tratamento de segurança viária.

Atualmente, esforços consideráveis têm sido feitos para incorporar considerações de segurança viária na prática de planejamento dos transportes (WASHINGTON *et al.*, 2006; HERBEL *et al.*, 2009). Na última década, houve um avanço significativo na modelagem estatística de frequência de acidentes com a utilização dos modelos de previsão de acidentes (MPA). Os MPA, modelos estatísticos de regressão que quantificam potenciais fatores de risco de acidentes, têm sido considerados uma ferramenta promissora na modelagem da natureza aleatória e rara associada aos acidentes de trânsito. A partir desse esforço de modelagem é possível estimar a frequência de acidentes de trânsito, indicador determinante para a inserção do DSV no processo de planejamento dos sistemas de transportes.

Segundo Gomes *et al.* (2015), a modelagem do DSV pode ser dividida em função do nível de agregação das variáveis relacionadas aos acidentes. Em um nível desagregado, procura-se o desenvolvimento de MPA independentes e calibrados para entidades da rede, como segmentos (arcos) e interseções (nós). As variáveis comumente utilizadas são o volume diário médio anual (VDMA) e características geométricas da rede (LORD, 2000; TARKO, 2006).

Para o nível de modelagem agregado, as variáveis são frequentemente relacionadas ao nível de zonas de tráfego (ZT), como o uso do solo e aspectos socioeconômicos da área em estudo, atribuindo uma natureza mais preditiva e menos explicativa aos MPA, quando comparados com os modelos desagregados (WASHINGTON *et al.* 2006). Essa abordagem macroscópica desempenha um papel importante no planejamento de transporte e têm sido destaque em vários estudos de previsão de acidentes (HADAYEGHI, *et al.*, 2003; WIER *et al.*, 2009). Os autores desses estudos ressaltam a utilidade dessa abordagem para o estabelecimento de metas de investimentos e políticas públicas para a melhoria do DSV.

No entanto, de acordo com Zeng *et al.* (2014), o problema de segurança viária é microscópico e as causas que contribuem diretamente para o acidente de trânsito podem estar

relacionados a fatores de nível desagregado. Essa abordagem tem sido muito útil quando aplicadas em entidades viárias isoladas, principalmente por lidar com alguns dos problemas estocásticos relacionados com a natureza rara e aleatória dos acidentes.

Os resultados de Lord e Persaud (2004) demonstraram que é possível prever acidentes nas redes de transportes utilizando MPA de nível mais desagregado (nós e arcos), a partir de uma rede digital. Entretanto, é importante destacar que o método utilizado não levou em consideração diferenças entre regiões específicas. Diferenças nas redes viárias, no desempenho e comportamento do motorista e na frequência e severidade de acidentes podem ter variações significativas no DSV estimado pelos MPA.

No Brasil, essa abordagem ainda é explorada de forma muito incipiente devido às limitações nos métodos de estimação do DSV em redes de transportes. Neste contexto, o problema de pesquisa motivador do desenvolvimento deste trabalho está relacionado à necessidade de aperfeiçoamento das metodologias para estimar a frequência de acidentes de trânsito nas redes urbanas de transportes.

1.1 Questões de pesquisa

Com tantos MPA distintos já propostos e desenvolvidos pela comunidade científica, advém a primeira questão de pesquisa desta dissertação: quais atributos físicos e operacionais da rede viária apresentam potenciais fatores de risco significativos para estimar a frequência de acidentes de trânsito, na fase de planejamento, em redes urbanas de transportes? No trato dessa questão de pesquisa, o método proposto deve ser capaz de avaliar se as variáveis modeladas estão consistentemente conectadas e tem significados coerentes com aquelas apontadas na representação do fenômeno. A partir disso, surge a segunda questão de pesquisa: como avaliar o DSV em redes urbanas de transportes através de suas características físicas e operacionais representadas e modeladas digitalmente?

A investigação de como os MPA representam o fenômeno permite compreender o nível de detalhamento ao qual eles se propõem. Quanto mais detalhado, mais complexo será o processo de calibração dessa modelagem. Além da compreensão dos fatores de riscos, para calibrar os MPA, também é preciso identificar a melhor técnica estatística para representar o fenômeno e quais são os melhores grupos de entidades homogêneas da rede que devem ser adotados na modelagem. Dessa forma, surge a terceira questão de pesquisa: quais os MPA mais adequados para a estimação da frequência de acidentes para diferentes entidades da rede urbana de transportes?

Uma vez calibrados e validados, os MPA são capazes de estimar o DSV de uma rede viária para diferentes cenários, modificando-se os fatores de riscos incorporados ao modelo. Esta técnica permite a quantificação dessa medida de desempenho no processo de avaliação de alternativas do planejamento do sistema de transportes. Sendo assim, surge uma quarta questão a ser tratada nesta pesquisa: qual o nível de sensibilidade da estimação do DSV obtida a partir dos MPA desenvolvidos para o ambiente urbano?

1.2 Objetivos de pesquisa

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar a utilização de Modelos de Previsão de Acidentes para estimar o Desempenho da Segurança Viária em redes urbanas de transportes, atuando como ferramenta essencial na etapa de avaliação de alternativas do processo de planejamento do sistema de transportes. Como objetivos específicos, tem-se:

- a) consolidar um banco de dados georreferenciado para o desenvolvimento de modelos de previsão da frequência de acidentes de trânsito que considere a influência dos principais atributos de redes viárias urbanas brasileiras e possíveis variáveis explicativas do fenômeno;
- b) desenvolver Modelos de Previsão de Acidentes capazes de estimar a frequência de acidentes de trânsito para diferentes entidades da rede de transporte de Fortaleza (CE);
- c) consolidar uma rede digital, utilizando dados da cidade de Fortaleza, compatível com a aplicação da modelagem do desempenho da segurança viária em redes urbanas de transportes;
- d) efetivar uma análise de sensibilidade da estimação do desempenho da segurança viária através da aplicação dos MPA desenvolvidos em cenários hipotéticos de variações na demanda e oferta da rede digital consolidada.

A cidade de Fortaleza, uma das capitais brasileiras com um dos índices mais alto de acidentes de trânsito, foi utilizada como estudo de caso pela possibilidade de acesso aos dados necessários para a realização deste trabalho.

1.3 Estrutura da pesquisa

Esta pesquisa de mestrado foi desenvolvida em cinco capítulos, a contar com uma introdução realizada no presente capítulo. Este conjunto de capítulos buscam apresentar uma

sequência lógica de definição dos conceitos e métodos envolvidos na realização deste trabalho.

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

A metodologia proposta para o desenvolvimento e a aplicação de MPA em redes urbanas de transportes com a qual se espera contribuir na inserção do DSV no processo de planejamento dos sistemas de transporte é disposta no terceiro capítulo. O Capítulo 4 apresenta os resultados da aplicação da metodologia descrita para a cidade de Fortaleza.

No último capítulo, são apresentadas as principais conclusões deste trabalho, bem como as considerações finais acerca do seu objetivo. Ainda nesse capítulo, são listadas as sugestões para novas pesquisas relacionadas ao tema estudado.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Esse capítulo tem o objetivo de apresentar os principais conceitos relacionados às análises do desempenho da segurança viária (DSV), modelos de previsão de acidentes (MPA) e a sua aplicabilidade no processo de planejamento do sistema de transportes, de modo a facilitar o entendimento dos métodos empregados ao longo desta pesquisa.

2.1 Modelagem do desempenho da segurança viária

No Brasil, programas que visam a redução de frequência e gravidade de acidentes em áreas urbanas têm sido tradicionalmente reativos, voltados para vias em operação. Para um local ser sinalizado como crítico condiciona-se à existência de um histórico de acidentes e pessoas vítimas do trânsito nesse local. O ideal é que o número previsto de acidentes seja estimado durante o planejamento do sistema de transportes. A partir desse princípio proativo, elementos potencialmente perigosos devem ser identificados, prevenindo o surgimento de situações de risco (SAYED *et al.*, 2004). Segundo Nodari (2003), as iniciativas proativas são fundamentadas no conhecimento pré-existente de fatores influentes na segurança viária. Elas consistem basicamente na realização de estudos de impacto sobre a segurança das intervenções planejadas e na execução de inspeções de segurança na rede viária.

A abordagem proativa ainda é explorada de muito incipiente no Brasil. De acordo com o âmbito regulatório brasileiro até hoje não se estabeleceu, de forma prática, como a segurança viária pode ser considerada no processo de planejamento urbano. Em contrapartida, em algumas cidades norte americanas, desde a década de 60, a segurança viária vem sendo tratada pelo governo federal americano como um problema nacional (ITE, 2009). As primeiras leis e marcos regulatórios aplicados à essa questão datam de 1966. No documento intitulado “*Considering Safety in the Transportation Planning Process*”, são referidas as primeiras lacunas existentes relativas a metodologia que estime o DSV no processo de planejamento. Nesse documento, são sugeridos três potenciais métodos de avaliação do DSV:

- a) avaliação por especialistas;
- b) aplicação de modelos de análise da segurança viária do projeto e;
- c) aplicação de modelos de previsão a partir dos resultados da estimação do tráfego.

O primeiro método consiste na utilização dos conhecimentos de especialistas nas áreas do transporte e da segurança para a avaliação da situação. O segundo corresponde à aplicação de modelagem DSV com base em informações que caracterizam a geometria e operação da rede. O terceiro método avalia a segurança viária através da aplicação de modelos de previsão, em que as variáveis independentes são relativas ao tráfego.

Em 2006 foi publicado o relatório com a designação - “*Incorporating Safety into Long- Range Transportation Planning*” de Washington, *et al.* (2006) que descreve várias ferramentas aplicáveis para analisar o DSV. Esse relatório constitui um guia direcionado para os departamentos governamentais de planejamento e refere-se às fases em que é possível incluir a segurança no planejamento dos transportes em longo prazo. Destas ferramentas, destacam-se três: *SafeNET*, *SafetyAnalyst*, e o *PLANSAFE*.

O *SafeNET* – “*Software for Accident Frequency Estimation for Networks*”, foi desenvolvido pelo Departamento de Transportes do Reino Unido. É um software com várias componentes em que cada uma corresponde a um determinado tipo de intersecção ou segmento de via, onde se desenvolve as modelagens de previsão de acidentes. Com características similares e mais utilidades, o *SafetyAnalyst*, desenvolvido pela *Federal Highway Administration*, é composto por seis *softwares* para analisar o desempenho de segurança de locais específicos, sugerir medidas de prevenção, quantificar os benefícios esperados e avaliar a sua eficácia.

O *PLANSAFE* – “*Planning Level Safety Prediction Model*”, foi desenvolvido no projeto do qual resultou o relatório de Washington, *et al.* (2006). Trata-se de uma ferramenta de apoio à tomada de decisão na fase de planejamento por permitir, por exemplo, conferir se determinadas metas e objetivos para a segurança poderão ser atingidos. Neste sentido, foram desenvolvidas várias abordagens macroscópicas de previsão de acidentes cujos dados são agregados, no mínimo, em uma zona ou área de interesse.

Neste contexto, o *Transportation Planning Handbook* (2009) apresentou uma proposta de inserção da segurança viária 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 segurança viária no processo de planejamento da região;
- d) desenvolver metas, objetivos e medidas de desempenho;
- e) analisar projetos, estratégias e alternativas e;

f) monitorar a implementação e avaliar os resultados.

Dentre as etapas da metodologia proposta no TPH, ressalta-se a importância do desenvolvimento de medidas que considerem a segurança viária no desempenho e análise de projetos, estratégias e alternativas. Entretanto, constatou-se que a metodologia ainda não estava sendo aplicada de forma atuante no processo de tomada de decisão devido à ausência de 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. Dessa mobilização culminou a publicação do *Highway Safety Manual* (HSM) em 2010.

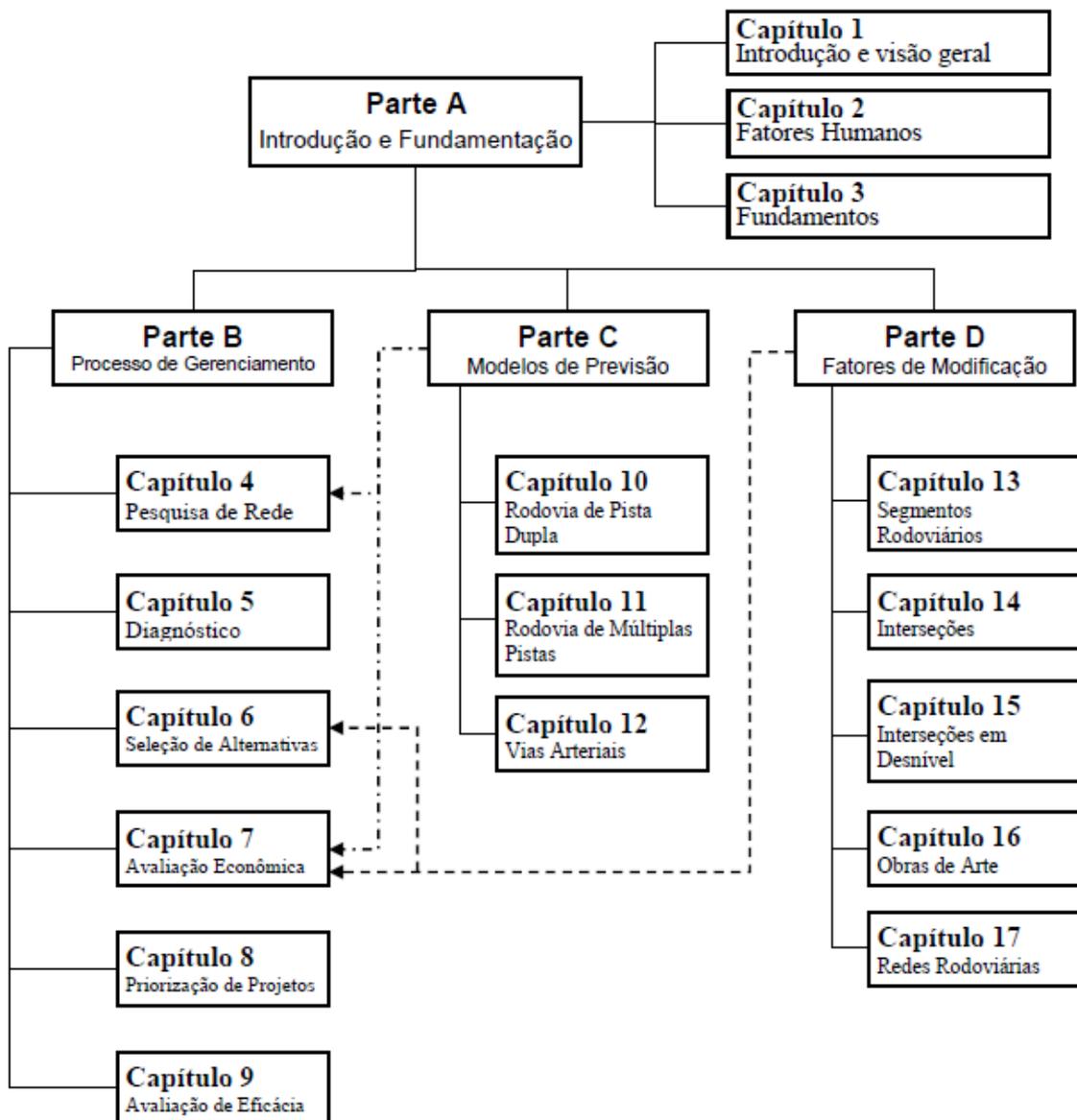
O HSM foi desenvolvido com a proposta de ser uma ferramenta para fomentar o conhecimento da segurança viária e auxiliar o processo de tomada de decisão com base na análise do DSV. O manual reúne métodos e informações para estimar e avaliar a segurança viária em termos de frequência e severidade dos acidentes. Desta forma, apresenta métodos quantitativos de avaliação da segurança viária de modo a ser utilizado nas etapas de planejamento, projeto, construção e operação de sistemas de transportes.

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 1, 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 do HSM. As Partes B, C e D podem ser usadas 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.

Figura 1 - Organização do *Highway Safety Manual*



Fonte: Adaptado de HSM (2010)

A linha que liga a parte C aos 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 fatores de modificação de acidentes podem ser utilizados para os cálculos de seleção de medidas mitigadoras e na avaliação econômica das mesmas.

Contemplado na Parte C do HSM, o método de previsão de acidentes pretende estimar a frequência média de acidentes, incluindo a gravidade e tipo dos acidentes de uma

rede viária, segmento, interseção ou de um determinado local. A previsão pode ser calculada para as condições existentes ou para cenários alternativos da rede, resultando em propostas de tratamentos e melhorias. O método de previsão de acidentes pode ser usado para avaliar e comparar a frequência média de acidentes esperada em situações tais como:

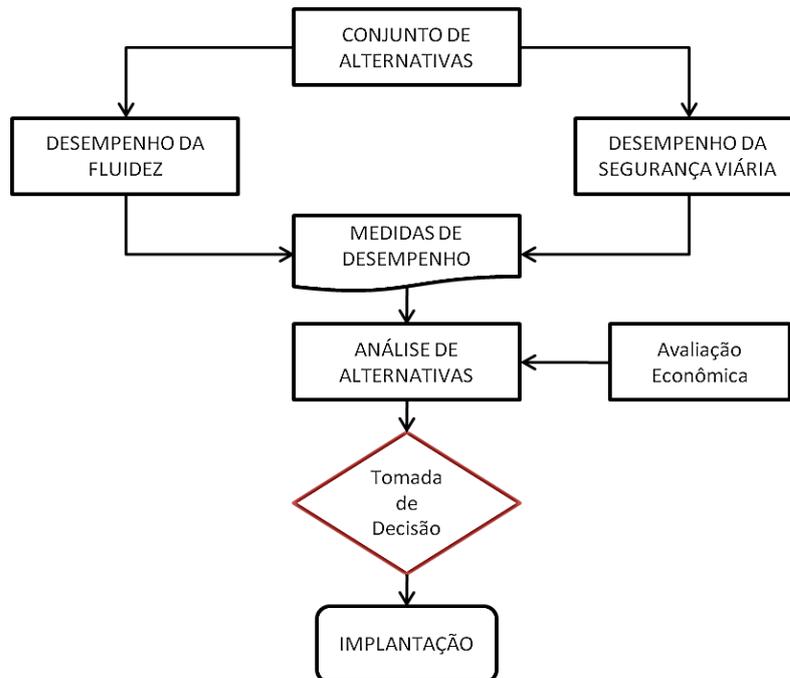
- a) entidades viárias existentes segundo volumes de tráfego passados e/ou futuros;
- b) projetos alternativos para uma entidade viária existente, segundo volumes de tráfego passados ou futuros;
- c) projetos para uma nova entidade viária, segundo futuros valores de volume de tráfego previstos;
- d) a eficácia estimada de medidas de tratamento após um período de implementação e;
- e) a eficácia estimada de medidas de tratamento propostas sobre uma entidade viária existente (antes da implementação).

De acordo com o HSM, o método de previsão de acidentes fornece um procedimento de 18 etapas para estimar a frequência média de acidentes. O detalhe de cada uma dessas etapas é definido na Parte C do HSM, onde são apresentados os Modelos de Previsão de Acidentes (MPA), elemento fundamental e com potencial para a inclusão do DSV no processo de planejamento.

Entretanto, é importante destacar que o método apresentado não leva em conta diferenças entre regiões específicas, por isso seu emprego em locais distintos dos quais ele foi desenvolvido deve ser feito com cuidado. Os modelos apresentados no manual não devem ser aplicados na sua forma original em outros países, pois as redes viárias, o desempenho e comportamento do motorista e a frequência e severidade de acidentes podem ter variações significativas. Portanto, é recomendável a adaptação da sistemática apresentada no manual (AASHTO, 2010).

Segundo Souza (2012), com a consolidação do HSM é possível observar uma mudança na estrutura do processo decisório de análise de alternativas no processo de planejamento dos transportes. Essa nova estrutura passou a considerar não só os *inputs* das análises do desempenho operacional da fluidez, mas também os das análises do DSV, como apresentado no fluxograma da Figura 2.

Figura 2 - Processo decisório de análise de alternativas considerando a segurança viária.



Fonte: Adaptada de Souza (2012)

Observa-se, pelo fluxograma, que o processo de análise de alternativas deve ser baseado em indicadores de desempenho de fluidez e de segurança viária. Entretanto, no Brasil, o processo de planejamento de transporte tem estado bastante voltado para a modelagem de cenários e avaliação de alternativas, levando em consideração apenas as medidas de desempenho relacionadas à fluidez do sistema. Neste sentido, esta pesquisa pretende apresentar um esforço para avaliar a utilização dos Modelos de Previsão de Acidentes (MPA) como uma potencial ferramenta de inclusão da segurança viária na etapa de análise de alternativas do processo de planejamento urbano brasileiro. Contudo, antes de apresentar as premissas desta abordagem julga-se necessária a discussão acerca dos MPA.

2.2 Modelos de Previsão de Acidentes (MPA)

O ato de prever uma determinada mudança, ou mesmo a manutenção das condições presentes, tem importância fundamental em praticamente todas as áreas de atuação. Na grande maioria dos ramos de atividades, a previsão é feita através do conhecimento histórico sobre o tema em análise. Trazendo esta realidade para a segurança viária, observa-se uma significativa quantidade de métodos que objetivam a previsão da ocorrência de acidentes de trânsito sobre determinadas circunstâncias. Isto se deve à necessidade de se conhecer por

que os acidentes acontecem, o que tem efeito significativo na ocorrência dos acidentes de trânsito e qual resultado pode ser alcançado através de determinadas medidas ou mudanças a serem adotadas. A estimação da frequência de acidentes de trânsito é geralmente feita através de modelos matemáticos que, de uma maneira geral, determinam o valor esperado de acidentes em função de determinadas variáveis que possuem influência significativa para que os mesmos aconteçam (CARDOSO, 2007). Esses modelos são popularmente definindo como Modelos de Previsão de Acidentes.

Segundo Ferreira (2010), os MPA são desenvolvidos com dois objetivos distintos segundo o seu contexto de aplicação. Por um lado, a apresentação do mecanismo que descreve as relações entre a infraestrutura e os acidentes. Neste caso, o modelo é composto por um número elevado de variáveis independentes que representam determinadas características da infraestrutura. Por outro lado, a previsão do número de acidentes para um determinado ano horizonte, em que as variáveis independentes são normalmente fatores de exposição que influenciam a frequência dos acidentes. São estes últimos modelos que se aplicam na fase de planejamento. Dos MPA desenvolvidos distinguem-se três tipos quanto à área em estudo:

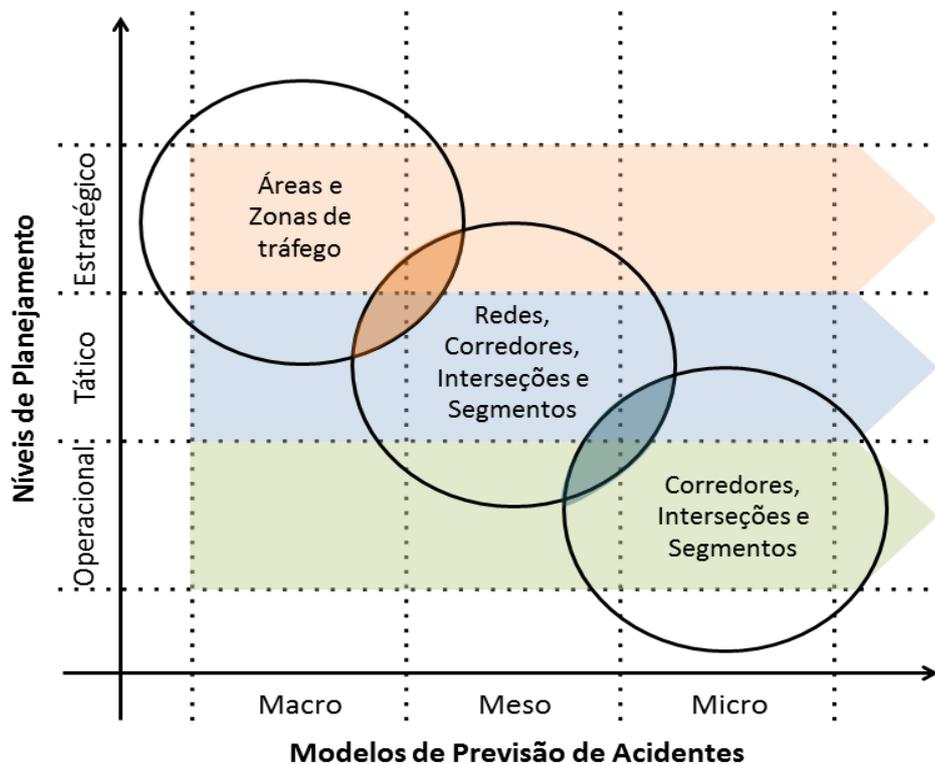
- a) modelos microscópicos: aplicados as entidades específicas, tais como uma interseção ou um segmento de via, atendendo ao funcionamento específico dessa entidade em termos físicos e funcionais;
- b) modelos mesoscópicos: aplicados à rede (conjunto de arcos e nós) de uma determinada área com dados, relativos a fatores de exposição e informações, que possam estar relacionada direta ou indiretamente com a ocorrência de acidentes no processo de planejamento;
- c) modelos macroscópicos: aplicado a dados agregados numa zona e relativos à informação socioeconómica, demográfica e do sistema de transportes, objetivando a avaliação do DSV em cenários de longo prazo.

Conforme foi estabelecido nos objetivos, este trabalho pretende analisar o desempenho da segurança de sistemas viários no ambiente urbano, o qual possui algumas características peculiares que o torna diferenciado para este tipo de análise. A principal destas características refere-se 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 acidentes de trânsito. Segundo Cunto *et al.* (2012), o ambiente viário urbano acrescenta um

nível de dificuldade ao processo de modelagem em virtude da maior quantidade de variáveis que podem influenciar nos acidentes.

O sistema viário urbano pode ser organizado em três níveis de agregação que se inter-relacionam. No nível mais alto, zonas e áreas, 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. Para cada tipo de intervenção podem-se aplicar os MPA das diferentes áreas de estudo. Na Figura 3 é ilustrada uma representação dos elementos supracitados e suas inter-relações.

Figura 3 - Elementos do sistema viário e suas relações com os níveis de planejamento e os tipos de MPA.



Fonte: O autor.

De acordo com a Figura 3, é possível destacar que existe uma relação aparentemente objetiva entre os níveis de planejamento e os MPA e, percebe-se que, os níveis de agregação do sistema viário podem ser analisados nos três níveis de planejamento e modelagem. Contudo, vale destacar que, para qualquer análise do sistema viário urbano 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 qual a melhor tática de modelagem de previsão acidentes deve ser utilizada.

De acordo com Ferreira (2012), os modelos microscópicos são aplicados quando se pretende analisar um local específico (interseção ou segmento de via) com o objetivo de avaliar o impacto de uma alteração do local em termos físicos e funcionais. Estes modelos são inseridos em uma fase de decisão das características geométricas e funcionais de um determinado local. É o caso dos modelos que incorporam os microssimuladores.

Os MPA mesoscópicos apresentam um direcionamento para aplicação prática na fase de planejamento para avaliação entre alternativas. São modelos que consideram como variáveis independentes dados disponíveis no nível tático, em geral, indicadores que caracterizam a área em estudo com informações que possam estar relacionadas direta ou indiretamente com a ocorrência de acidentes. Nos modelos macroscópicos os dados das variáveis são agregados por zona, o que permite a avaliação do DSV em cenários de longo prazo que envolva mudança na população e alteração na infraestrutura e espaço construído (WASHINGTON *et al.*, 2006).

Além da definição do escopo, os esforços de modelagem do DSV no processo de planejamento podem ser divididos em função do nível de agregação das variáveis envolvidas. Em um nível desagregado, procura-se o desenvolvimento de modelos micro e mesoscópicos. Nesses casos, as variáveis mais comumente utilizadas são o volume diário médio anual (VDMA), e atributos físicos e operacionais (TABELA 1). Segundo Gomes *et al.* (2015), o domínio natural de aplicação dos modelos desagregados concentra-se na etapa de avaliação de cenários de planejamento propostos.

Dentre os desafios dessa abordagem, ressaltam-se a dependência de informações obtidas por outro processo de modelagem (*e.g.*: VDMA), além do nível de confiabilidade dos modelos em decorrência da aleatoriedade relacionada à ocorrência dos acidentes de trânsito, principalmente quando analisados em um nível tão desagregado (HADAYEGHI, *et al.*, 2003; WASHINGTON *et al.*, 2006).

Para o nível de modelagem agregado, as variáveis são frequentemente relacionadas ao nível de zonas de tráfego (TABELA 2). As variáveis explicativas estão mais relacionadas ao uso do solo e a aspectos socioeconômicos da área em estudo o que atribui uma natureza mais preditiva e menos explicativa aos modelos (WASHINGTON *et al.*, 2006). Além disso, esses autores ressaltam a utilidade dessa abordagem para o estabelecimento de

metas de investimentos, políticas públicas para a melhoria do DSV e estimação do número previsto de acidentes em áreas em virtude da variação temporal de fatores socioeconômicos e do ambiente construído. No entanto, de acordo com Zeng *et al.* (2014), o problema de segurança viária é, de certa forma, microscópico e as variáveis que contribuem diretamente para o acidente de trânsito podem estar relacionados a fatores desagregados de uma específica interseção ou segmento viário.

Song *et al.* (2015) revelaram que os MPA de nível microscópico possuem um melhor desempenho preditivo e sua estimativa pode ser mais direta e específica para análise do acidente com mais precisão que os MPA de nível macroscópico. No esforço de aperfeiçoar o nível de previsão da modelagem do DSV no planejamento dos transportes, os autores recomendam estimar a segurança utilizando-se de modelos desagregados (arcos e nós). Essa abordagem revelou resultados satisfatórios, permitindo uma potencialização da análise do DSV no planejamento do sistema viário.

As Tabelas 1 e 2 apresentam uma lista de autores e das variáveis envolvidas nos esforços de modelagem discutidos anteriormente. A revisão da literatura reforça a necessidade da utilização frequente de bancos de dados distintos, incluindo informações obtidas por outros processos de modelagem, obviamente sujeito a diversos tipos de simplificações e erros.

Tabela 1- Referências bibliográficas de estudos com base em MPA desagregados

Autores	Entidades	Variáveis Dependentes	Variáveis Independentes
Greibe (2003)	Nós e arcos (Urbano)	# acidentes totais	Características geométricas e fluxo de tráfego.
Lord e Persaud (2004)	Nós e arcos (Urbano)	# acidentes totais	Fluxo de tráfego.
Tarko, <i>et al.</i> (2008)	Nós e arcos (Urbano e Rural)	# acidentes com vítimas e danos materiais	Fluxo de tráfego e comprimento do arco
Ferreira e Couto (2012)	Nós e arcos (Urbano)	# acidentes com vítimas e danos materiais	Características geométricas, fluxo de tráfego e uso do solo.
Cunto, <i>et al.</i> (2012)	Nós semaforizados	# acidentes totais	Características geométricas e fluxo de tráfego.
Sobreiro e Cunto, (2014)	Arcos arteriais	# acidentes totais	Fluxo de tráfego e comprimento do arco.

Tabela 2 - Referências bibliográficas de estudos com base em MPA agregados

Autores	Entidades	Variável dependente	Variáveis independentes
Hadayeghi <i>et al.</i> (2003)	ZT	# acidentes com vítimas feridas e fatais	Dados Socioeconômico e Demográfico, características geométricas e demanda de tráfego.
Lovegrove e Sayed. (2004)	ZT	#acidentes totais, # acidentes com vítimas fatais e feridas	Dados Socioeconômico e Demográfico, características geométricas e demanda de tráfego.
Aguero-Valverde <i>et al.</i> (2006)	ZT	# acidentes com vítimas feridas e fatais, Taxas de acidente por severidade	Dados Socioeconômico e Demográfico, características geométricas e do meio ambiente.
Gomes <i>et al.</i> (2015)	ZT	# total de acidentes, # acidentes com vítimas fatais e feridas	Dados Socioeconômico e Demográfico, características geométricas da via e de controle de tráfego.

2.2.1 Estrutura dos MPA

Inicialmente, os MPA foram desenvolvidos a partir de modelos de regressão linear assumindo a normalidade dos erros e homocedasticidade. Essas suposições foram consideradas inconsistentes por fato da natureza aleatória e rara da frequência dos acidentes de trânsito (HAUER *et al.*, 1988). Uma alternativa possível para lidar com esse padrão excessivo de dispersão dos dados, incompatível com as suposições da regressão linear tradicional, é o emprego dos modelos lineares generalizados (MLG) (CARDOSO, 2007; CUNTO *et al.*, 2012).

Os MLG foram propostos em 1972 como sendo uma extensão dos modelos lineares clássicos, cujas suposições de normalidade, homogeneidade de variâncias e relacionamento linear entre os efeitos da covariável e a média eram relaxados, produzindo uma abordagem unificada para análise de uma ampla classe de dados aleatórios e discretos.

McCullagh e Nelder (1983) descreveram o que é preciso para aplicar os MLG. Para os autores, é necessário definir: (i) a variável dependente e sua distribuição de probabilidade, que deve pertencer à família de distribuição exponencial (componente aleatória); (ii) as variáveis explicativas que integram o preditor linear (componente sistemática); (iii) uma função de ligação que irá relacionar a componente aleatória e a componente sistemática do modelo. Essas características são uma grande vantagem dos MLG

aplicados aos acidentes, pois as distribuições exponenciais se aproximam das características dos valores das frequências dos acidentes, valores inteiros e positivos.

A componente aleatória dos MLG é formada pela função densidade de y_i , no qual cada integrante de y segue uma mesma distribuição da família exponencial. Na Equação 1 é apresentada a formulação da função densidade de y_i .

$$f(y_i; \theta; \phi) = e^{\left\{ \frac{y_i - b(\theta)}{a(\theta)} - c(y_i, \phi) \right\}} \quad (1)$$

Em que:

y_i	Função densidade;
$a(\cdot)$, $b(\cdot)$ e $c(\cdot)$	Funções conhecidas;
ϕ	Parâmetro de dispersão;
θ	Parâmetro canônico;
i	1, 2, ..., n.

O parâmetro θ é o que caracteriza a distribuição. Se ϕ é conhecido, a Equação 1 representa a família de densidades exponenciais uniparamétricas indexada por θ . Na componente sistemática considera-se que a estrutura linear do modelo de regressão é $\eta = X\beta$, onde $\eta = (\eta_1, \dots, \eta_n)'$, $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_p)'$ e X é a matriz de variáveis independentes $n \times p$ ($p < n$), onde p é o número de parâmetros no modelo e n é o número de variáveis explicativas. A função linear η dos parâmetros desconhecidos β é chamada de preditor linear.

No que se refere à função de ligação, terceira componente dos MLG, ela pode ser qualquer função monótona e diferencial. Destaca-se que é possível escrever a média da variável dependente, $\mu = E(y)$, em função das variáveis explicativas, X , ou seja, para cada distribuição da família exponencial existe uma função de ligação $g(\cdot)$, com contradomínio na reta real, tal que: $g(\mu) = \eta_i$, $i = 1, 2, \dots, n$. No caso dos acidentes, em que se assume habitualmente uma distribuição exponencial do tipo Poisson ou Binomial Negativa, a função de ligação é uma função logarítmica, garantindo assim que, para qualquer combinação de parâmetros e variáveis independentes, o modelo não altera a característica dos valores das frequências dos acidentes (inteiros e positivos).

As variáveis independentes podem ser de dois tipos: variáveis que descrevem a exposição ao risco de acidentes e variáveis que identificam fatores de risco que influenciam a ocorrência de acidentes em uma unidade de exposição (REURINGS *et al.*, 2005). As variáveis independentes mais utilizadas nos MPA para descrever fatores de risco são, geralmente,

representativas das características físicas e funcionais da rede, tais como a função hierárquica, as características geométricas e operacionais (FRIDSTROM *et al.*, 1995; LORD, 2000; GREIBE, 2003). A variável de exposição mais utilizada é Volume Médio Diário Anual (VMDA), indicador de tráfego. Esta variável tem sido referida em diversos trabalhos como a mais determinante para a ocorrência de acidentes.

O processo de seleção das variáveis passa, muitas vezes, por uma fase de análise exploratória, tendo por base uma metodologia que a fundamente (GOMES *et al.*, 2015). Porém, na prática, o que habitualmente acontece é que a escolha das variáveis é limitada aos dados disponíveis. No método utilizado por Fridstrom *et al.* (1995) as variáveis são introduzidas uma a uma, e apenas são incorporadas ao modelo se a relação com a variável dependente for estatisticamente significativa.

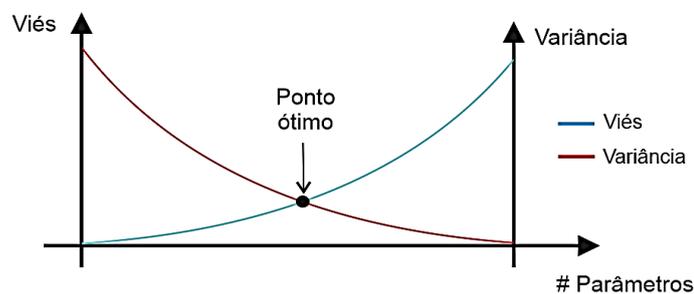
Na pesquisa de Reurings *et al.* (2005) recomenda-se que as variáveis independentes sejam selecionadas com base em estudos anteriores, que possam ser medidas e determinadas de uma forma confiável e que não sejam correlacionadas com outra variável já incluída. Reforçando estes princípios de escolha das variáveis, Maher e Summersgill (1996) referem que se deve ter em conta quatro fatores:

- a) o nível de significância estatística: as variáveis são rejeitadas para níveis de confiança inferiores a 95% e para níveis de confiança superiores a 99% só serão rejeitadas se um estudo cuidadoso assim o justificar;
- b) a estabilidade do modelo: se as variáveis estão relacionadas entre si então, ao introduzir uma variável, os valores dos parâmetros das outras variáveis são afetados;
- c) o efeito da variável deve ser lógico: o valor do parâmetro deve ser ajustado aos conhecimentos empíricos e a estrutura do modelo deve fazer sentido;
- d) a dimensão do efeito e a facilidade de medição da variável: são preferíveis as variáveis que tenham um efeito preponderante e que sejam fáceis de medir na prática.

Em sua pesquisa, Lord (2000) argumenta que é preferível estratificar os MPA a partir das variáveis explicativas disponíveis, simplificando os modelos e, conseqüentemente, a estimação dos parâmetros, garantindo um baixo viés (princípio da parcimônia). Entretanto, essa abordagem é criticada por trazer uma alta variância para a modelagem ao considerar poucas variáveis explicativas e reduzir o tamanho da amostra.

Segundo Cunto *et al.* (2012), busca-se o equilíbrio entre a simplicidade (número de parâmetros) e a aderência aos dados. Para modelos com elevado número de parâmetros, a variância dos erros será baixa, entretanto o modelo será viesado para a amostra utilizada (*overfitting*); ou seja, o modelo se ajustará tão firmemente aos dados existentes que perderá a capacidade de previsão de acidentes em novas interseções. Por outro lado, modelos com menos parâmetros terão um menor viés, porém possuirão menor aderência, pois variáveis importantes para explicar o número de acidentes estarão ausentes. O esforço para encontrar um ponto ideal entre a variância e o viés na estruturação dos modelos é um dos principais critérios que garantem a qualidade de ajuste dos parâmetros. A Figura 4 apresenta um gráfico da relação entre o viés, variância e número de parâmetros nos MPA.

Figura 4 - Relação entre o viés, variância e número de parâmetros dos MPA.



Fonte: O autor.

De acordo com Hauer (2004), o desenvolvimento da equação do modelo tem sido descrito como um processo de introdução de variáveis um após o outro de modo que todos os parâmetros do modelo são reestimados após uma variável ser adicionada. A Estimativa do parâmetro é otimizada a partir de uma equação que expressa a probabilidade de o acidente ocorrer em função de características conhecidas de uma entidade e de parâmetros desconhecidos que precisam ser estimados. Para determinar essa expressão, é necessário assumir pressupostos sobre a natureza aleatória e rara da variável dependente, frequência de acidentes. Pode-se supor que a distribuição *Poisson* trata de uma boa aproximação para esses casos. A Equação 2 apresenta a forma funcional que caracteriza a distribuição de *Poisson*.

$$P [Y = y_i] = \frac{\lambda_t^{y_i} e^{-\lambda_t}}{y_t!} \quad (2)$$

Onde, a observação y_i tem uma probabilidade de ocorrer, no intervalo de tempo t , segundo a distribuição probabilística de *Poisson*, da qual é caracterizada por uma média $\mu_i = E[y_i] = \lambda_i$ e variância $Var[y_i] = \lambda_i$, ou seja, a média é igual a variância. E, por se tratar de um MLG, a função de ligação estabelecida, que relaciona o parâmetro de Poisson λ_i às variáveis independentes, é a função logarítmica (EQUAÇÃO 3).

$$\ln(\lambda_i) = \sum_j \beta_j x_{ij} \quad (3)$$

Em que, x_{ij} são as possíveis variáveis explicativas observadas e o β_j são os parâmetros que se deseja estimar. Essa hipótese implica que as entidades com as mesmas características medidas têm a mesma média. Entretanto, a experiência com os dados mostra que isso geralmente não é uma boa suposição (HAUER, 2004).

Na distribuição de *Poisson*, a probabilidade de ocorrência de um evento associado a um local é constante num determinado período de tempo e os eventos ocorridos em intervalos diferentes são probabilisticamente independentes. Contudo, nem sempre é possível admitir a constância da probabilidade das ocorrências. Por um lado, tem-se verificado uma tendência para a diminuição dos acidentes ao longo do tempo refletindo em uma diminuição do risco de acidente. Por outro lado, diversos fatores levam a justificar a homogeneidade do risco individual de cada entidade de um grupo homogêneo de entidades, dando origem a valores da variância maiores do valor esperado (CARDOSO, 2007).

Como alternativa, pode-se supor que a frequência de acidentes nas entidades segue a distribuição *Poisson* com uma média $\mu_i = \theta \cdot E[y_i]$, onde θ de cada entidade é fornecido aleatoriamente por uma distribuição Gama. Esse θ representa um multiplicador que varia na medida em que a média de uma entidade difere da média de outra com as mesmas características medidas (HAUER, 2004). A partir dessas suposições, a frequência de acidentes obedece à distribuição *Poisson-Gama*, também conhecida como Binomial Negativa (BN). Nesta distribuição, considera-se que os acidentes resultam de um processo cujas probabilidades de sucesso variam em cada evento. A forma funcional que caracteriza a distribuição BN é descrita na Equação 4 a seguir.

$$P(Y_{it} = y_{it}, \phi, \lambda_{it}) = \frac{\Gamma(y_{it} + \phi)}{\Gamma(\phi) y_{it}!} \left(\frac{\phi}{\lambda_{it} + \phi} \right)^\phi \left(\frac{\lambda_{it}}{\lambda_{it} + \phi} \right)^{y_{it}} \quad (4)$$

Em que $\phi = \frac{1}{\alpha}$ e α é o parâmetro de superdispersão e $\Gamma(\cdot)$ é a função Gama. Esta distribuição é caracterizada por uma média $\mu_i = E[Y] = \lambda_i \cdot \theta_i$, e variância $Var[y_i] = E[y_i] \cdot \{1 + \alpha E[y_i]\}$. Logo, quando o parâmetro de superdispersão α se aproxima de zero ($\theta \rightarrow \infty$), a regressão reverte para a distribuição de *Poisson* (LORD e PARK, 2008). O valor do parâmetro de superdispersão (α) pode ser utilizado para avaliar a capacidade do modelo de explicar a componente sistemática do processo de ocorrência dos acidentes, então quanto menor o valor de α melhor o modelo. Existem, no entanto, vários indicadores da qualidade de ajuste do modelo que utilizam o valor do parâmetro da superdispesão para calcular a percentagem da componente sistemática explicada pelo modelo (REURINGS *et al.*, 2005).

Desta forma, a distribuição BN é caracterizada por uma distribuição de *Poisson* para a componente aleatória e uma distribuição Gama para o termo do erro u_i , com média igual a 1 e variância α . Aplicando a função de ligação logarítmica que relaciona os parâmetros da BN às variáveis independentes, tem-se a Equação 5 a seguir.

$$\ln(\mu_i) = \sum_j \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i = \ln(\lambda_i) + \ln(u_i) \quad (5)$$

Segundo Hauer (2015), apesar da função de probabilidade *Poisson* ser mais simples, sua desvantagem está na incompatibilidade com a necessidade lógica e realidade empírica de superdispersão. Ser capaz de explicar a superdispersão é o principal mérito da função de probabilidade BN. Tem também a vantagem prática de fornecer simultaneamente estimativas da média e variância. Estas características desejáveis têm um preço: a necessidade de fazer suposições específicas e difíceis de justificar sobre a distribuição das médias e a probabilidade serem uma constante para todas as entidades. Hauer (2015) expõe que, mesmo com as deduções matemáticas sólidas, o resultado final é apenas tão bom quanto os pressupostos sobre os quais se assumem. A formulação genérica dos MPA pode ser apresentada conforme a Equação 6.

$$E(y|x_1, x_2, \dots, x_k) = \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k) \quad (6)$$

Em que $E(y|x_1, x_2, \dots, x_k) = Y$ é o valor esperado da componente aleatória, y , dado que um conjunto de k valores das variáveis explicativas é observado. Os β 's são os parâmetros que se deseja estimar. Assumindo as premissas de que a componente aleatória é

única, a componente sistemática é linear, o termo de erro não deve ser correlacionado com qualquer variável independente e as observações são independentes (CARDOSO, 2007).

2.2.2 Estimação dos parâmetros e qualidade de ajuste

A Estimativa do parâmetro é sempre baseada na otimização do modelo. Seus valores devem gerar uma maior probabilidade de ocorrência do acidente observado, através da estimativa de probabilidade máxima. Nas regressões não lineares, como é o caso da regressão de *Poisson* e da Binomial Negativa (BN), a técnica de estimação dos parâmetros usualmente aplicada, para maximizar essa probabilidade, é o método da máxima verossimilhança. Esse método consiste em selecionar, entre todos os valores possíveis dos parâmetros populacionais, aqueles que tornem mais verossímil a ocorrência de uma amostra idêntica àquela que efetivamente se obteve. As estimativas de máxima verossimilhança dos parâmetros $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ são os valores destes parâmetros que maximizam a função de verossimilhança (\mathcal{L}).

De acordo com Hauer (2015), a aplicação do método exige algumas suposições acerca da função de probabilidade que se deseja maximizar. Para a função de probabilidade BN supõe-se (i) que a frequência de acidentes em cada unidade segue a distribuição de *Poisson*, (ii) que as médias dos elementos, dos quais uma população é composta são diferentes, (iii) que a frequência média da população pode ser bem aproximada por uma distribuição Gama e (iv) que a "forma" do parâmetro da distribuição gama se comporta de uma forma específica para todas as populações. Com estes pressupostos a função de log-verossimilhança BN, abreviada, poderia ser escrito conforme a Equação 7.

$$\mathcal{L}(\beta) = \prod \frac{\Gamma(y_{it} + \phi)}{\Gamma(\phi) y_{it}!} \left(\frac{\phi}{\lambda_{it} + \phi} \right)^\phi \left(\frac{\lambda_{it}}{\lambda_{it} + \phi} \right)^{y_{it}} \quad (7)$$

As estimativas dos parâmetros dos MPA devem ser avaliadas a partir do ajuste do modelo, ou seja, da análise de seus resíduos (as diferenças entre a frequência de acidentes observada e frequência estimada pelo modelo). Normalmente, para ter evidências que um modelo é o melhor entre os vários estudados é necessário ajustar dois ou mais modelos que se destacam, necessitando de uma medida da distância entre um bom modelo e os vários modelos candidatos (HAUER, 2004).

Para medir qualidade do ajuste de um MLG, Akaike (1974) desenvolveu o critério de informação de Akaike (*Akaike Information Criterion* – AIC), que origina na minimização

da informação de *Kullback-Leibler* (K-L). A informação K-L é uma medida da distância entre o modelo verdadeiro e um modelo candidato. Na realidade, este modelo verdadeiro quase sempre, é uma abstração. Essa medida baseia-se no ponto máximo da função de logaritmo da verossimilhança (FLV), acrescida de uma penalidade associada ao número de parâmetros do modelo (Equação 8). O autor recomenda usar o AIC para analisar modelos quando o número de observações, n , é maior do que pelo menos 40 vezes o número de parâmetros.

$$AIC = -2 \cdot \log(L) + 2 \cdot p \quad (8)$$

Em que:

- AIC Critério de Informação de Akaike (*Akaike Information Criterion* – AIC);
- L Máximo valor da função de máxima verossimilhança para o modelo estimado;
- p Número de parâmetros incluídos no modelo.

Segundo Costa (2013), a modelagem de um fenômeno pode tornar-se bastante complexa devido à difícil tarefa de definição das variáveis, os algoritmos de exclusão sequencial (*backward*), de inclusão sequencial (*forward*) e inclusão/exclusão sequencial alternada (*stepwise*) auxiliam na seleção arbitrária das variáveis. Uma alternativa é considerar todas as combinações possíveis dos termos do modelo completo e de número de parâmetros e utilizar critérios de seleção de modelos baseados na avaliação do ajuste. O critério AIC compara diferentes modelos com base no equilíbrio entre o viés e a variância explicada pelos mesmos (princípio da parcimônia). Por sua formulação matemática o modelo mais equilibrado é aquele que apresenta o menor AIC.

No entanto, assim como essa medida de ajuste a partir do critério de informação de Akaike, na literatura encontra-se uma abundância de outras medidas. O problema é que todas elas descrevem apenas como o modelo se ajusta globalmente, a partir de um único valor (e.g: função desvio - S_p e máximos da log-verossimilhança $-2l$). Para aplicações em MPA isso é insuficiente. Para seu uso prático, as estimativas dos MPA devem produzir resultados não enviesados para todos os valores das variáveis. Para examinar o ajuste de um modelo no rigor necessário, é comumente recomendado plotar os resíduos em função da variável de interesse. Infelizmente, para MPA essa abordagem é difícil de interpretar. A melhor alternativa é a utilização de resíduos acumulados, o *CURE plot*. (HAUER, 2015).

Hauer e Bamfo (1997) propuseram o método *CURE* (*CUMulative REsiduals*) para avaliar a relação das variáveis independentes com a variável dependente. Esse método requer

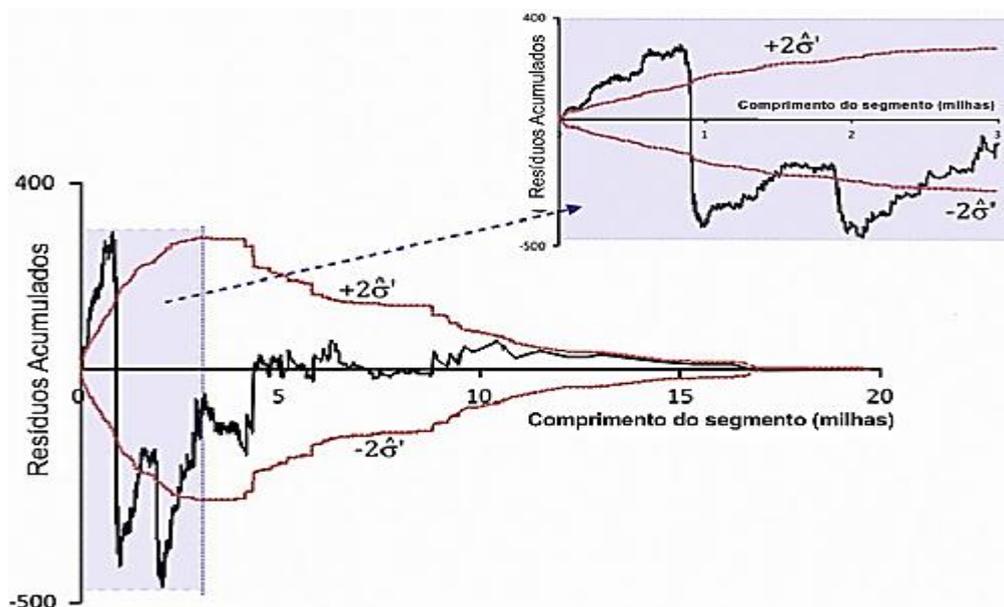
a necessidade de pré-estimar os parâmetros para determinar os valores previstos e com estes os resíduos de cada observação. Em seguida, é elaborado um gráfico com os valores acumulados desses resíduos, ordenados por ordem crescente de acordo com determinada variável independente de interesse.

O padrão esperado para os resíduos acumulados no gráfico corresponde a uma linha que deveria oscilar em torno da origem e terminar com um valor final acumulado próximo do valor nulo (*random walk*). Através do método *CURE*, é analisada a variação da linha para distinguir o que é um padrão que represente um bom ajuste do modelo e o que é um padrão de enviesamento sistemático do modelo. Além disso, o *CURE Plot* apresenta duas curvas adicionais formadas por limites aceitáveis para os resíduos acumulados, que são obtidas da seguinte forma:

- calcula-se o quadrado do resíduo para cada um dos resíduos ordenados;
- calcula-se $\hat{\sigma}^2(z)$, como a soma destes resíduos quadrados de 1 a z ;
- calcule-se $\sigma^*(z) = \hat{\sigma}(z) = \sqrt{1 - \frac{\hat{\sigma}^2(z)}{\hat{\sigma}^2(N)}}$;
- adiciona-se os limites de $\pm 2\sigma^*(z)$ ao *CURE Plot*.

Com este método, avalia-se a qualidade de ajuste do modelo e a influência das variáveis independentes que vão sendo sucessivamente introduzidas no modelo. A Figura 5 apresenta um exemplo de um gráfico *CURE plot*.

Figura 5 - Exemplo de *CURE plot*



Fonte: Hauer (2015)

2.2.3 Validação dos MPA

Em um estudo de modelagem é preciso garantir que os modelos desenvolvidos representam a população geral (generalização) e sejam apropriados às situações nas quais serão usados (transferibilidade), utilizando a teoria de validação. Podem ser utilizados dois tipos de validação, ambos sugeridos por Hair Jr. *et al.* (2009), a validação particionada e a validação com amostras adicionais. A validação particionada consiste na divisão da amostra original em duas subamostras, uma a ser utilizada para fins de ajuste do modelo de regressão e a outra para ser utilizada na validação. Contudo, quando a capacidade de recolher novos dados é limitada ou impraticável devido a fatores como custo e tempo e o tamanho da amostra é insuficiente para permitir a validação particionada, recomenda-se a validação por amostras adicionais.

A validação com amostras adicionais consiste na utilização do modelo original para prever valores na nova amostra, seguida da análise dos erros do modelo. Silva *et al.* (2009) sugerem dois indicadores que devem ser utilizados para análise dos erros na validação: (i) erro médio absoluto (EMA); (ii) raiz do erro quadrático médio (REQM). Estes elementos estatísticos também devem ser calculados para os modelos ajustados, para a realização do comparação e julgamento do ajuste. Valores desses indicadores próximos aos valores obtidos para a amostra de calibração indicam um bom desempenho na validação dos MPA.

A determinação do EMA e REQM é feita através das Equações 9 e 10, respectivamente. Além dessas métricas, o coeficiente de correlação de Pearson também pode ser utilizado como um indicador para avaliar a validação dos modelos.

$$EMA = \frac{\sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|}{n} \quad (9)$$

$$REQM = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n} \quad (10)$$

Em que:

- \hat{y}_i Variável resposta estimada para o elemento i ;
- y_i Variável resposta observada para o elemento i ;
- n Número de elementos considerados;
- i 1, 2, ..., n .

Contudo, assim como na calibração dos MPA, essas métricas descrevem apenas como o modelo se ajusta globalmente, a partir de um único valor. Para examinar o ajuste da

validação em um modelo no rigor necessário, é recomendado plotar os resíduos em função da variável de interesse, aplicando a técnica de avaliação dos resíduos acumulados (*CURE Plot*). Considera-se uma validação satisfatória quando os resíduos acumulados da amostra adicional, ordenados de acordo com o valor da variável independente de interesse, oscilam em torno da origem, termine com um valor final acumulado próximo do valor nulo e não ultrapasse a banda limitada pelos valores ± 2 desvios padrões (σ).

2.3 O DSV e o processo de planejamento de transportes

Segundo Silva (2009), os sistemas de transporte são, na sua gênese, os elementos que permitem a deslocamento de pessoas e bens no espaço através da utilização das redes de transportes como suporte. A representação digital de rede viária é uma ferramenta essencial para que os analistas realizem o planejamento dos transportes de forma eficiente através de práticas de modelagem.

De acordo com Lord (2000), existe uma regularidade nos hábitos de uma população urbana que estabelece certos padrões de deslocamentos que podem ser descritos por modelos matemáticos. Seus objetivos são de prever ou estimar, tão preciso quanto possível, os padrões de fluidez do tráfego que viaja através de cada componente da rede física e, dado o padrão de fluxo, avaliar várias outras medidas de desempenho da rede e indicadores, dos quais irão fundamentar o processo de planejamento do sistema de transportes. O conceito associado à qualidade de um sistema de transportes é percebido de forma diferente pelos usuários, mas pode ser de maneira geral, atribuído a uma combinação dos atributos custo, fluidez e segurança.

2.3.1 MPA na prática de avaliação de alternativas

De acordo com Meyer e Miller (2001), o processo de planejamento dos sistemas de transportes deve gerar informação útil para os analistas avaliarem as consequências dos diferentes cenários estabelecidos. Para tornar possível essa tarefa, é necessária a definição de critérios que, por sua vez, façam uso de indicadores dos sistemas de transporte que tenham os seus impactos sociais e econômicos mensuráveis. Nessa etapa, comumente denominada de avaliação de alternativas, a representação da rede permite a avaliação dos indicadores que irão dar suporte para o processo de tomada de decisão na escolha da alternativa ideal, visando o desenvolvimento sustentável de uma comunidade.

Diante desse contexto, o processo de planejamento tem estado bastante voltado para a modelagem de cenários e avaliação de alternativas levando em consideração medidas de desempenho relacionadas à fluidez do sistema, pelo fato da mesma possuir uma metodologia já bem definida para sua estimação. Entretanto, para um desenvolvimento mais sustentável, que propicie uma qualidade de vida para a comunidade, é necessário considerar outros fatores no planejamento dos sistemas de transportes, dentre eles, destaca-se a segurança viária da rede, foco dessa pesquisa.

Há várias décadas já se identificou o potencial da segurança viária como indicador que possuem influência social e econômica negativa para a sociedade. Apesar de sua reconhecida importância, o DSV não está incorporado de forma objetiva e sistemática no processo de planejamento (ITE, 2009). No Brasil, não há tradição de considerar essa abordagem. Acredita-se que, pelo menos em parte, esse problema possa ser atribuído a carência de metodologias que procuram estimar os reflexos dos cenários planejados no nível de segurança do sistema de transportes.

Assim como na modelagem da demanda, que objetiva estimar o padrão de fluidez da rede, é possível realizar, de forma paralela, a modelagem do DSV com o objetivo de estimar a frequência de acidentes da rede viária de forma proativa. Uma ferramenta que apresenta potencial para realização desse tipo de análise são os MPA, como discutido na seção anterior. Em um dos poucos estudos que consideram a modelagem de acidentes a partir de uma perspectiva de rede viária, Lord e Persaud (2004) representaram uma rede viária como uma rede digital muito simplificada com o auxílio do *software* EMME / 2, que permitiu a estimação dos fluxos nos arcos da rede. Os resultados demonstraram que é possível prever acidentes nas redes digitais de transportes utilizando MPA, mas confirmou o fato de que a precisão das estimativas dos acidentes está diretamente relacionada com a codificação da rede e a precisão da modelagem do padrão de fluidez de tráfego.

O Departamento de Transporte de Indiana (IDOT) tem tentado vincular MPA ao processo de planejamento de longo prazo da rede estadual através das ferramentas de planejamento baseada em SIG. A ideia principal é a predição de segurança viária como um processo executado em paralelo a previsão da demanda de tráfego. A adição da componente de previsão dos acidentes permite avaliar as soluções de planejamento de alternativas do ponto de vista do tráfego e da segurança viária (Tarko, 2006).

A relação direta da qualidade da modelagem da demanda e da modelagem do DSV utilizando MPA, está associado ao fato da estimação da demanda ser reconhecida, por

diversos autores, como principal variável que representa o nível de exposição da segurança viária, como já exposto na seção anterior. Logo, julga-se necessária a discussão acerca da modelagem da demanda de transportes.

2.3.2 Modelagem da demanda por transportes

Uma importante ferramenta para estimação do padrão de fluidez de uma rede de transporte é a modelagem da demanda. Essa modelagem e sua interação com a oferta da rede viária vêm sendo realizada por meio de um processo sequencial (seguindo uma formulação em quatro etapas). Esse processo busca representar o contexto decisório dos usuários ao tentarem satisfazer suas necessidades de deslocamento, definindo a frequência e os horários de realização das viagens, seus destinos, assim como os modos e rotas utilizados na rede de transportes (ORTÚZAR e WILLUMSEN, 2011). Entende-se que o objetivo geral desse processo tradicional tem sido modelar o padrão dos fluxos das viagens produzidas e atraídas pelas zonas de origem (O) e destino (D) na área de estudo, tendo como produto final a simulação dos volumes de tráfego de pessoas ou cargas, nos segmentos da rede de transporte.

No contexto urbano, o método tradicional de modelagem dos deslocamentos entre pares de zonas origem/destino (OD) tem se baseado nas análises de correlação entre as viagens realizadas e as variáveis explicativas, representando os atributos socioeconômicos da população, as características físicas e operacionais do sistema de transportes, assim como os aspectos quantificáveis do uso e ocupação do solo (ORTÚZAR e WILLUMSEN, 2011). Essas variáveis são normalmente obtidas por meio de entrevistas domiciliares e pesquisas complementares em vias, terminais e pontos de parada, realizadas para caracterizar o padrão de deslocamento dos usuários. Como fruto principal da consolidação dos dados resultantes desses levantamentos, tem-se uma matriz amostral das viagens observadas entre pares OD, que se constitui na referência básica para o desenvolvimento das etapas de modelagem tradicional da demanda por transportes.

Essa abordagem constitui processo trabalhoso e que despende de significativa quantidade de recursos financeiros (WILLUMSEN, 1981). Além do mais, por questões práticas e econômicas, raramente é possível obter matrizes para períodos fragmentados de tempo, o que constitui dado importante para a tomada de decisão em engenharia de tráfego, bem como para a aplicação das técnicas de simulação de tráfego, devido à impossibilidade de representar o comportamento dinâmico dos deslocamentos realizados (RAKHA *et al.* 1998).

Na tentativa de reduzir custos de coleta de dados em campo e superar as dificuldades inerentes à obtenção de uma matriz OD representativa do padrão de fluxos na área em estudo, tem se desenvolvido uma nova alternativa de estimação da OD a partir da contagem de fluxo, denominada de modelagem sintética. A sua principal vantagem é utilização de informações de fluxo de tráfego ao longo da rede viária, uma fonte de dados bastante atrativa, visto que sua obtenção pode ser feita de forma automática, como no caso de redes monitoradas por uma central de controle de tráfego.

Essa técnica busca reconstituir um conjunto de fluxos entre pares OD que, uma vez alocados na rede, reproduzam os volumes observados nos seus arcos. Pode-se destacar como principais vantagens na utilização desse método o baixo custo na sua realização e o menor tempo na compilação dos dados e, conseqüentemente, na obtenção da matriz OD. Como desvantagens, destacam-se a impossibilidade de associar as demandas de viagens com dados socioeconômicos ou com os motivos de viagem e a existência de fontes de erro que podem comprometer a qualidade da matriz OD.

Apesar das dificuldades de reconstrução da OD sintética, de um ponto de vista desagregado, as estimações de volumes nos arcos constituem o resultado das decisões de viagens dos usuários e, portanto, podem funcionar como informação relevante ao processo de calibração de modelos que buscam entender melhor os padrões de deslocamentos em sistemas de transportes, visando principalmente a avaliação de alternativas. Portanto, o objetivo da utilização dos métodos sintéticos é suprimir essas desvantagens do método tradicional por meio da utilização de informações de fluxo de tráfego ao longo da rede viária que, como descrito por Ortúzar e Willumsen (2011), é uma fonte de dados bastante atrativa, visto que sua obtenção é realizada com custos relativamente baixos, podendo ser feita de forma automática e requerendo pouca quantidade de recursos humanos, como no caso de redes monitoradas por uma central de controle de tráfego.

A seguir, será apresentada uma revisão sobre a reconstrução sintética dos fluxos a partir de contagens de tráfego, finalizando, então, a revisão teórica dos temas estudados nessa dissertação.

2.3.3 Estimação sintética dos fluxos

Modelos sintéticos de estimação dos fluxos origem-destino (OD) constituem uma técnica de modelagem da demanda estudada desde a década de 1970. Esta estratégia consiste na obtenção de uma matriz dos fluxos de viagens a partir de observações de volumes de

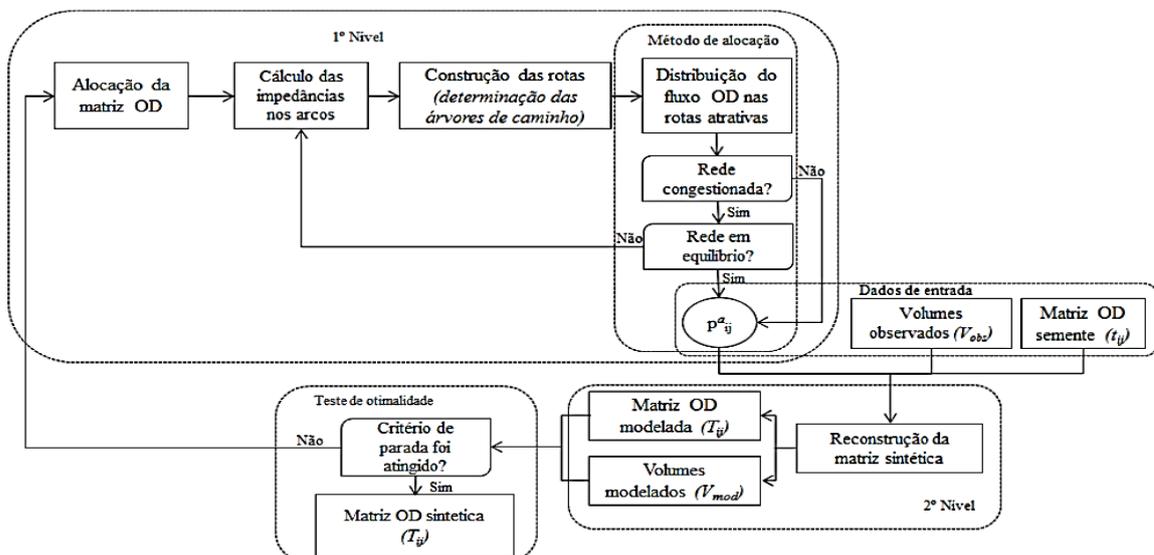
tráfego (WILLUMSEN, 1981). Tal simplificação pode ser interpretada como o inverso do problema da alocação do tráfego em uma rede de transportes, quando se busca reconstituir um conjunto de fluxos entre pares de zonas que, uma vez alocados na rede, reproduzam os volumes observados nos seus arcos.

Apesar de suas vantagens práticas e econômicas, a técnica ainda não é muito utilizada pelos planejadores e operadores de sistemas de transportes. Muito disto deve-se ao fato de que existem questões de pesquisa relativas tanto à formulação do problema da reconstrução da matriz OD sintética, quanto à sua solução, que ainda não foram suficientemente respondidas, gerando dúvidas quanto ao uso deste tipo de modelo.

Segundo Bertoincini (2007), o modelo sintético tem grande importância no processo de estimação das demandas. O grande mérito está na pouca quantidade de informações iniciais necessárias para se chegar aos resultados. Entretanto, essa técnica apresenta algumas dificuldades práticas, como a possibilidade de haver múltiplas soluções, a falta de continuidade de fluxo em arcos contíguos e a estimativa correta da matriz OD quando a rede se encontra congestionada.

Na tentativa de minimizar as dificuldades, pesquisadores propuseram a utilização de um método iterativo, levando em consideração a utilização em conjunto de modelos de geração e alocação do tráfego, como uma espécie de técnica bi-nível. Na Figura 6, Bertoincini *et al.* (2013) apresentaram uma proposta para obtenção da matriz OD sintética em que o primeiro nível é resolvido pelo método de médias sucessivas.

Figura 6 - Estrutura bi-nível do processo de reconstrução da matriz OD sintética



Fonte: Bertoincini *et al.* (2013)

A partir da solução de equilíbrio gerada no primeiro nível, a matriz OD é reconstruída no segundo nível utilizando o método dos mínimos quadrados proposto por Cascetta (1984). Esse método é utilizado em conjunto com a técnica de alocação do tipo equilíbrio do usuário para estimação da matriz OD.

Os efeitos do congestionamento precisam ser incorporados ao processo. A forma mais usual seria inserir uma função de custo para cada arco, relacionando o fluxo observado com a sua capacidade, como, por exemplo, a função de impedância do *Bureau of Public Roads* (BPR) (BPR, 1964) (EQUAÇÃO 11). É necessário ressaltar que essa função foi desenvolvida a partir de um experimento controlado para uma realidade rodoviária norte americana e que a rota escolhida, a cada iteração, é aquela que apresenta menor custo em função do tempo de percurso.

$$t_s = T_0 \left[1 - \alpha \cdot \left(\frac{V_{obs}^s}{C_{ap}^s} \right)^\beta \right] \quad (11)$$

Em que,

- t_s Tempo no arco s , sendo este um arco pertencente ao conjunto L ;
- T_0 Tempo de percurso no arco para condição de fluxo livre
- V_{obs}^s Fluxo observado no arco s ;
- C_{ap}^s Capacidade do arco s ;
- α, β Parâmetros de calibração.

Nas últimas décadas, a comunidade internacional tem destinado esforços ao aprimoramento e disseminação do método, resultando em implementações em pacotes comerciais de modelagem da demanda e simulação de redes de transportes. Nielsen (1993) desenvolveu um procedimento de estimação de matrizes OD baseado no método iterativo, do qual foi implementado pela Caliper (2002) no TransCAD, uma importante ferramenta de modelagem da demanda utilizada no planejamento e operação de transportes. A vantagem de seu método está em tratar os fluxos como uma variável estocástica e deve ser utilizado em conjunto com algum método de alocação de tráfego.

O método consiste na alocação de uma matriz prévia (semente), definindo-se assim as porcentagens de utilização dos arcos; nesta primeira iteração é considerado que a rede opere na condição de fluxo livre. Com a matriz de utilização dos arcos já definida e com os fluxos observados nos arcos, é então realizado o processo de estimação da nova matriz OD.

Essa nova matriz é então alocada à rede com a consideração de que a rede já não mais opere em regime de fluxo livre, passando a considerar a função de impedância. Este processo iterativo continua até que o número de iterações se complete ou até que a diferença entre os fluxos observados e estimados em cada arco chegue a um mínimo estipulado pelo usuário. O número máximo de iterações a ser utilizado irá variar em função do critério de alocação adotado e o valor do erro máximo é definido em função dos critérios de cada usuário.

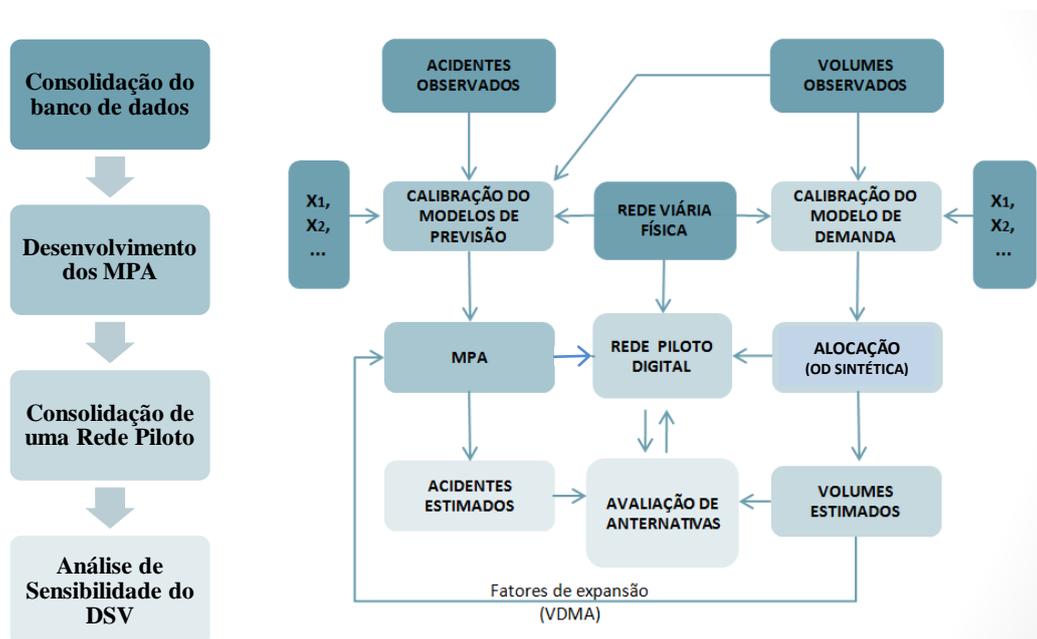
Nielsen (1993) destaca que a proposta é sensível à técnica de alocação, ao valor mínimo de erro e , principalmente, à qualidade da matriz semente. A vantagem do método implementado está em permitir ao planejador a escolha da técnica de alocação que melhor reflete suas necessidades. O autor faz a ressalva que seu modelo apresenta melhor desempenho quando utilizado com a técnica de alocação baseada no equilíbrio do usuário. Na prática, o método de Nielsen foi estudado em alguns trabalhos e vários pesquisadores têm afirmado que obtiveram bons resultados com seu uso (BERTONCINI, 2007).

Apesar da praticidade de um método já implementado em pacotes comerciais de modelagem da demanda e simulação, como o TransCAD, é importante ressaltar que tais programas são do tipo “caixa preta”, não permitindo acesso ao código implementado. Conforme Rakha *et al.* (2005), é teoricamente possível que existam múltiplas matrizes OD que repliquem exatamente os volumes observados em campo, levando à necessidade de avaliar qual delas seria a “mais provável” de ter gerado aquela configuração de carregamento da rede. Logo, os autores recomendaram atenção às premissas e limitações dos métodos implementados em pacotes computacionais de modelagem de redes de transportes.

3 METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DO DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA EM REDES DE TRANSPORTES UTILIZANDO MODELOS DE PREVISÃO DE ACIDENTES

A abordagem metodológica utilizada nessa dissertação para alcançar o objetivo geral e os objetivos específicos, concebida para avaliar o DSV em redes viárias urbanas, foi realizada a partir das seguintes etapas sequenciais: i) Consolidação do banco de dados da rede; ii) Desenvolvimento de Modelos de Previsão de Acidentes; iii) Consolidação de uma rede piloto e iv) Aplicação e análise de sensibilidade da modelagem do DSV na rede urbana de transporte. A Figura 7 apresenta o fluxograma das etapas metodológicas definidas nessa pesquisa.

Figura 7 - Fluxograma das etapas metodológicas e subatividades para obtenção do DSV.



Fonte: O autor.

A Figura 7 também apresenta os principais componentes das subatividades das etapas metodológica estabelecida. Podemos considerar a avaliação do DSV como um processo executado em paralelo com a avaliação de demanda de tráfego. A adição do componente de previsão de segurança viária permite avaliar as soluções de planejamento do ponto de vista do tráfego e da segurança.

Para consolidar a metodologia proposta, o capítulo 4 apresentará sua aplicação utilizando dados da cidade de Fortaleza, umas das capitais com maior índice de acidentes. Entretanto, ressalta-se que, a metodologia pode ser adaptada a uma aplicação para qualquer meio urbano brasileiro. A seguir será detalhada cada etapa metodológica definida para essa pesquisa de dissertação.

3.1 Consolidação do banco de dados da rede

Essa etapa metodológica se desenvolve em duas subatividades: Consolidação de um banco georreferenciado de acidentes e características físicas e operacionais da rede e de um banco de dados de volumes de tráfego motorizado. Tais atividades são consideradas essenciais para a especificação e alimentação de um banco de dados em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas para Transportes (SIG-T), que permite a representação digital e modelagem de uma rede de transporte. Esse esforço inicial de consolidação da base de dados é essencial para o bom desempenho do método em geral.

3.1.1 Banco de dados de acidentes de trânsito e das características físicas e operacionais da rede

O desenvolvimento de uma base de dados geográfica é a etapa inicial do processo de consolidação de uma base de dados mais abrangente que permita, dentre outras ações: georreferenciamento dos acidentes de trânsito e dispositivos de gestão de tráfego urbano presentes na cidade, atributos geométricos das vias, controle de alterações em sentido e cadastro de controle do fluxo veicular em vias de monitoramento contínuo na cidade. Tais informações correspondem aos insumos técnicos essenciais para o processo de modelagem do sistema de transportes com foco na fluidez e na segurança viária da cidade.

Desde a promulgação do novo Código de Trânsito Brasileiro (CTB) em 1997, observa-se uma crescente preocupação para o desenvolvimento de Sistema de Informações de Acidentes de Trânsito (SIAT) no âmbito dos Municípios brasileiros. Apesar da falta de uniformidade nos procedimentos para o desenvolvimento, implantação, operação e manutenção de tais bancos de dados, percebe-se, ao longo da última década, que a maioria das capitais brasileiras dispõe de um SIAT que opera de maneira sistemática. Esses bancos de dados de acidentes de trânsito são componentes fundamentais no processo de avaliação do DSV.

Segundo Gomes *et al.* (2015), a localização do acidente de trânsito é essencial para qualquer análise espacial, desde a simples visualização de padrões, identificação de zonas críticas e até as mais complexas análises espaciais. Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são comumente utilizados como ferramenta básica para a sua manipulação e tratamento desses dados. Além disso, é imprescindível a existência de uma base viária consistente e adequada para a obtenção de atributos físicos e operacionais os quais deverão ser utilizados no processo de modelagem da fluidez e segurança.

A rotina de georreferenciamento dos dados de acidentes é uma atividade crucial e que está diretamente ligada à qualidade dos resultados da pesquisa. Segundo Quin, *et al.* (2013), os procedimentos de criação de mapas de acidentes de trânsito normalmente incluem o uso de sistema de referência de quilometragem, obtenção de coordenadas GPS ou sistema de geocodificação de endereço/interseções. Sendo esse último comumente utilizado nas áreas urbanas brasileiras.

De acordo com Faria (2005), processo de geocodificação associa os endereços armazenados em um arquivo tabular com outro arquivo contendo dados espaciais, mais frequentemente contendo eixos de vias, campos com informações da numeração da primeira e última edificação do lado direito, esquerdo do logradouro e pontos de referências. Neste método é possível determinar por um processo de interpolação, a posição geográfica correspondente a cada endereço e, conseqüente, a cada acidente.

Lima *et al.* (2015), apresentaram uma metodologia para a consolidação e atualização de uma base de dados georreferenciada, aplicado a rede urbana do município de Fortaleza/CE, objetivando melhorar a disponibilidade e a qualidade das informações destinadas a modelagem do DSV no planejamento de transportes. Para o georreferenciamento de acidentes em interseções recomenda-se a utilização de a rotina desenvolvida por Queiroz (2003) em linguagem de programação GISDK e ferramenta *Locate by Value*, ambas no *software* TransCAD 5.0. Para acidentes em segmentos de vias que possuíam o endereço contendo o nome da via e número defronte ao qual ocorreu o acidente, recomendou-se a utilização da rotina *Location by address* existente no *software* TransCAD 5.0. Os autores obtiveram bons resultados para a taxa de georreferenciamento e para a precisão, aproximadamente 99,2 % para acidentes em interseções e 82,4 % para acidentes em segmentos de via.

Entretanto, é importante ressaltar que essa forma de localização pode apresentar registros não localizados devido à inexistência de interseções e/ou de informações dos nomes

de logradouros não estão em conformidade com a base de eixos de vias, devido à existência de abreviações, erros ortográficos, desatualização dos eixos viários, etc. Logo, a qualidade dos dados dos acidentes e dos eixos de vias é essencial.

A investigação dos atributos geométricos da rede viária pode ser realizada com informações do órgão gestor de trânsito, com o uso do *software Google Earth*® e, quando necessários, as informações podem ser complementadas com inspeções de campo. Os elementos geométricos importantes a serem avaliados na etapa de modelagem são: o comprimento do segmento, quantidade de faixas e de das pistas de rolamento, a existência de separadores centrais. A consolidação do banco de dados de acidentes de trânsito e características físicas e operacionais da rede dessa pesquisa se apoiou na atualização da base viária de Fortaleza e georreferenciamento de seus acidentes realizada por Lima *et al.* (2015).

No que diz respeito aos aspectos de operação do tráfego, dentre as características gerais de operação do local pode-se destacar o tipo de controle das interseções, presença de fiscalização, operação de transporte coletivo, entre outras. A lista não é exaustiva, devendo o pesquisador investigar e coletar informação que estejam disponíveis e que jogue ser importante para a análise do DSV.

3.1.2 Banco de dados de volumes de tráfego motorizado

No ambiente de modelagem dos acidentes de trânsito são comumente utilizadas variáveis relacionadas ao fluxo veicular. O volume de tráfego constitui-se em um elemento básico à elaboração de praticamente todos os estudos de planejamento de transportes, principalmente os ligados ao desempenho da fluidez e segurança viária, como discutido na revisão da literatura.

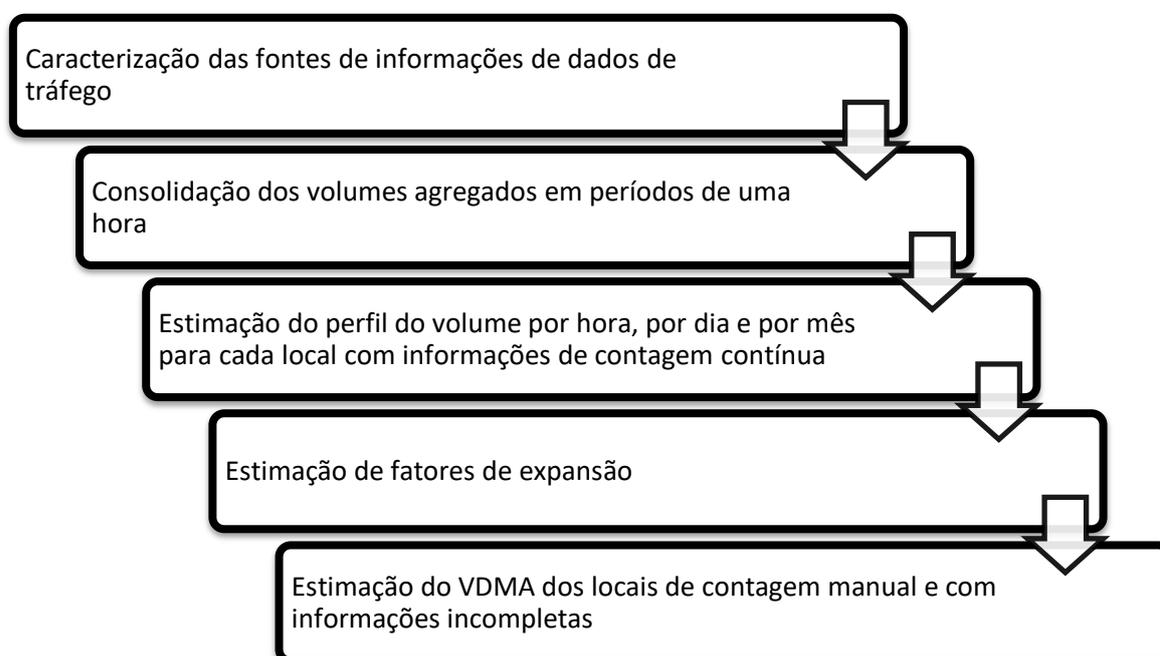
Portanto, variáveis que determinam os aspectos de demanda da rede também devem estar incorporadas nessa base de dados georreferenciada. Essas informações podem ser fornecidas pelo órgão de trânsito da cidade que realizam contagens de tráfego pontuais para estudos específicos de fluidez/operação. Nas cidades onde existe um centro de Controle de Tráfego em Área (sistema CTA) estas informações podem ser obtidas a partir de equipamentos de contagem contínua de tráfego.

Apesar da existência de contagens de tráfego de diversas origens e períodos de tempo, algumas cidades ainda não dispõem de um banco de dados de volume de tráfego veicular único, que integre todas essas fontes e assegure a utilização de dados válidos para o

cálculo do Volume Diário Médio Anual (VDMA) e fatores de expansão para a sua rede viária. Esse banco, além de reunir todas essas informações, verifica a qualidade dos dados, através do reconhecimento de valores errôneos e/ou perdidos, a partir de rotinas que identifiquem, controlem e filtrem essas possíveis inconsistências. Esse banco de dados permitirá a estimação do Volume Diário Médio Anual (VDMA) e fatores de expansão (horário, diário e mensal) para os segmentos de vias com contagens reduzidas disponíveis, informações essenciais para a avaliação do DSV.

Para facilitar o gerenciamento dos dados esses volumes observados devem ser compatíveis com a base georreferenciada de vias do município, permitindo uma fácil manipulação da informação do VDMA do segmento de logradouro em um sistema SIG. Para o desenvolvimento de um banco de dados de tráfego que atendesse as necessidades dessa pesquisa estabeleceu-se as seguintes atividades: i) Caracterização das fontes de informações de dados de tráfego; ii) Consolidação dos volumes agregados em períodos de uma hora; iii) Estimação do perfil do volume por hora, por dia e por mês para cada local com informações de contagem contínua; iv) Estimação de fatores de expansão e v) Estimação do VDMA dos locais de contagem manual e com informações incompletas. A Figura 8 apresenta o fluxograma das atividades estabelecidas para a construção do banco de dados de volume de tráfego motorizado.

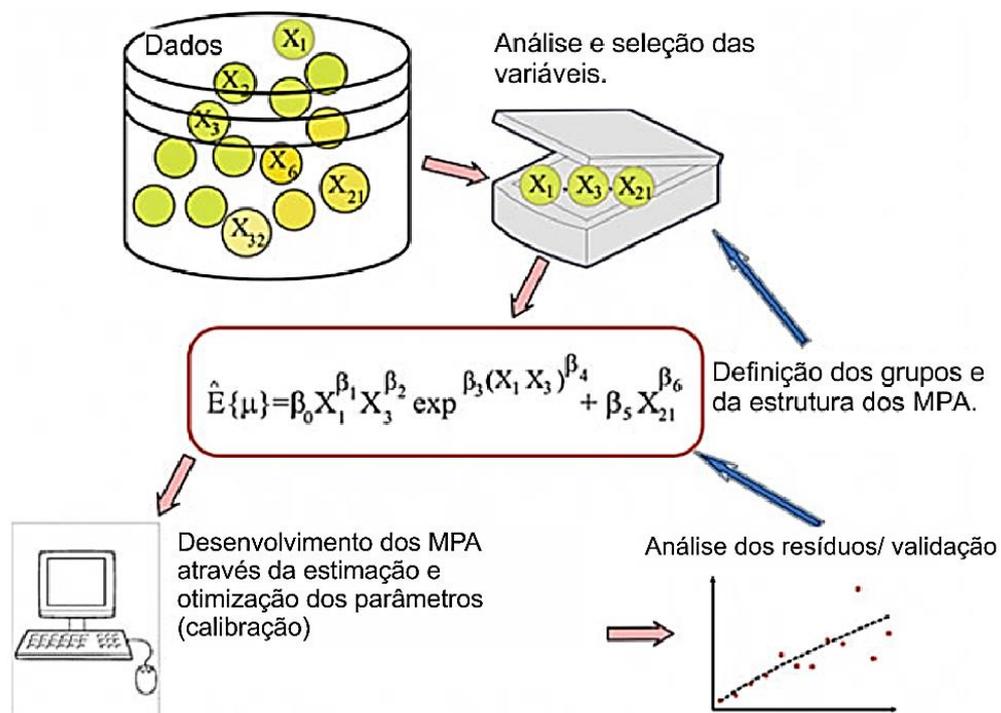
Figura 8 - Atividades estabelecidas para a construção do banco de dados de volumes



3.2 Desenvolvimento de Modelos de Previsão de Acidentes

Essa etapa se inicia com a análise exploratória dos dados disponíveis, avaliando a estatística descritiva e correlações das possíveis variáveis. A partir dessa análise e dos objetivos da modelagem, são definidos os agrupamentos de entidades viárias e a estrutura dos MPA, conforme revisado no capítulo anterior, buscando um modelo com número de parâmetros ótimo (viés x variância). Na sequência, inicia-se o esforço de estimação dos parâmetros em busca de um modelo com o bom desempenho. Após a análise dos resíduos, se os modelos não se apresentarem satisfatório, deve-se voltar a subatividade de estruturação do modelo e recalibrar os parâmetros até a obtenção de MPA satisfatórios. A Figura 9 apresenta as subatividades mencionadas dessa etapa e suas inter-relações.

Figura 9 - Método de desenvolvimento dos MPA



Fonte: Adaptada de Hauer (2015).

Nessa etapa é importante considerar na modelagem dados que podem ser obtidos na aplicação prática, para a área em análise, e ter o objetivo bem definido para as aplicações dos MPA (HAUER, 2015). A seguir serão detalhadas a subatividades dessa etapa metodológica.

3.2.1 Análise e seleção das variáveis

Os MPA desagregados, foco dessa pesquisa, apresentam um direcionamento para aplicação prática na fase de planejamento tático/operacional. São modelos que consideram como variáveis independentes dados disponíveis nesta fase, em geral, indicadores que caracterizam a área em estudo com informação que possa estar relacionada direta ou indiretamente com a ocorrência de acidentes.

Entretanto, na prática, o processo de escolha das variáveis para os MPA, na maioria das vezes depende, além dos objetivos do estudo, de fatores relacionados à experiência do modelador e à disponibilidade das informações sobre o ambiente viário em análise. Segundo Reurings, M., *et al.* (2005), recomenda-se que as variáveis independentes sejam selecionadas com base em estudos anteriores, que possam ser medidas e determinadas de uma forma confiável, e que não sejam correlacionadas com outra variável já incluída.

Essa análise preliminar das variáveis disponíveis deve ser realizada a partir de levantamento de suas estatísticas básicas (análise descritiva), tais como média, mediana, desvio padrão, máximo e mínimo. E, em seguida, uma análise de correlação fornecerá informações sobre as variáveis independentes com maior correlação com as variáveis dependentes (os acidentes) e variáveis independente com possuem correlações entre si. Essa análise preliminar e o conhecimento prévio do fenômeno são os principais critérios para a seleção das variáveis candidatas a compor o MPA.

3.2.2 Definição de grupos e estrutura dos MPA

A definição de grupos de entidades homogêneas tem o objetivo de minimizar a influência de fatores desconhecidos (ou não controlados) que reduzam o poder preditor dos MPA. A definição desse grupo será baseada nas características semelhantes de infraestrutura e de operação dos componentes de rede viária, interseções e segmentos. A revisão da literatura e o conhecimento prévio do fenômeno fornecem um direcionamento para a definição desse agrupamento, que deve seguir o princípio da parcimônia.

Estratificar os MPA a partir das variáveis explicativas disponíveis os simplificará e, conseqüentemente, a estimação dos parâmetros, garantindo um baixo viés. Entretanto, essa abordagem é criticada por trazer uma alta variância para a modelagem ao considerar poucas variáveis explicativas e reduzir o tamanho da amostra, como mostrou a Figura 4.

A revisão da literatura direciona para a modelagem de acidentes o emprego dos modelos lineares generalizados (MLG), por demonstrar bom desempenho ao lidar com esse padrão excessivo de dispersão dos dados de acidentes, incompatível com as suposições da regressão linear tradicional. A estrutura dessa modelagem foi apresentada no capítulo 2 dessa pesquisa. A formulação genérica dos MPA pode ser apresentada conforme a Equação 12.

$$E(y|x_1, x_2, \dots, x_k) = \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k) \quad (12)$$

Em que $E(y|x_1, x_2, \dots, x_k)$ é o valor esperado da componente aleatória (y) dado que um conjunto de k valores das variáveis explicativas é observado. Os β 's são os parâmetros que se deseja estimar. Assumindo as premissas de que a componente aleatória é única, a componente sistemática é linear, o termo de erro não deve ser correlacionado com qualquer variável independente e as observações são independentes. O *software* estatístico R, que possui pacotes disponíveis para o desenvolvimento de MLG, foi utilizado para o desenvolvimento dos MPA dessa dissertação.

3.2.3 Desenvolvimento dos MPA - Calibração

A estimação dos parâmetros a partir da maximização da verossimilhança é a abordagem mais usual nas regressões lineares generalizadas. As suposições para aplicação dessa técnica foram apresentadas na revisão da literatura. As estimativas devem ser avaliadas a partir do ajuste do modelo, ou seja, da análise de seus resíduos. O método recomendado para medir qualidade do ajuste dos MPA desenvolvidos é critério de informação de *Akaike* (AIC). Esse critério permite evidenciar que um modelo é o melhor entre os vários estudados.

O AIC distingue os modelos que melhor explicam os dados de um fenômeno com o menor número de parâmetros, penalizando os modelos com elevado número de parâmetros. O modelo com o menor AIC é considerado o melhor, entre os modelos testados. Além dessa avaliação global de ajuste, é recomendada a avaliação mais rigorosa a partir da avaliação dos de resíduos acumulados.

O método *CURE* (*CUMulative RESiduals*) foi proposto para avaliar a relação das variáveis independentes com a variável dependente. A revisão da literatura apresentou as etapas para o seu desenvolvimento gráfico. O padrão esperado para os resíduos acumulados corresponde a uma linha que deverá oscilar em torno da origem e terminar com um valor final acumulado próximo do valor nulo (*random walk*) sem ultrapassar a envoltória limitada pelos

valores ± 2 desvios padrões. A análise da variação da linha dos resíduos acumulados permitiu distinguir o que é um padrão que represente um bom ajuste do modelo e o que é um padrão de enviesamento sistemático do modelo.

3.2.4 Análise dos resíduos - Validação

Por fim, é feita a validação dos MPA ajustados para todas as entidades viárias. A validação pode ser realizada de duas formas, ambos sugeridos por Hair Jr. *et al.* (2009). O primeiro é a validação com amostras adicionais, enquanto o segundo tipo é a validação particionada, detalhadas na revisão da literatura. Os resultados obtidos na validação dos MPA desenvolvidos são apresentados em termos do erro dos modelos. Os elementos estatísticos de validação calculados para análise dos dois tipos de validação são erro médio absoluto – EMA (Equação 9) e raiz do erro quadrático médio – REQM (Equação 10). Esses elementos devem ser calculados para as amostras de ajuste dos parâmetros e de validação do modelo. É importante destacar que o modelo será considerado válido se apresentar desempenho semelhante, ou aproximado, ao observado na amostra de ajuste.

3.3 Consolidação de uma rede piloto

Para a consolidação da área a ser analisada, é importante levar em consideração o tipo de intervenção que se pretende avaliar. Análises de planejamento estratégico exigem a seleção de áreas mais extensas, a fim de considerar os deslocamentos relevantes, incluindo os de entrada e saída da região, e prever de maneira consistente os impactos com a implementação das possíveis alternativas. Entretanto, se a intervenção avaliada apresentar caráter tático/operacional, que geralmente exige soluções mais rápidas, deve-se selecionar uma área menos abrangente, contemplando somente os elementos estritamente necessários para a análise coerente das alternativas na rede viária em análise.

O escopo da análise deverá definir os dados necessários, o nível de modelagem que será utilizado e, conseqüentemente, como será realizada a consolidação da rede digital, a qual permitirá a avaliação do DSV. A principal informação que se deseja obter nessa etapa é o VDMA dos arcos da rede, do qual, quando não disponível, deverá ser obtido por um processo de modelagem sintética com auxílio de plataforma SIG-T (Sistema de Informações Geográficas para Transportes). Essa etapa metodológica divide-se em duas atividades, a definição e caracterização da rede piloto digital e a estimação dos fluxos na mesma.

3.3.1 Definição e caracterização da rede

A seleção da área estudada foi baseada na disponibilidade das variáveis necessária para análise do DSV. O grande desafio das cidades brasileiras é a escassez e inconsistência das informações de volumes de tráfego de suas malhas viárias, sendo necessário o desenvolvimento de uma técnica de modelagem sintética que estime os fluxos nos arcos da rede (essa atividade será detalhada na próxima sessão).

Baseando-se na rede consolidada na primeira etapa dessa pesquisa, a motivação para escolha da área a ser avaliada leva em consideração os dados disponíveis para a aplicação dos MPA desenvolvidos. Na região selecionada devem estar disponíveis as características físicas e operacionais da rede e a maior concentração de informações disponíveis de fluxo contínuo (e. g. áreas com central de controle de tráfego em tempo real, que armazena informações de fluxos continuamente).

O TransCAD, um SIG-T bastante difundido para planejamento e operação do sistema de transportes, possui um algoritmo de estimação sintética do fluxo baseado na metodologia desenvolvida por Nielsen (1993), apresentada na revisão da literatura. Essa pesquisa se apoiará nas premissas desse *software* para a estimação sintética dos fluxos nos arcos que não possuem essa informação disponível. Nielsen (1993) destaca que sua metodologia é sensível à técnica de alocação e faz a ressalva que seu modelo apresenta melhor desempenho quando utilizado com a técnica de alocação baseada no equilíbrio do usuário.

Essa técnica se destaca por considerar os efeitos de congestionamento através de funções que determinam impedância em cada arco. A forma mais usual de inserir uma função de impedância é relacionando o fluxo observado com a capacidade do arco, como mostra a Equação 11 da função *Bureau of Public Roads* (BPR, 1964), utilizada nessa pesquisa. A aplicação dessa função depende de informações das capacidades dos arcos e dos seus respectivos parâmetros de calibração (α , β).

A pesquisa de Maia (2007) propõe um procedimento para a calibração e validação de modelos de simulação do tráfego veicular para a avaliação de intervenções tático-operacionais na malha viária urbana de cidades brasileiras de médio e grande portes, com enfoque eminentemente prático. Esse procedimento, do qual essa pesquisa se apoiou, inclui a estimação da capacidade e calibração dos parâmetros α e β dos arcos de uma rede.

Além disso, essa abordagem procede a realização do zoneamento da área de estudo, identificando os pontos de origem e destino do tráfego veicular. Se possível esse

zoneamento pode corresponder a um zoneamento pré-existente da cidade. Definido as zonas e seus respectivos centroides, é realizada a ligação dos mesmos à rede viária digital através dos conectores de centroides. Essa atividade consiste em um conhecimento prévio da região em análise, pois os conectores devem ser ligados a arcos que possui grande demanda devido à proximidade a Polos Geradores de Tráfego (e.g. *Shopping centers*, prédios comerciais, indústrias, entre outros).

Na prática, em análises realizadas em pacotes computacionais de macro e mesossimulação alguns elementos da rede de simulação podem ser descartados, mas isto se dá dependendo do propósito da análise e da irrelevância destes elementos para a modelagem e não necessariamente para diminuir a impedância no processo da simulação das alternativas.

3.3.2 Estimação do fluxo da rede

O fluxo é a principal variável de exposição a risco de acidentes de trânsito, sendo então fundamental para a avaliação do DSV em redes urbanas de transportes. Infelizmente essa informação muitas vezes não está disponível ou se encontra inconsistente para todos os arcos da rede em análise, sendo necessário um esforço de estimação desses fluxos.

A modelagem sintética, técnica aplicada nessa pesquisa, busca reconstituir um conjunto de fluxos entre pares OD. Assumindo que essa matriz OD é a representação da rede em análise, aplica-se então uma técnica de alocação para obtenção dos carregamentos da rede, dos quais deverão se expandidos com os fatores de expansão obtidos na primeira etapa dessa metodologia, para determinação dos VDMA de todos os arcos da rede em avaliação.

Como definido na atividade anterior, o TransCAD foi o simulador escolhido para essa estimação dos fluxos a partir do método desenvolvido por Nielsen (1993). O método, descrito na revisão da literatura, necessita de uma informação prévia da matriz OD, a matriz OD semente, que definirá as porcentagens de utilização dos arcos. Essa matriz norteia o processo de estimação da nova matriz OD, da qual será alocado na rede para a estimação dos fluxos nos arcos.

Nos casos em que não é possível uma a matriz semente com informações prévias da demanda da rede em análise, deve ser fornecida uma matriz OD unitária. Nessa matriz se atribuir o valor 1 para os pares que possuem viagens e 0 para aqueles que não possuem, assim evita-se que os pares OD que não possuam viagens entre si venham a apresentá-las. A limitação para esse caso é a definição de um mesmo peso entre os pares OD. É importante

destacar que o método sintético de estimação dos fluxos é sensível não apenas ao método de alocação, mas também a qualidade da matriz semente (NIELSEN, 1993).

Por se tratar de um método iterativo, outros dois fatores determinantes para a qualidade da estimação é o número de interação e erro máximo pretendido entre a diferença dos volumes observados e estimados. Esses parâmetros são definidos a partir da capacidade do simulador. Para um melhor desempenho da estimação deve ser utilizado o número máximo de interações permitido pelo simulador e um erro inferior a 5%, como parâmetros de entrada para a modelagem.

A validação desse esforço de estimação dos fluxos pode ser realizada de forma similar a validação dos MPA. Os resultados obtidos com a amostra de validação são apresentados em termos do erro das estimativas. O desenvolvimento de um gráfico dos valores observados pelo estimado permite uma avaliação mais rigorosa do ajuste da amostra.

Os fluxos estimados nessa atividade correspondem ao volume do arco no mesmo intervalo de tempo que foi utilizado para a calibração desse processo de modelagem. Na sequência, é necessário expandir esses volumes intervalares para o VDMA, variável de interesse para a avaliação da DSV utilizando MPA. Esses fatores de expansão foram estimados na etapa 1, na atividade de construção da base de dados de fluxo veicular.

3.4 Aplicação e análise de sensibilidade da modelagem do DSV na rede piloto

A etapa final dessa pesquisa consiste na aplicação, comparação e análise de sensibilidade dos MPA desenvolvidos em diferentes cenários da rede piloto, consolidada na etapa anterior. As atividades que compõe essa etapa são a definição dos cenários hipotéticos, aplicação dos MPA nas entidades da rede e comparação/análise estatística e gráfica dos resultados.

Essa etapa permitirá verificar a sensibilidade da estimação do DSV para diferentes intervenções na rede urbana de transportes e avaliar o potencial dos MPA desenvolvidos para alcançar esse objetivo. Essa abordagem poderá ser incorporada ao processo de avaliação de diferentes cenários, a fim de explorar diferentes estratégias a serem implementadas.

4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA NA REDE DE TRANSPORTES DA CIDADE DE FORTALEZA-CE

Uma vez apresentadas as etapas metodológicas para avaliação do DSV utilizando MPA em redes urbanas de transportes, apresenta-se neste capítulo uma aplicação para a rede de transportes da cidade de Fortaleza. Para tanto, serão desenvolvidos MPA para estimar o DSV em diferentes cenários hipotéticos de uma área da cidade.

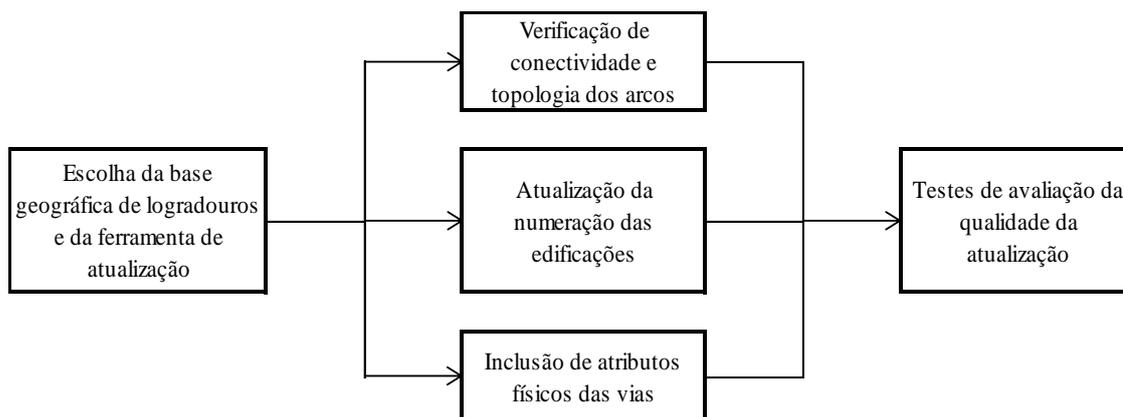
4.1 Consolidação da base de dados georreferenciada

Para a efetivação da modelagem do DSV apresentada na metodologia proposta faz-se necessário, primeiramente, a consolidação da base de dados georreferenciadas utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG) como ferramenta básica para a sua manipulação e tratamento. Portanto, é imprescindível a existência de uma base viária consistente e adequada para o georreferenciamento eficiente dos dados e a obtenção de atributos físicos e operacionais os quais deverão ser utilizados no processo de desenvolvimento e análise dos MPA das entidades da rede (nós e arcos). Esses dados constituem as variáveis dependentes e independentes dos modelos. As bases de dados, normalmente, estão separadas, sendo necessário um esforço de incorporação delas com a base viária atualizada.

4.1.1 Base geográfica de vias do município de Fortaleza

A partir dos critérios descritos na metodologia escolheu-se a base viária existente na Divisão de Engenharia da Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania - AMC, que possuía 36.663 links, para ser atualizada. Além da inserção de novos atributos e variáveis, a base sofreu correção de conectividades dos nós e atualização das topologias dos arcos e dos códigos, nomes e numeração das edificações dos logradouros. As atividades de atualização/consolidação da base de viária de Fortaleza se apoiou no trabalho desenvolvido por Lima (2015) que seguiram as etapas apresentadas na Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma do método utilizado para atualização da base viária.



Fonte: Lima *et al.* (2015)

O teste de avaliação desse método comparou as bases de vias “antes” e “depois” das atualizações. Para verificar a melhoria na taxa de sucesso do georreferenciamento dos acidentes de trânsito em interseções e em segmentos, utilizando o banco de dados de acidentes do período de 2004 a 2011, aplicando o processo de geocodificação de endereço/interseções, que associa os endereços dos acidentes com as informações da numeração da primeira e última edificação do lado direito e esquerdo do banco de dados do logradouro. Neste método, é possível determinar, por um processo de interpolação, a posição geográfica correspondente a cada endereço.

Após as edições na base, houve um aumento de 7,9% e 34,4% na taxa de sucesso do georreferenciamento dos acidentes em interseções e em segmentos, respectivamente (FIGURA 11). Verificou-se, também, melhorias no nível de precisão do georreferenciamento dos acidentes em segmentos e obteve-se um percentual de aproximadamente 94% dos dados localizados de forma adequada. De acordo com Lima *et al.* (2015), o baixo percentual do georreferenciamento dos acidentes em segmentos na base viária “antes”, comprometeria qualquer análise ou modelagem do DSV. Esse esforço de atualização da base viária resultou no banco de dados geográfico que foi utilizado para realizar os georreferenciamento das variáveis que serão utilizados nessa pesquisa.

Figura 11 - Distribuição espacial dos acidentes georreferenciados usando a base “antes” e “depois” da atualização.



Fonte: Lima *et al.* (2015)

Os dados de acidentes em seu formato mais desagregado foram coletados pelo Sistema de Informações de Acidentes de Trânsito de Fortaleza (SIAT-FOR). Trata-se de um banco de dados informatizado e georreferenciável que compila os acidentes de trânsito registrado por 12 órgãos responsáveis pelo atendimento às ocorrências de trânsito do município de Fortaleza. Dentre as informações disponíveis no SIAT-FOR, destacam-se: data, hora, local da ocorrência (nome da via e número/referência), tipo do acidente, veículos envolvidos, severidade do acidente (sem vítimas, com vítimas feridas e com vítimas fatais), além de informações sobre as vítimas como gênero, idade, tipo (condutor, passageiro, pedestre, ciclista, etc). As informações consolidadas são referentes aos anos de 2004 a 2011, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3- Número de acidente georreferenciados de 2004 a 2011

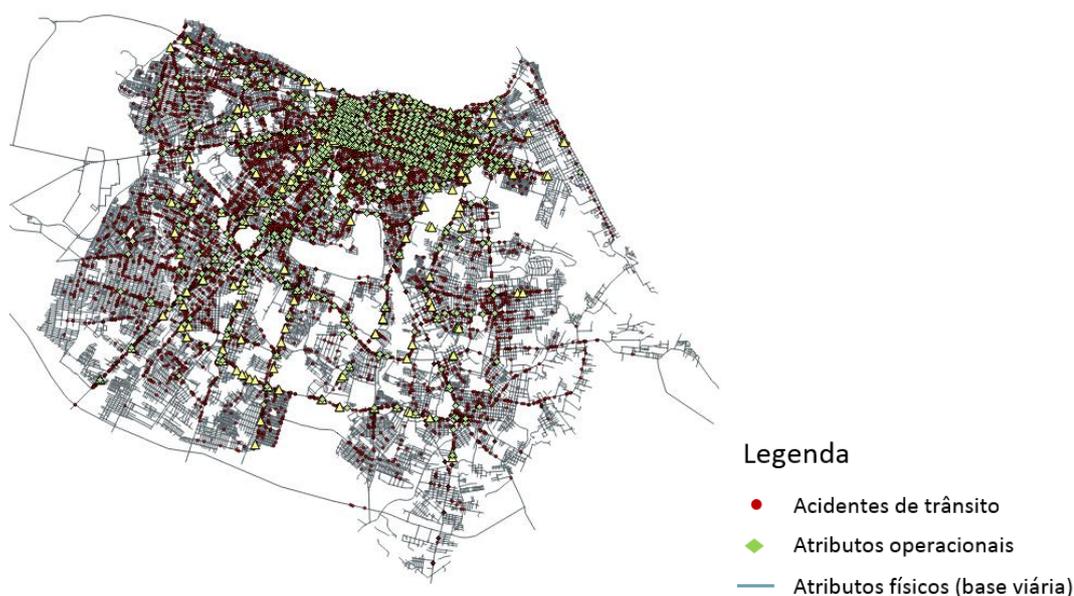
	# Acidentes Georreferenciados	% de Sucesso do Georreferenciamento
Acidentes em segmentos	66.507	82,4%
Acidentes em interseções	70.257	99,2%

Fonte: O autor

A investigação dos atributos geométricos da base viária foi realizada com o uso do *software Google Earth*®, tais como: o número de faixas e pistas de rolamento, a existência de separadores centrais e sentidos das vias. Foi atualizada, no total, uma amostra de 12.169 *links*, os quais foram priorizados em função da classificação viária, considerando inicialmente todas

as vias expressas, arteriais, coletoras e as vias locais com existência de semáforos, como também vias com quantidade observada de acidentes de trânsito. Esses critérios englobam a maioria das vias necessárias à representação macro e mesoscópica de rede viária para fins de análises que envolvam a modelagem do sistema. Foi também corrigida a topologia de 7.092 links. Essas informações foram adicionadas/atualizadas ao banco de dados ainda como parte do esforço de atualização da base de Fortaleza, realizado por Lima *et al.* (2015). A Figura 12 apresenta a base dados georreferenciada que será utilizada nessa pesquisa.

Figura 12 - Base de dados georreferenciada e consolidada



Fonte: O autor

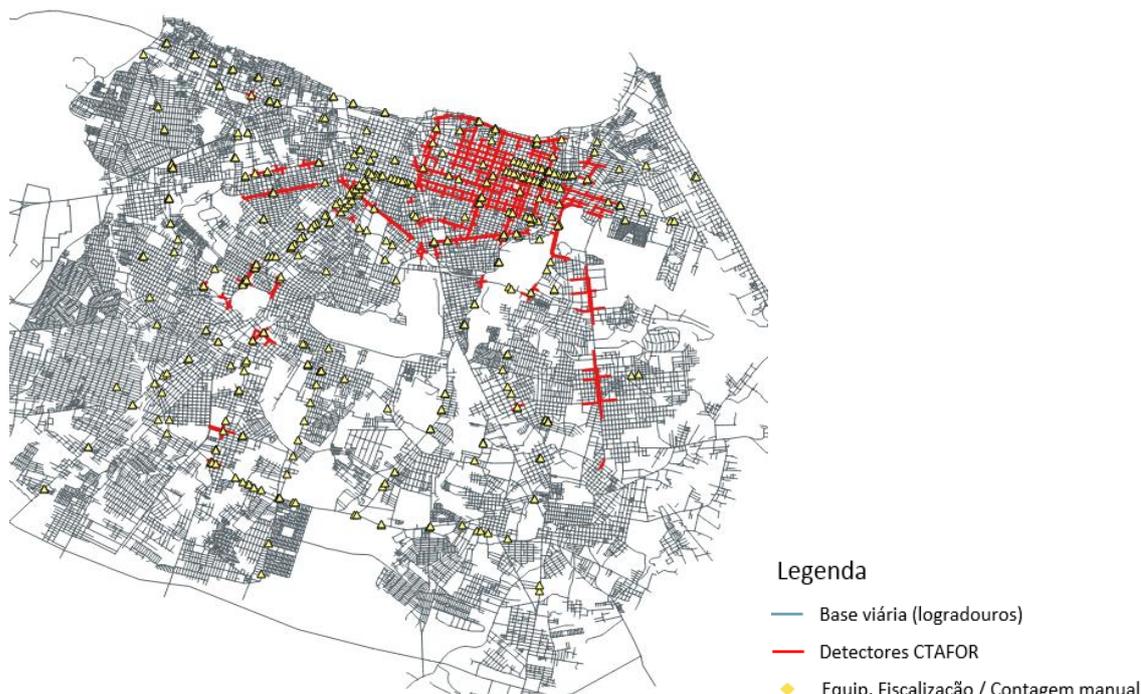
4.1.2 Banco de dados de volume de tráfego motorizado

As variáveis relacionadas aos atributos operacionais e de demanda da malha viária de Fortaleza foram disponibilizadas pelo órgão gestor de trânsito da cidade, a Autarquia Municipal de Trânsito (AMC). Foram fornecidas informações de localização e dados coletados dos dispositivos de fiscalização eletrônica, de contagens manuais e do Sistema Centralizado de Controle de Tráfego em Área de Fortaleza (CTAFOR) para variadas datas. Os dados fornecidos foram refinados e analisados para a criação do banco de dados integrado de volume de tráfego veicular, elemento básico à elaboração de praticamente todos os estudos de planejamento de transportes, principalmente os ligados ao desempenho da fluidez e segurança viária.

O município de Fortaleza ainda não dispõe de um banco de dados de volume de tráfego veicular único que integre todas essas fontes e assegure a utilização de dados válidos para o cálculo do VDMA e fatores de expansão para a sua rede viária. Assim, nessa pesquisa utilizou-se o relatório de Modelagem no Apoio à Decisão no Planejamento, Operação e Gestão dos Sistemas de Transporte Público e de Circulação Viária de Fortaleza (ASTEUF/UFC, 2015), desenvolvida pela Universidade Federal do Ceará em parceria com a Prefeitura de Fortaleza (PMF).

Esse relatório desenvolveu a construção de um banco de dados de volume de tráfego que integrasse as contagens contínuas de fiscalização eletrônica e detectores do CTAFOR, bem como contagens manuais realizadas para estudos da Prefeitura Municipal de Fortaleza (PMF). Esse banco, além de reunir todas essas informações, enfatiza a qualidade dos dados através da sequência de atividades que identifica, controla e filtra possíveis inconsistências, reconhecendo valores errôneos e/ou perdidos. A Figura 13 mostra a distribuição espacial das observações dos dados disponíveis de volume de tráfego utilizados nessa pesquisa.

Figura 13 - Localização dos dados disponíveis de volume de tráfego



Fonte: O autor

O banco de dados, integrado com a base georreferenciada de vias do município de Fortaleza, permitiu ainda a estimação de fatores de expansão (horário, diário, semanal, mensal

e anual) e obtenção do Volume Diário Médio Anual (VDMA) para os segmentos de vias e interseções com contagens disponíveis (ASTEF/UFC, 2015). No Anexo A são apresentados os fatores e as fórmulas para cálculo do VDMA, propostos no relatório.

4.2 Desenvolvimento dos Modelos de Previsão de Acidentes

A partir da consolidação e georreferenciamento dos dados disponíveis para a cidade de Fortaleza/CE foi realizado o desenvolvimento de Modelos de Previsão de Acidentes (MPA) desagregados para entidades da rede urbana de transportes da cidade, seguindo as atividades apresentadas na Figura 9.

4.2.1 Análise e seleção das variáveis e definição de grupos e estrutura dos MPA

Direcionado para a aplicação prática na fase de planejamento, os MPA desenvolvidos nessa pesquisa consideram como variáveis independentes dados, disponíveis nesta fase, que caracterizam a cidade de Fortaleza com informações relacionadas as entidades de sua rede viária que possam estar relacionada direta ou indiretamente com a ocorrência de acidentes de trânsito.

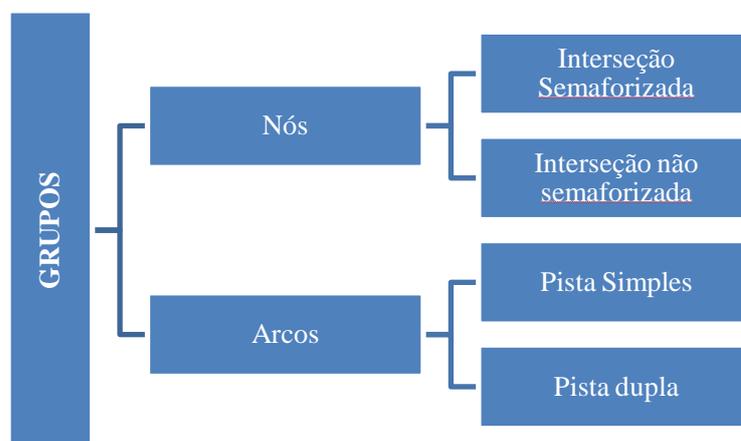
Tomando por base os objetivos da pesquisa, a experiência sobre o fenômeno, disponibilidade das informações sobre o ambiente viário em análise e considerando a frequência com que certas variáveis aparecem na literatura, as variáveis preditoras consideradas neste estudo foram volume diário médio anual (VDMA) e as características operacionais e geométricas da rede

O VDMA, variável de exposição que usualmente explica a maior parte da variação dos acidentes de trânsito, foi a variável limitante para a definição das observações disponíveis para o desenvolvimento dos MPA. Para os anos dos quais se possui dados de acidentes de trânsito (2004 a 2011) apenas em 2010 e 2011 há informações de volume veicular. Como para 2011 esse banco dado de volume era maior que o de 2010, esse ano foi utilizado como ano base para o desenvolvimento dos modelos. A amostra de 2010 foi utilizada para a validação dos MPA partindo da premissa que os fatores desconhecidos que influenciam nos acidentes são iguais ao longo desses dois anos.

Contudo, antes da análise exploratória das variáveis, procurou-se controlá-las com objetivo de criar grupos de entidades homogêneas para minimizar a influência de fatores desconhecidos (ou não controlados) que reduzam o poder preditor do modelo. O agrupamento

adotado nessa pesquisa foi baseado no tipo de operação de tráfego (interseções) e nas seções de vias mais comuns (segmentos), essa abordagem é justificada pelas suas possíveis homogeneidades nos valores dos VDMAs. A Figura 14 apresenta os agrupamentos de MPA utilizados nessa pesquisa.

Figura 14 - Agrupamento dos modelos



Fonte: O autor.

Em relação ao agrupamento da variável dependente (acidentes com pelo menos um veículo motorizado em 2011), foram definidos dois grupos baseados na severidade, acidentes com vítimas e acidentes totais. A tabela 4 apresenta a estatística descritiva dos dados de acidentes para os agrupamentos definidos.

Tabela 4 - Estatísticas descritiva das variáveis dependentes

Grupo	Número de observações	Acidentes com vítimas				Acidentes totais			
		Média	Min.	Max	Desvio	Média	Min.	Max	Desvio
Interseção SemafORIZADA	200	1,37	0	10	1,63	6,91	0	45	6,67
Interseção não SemafORIZADA	131	1,06	0	9	1,47	4,09	0	23	4,45
Segmento de sentido duplo	122	0,48	0	4	0,86	2,07	0	15	2,64
Segmento de sentido único	255	0,15	0	2	0,41	0,62	0	5	0,94

Das variáveis independentes disponíveis e de interesse para esse exercício de modelagem ficaram VDMA, número de faixas, número de pistas e comprimento (para as entidades de segmento). Realizada a análise de correlação, verificou-se que, dentre as variáveis independentes, o VDMA possui a maior correlação com a variável dependente e que a variável “número de pistas” e “número de aproximações” possuía forte correlação com

variável “número de faixas”, da qual possuía uma correlação maior com as variáveis dependentes. A partir dessa análise as variáveis “número de pistas” e “número de aproximações” foram eliminadas do exercício de modelagem. A Tabela 5 apresenta a estatística descritiva das variáveis independentes classificadas pelo agrupamento definido.

Tabela 5 - Estatísticas descritiva das variáveis independentes

Grupo	VDMA				Número de Faixas				Comprimento do segmento			
	Média	Min.	Max	Desvio	Média	Min.	Max	Desvio	Média	Min.	Max	Desvio
Interseção Semaf.	33.632	7.917	82.724	13.358	12,11	8	24	3,51	-	-	-	-
Interseção não Semaf.	18.052	1.171	39.292	8.530	9,34	6	20	3,07	-	-	-	-
Seg. de sentido duplo	26.447	11.570	49.425	7.166	4,46	4	8	0,92	127,93	9,15	1008	94,74
Seg. de sentido único	10.535	579	34.727	5.334	2,19	2	5	0,52	109,82	18,57	290	36,34

Para o desenvolvimento dos MPA, a revisão da literatura direcionou a presente pesquisa para utilização dos modelos lineares generalizados (MLG) por demonstrar bom desempenho ao lidar com esse padrão raro e aleatório dos dados de acidentes. A estrutura genérica dessa técnica de modelagem foi apresentada conforme a Equação 12.

Com o auxílio do *software* R, foram realizados testes utilizando o parâmetro de dispersão (Bonneson e McCoy, 1993) no intuito de verificar, entre *Poisson* e Binomial Negativa (BN), qual a distribuição mais adequada para a amostra dos acidentes de trânsito. Valores superiores a 1,00, para este parâmetro, indicam dispersão nos dados superior à assumida na distribuição. Modelos básicos para acidentes totais foram calibrados com a variável VDMA. Os resultados indicaram valores de dispersão (σ_d) entre 2,01 e 7,42 para os modelos assumindo distribuição de *Poisson* e de 1,13 e 1,19 para os modelos com a distribuição BN, sendo a última premissa mais adequada para os dados.

4.2.2 Estimação dos parâmetros

Os parâmetros dos modelos foram estimados pelo método da máxima verossimilhança (Hauer, 2002; Lord, 2006). A especificação final dos MPA foi obtida por remoção sistemática das variáveis estatisticamente insignificantes, utilizando método de exclusão sequencial (*backward*). O critério de informação de Akaike (*Akaike Information Criterion* – AIC) foi utilizado para distinguir os modelos que melhor explicam os dados de um fenômeno com o menor número de parâmetros, penalizando os modelos com elevado

número de parâmetros. O modelo com o menor AIC é considerado o melhor entre os modelos testados para cada grupo. A Tabela 6 apresenta os coeficientes de cada modelo (com vítimas e totais) estimado com os respectivos valores do erro-padrão para MPA em interseções.

Tabela 6 - Parâmetros dos MPA para interseções

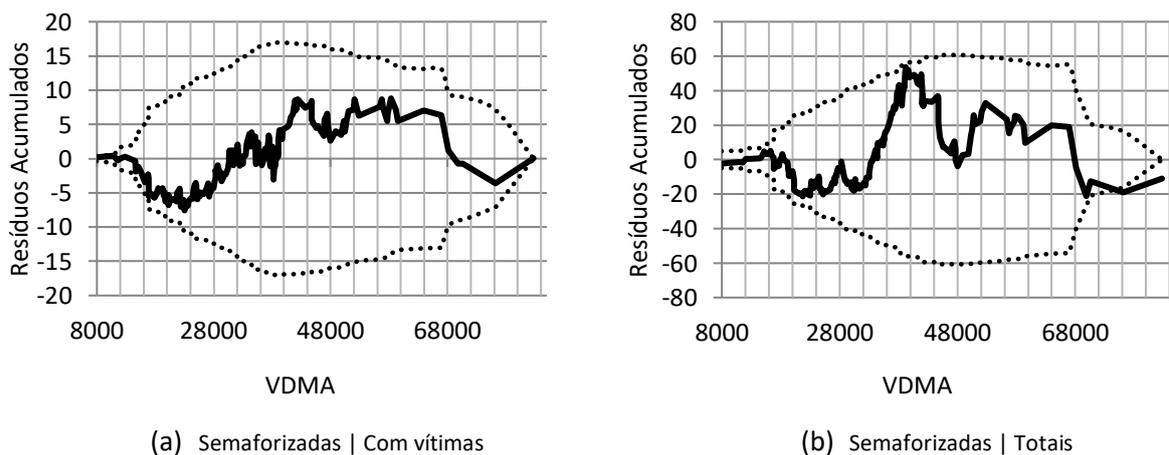
Variáveis		MPA para interseções			
		Semaforizadas		Não semaforizadas	
		Com vítimas	Totais	Com vítimas	Totais
α	ln(alfa)	-11,19	-6,19	-10,63	-9,68
	Coef.	1,38E-05	2,05E-03	2,42E-05	6,25E-05
	$\hat{\sigma}_\beta$ (*)	2,55	1,56	2,49	1,65
VDMA	Coef.	0,97	0,65	1,02	1,06
	$\hat{\sigma}_\beta$	0,27	0,16	0,26	0,18
Número de faixas	Coef.	0,10	0,10	0,07	0,07
	$\hat{\sigma}_\beta$	0,025	0,017	0,026	0,027
<i>AIC</i>		556,98	1029,27	350,94	613,54

coeficientes estatisticamente significativos ($\alpha \leq 0,05$)

(*) erro padrão

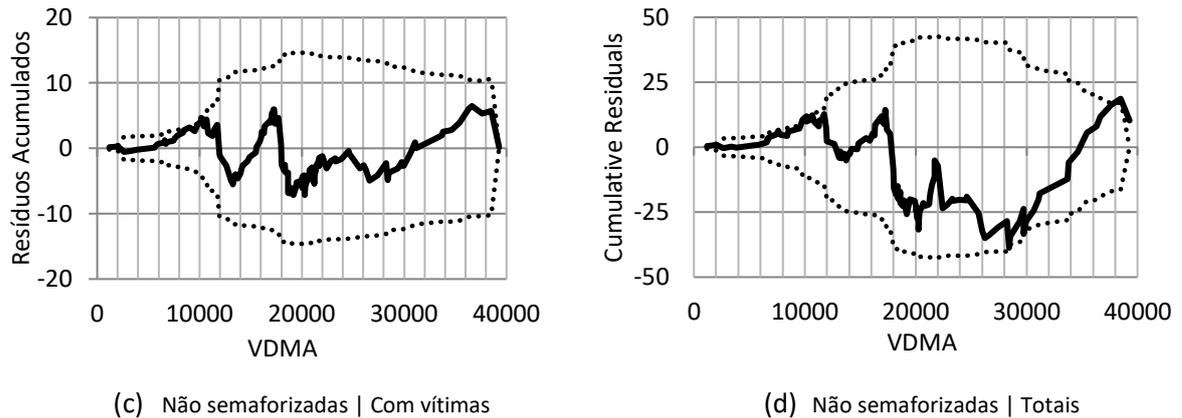
Ambas as variáveis independentes (VDMA e número de faixas) foram estatisticamente significativas. Dentre os MPA desenvolvidos, para cada tipo e agrupamento, o AIC apresentou menor valor para os MPA que possuíam as duas variáveis, sendo esses os mais plausíveis. Para confirmar a escolha desses modelos foi realizada uma avaliação mais minuciosa com o emprego da ferramenta gráfica apresentada na revisão da literatura, o *CURE plot*. A Figura 15 apresenta os *CURE plot* em função do VDMA dos MPA apresentados na Tabela 6.

Figura 15 - *CURE plots* dos MPA para interseções



(a) Semaforizadas | Com vítimas

(b) Semaforizadas | Totais

Figura 15 - *CURE plots* dos MPA para interseções (Continuação)

Fonte: O autor

Pela análise dos *CURE plots* confirmou-se a escolha dos MPA para interseções. Para os MPA com vítimas, os resíduos acumulados (linhas contínuas) oscilaram em torno do zero (*random walk*), não ultrapassaram os limites de dois desvios padrões (linha tracejada) e terminaram em zero. Os MPA totais apresentaram tendência similar. Contudo, para valores extremos de VDMA, os resíduos extrapolaram os limites do desvio padrão e terminaram próximo a zero. Isso aconteceu devido ao baixo número de observações para altos VDMA.

De forma análoga, foram estimados os parâmetros dos MPA para segmentos. A Tabela 7 apresenta os coeficientes de cada modelo (com vítimas e totais) estimado com os respectivos valores do erro-padrão para MPA em segmentos.

Tabela 7 - Parâmetros dos MPA para segmentos

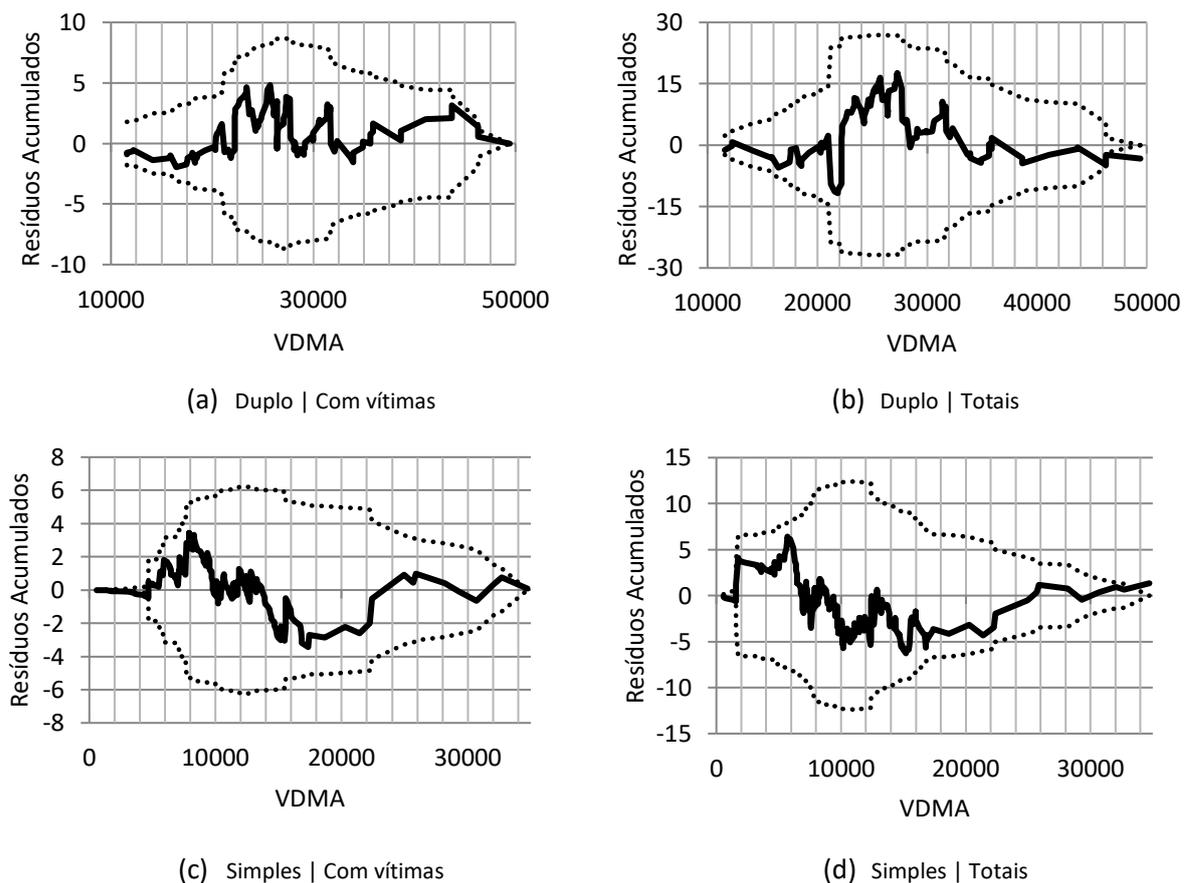
Variáveis		MPA para segmentos			
		Duplos		Simples	
		Com vítimas	Totais	Com vítimas	Totais
α	ln(alfa)	-23,35	-13,94	-15,11	-7,52
	Coef.	7,23E-11	8,83E-07	2,74E-07	5,42E-04
	$\hat{\sigma}_\beta$ (*)	6,56	4,23	3,46	1,70
VDMA	Coef.	1,80	1,09	1,31	0,64
	$\hat{\sigma}_\beta$	0,6	0,39	0,37	0,18
Comprimento	Coef.	0,88	0,75	0,0081	0,009
	$\hat{\sigma}_\beta$	0,31	0,22	0,0040	0,002
AIC		222,33	463,11	211,59	520,88

coeficientes estatisticamente significativos($\alpha \leq 0,05$)

(*) desvio padrão

As variáveis independentes “VDMA” e “comprimento” foram estatisticamente significativas para os MPA apresentados. A variável “número de faixas” foi significativa apenas para os MPA em segmentos simples, entretanto a diminuição no AIC foi insignificante (apenas 3 pontos) sendo essa variável não incluída na Tabela 7, que apresentou os modelos mais plausíveis. Também foi realizada uma avaliação mais minuciosa utilizando o *CURE plot* para confirmar a escolha desses modelos. A Figura 16 apresenta os *CURE plot* em função do VDMA dos MPA apresentados na Tabela 7.

Figura 16 – *CURE plots* dos MPA em segmentos



Fonte: O autor.

Assim como nos MPA para interseções, pela análise dos *CURE plots* foi confirmada a escolha dos MPA em segmentos. Os MPA apresentaram-se satisfatórios com os resíduos acumulados (linhas contínuas) oscilando em torno do zero (*random walk*), não ultrapassaram os limites de dois desvios padrões (linha tracejada) e terminaram bem próximos a zero.

4.2.3 Análise dos resíduos - Validação

A atividade final do desenvolvimento dos MPA tem por objetivo garantir que os modelos desenvolvidos representem a população geral e que são apropriados às situações nas quais serão usados, aplicando a teoria da validação. Devido ao tamanho da amostra do ano de 2011 ser insuficiente para permitir a validação particionada, utilizou-se a artifício da validação por amostras adicionais.

Os MPA calibrados foram aplicados para dados do ano de 2010, considerando a premissa que os atributos operacionais e físicos da rede e os demais fatores desconhecidos não tiveram alterações entre esse ano e o de 2011. Para cada grupo, os MPA foram aplicados para o número de observações de VDMA disponíveis para aquele ano. Os acidentes e VDMA para 2010 foram georreferenciados na etapa de consolidação da base. As Tabelas 8 e 9 apresentam as estatísticas descritivas da amostra de validação.

Tabela 8 - Estatísticas descritiva das variáveis dependentes da amostra de validação

Grupo	Número de observações	Acidentes com vítimas				Acidentes totais			
		Média	Min.	Max	Desvio	Média	Min.	Max	Desvio
Interseção Semaforizada	82	1,21	0	8	1,35	6,05	1	36	5,13
Interseção não Semaforizada	51	0,88	0	8	1,15	3,95	0	20	4,33
Segmento de sentido duplo	55	0,40	0	3	0,68	1,78	0	10	2,02
Segmento de sentido único	115	0,14	0	2	0,40	0,74	0	7	1,10

Tabela 9 - Estatísticas descritiva das variáveis independentes da amostra de validação

Grupo	VDMA				Número de Faixas				Comprimento do segmento			
	Média	Min.	Max	Desvio	Média	Min.	Max	Desvio	Média	Min.	Max	Desvio
Intersec. Semaf.	33.268	9.912	66.915	12.714	11,43	8	20	3,05	-	-	-	-
Intersec. não Semaf.	15.887	1.015	33.865	8.750	8,74	6	18	2,87	-	-	-	-
Seg. sentido duplo	25.175	9.890	43.356	6.802	4,38	4	6	0,78	110,30	9,15	295.28	47,81
Seg. sentido único	11.280	1.290	28.900	4.856	2,27	2	5	0,64	107,74	15,35	255.98	35,75

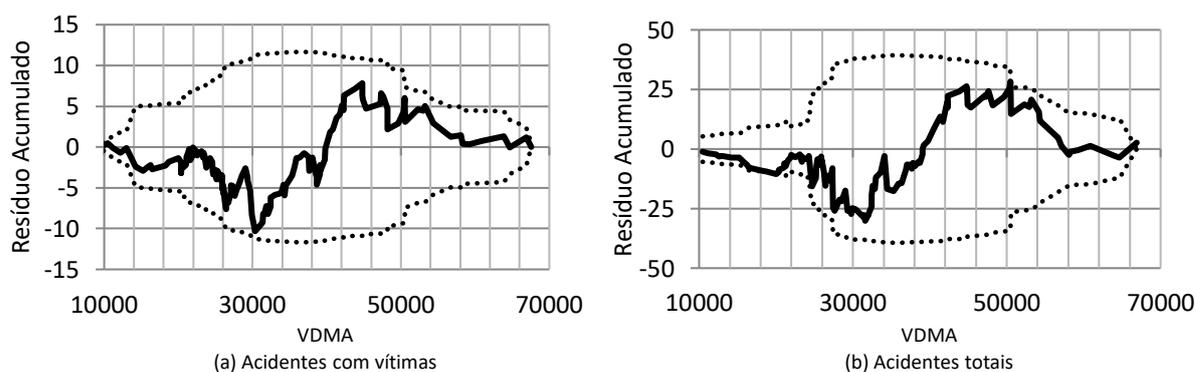
Os resultados obtidos na validação dos modelos, desenvolvidos no presente estudo, são apresentados em termos do erro dos modelos. Os elementos estatísticos usados na análise da validação foram o erro médio absoluto – EMA e a raiz do erro quadrático médio – REQM. É importante destacar que o modelo pode ser considerado válido se apresentar desempenho aproximadamente semelhante ao observado na amostra de ajuste. A Tabela 10 apresenta o resultado dos erros obtidos para a amostra de validação e de ajuste dos MPA.

Tabela 10 - Erros da amostra de validação e ajuste

Grupo	Nº de Observações	TIPO	Validação		Ajuste		Δ EMA	Δ REQM
			EMA	REQM	EMA	REQM		
Interseção SemafORIZADA	140	Com vítimas	0.818	0.992	0.947	1.179	13.62%	15.86%
		Totais	2.416	3.435	2.852	4.273	15.29%	19.61%
Interseção não SemafORIZADA	50	Com vítimas	1.053	1.333	0.931	1.278	-13.10%	-4.30%
		Totais	2.958	4.325	2.646	3.737	-11.79%	-15.73%
Segmento de sentido duplo	55	Com vítimas	0.466	0.608	0.543	0.744	14.18%	18.28%
		Totais	1.456	1.724	1.66	2.015	12.29%	14.44%
Segmento de sentido único	255	Com vítimas	0.243	0.391	0.233	0.389	-4.29%	-0.51%
		Totais	0.771	1.251	0.665	1.085	-15.94%	-15.30%

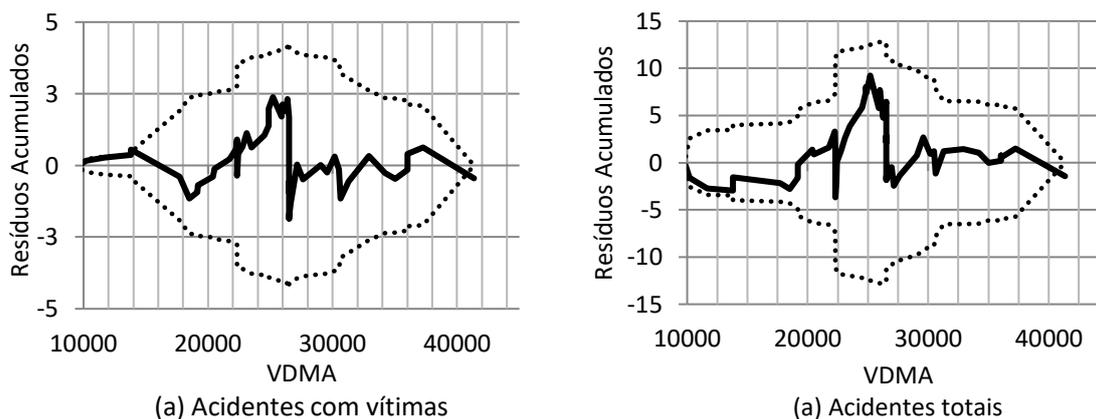
Os resultados apresentados mostram que a variação entre os valores do EMA obtidos na validação e no ajuste ficou no intervalo de -15,94 % a +15,29%, e que para a REQM esse intervalo foi de -15,73% a +19,61%. Pela técnica da validação com amostras adicionais de 2010, os MPA para interseção não semaforizadas e segmentos de sentido único apresentaram melhor desempenho na validação do que no ajuste (variação negativas), já os MPA para interseção semaforizadas e segmento de sentido duplo apresentaram melhor desempenho no ajuste (variações positivas). Em módulo, as diferenças percentuais entre as estatísticas foram inferiores a 20%, consideradas relativamente baixas e, portanto satisfatórias.

Para uma análise mais rigorosa da validação, a técnica de avaliação dos resíduos acumulados (*CURE plot*) também foi aplicada, assim como no ajuste dos modelos. A Figura 17 apresenta o *CURE plot* dos MPA aplicado na amostra de validação para interseções semaforizadas e a Figura 18 o *CURE plot* dos MPA aplicado na amostra de validação para segmentos duplos.

Figura 17 - *CURE plot* dos MPA para interseções semaforizadas da amostra de validação

Fonte: O autor

Figura 18 - *CURE plot* dos MPA para segmentos duplos da amostra de validação



Fonte: O autor.

Os *CURE plots* foram produzidos para os demais grupos de MPA com as amostras de validação. Eles seguiram o mesmo padrão dos gráficos apresentados na Figura 17 e 18. Em todos os casos os resíduos acumulados estiveram entre os limites da envoltória e com oscilação em torno de zero, garantindo assim a validação do modelos para os parâmetros estabelecidos.

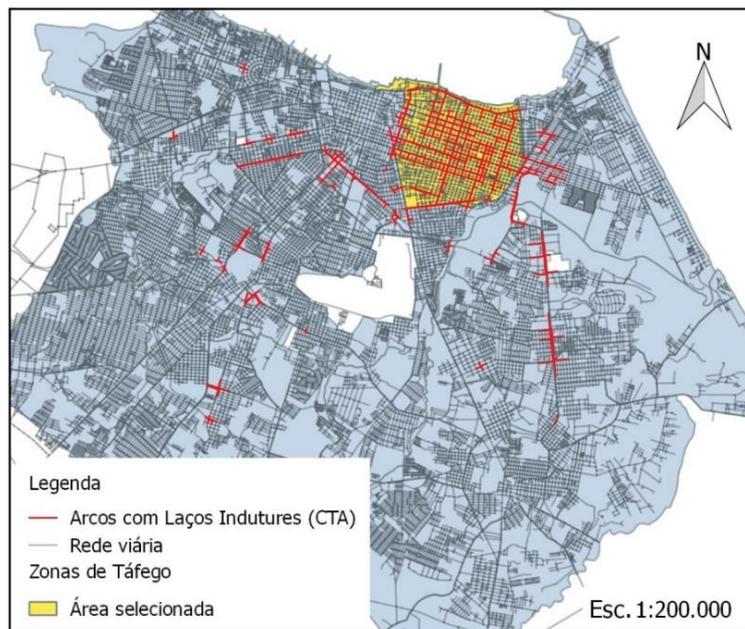
4.3 Consolidação da rede piloto

Dentro do processo de planejamento urbano, a avaliação de diferentes cenários é um passo importante para explorar diferentes estratégias a serem implementadas. Essas estratégias devem ser comparadas utilizando diferentes dimensões de transporte, tais como fluidez, equidade, segurança e aspectos ambientais. Para desenvolver esse exercício e avaliar o DSV, foi construído um estudo de caso para uma determinada área de Fortaleza/CE.

4.3.1 Definição e caracterização da rede

Optou-se, para o estudo de caso dessa pesquisa, a seleção de uma área da cidade que tem o seu controle semaforico realizado predominantemente pelo sistema do CTAFOR, objetivando auxiliar na caracterização da região, permitindo a utilização do banco de dados de fluxo contínuo. A área escolhida é formada por 8 das 126 zonas de tráfego (ZT) existentes em Fortaleza e é composta por 1.896 arcos e 729 nós. Dentre esses arcos, 388 possuem laços indutores que fazer a contagem contínua do tráfego veicular. A Figura 19 apresenta as 8 ZT selecionadas para o estudo.

Figura 19 - Delimitação da área de estudo (rede piloto)



Fonte: O autor.

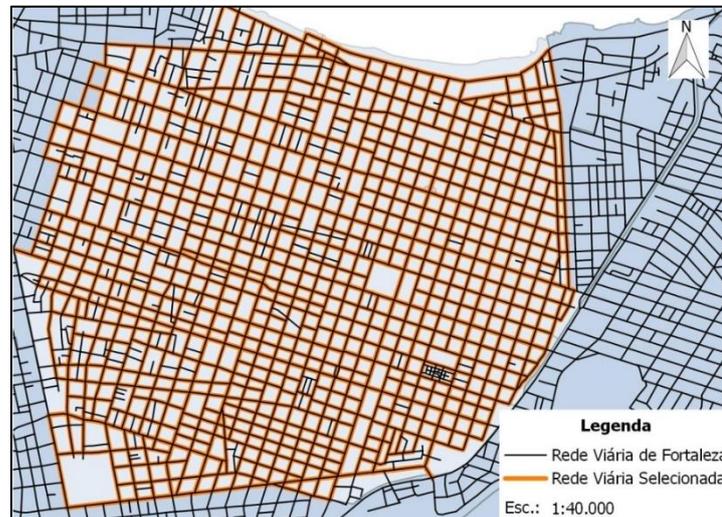
Essa região é caracterizada por um forte adensamento do uso do solo, apresentando um sistema viário reticulado, no qual concentra a maioria das atividades comerciais da cidade. Caracteriza-se, ainda, por apresentar uma grande diversidade de configurações geométricas, variando desde pista única com sentido único (duas ou três faixas) até pista dupla com sentido duplo (duas faixas por sentido). É uma área constituída por um conjunto de bairros de classe média e alta com uma grande concentração de edificações residenciais e ocupações comerciais. Essa configuração faz com que essa região concentre a maior parte das viagens motorizadas realizadas na cidade e, conseqüentemente, dos acidentes de trânsito.

É importante ressaltar que não foram considerados todos os nós e arcos da rede viária da região selecionada. Deve-se isto a simplificação da concepção da rede piloto. Nos arcos suprimidos, o tráfego de veículos se dá principalmente para o acesso local das residências que se encontram lindeiras aos trechos viários. Outro critério relevante na definição dos elementos da rede foi a continuidade. Vias que tinham pouca extensão, ou seja, não permitiam a realização de viagens longas também foram suprimidas.

A retirada desses arcos pode alterar a escolha das rotas por parte dos usuários, caso o sistema apresente congestionamento e altas saturações. Porém, os arcos que permaneceram na rede piloto permitem o pleno deslocamento dos usuários, inclusive

oferecendo mais de uma opção de trajeto para a maioria das viagens. É importante frisar que se espera um aumento do fluxo em alguns arcos que vão funcionar como rotas alternativas. Assim, tem-se a rede piloto exposta na Figura 20.

Figura 20 - Mapa da rede selecionada para modelagem



Fonte: O autor

4.3.2 Estimação dos fluxos da rede

Para a consolidação dos dados necessários para avaliar o DSV da rede piloto, foi realizado um esforço de reconstrução dos fluxos da forma mais coerente possível, na medida das limitações encontradas, para alcançar essa etapa metodológica. O fluxo veicular, que na sequência foi convertido em VDMA, irá compor a principal variável explicativa do banco de dados da rede piloto.

Nessa atividade, foi utilizado o método de modelagem sintética implementado no *software* TransCAD, desenvolvido por Nielsen (1993), do qual foi apresentado na revisão da literatura.

A técnica utilizada para a alocação foi do equilíbrio do usuário. Para isso, o método de Nielsen exige alguns dados de entrada. São estes descritos como, capacidade, tempo de viagem de fluxo livre, carregamento (fluxos) nos arcos, uma matriz OD semente e os dois parâmetros de calibração da função de impedância BPR, o α e o β . Esses dados são implementados no simulador através da tabela do banco de dados associados aos elementos espaciais que compõem a rede piloto.

A capacidade dos arcos e os parâmetros α e β utilizados basearam-se na calibração desenvolvida por Maia (2007) para uma pequena rede dentro da área definida pela rede piloto. Em seguida os dados calibrados foram extrapolados para toda rede selecionada, baseada na sua função prática da via dentro do sistema viário da cidade. Para isso, foi utilizada a metodologia também desenvolvida por Maia (2007) para definir agrupamentos dessas vias da rede piloto seguindo o método adaptado de Paula (2006), que, por sua vez, baseou-se na metodologia do HCM 2000 para classificação de vias urbanas.

No Anexo B são apresentados critérios propostos para a classificação e agrupamento das vias de Fortaleza. No Anexo C são apresentados os parâmetros calibrados para os grupos de vias, no TransCAD.

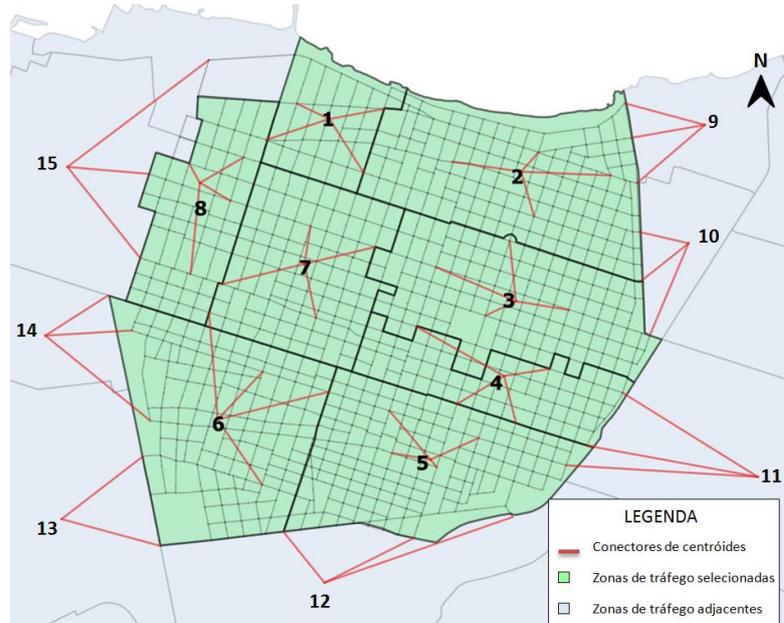
As informações de fluxo de alguns arcos foram extraídas do banco de dados de fluxo veicular, desenvolvido na etapa de consolidação da base. Para esse esforço de reconstrução dos fluxos, utilizou-se as médias da hora de pico (17h às 18h) das terças-feiras do mês de outubro de 2011. Para uma modelagem mais eficiente é necessário o máximo de dados de fluxos disponíveis associados aos arcos da rede.

Outro importante dado de entrada para a reconstrução sintética é a Matriz OD semente. A matriz OD semente utilizada foi uma revisão, realizado pelo Governo do Estado do Ceará, de uma matriz base para o ano de 2010. Esta matriz base, que representa os deslocamentos na Região Metropolitana de Fortaleza, apenas durante o pico da manhã, teve origem na matriz OD obtida com a pesquisa domiciliar realizada em 1996, que vem sendo sistematicamente atualizada, em função de taxas de crescimento populacional, não incorporando consideração de mudanças no padrão de deslocamento da população.

Por se tratar de uma modelagem mesoscópica, foi necessário definir os conectores dos centroides para criar os pares OD da matriz unitária. Optou-se por fazer as ligações dos centroides das zonas nos principais corredores da rede, atentando-se aos locais onde existem polos geradores de viagens (PGV).

As viagens externas da área selecionada também foram consideradas para a modelagem. Foram adicionados mais sete centroides externos que representaram a influência das demais zonas da cidade sobre a rede piloto. Os conectores dos centroides adjacentes também foram associados aos principais corredores. A Figura 21 apresenta o exposto. Por conta dessas considerações, foi necessário desconsiderar da análise os arcos da borda e aqueles sobre influência direta dos conectores, pois tendem a ter seu volume superestimado.

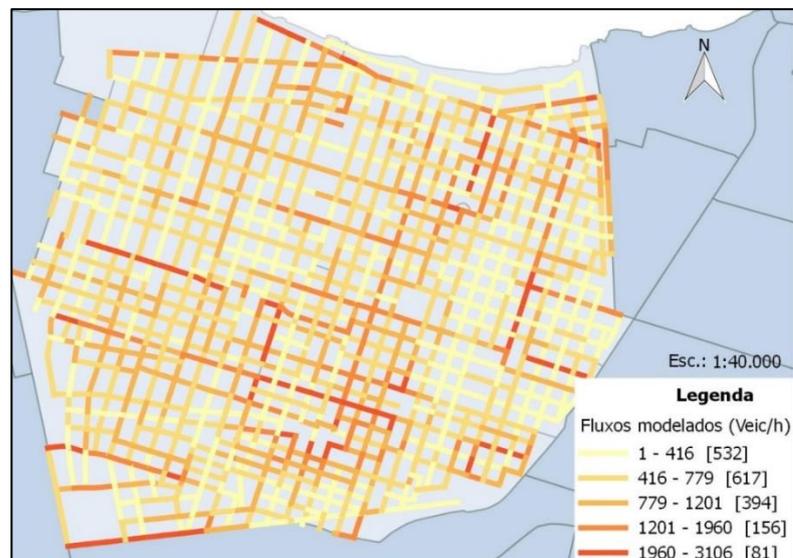
Figura 21 - Centroides e conectores da rede piloto



Fonte: O autor

Dos dados de fluxo veicular disponível, utilizou-se 80% para a calibração do modelo de reconstrução dos fluxos e 20% para a validação. Aplicado o limite máximo de iterações permitidas pelo simulador obtivemos o resultado apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Resultado dos fluxos reconstruídos sinteticamente



Fonte: O autor

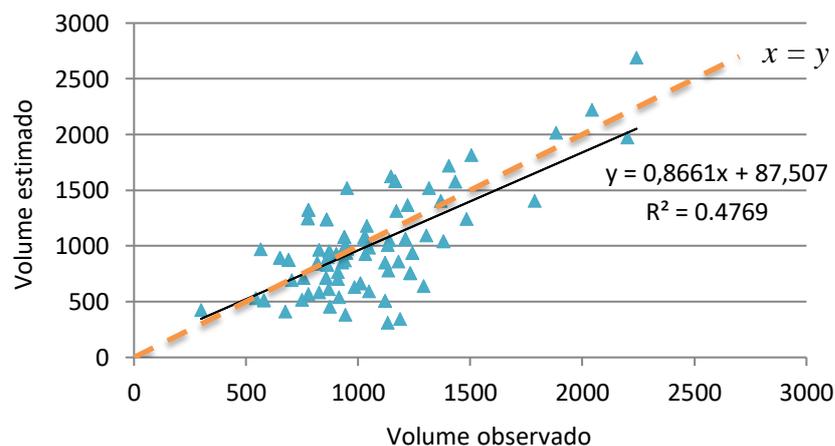
A Figura 22 apresentou o resultado da modelagem da rede piloto a partir dos carregamentos dos arcos na hora de pico da tarde (17h às 18h). A Tabela 11 apresenta as estatísticas descritivas desses fluxos.

Tabela 11 - Estatísticas descritivas dos fluxos

	Fluxos observados	Fluxos estimados
Média	1046,35	934,59
Erro padrão	27,60	33,14
Mediana	1025,00	849,40
Modo	779,00	711,46
Desvio padrão	368,26	410,88
Variância da amostra	135615,80	194376,08
Mínimo	148,00	152,96
Máximo	2392,00	2691,07
Soma	186250,35	160112,19

Para efetivar a validação da modelagem sintética, foi plotado um gráfico dos valores estimados e observados da amostra de validação. Calculou-se, ainda, a raiz do erro quadrático médio (REQM) para comparação dessa amostra com a de calibração. Os valores obtidos foram 11,05 e 9,75 respectivamente. A diferença de -22% no valor do REQM e a análise gráfica, apresentado na Figura 23, indicam uma tendência de subestimação dos fluxos. Observa-se que o coeficiente de determinação obtido (R^2) foi de 0,63 e que a maior parte dos dados então abaixo a reta de ajuste ($f(x) = y$).

Figura 23 - Comparação dos volumes nos arcos observados e estimado



Fonte: O autor

Duas possíveis hipóteses para os resultados apresentados são: (i) a baixa quantidade de informação de fluxos disponíveis e (ii) a qualidade matriz OD semente utilizada no processo. A revisão da matriz OD base de 1996 foi realizada utilizando taxas de crescimento populacional, entretanto, acredita-se que o padrão de deslocamento da população mudou significativamente ao longo dos últimos anos. Mais observações de fluxos e uma maior confiabilidade da matriz OD semente podem melhorar ainda mais as estimativas de reconstrução dos fluxos, que, para essa pesquisa, foram considerados satisfatórios.

O dado de saída desse esforço é o volume da hora de pico de todos os arcos da rede. Na sequência, foi realizada a transformação desse valor em VDMA. Os fatores de expansão utilizados nessa pesquisa encontram-se no relatório de Modelagem no Apoio à Decisão no Planejamento, Operação e Gestão dos Sistemas de Transporte Público e de Circulação Viária de Fortaleza (ASTEUF/UFC, 2015). No Anexo A dessa dissertação, são apresentados esses fatores e as fórmulas utilizadas para a expansão dos fluxos da rede piloto.

É importante ressaltar que esses fatores calculados para o ano de 2013, único ano que se possuía os dados para todos os dias do CTAFOR. Considerando a hipótese de que não existe uma variação significativa entre a relação dos fluxos diários com o anual ao longo dos anos de 2011 e 2013, foram aplicados os fatores apresentados no relatório (ANEXO A).

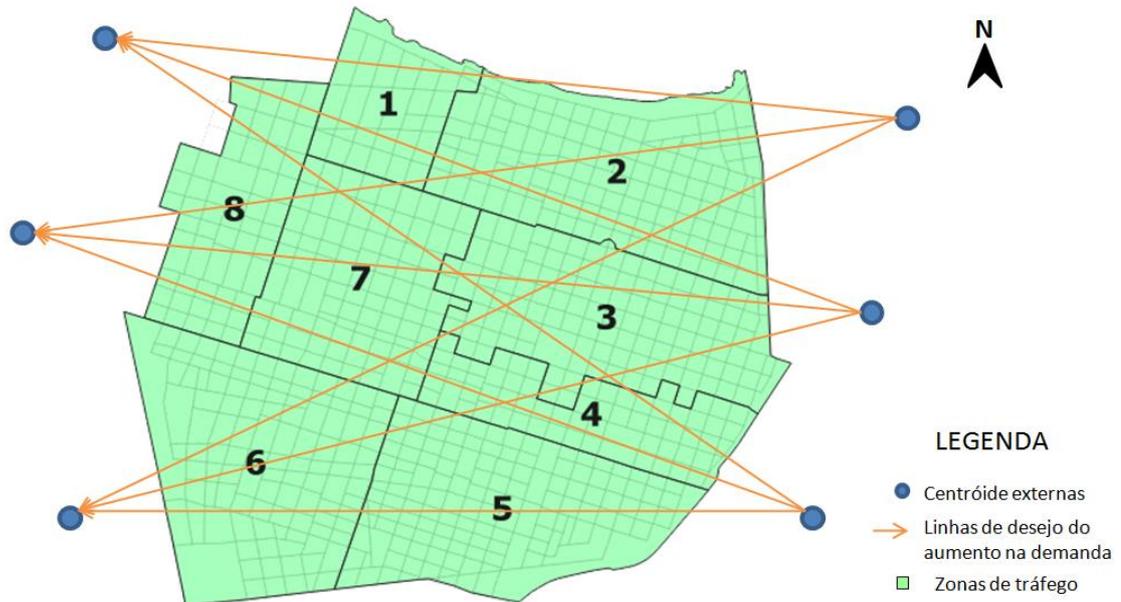
4.4 Avaliação de cenários e da sensibilidade dos MPA

Nessa etapa final, foram criados dois cenários hipotéticos para a rede piloto. O objetivo foi avaliar o desempenho da segurança viária (DSV), utilizando os MPA desenvolvidos, para cada um dos cenários e analisar a diferença entre eles. O cenário base, que serviu de comparação para os demais, foi a rede piloto modelada na etapa anterior. Esse cenário foi nomeado de cenário zero.

4.4.1 Cenário 01

No cenário 01 foi majorada a demanda da hora pico em 10%, o que representou um incremento de 6.870 viagens na rede. Essas viagens foram alocadas nos pares OD que ligam os centroides externos leste aos centroides externos oeste. Logo, essas viagens representam um tráfego de passagem pela rede piloto no sentido leste-oeste (L-O). As viagens foram distribuídas entre esses nove pares, que representam as linhas de desejo desse incremento. A Figura 24 representa o esquema de configuração desse cenário.

Figura 24 - Configuração do cenário 01



Fonte: O autor

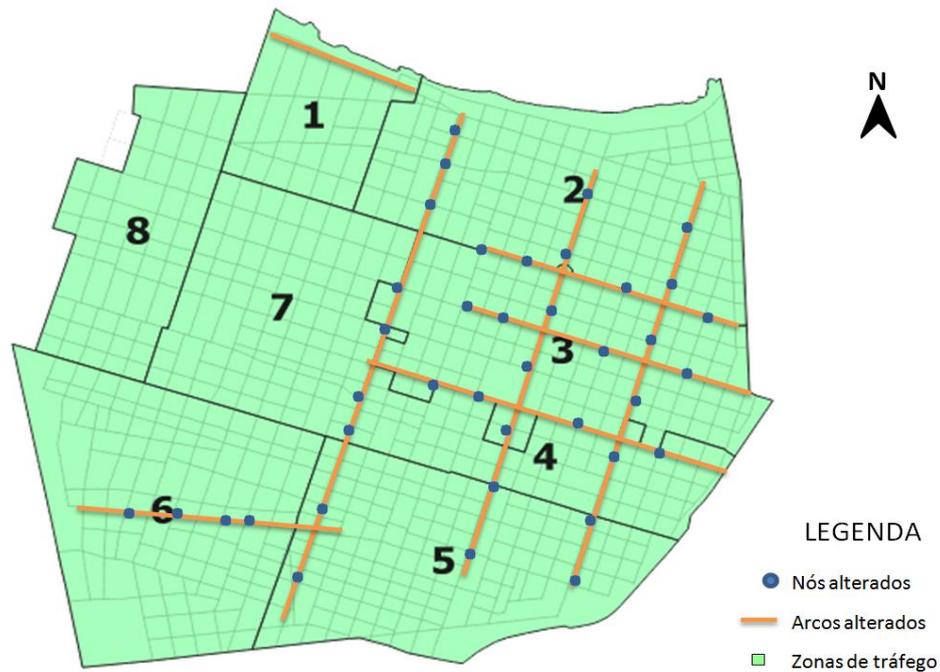
Com auxílio do *software* TransCAD uma nova alocação foi feita utilizando o método tradicional de modelagem da demanda. Nesse processo, a matriz OD modificada com o aumento da demanda desse cenário, é o *input*. Foi utilizada a mesma técnica de alocação da etapa anterior, o equilíbrio do usuário, e os mesmos parâmetros e capacidades para os arcos. Esse processo gerou novos carregamentos para os arcos da rede, caracterizando a fluidez desse cenário.

Para finalizar a construção desse cenário, esses novos carregamentos foram expandidos utilizando os fatores de expansão e equações apresentados no Anexo A (ASTEUF/UFC, 2015).

4.4.2 Cenário 02

Com o objetivo de melhorar a fluidez na rede piloto, foram alteradas as capacidades de 8 corredores, que deixaram de ser sentido duplo e passaram a ser sentido único. Nesse cenário, foram também adicionados 30 semáforos, visando melhorar a operação da área. A Figura 25 apresenta a configuração do cenário 2, destacando os arcos e nós que sofreram as modificações.

Figura 25 - Configuração do cenário 02



Fonte: O autor

Apesar das modificações desse cenário hipotético alterarem apenas a oferta da rede, é importante destacar que existe uma relação de dependência mútua entre oferta e demanda. Logo, ao se alterar a oferta do cenário, consequentemente isso terá um efeito sobre a demanda durante o processo de alocação do tráfego na rede. Como o foco desse trabalho é analisar a sensibilidade dos MPA em cenários hipotéticos da rede, essa complexidade da relação demanda e oferta será considerada uma premissa para a construção do cenário 02.

Como no cenário anterior, foi utilizado o mesmo processo tradicional de modelagem da demanda e a técnica de equilíbrio do usuário implementada no *software* TransCAD. O resultado gerou novos carregamentos para os arcos da rede desse cenário, que caracterizam sua fluidez. O aumento na oferta (capacidades dos arcos) implicou em uma alteração no padrão de alocação. De acordo com a técnica aplicada, os arcos de maior capacidade tendem a receber um maior fluxo de veículos.

Por fim, esses novos carregamentos foram expandidos para determinar os VDMAs desse cenário, também aplicando os fatores de expansão e equações apresentados no Anexo A (ASTEF/UFC, 2015).

4.4.3 Resultados da aplicação dos MPA

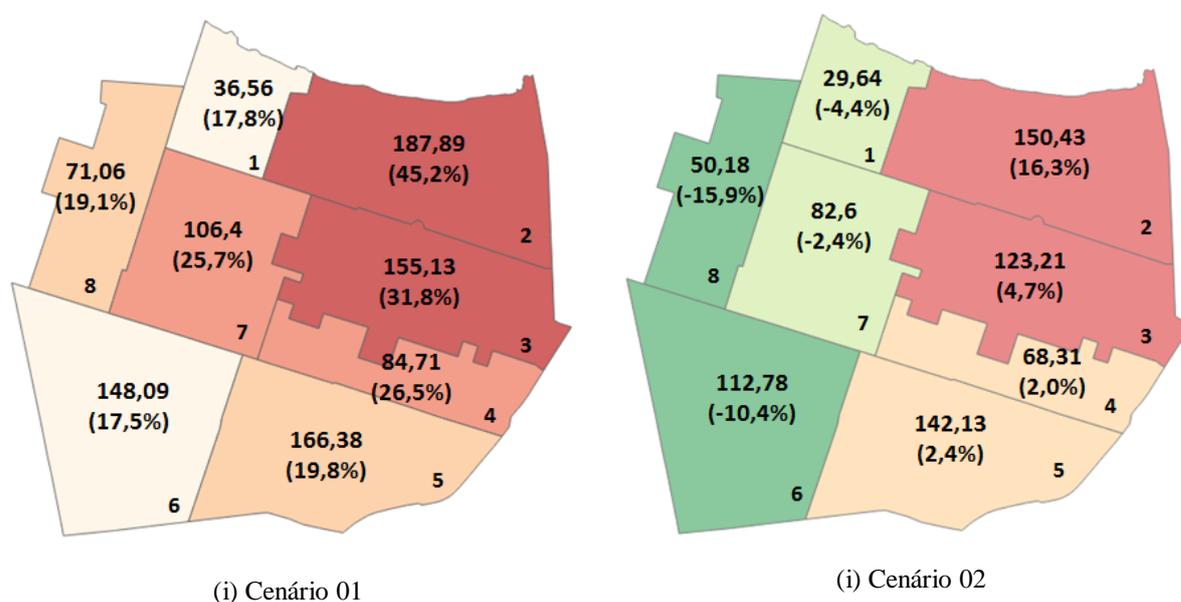
Os MPA desenvolvidos na etapa 2 foram aplicados na rede de cada cenário para a comparação do DSV e avaliação da sensibilidade dos modelos. A Tabela 12 apresenta o resumo geral dessas aplicações e nas Figura 26 e 27 são apresentados os mapas com os resultados da modelagem e a variação em relação ao cenário 0 para os acidentes com vítimas e acidentes totais, respectivamente.

Tabela 12 - Resultados gerais da aplicação dos MPA nos cenários hipotéticos

Zona	Acidentes com vítimas			Acidentes totais		
	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 0	Cenário 1	Cenário 2
1	31,01	36,56 (17,88%)	29,64 (-4,42%)	138,46	158,5 (14,47%)	131,82 (-4,79%)
2	129,38	187,89 (45,22%)	150,43 (16,27%)	537,67	753,77 (40,19%)	627,82 (16,76%)
3	117,67	155,13 (31,83%)	123,21 (4,71%)	511,10	653,16 (27,79%)	519,87 (1,71%)
4	66,96	84,71 (26,51%)	68,31 (2,02%)	286,20	352,28 (23,09%)	290,28 (1,42%)
5	138,81	166,38 (19,86%)	142,13 (2,39%)	556,55	664,13 (19,33%)	575,22 (3,35%)
6	125,95	148,09 (17,57%)	112,78 (-10,45%)	524,17	608,21 (16,03%)	481,62 (-8,11%)
7	84,66	106,4 (25,67%)	82,6 (-2,43%)	362,57	439,05 (21,09%)	359,24 (-0,91%)
8	59,66	71,06 (19,1%)	50,18 (-15,89%)	243,74	285,37 (17,08%)	207,47 (-14,87%)
TOTAL	754,10	956,22 (26,8%)	759,28 (0,68%)	3160,44	3914,47 (23,85%)	3193,34 (1,04%)

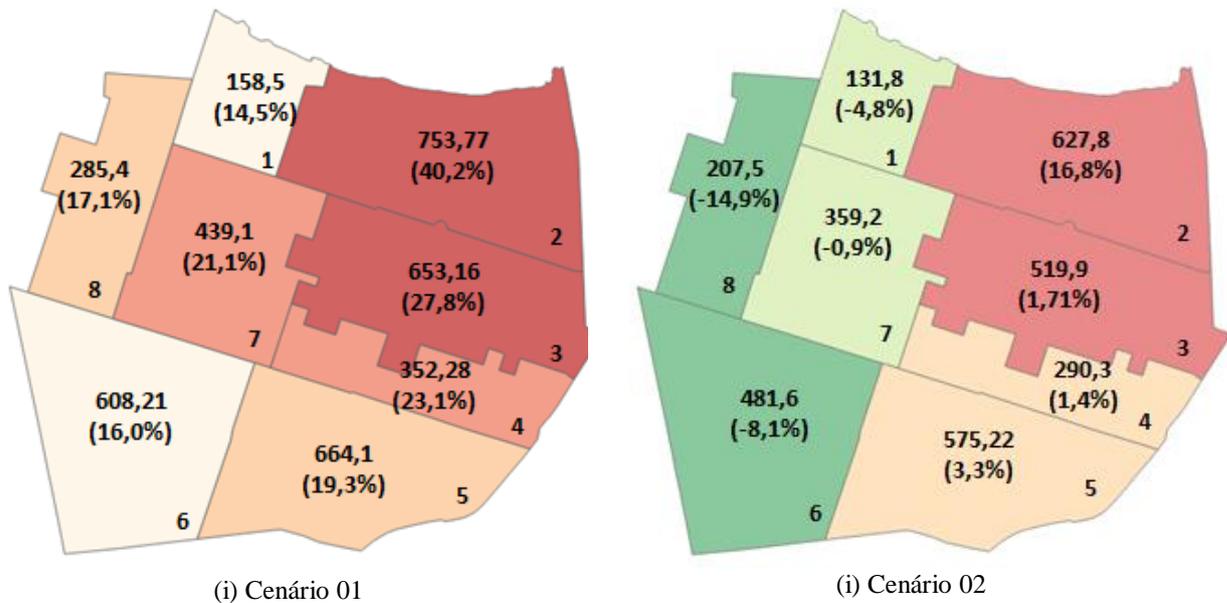
(*) Diferença percentual em relação ao cenário 0

Figura 26 - Mapa da frequência estimada de acidentes com vítimas nos cenários 01 e 02 e suas variações percentuais em relação ao cenário 0.



Fonte: O autor.

Figura 27 - Mapa da frequência estimada de acidentes totais nos cenários 01 e 02 e suas variações percentuais em relação ao cenário 0.



Fonte: O autor.

Assumiu-se a hipótese de que a contagem dos acidentes para as entidades compostas pelas oito Zonas de Tráfego (ZT) seguem a distribuição de *Poisson*, onde a média de cada zona é o somatório dos valores esperados de acidentes para cada entidade da rede que a compõe. Para essa distribuição, a variância é igual a sua média, logo o desvio padrão é a raiz quadrada da média. No Apêndice A, é apresentado o resumo geral, com o valor da média e desvio padrão de todas as zonas, para todos os cenários e respectivos grupos de entidades da rede.

Observa-se que o aumento na frequência de acidentes para o cenário 1 foi estatisticamente significativo, considerando um intervalo de \pm dois desvios padrões, como apresenta o Apêndice A. Esse resultado era esperado devido ao fato das alterações proposta nesse cenário impactarem diretamente nos VDMAs, principal fator de exposição de ocorrência do fenômeno.

O incremento proposto de aproximadamente 10% na demanda (6.870 viagens), no cenário 1, resultou em um incremento médio de 202 (26,8%) nos acidentes com vítimas e 754 (23,85%) nos acidentes totais, como apresenta a Tabela 12. Logo, percebe-se que a alteração da demanda não apresentou uma relação direta com acidentes totais e com vítimas. Essa

relação irá depender, principalmente, do carregamento da rede e sua relação entre o volume e capacidade dos arcos que a compõe.

O aumento na frequência de acidentes no cenário 01 ocorreu principalmente nas zonas 2, 3, 4 e 7, como mostra as Figuras 26 e 27. Uma possível justificativa para os resultados apresentados é que essas zonas recebem influência direta do tráfego de passagem adicionado nesse cenário. As zonas 2, 3 e 4 são as que recebem as viagens dos centroides de origem. Enquanto a zona 7, por estar em uma região central da área, tende a receber uma carga intensa desse tráfego de passagem, como apresentou a Figura 26.

No geral, avaliando o grupo de entidades composta pelas 8 ZT, as alterações estabelecidas para o cenário 2 não foram estatisticamente significativas, com um incremento médio em torno de 1% (5 para acidentes com vítimas e 33 para o total de acidentes) Contudo, quando a análise é desagregada por zona, as diferenças tornam-se expressivas e significativas, como mostra o Apêndice A.

Nas Figuras 26 e 27, observa-se o aumento na frequência de acidentes para as zonas 2, 3, 4 e 5 e diminuição para as zonas 1, 6, 7 e 8, no cenário 02. A Figura 27 mostrou que a maioria das alterações desse cenário ocorreram nas zonas em que houve o incremento na frequência de acidentes, sendo essa constatação uma possível justificativa para os resultados apresentados.

Para uma análise mais rigorosa e desagregada, as Tabelas 13 e 14 apresentam a diferença percentual no número de acidentes com vítimas e totais, respectivamente, em relação ao cenário 0 para cada grupo de entidade da rede viária.

Tabela 13 - Diferença percentual da frequência de acidentes com vítimas em relação ao cenário 0 para as entidades da rede

ZONA	Cenário 1				Cenário 2			
	Interseções		Segmentos		Interseções		Segmentos	
	Semaf	Não Semaf	Duplo	Simples	Semaf	Não Semaf	Duplo	Simples
1	13.95%	18.28%	17.58%	29.35%	-8.15%	-0.84%	-62.24%	3.05%
2	59.55%	38.03%	135.74%	37.39%	71.39%	-1.58%	-4.56%	64.40%
3	34.29%	30.19%	77.56%	35.58%	68.31%	-20.68%	-2.44%	57.78%
4	33.83%	22.28%	55.19%	25.22%	20.66%	-0.01%	-35.57%	22.54%
5	12.83%	19.28%	54.59%	10.71%	41.68%	-1.94%	-12.57%	25.11%
6	16.60%	15.51%	49.31%	17.43%	83.51%	-20.26%	-33.39%	30.48%
7	28.16%	22.34%	46.79%	34.62%	21.16%	-9.56%	-30.22%	13.87%
8	20.29%	17.40%	38.98%	28.55%	-22.84%	-14.18%	-25.42%	-21.11%
Total	31.29%	23.81%	65.06%	27.05%	44.92%	-8.39%	-23.76%	27.35%

Tabela 14 - Diferença percentual da frequência de acidentes totais em relação ao cenário 0 para as entidades da rede

ZONA	Cenário 1				Cenário 2			
	Interseções		Segmentos		Interseções		Segmentos	
	Semaf	Não Semaf	Duplo	Simple	Semaf	Não Semaf	Duplo	Simple
1	8.69%	19.04%	9.86%	14.10%	-6.44%	-0.80%	-44.88%	-3.62%
2	37.49%	39.70%	67.71%	18.02%	63.07%	3.53%	-13.00%	31.27%
3	21.60%	31.52%	41.26%	17.99%	58.42%	-30.24%	-6.02%	7.36%
4	21.53%	23.16%	29.84%	15.04%	21.72%	0.36%	-37.86%	19.15%
5	9.27%	19.98%	30.72%	9.43%	47.89%	-1.57%	-11.57%	13.89%
6	11.88%	16.23%	22.30%	7.20%	81.06%	-20.43%	-25.85%	17.25%
7	17.95%	23.33%	21.97%	14.28%	22.27%	-9.46%	-29.35%	7.84%
8	13.19%	18.20%	19.03%	11.15%	-16.86%	-14.79%	-13.44%	-12.89%
Total	20.16%	24.81%	32.49%	13.49%	42.19%	-9.58%	-22.07%	11.59%

O aumento da demanda no cenário 01 ocasionou um incremento significativo na frequência de acidentes para todas as entidades da rede. As estruturas dos MPA corroboram esse fato, pois como mostrou as Tabelas 6 e 7 todos os modelos apresentam coeficientes positivos para a variável independente de demanda/exposição VDMA.

A frequência de acidentes em segmentos duplos foram os que apresentaram o maior aumento, principalmente nas zonas 2 e 3, com uma significância maior para os acidentes com vítimas. A hipótese que corrobora esse fato é que, dentre todos MPA calibrados, aquele que apresenta o maior coeficiente para a variável VDMA é o de acidentes com vítimas para segmentos duplos ($\beta = 1,80$), como mostrou a Tabela 7.

Apesar da análise geral da entidade composta da ZT mostrar que não houve alterações na frequência de acidentes estatisticamente significativas entre os cenários 0 e 2, pela análise desagregada podemos verificar que as alterações no cenário 2 trouxeram impactos significativos à rede (APÊNDICE A). A adição de semáforos nas zonas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 aumentou a frequência de acidentes no grupo de interseções semaforizadas de suas zonas e diminuiu, na maioria, no de interseções não semaforizadas.

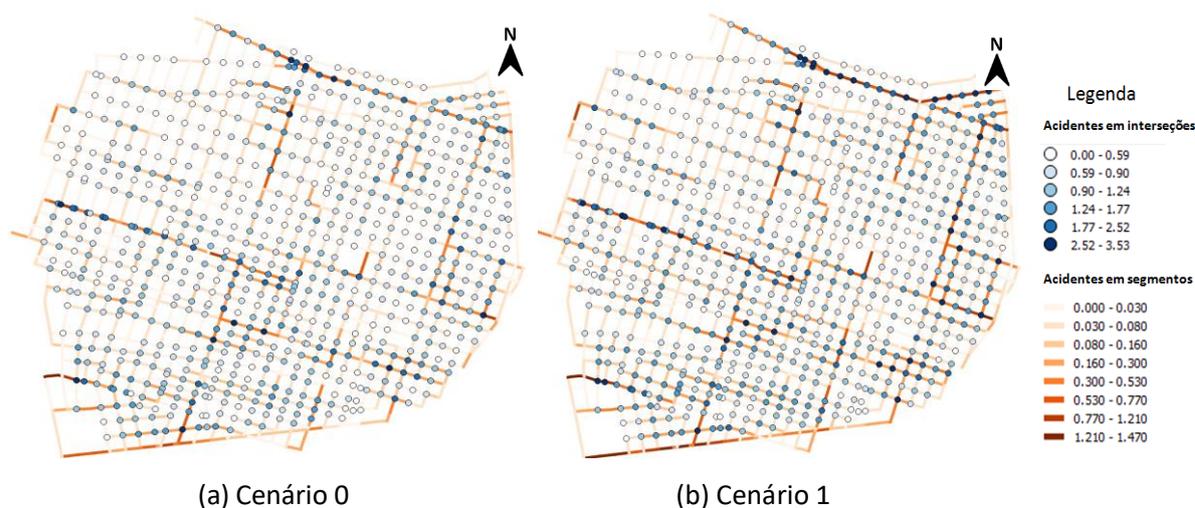
A redução da quantidade de interseções não semaforizada trouxe diminuição na frequência de acidentes significativa apenas para as zonas 3, 6, 7 e 8. Este fato pode estar relacionado ao aumento de capacidades nos arcos que compõe essa zona. Esse aumento na capacidade tende a elevar seu volume de tráfego. Portanto, as interseções não semaforizadas da rede passaram a receber um VDMA maior, ocasionando um incremento na frequência de acidentes dessa entidade.

A alteração no sentido das vias impactou principalmente nos acidentes em segmentos de sentidos duplos, diminuindo sua frequência em todas as zonas. Os corredores alterados que passaram de sentido duplo para simples, trouxeram um aumento nos acidentes em segmentos de sentido simples para todas as zonas, exceto a zona 8, na qual não teve arcos modificados.

Para uma análise ainda mais desagregada, é possível comparar os cenários no nível de arcos e nós. Entretanto, pela natureza rara e aleatória associada aos acidentes de trânsito, para tal nível de desagregação, os MPA perdem sua sensibilidade, o que torna mais difícil a interpretação dos resultados. As Figuras 28 e 29 apresentam os mapas da distribuição da frequência de acidentes com vítimas para os três cenários. De forma análoga, no Apêndice B, são apresentados os mapas da frequência de acidentes totais.

Esse nível de análise possibilita uma avaliação mais pontual e detalhada da rede de transporte, permitindo a identificação de gargalos em relação ao desempenho da segurança viária e da fluidez do tráfego. A identificação dos pontos de maior risco auxilia a direcionar as intervenções, proposição de alterações no cenário e/ou a implementação de medidas preventivas na rede.

Figura 28 - Mapa da frequência de acidentes com vítimas para cenários 0 e 1

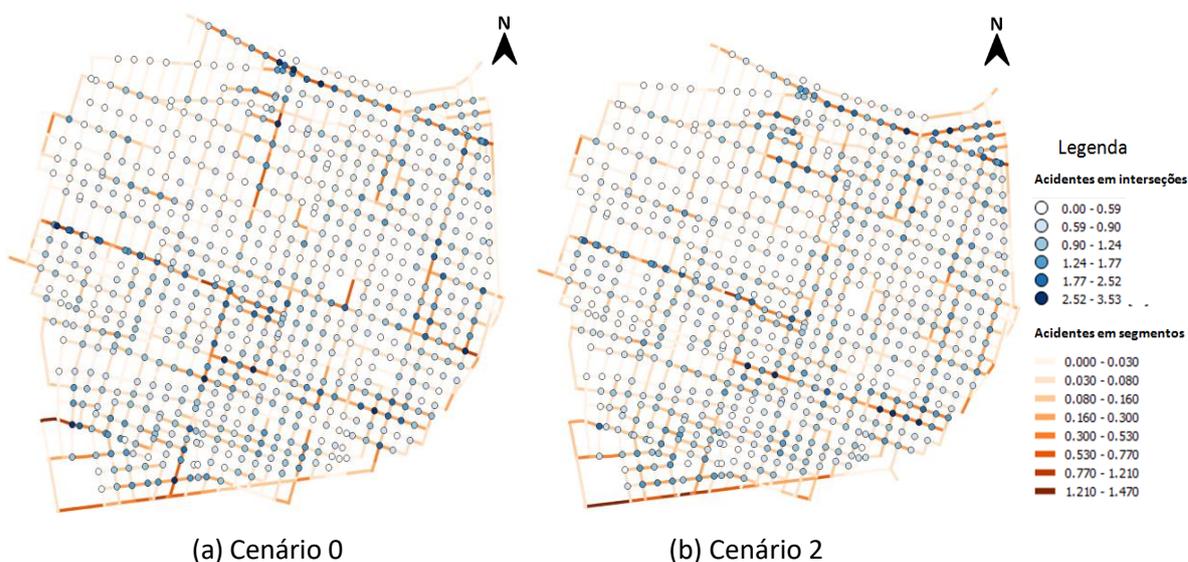


Fonte: O autor.

Pela análise visual dos mapas é possível notar que alguns nós e arcos estão mais escuros no cenário 1, em relação ao cenário 0. Isso indica que, nesses pontos, o risco de acidentes se tornou mais alto, principalmente no lado leste da área, onde estão as zonas que

apresentaram maiores incrementos de acidentes e onde se dá a entrada do tráfego de passagem adicionado à rede.

Figura 29 - Mapa da frequência de acidentes com vítimas para cenários 0 e 2



Fonte: O autor.

No cenário 2, é possível identificar o clareamento de alguns corredores, em relação ao cenário 0, indicando que, com a intervenção, espera-se um número menor de acidentes para aquela entidade da rede específica. A maioria dos arcos que foram modificados nesse cenário apresentaram redução da frequência de acidentes totais e com vítimas. Logo, a alteração no tipo da via (dupla para simples) trouxe resultados positivos na diminuição da frequência de acidentes para os arcos que compõe a via.

Identificou-se também o clareamento de alguns nós da rede e escurecimentos de outros, sugerindo alterações no DSV dessas interseções, principalmente naqueles que foram alterados e que se conectam com os arcos que sofreram alterações de oferta. É importante destacar que, como já comentando na caracterização desse cenário, as variações na frequência de acidentes não estão relacionadas apenas com as alterações na oferta da rede, mas também as alterações na demanda, da qual variou durante a processo de alocação devido à dependência mútua que existe entre a oferta e demanda.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este estudo descreveu a metodologia e apresentou a sua aplicação prática para avaliar o desempenho da segurança viária em redes urbanas de transportes, utilizando modelos de previsão de acidentes (MPA).

Os dados da cidade de Fortaleza (CE) foram utilizados para calibrar e validar os MPA para diferentes entidades da rede. Os modelos desenvolvidos foram aplicados em cenários hipotéticos de uma área dessa cidade para analisar a sensibilidade dessa ferramenta de modelagem, avaliar e comparar o DSV.

A partir desse estudo, foi adquirido um maior conhecimento dessa abordagem, resultando em uma série de conclusões e sugestões que poderão orientar futuros estudos que venham a utilizar este método de avaliação do DSV apresentado.

Nos tópicos a seguir serão apresentadas as principais conclusões e recomendações dessa pesquisa de dissertação.

5.1 Conclusões

O Desempenho da Segurança Viária (DSV) deve ser um fator determinante no processo de tomada de decisão dos gestores públicos. Para tanto, sua avaliação deve ser aplicada como um componente agregado ao planejamento e às operações de tráfego antes de intervenção nos sistemas de transporte. Entretanto, no Brasil, essa abordagem é explorada de forma incipiente devido às limitações nos métodos de estimação do DSV em redes de transportes.

O processo de planejamento de transportes tem estado bastante voltado para a modelagem de cenários e avaliação de alternativas levando em consideração apenas as medidas de desempenho relacionadas à fluidez do sistema. Diante esse contexto, essa pesquisa propôs a aplicação de uma ferramenta de análise da DSV das redes urbanas de transportes, integrada no processo de planejamento e de tomada de decisão.

A revisão apresentada no capítulo 2 apontou que, com a publicação do *Highway Safety Manual* (HSM), houve avanços na aplicação das análises de segurança viária no processo de planejamento tático e operacional dos sistemas de transporte. O manual destaca os MPA como uma ferramenta eficiente e com potencial para a inclusão do DSV no processo de planejamento. Essa abordagem proativa já é frequente em muitos países desenvolvidos.

Para alcançar o principal objetivo deste trabalho, utilizaram-se os MPA como ferramentas de modelagem. Foi definida uma série de etapas, concebidas na forma de objetivos específicos para avaliar o DSV em redes urbanas de transportes.

A primeira etapa consistiu na consolidação de uma base de dados georreferenciados para a cidade de Fortaleza (CE), cidade escolhida para a aplicação prática da metodologia definida. Essa consolidação consistiu no desenvolvimento de bases de dados geográficos de acidentes, características físicas e operacionais da rede viária e tráfego veicular para a estimação do volume médio diário anual (VMDA) e fatores de expansão.

O passo seguinte foi desenvolver os MPA utilizando a base de dados consolidada. Deste modo, foi realizada uma análise exploratória dos dados disponíveis e definida a estrutura dos modelos. Foram desenvolvidos MPA para quatro entidades da rede viária da cidade: interseções semaforizadas, interseções não semaforizadas, segmentos duplos e segmentos simples. Para cada uma dessas entidades foram calibrados e validados modelos para acidentes com vítimas e acidentes totais, totalizando oito MPA desenvolvidos.

A estrutura dos MPA e suas variáveis preditoras indicaram dependência com os dados relacionados à rede em análise (oferta) e o VDMA (demanda), e, conseqüentemente com seu processo de modelagem e com a qualidade do simulador utilizado nele.

Possíveis erros de estimativa do DSV podem estar associados à fatores não controlados do fenômeno e ao efeito da dependência espacial, devido o fato do acidente de trânsito ser um fenômeno espacial. Conseqüentemente, a precisão dos MPA para explicar a relação entre a variável dependente e as variáveis preditoras pode ser comprometida, sendo provavelmente influenciada por fatores espacialmente definidos. Alguns desses fatores podem ter um alto poder explicativo para estimar a frequência de acidentes em determinados locais, mas podem ter um baixo poder explicativo em outros.

Para avaliar a sensibilidade dos modelos e comparar os resultados de suas aplicações em diferentes cenários, foi consolidada uma rede piloto de uma área da cidade de Fortaleza.

A área definida caracteriza-se por concentrar boa parte do controle operacional em tempo real da cidade, principal motivo para a sua escolha. Os dados disponíveis de contagem veicular da área auxiliaram a reconstrução sintética dos fluxos, na hora de pico, em todos os arcos da rede piloto, a partir do método de modelagem sintética implementada no *software* TransCAD.

Apesar da literatura apresentar técnicas mais robustas de modelagem sintética, este trabalho procurou utilizar ferramentas disponíveis no mercado que atendessem às necessidades da pesquisa, tendo em vista que esse processo de reconstrução não era seu principal objetivo. Os fluxos estimados foram expandidos para a definição do VDMA em todas as entidades da rede piloto.

Foram definidos dois cenários hipotéticos para avaliar a sensibilidade desses modelos e comparar seus DSVs. No primeiro cenário, a demanda da rede foi majorada em 10%. Essas viagens foram caracterizadas como de tráfego de passagem no sentido Leste-Oeste da rede. Essa intervenção ocasionou um incremento significativo de 26,8% nos acidentes com vítimas e 23,85% nos acidentes totais. Esse aumento, já esperado, se deu principalmente nas zonas 2, 3, 4 e 7.

No cenário 2, definiram-se alterações na oferta da rede piloto. Foram adicionados 30 semáforos e majoradas as capacidades de 8 corredores, dos quais deixaram de ser sentido duplo e passaram a ser sentido único.

Na análise agregada do grupo de entidades composta pelas 8 ZT da rede, essas alterações não foram estatisticamente significativas, com um incremento de acidentes totais e com vítimas em torno de 1%. Contudo, quando desagregado por zona e grupos de entidades isoladas, as diferenças tornam-se expressivas. A frequência de acidentes aumentou para as zonas 2, 3, 4 e 5, onde a maioria das alterações desse cenário ocorreram, e diminuiu para as zonas 1, 6, 7 e 8.

Essa abordagem possibilitou a análise global do DSV em dois cenários de meio urbano utilizando MPA desagregados. Essa ferramenta permitiu a identificação de zonas mais propensas a alterações na frequência de acidentes de trânsito para as intervenções planejadas. Portanto, apresentou potencial para avaliar cenários, direcionar ações, decisões e proposições de possíveis medidas preventivas para uma rede urbana de transportes em fase de planejamento.

A partir de uma análise mais desagregada, foi possível avaliar quais grupos de entidades da rede sofreram mais impactos com as intervenções definidas. De modo geral, a análise apresentou resultados estatisticamente significativos, comparando a diferença da frequência de acidentes de trânsito entre os cenários.

Para o cenário 1, houve aumento para todos os grupos de entidade da rede. O grupo dos segmentos duplos foi o que apresentou o maior aumento, principalmente nas zonas 2 e 3, com uma significância maior para os acidentes com vítimas.

No cenário 2, a adição de semáforos aumentou a frequência de acidentes nas interseções semaforizadas e diminuiu a de interseções não semaforizadas. A alteração no tipo das vias impactou principalmente nos segmentos de sentidos duplos. Os resultados mostraram a diminuição na sua frequência de acidentes para todas as zonas e, conseqüentemente, o aumento no de segmentos de sentido simples, exceto a zona 8, na qual não teve arcos modificados.

À medida que diminui o nível de agregação, para os diferentes grupos de entidades compostas das zonas os MPA diminuem seu nível de sensibilidade. Esse nível de análise exige certa atenção. Para alguns grupos de entidade, as mudanças na frequência de acidentes não foram estatisticamente significativas. Esse fato pode gerar incertezas na avaliação do desempenho da intervenção em análise para esse nível de desagregação.

Uma análise ainda mais desagregada, à nível de arcos e nós, permite realizar um diagnóstico microscópico do DSV. Isso pode acontecer em paralelo com o desempenho da fluidez, a partir da avaliação dos mapas da frequência de acidentes e de alocação do tráfego. Esse nível permite localizar os pontos da rede de maior risco, sendo, portanto, mais fácil propor alterações ao cenário ou a implementação de medidas preventivas. Entretanto, pela natureza rara e aleatória associada aos acidentes de trânsito, para tal nível de desagregação, os MPA perderam sua sensibilidade, trazendo incertezas para a interpretação dos resultados.

Como decorrência da aplicação da metodologia descrita na cidade de Fortaleza, foi possível aperfeiçoar as metodologias para estimar a frequência de acidentes nas redes viárias urbanas. Trata-se de elemento essencial para a inserção do DSV como um indicador determinante no processo de avaliação de cenários do planejamento dos sistemas de transporte.

Desta forma, com a consideração de medida de desempenho no processo de planejamento, espera-se que seja possível prevenir determinados efeitos negativos gerados pelos acidentes de trânsito, diminuindo custos sociais e econômicos para a sociedade.

A metodologia proposta pode ser aplicada em outras regiões, desde que ajustada para a realidade do local. Os modelos desenvolvidos nessa pesquisa não devem ser aplicados na sua forma original em outras cidades, pois as redes viárias, o desempenho e comportamento do motorista e a frequência e severidade de acidentes podem ter variações significativas. Caso não seja possível calibrar novos modelos, recomenda-se calcular fatores de ajustes regionais.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Ao longo do desenvolvimento do procedimento metodológico para avaliação do DSV utilizando MPA em redes urbanas de transportes, alguns tópicos foram identificados para extensões e desenvolvimentos futuros. Dentre estes, recomenda-se:

- a) investigar uma amostra maior de entidades viárias e considerar um período maior de análise para obtenção de resultados mais robustos;
- b) comparar os resultados com MPA agregado por ZT e investigar qual apresenta maior eficiência na estimação da frequência de acidentes de trânsito;
- c) analisar o DSV considerando o processo de condução de outros tipos de usuários como pedestres, ciclistas e motociclistas.
- d) investigar e/ou propor MPA que representem o processo de interação desses usuários com os condutores de automóveis;
- e) avaliar mais cenários hipotéticos objetivando explorar o impacto de diferentes intervenções no DSV e na sua relação com o desempenho da fluidez de tráfego.
- f) investigar o impacto do erro de estimação da modelagem dos VDMA na estimativa do DSV através da aplicação de MPA;
- g) investigar o caráter espacial nos MPA, visando uma melhor estimativa dos seus efeitos.

REFERÊNCIAS

AASHTO - American Association of State and Highway Transportation Officials, **Highway Safety Manual (HSM)**. Washington, v. 10, 2010.

AGUERO-VALVERDE, J.; JOVANIS, P. P. Spatial Analysis of Fatal and Injury Crashes in Pennsylvania. **Accident Analysis and Prevention**, v. 38, p. 618-625. 2006.

ASTEUF - Associação Técnico-Científica Eng. Paulo de Frontin. Convênio UFC – SCSP/PMF. **Relatório de Modelagem no Apoio à Decisão no Planejamento, Operação e Gestão dos Sistemas de Transporte Público e de Circulação Viária de Fortaleza**. Fortaleza: UFC, 2015.

BERTONCINI, B.V., LOUREIRO, C. F. G., KAWAMOTO, E. Proposta e avaliação de algoritmo de médias sucessivas para reconstrução da matriz origem-destino sintética. **Transportes**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 2, p. 21-29, 2013.

BERTONCINI, B.V. **Uma Proposta de Carregamento Incremental de Fluxos Veiculares para a Estimção de Matriz O-D Sintética. Dissertação**. (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2007.

BPR - BUREAU OF PUBLIC ROADS. **Traffic Assignment Manual**, Washington, 1964.

CALIPER. Caliper Corporation. **Travel Demand Modeling With TransCAD 4.5**. New York, 2002.

CARDOSO, J. **Métodos racionais de apoio à intervenção da engenharia em segurança rodoviária**. Programa de investigação para obtenção do título "Habilitado para o exercício de funções de Coordenação de Investigação Científica". Universidade de Lisboa. Lisboa, 2007.

CASCETTA, E. Estimation of Trip Matrices from Traffic Counts and Survey Data: a Generalized Least Squares Estimator. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 18, p. 289-299. 1984.

CASCETTA, E. E M. N. POSTORINO. Fixed Points Approches to the Estimation of O/D Matrices Using Traffic Counts on Congested Networks. **Transportation Science**, v. 35, n. 2, p. 134-147, 2001.

COSTA, J. O. **Desenvolvimento dum modelo de previsão de acidentes**. Tese (Doutorado em Segurança Viária) - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013.

CUNTO, F. J. C; CASTRO NETO, M. M.; BARREIRA, D. S. Modelos de Previsão de Acidentes de Trânsito em Interseções SemafORIZADAS de Fortaleza. **Transportes**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 55-62, 2012.

FARIA, A. C. **Determinação das coordenadas geográficas de imóveis urbanos: desenvolvimento de Aplicativo Computacional - Abordagem exploratória de geocoding em GIS.** (Dissertação de Mestrado) Programa de Pós-graduação em Geografia da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

FERREIRA, S. M. P. **A Segurança Rodoviária no Processo de Planejamento de Redes de Transporte em Meio Urbano.** 2010. Tese (Doutorado em Vias de Comunicação) - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.

FERREIRA, S.; COUTO, A. Avaliação da Segurança Rodoviária em Fase de Planejamento: Modelo Estatístico de Resposta Qualitativa. **Transportes**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 48-56, 2012.

FRIDSTRØM, L., IFVER, J., INGEBRIGTSEN, S., KULMALA, R., & THOMSEN, L. K. Measuring the contribution of randomness, exposure, weather, and daylight to the variation in road accident counts. **Accident Analysis & Prevention**, v. 27 n. 1, p. 1-20. 1995.

GOMES, M. J. T. L., TORRES, C. A., OLIVEIRA NETO, F. M. e CUNTO, F. J. C. Avaliação da dependência espacial na modelagem do desempenho da segurança viária em zonas de tráfego. In: XXIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2015, Ouro Preto. **Anais...** Fortaleza: ANPET, 2015.

GOMES, M. J. T. L., TORRES, C. A., OLIVEIRA NETO, F. M. e CUNTO, F. J. C. Análise exploratória para a modelagem da frequência de acidentes de trânsito agregados ao nível de zonas de tráfego. **Transportes**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, p. 42-50, 2015.

GREIBE, P. Accident prediction models for urban roads. **Accident Analysis & Prevention**, v. 35, n. 2, p. 273-285, 2003.

HADAYEGHI, A., SHALABY, A.S., PERSAUD, B. Development of planning level transportation safety tools using Geographically Weighted Poisson Regression. **Accident Analysis and Prevention**, v. 42, n. 1, p. 676-688, 2010.

HADAYEGHI, A., SHALABY, A.S., PERSAUD, B. Macro-level accident prediction models for evaluating safety of urban transportation systems. **Transportation Research Record**, Washington, v. 1840, n. 1, p. 87-95, 2003.

HAIR JR., J. F., BLACK, W. C., BABIN, B. J., ANDERSON, R. E., & TATHAM, R. L. **Análise Multivariada de Dados.** 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688p.

HAUER, E. **Observational Before-after Studies in Road Safety.** 1 ed. Toronto: Pergamon, 2002. 289p.

HAUER, E. Statistical Road Safety Modeling. **Transportation Research Record**, Washington, v. 1897, p. 81-87, 2004.

HAUER, E. **The Art of Regression Modeling in Road Safety.** 1 ed. Toronto: Springer, 2015. 231 p.

HAUER, E.; J. BAMFO. Two Tools for Finding What Function Links the Dependent Variable to the Explanatory Variables. In: Conference of the International Co-operation on Theories and Concepts in Traffic Safety, Lund, 1997. **Anais...** Lund:CCTS, 1997.

HAUER, E., JERRY C. N. N.; LOVELL J. Estimation of safety at signalized intersections. **Transportation Research Record**, Washington, v. 1185, p. 48–61, 1988.

HERBEL, S., MEYER, M.D., KLEINER, B., GAINES, D. **A primer on safety performance measures for the transportation planning process**. Washington, Office of Safety, Federal Highway Administration. 2009.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Estimativa dos Custos dos Acidentes de Trânsito no Brasil com Base na Atualização Simplificada das Pesquisas Anteriores do Ipea – Relatório de pesquisa**. Brasília, 2015.13 p.

ITE - Institute of Transportation Engineers. **Transportation Planning Handbook**, 3 ed. Washington: ITE, 2009.

LIMA, M. G., MOREIRA, M. R., GOMES, M. J. T. L., e CUNTO, F. J. C. Consolidação de base de dados georreferenciada para a modelagem espacial do desempenho da segurança viária. In: XXIV ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Ouro Preto, 2015. **Anais...** Ouro Preto: ANPET, 2015.

LORD, D.; PARK, P. Y. J. Investigating the effects of the fixed and varying dispersion parameters of Poisson-gamma models on empirical Bayes estimates. **Accident Analysis & Prevention**, v. 40, n.4, p. 1441-1457. 2008.

LORD, D.; PERSAUD, B. N. Estimating the safety performance of urban road transportation networks. **Accident Analysis & Prevention**, v. 36, n. 4, p. 609-620. 2004.

LORD, D.. **The Prediction of Accidents on Digital Networks: Characteristics and Issues Related to the Application of Accident Prediction Models**. Tese (Doutorado em Transportes) - Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, 2000.

LOVEGROVE, G. R.; SAYED, T. Macro-level collision prediction models for evaluating neighbourhood traffic safety. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Toronto, v. 33, p. 609-621, 2006.

MAHER, M. J.; SUMMERGILL, I. A comprehensive methodology for the fitting of predictive accident models. **Accident Analysis & Prevention**, v. 2, n.3, p. 281-296. 1996.

MAIA, F. V. B. **Calibração e Validação de Modelos de Meso e Microsimulação do Tráfego para a Avaliação de Intervenções Tático-Operacionais na Malha Viária Urbana**. 2007. 104fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

MEYER, M. D.; MILLER, E. J. **Urban transportation planning**, 2 ed. New York: McGraw-Hill series in transportation, 2001. 380 p.

NIELSEN, O. A. A New Method for Estimating Trip Matrices from Traffic Counts. Institute of Roads, Traffic, and Town Planning. **The Technical University of Denmark, Paper**, Denmark, v. 3. p 15-22, 1993.

NODARI, Christine Tessele. **Método de avaliação da segurança potencial de segmentos rodoviários rurais de pista simples**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Transportes) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ONSV - Observatório Nacional da Segurança Viária. **Retrato da Segurança Viária no Brasil – 2014**. Brasília, 2015. 107 p.

ORTÚZAR, J. DE D.; WILLUNSEN, L. G. **Modelling Transport**. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. 607 p.

PAULA, F. S. M. **Proposta de Adaptação da Metodologia do Highway Capacity Manual 2000 para Análise de Vias Arteriais Urbanas em Fortaleza**. 2006. 158fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

QUIN, X.; PARKER, S.; LIU, Y.; GRAETTINGER, A. J.; FORDER, S. Intelligent geocoding system to locate traffic crashes. **Accident Analysis and Prevention**, v. 50, n. 2, p. 1034-1041. 2013

RAKHA, H.; VAN AERDE, M.; BLOOMBERG, L.; HUANG, X. Construction and Calibration of a Large-Scale Microsimulation Model of the Salt Lake Area. **Transportation Research Record**, Washington, v. 1644, p. 93-102, 1998.

REURINGS, M., JANSSEN, T., EENINK, R., ELVIK, R., CARDOSO, J., & STEFAN, C. Accident prediction models and road safety impact assessment: a state-of-the-art. **Institute for Road Safety Research**, Leidschendam, v. 1. p. 1-20, 2005.

SAYED, T.; LEUR, P.; SAWALHA, Z. Evaluating the Insurance Corporation of British Columbia road-safety improvement program. **Transportation Research Record**, Washington, v. 1865, p. 57-63, 2004.

SILVA, R. B. G . **Desenho de redes de transporte público de passageiros: o caso dos serviços internacionais de autocarros**. 2009. Dissertação (Mestrado integrado. Engenharia Civil, Especialização em Planejamento). Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Porto. 2009.

SOBREIRA, L. T. P.; CUNTO, F. J. C. Análise de variações temporais na estimação de acidentes em segmentos arteriais urbanos. **Transportes**, . Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, p. 128-137, 2014.

SONG, B., HUANG, H., ZENG, Q., DENG, Q., & ABDEL-ATY, M. A. Comparative Analysis of Macro and Micro Models for Zonal Crash Prediction. In: TRB 94th Annual Meeting, Washington, 2015. **Anais...** Washington: TRB, 2015

SOUZA, J. Q. **Modelagem microscópica aplicada na avaliação do desempenho da segurança viária em interseções urbanas.** 2012. 110fl. Dissertação - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2012.

TARKO, A. P., INEROWICZ, M., RAMOS, J.; LI, W. Tool with road-level crash prediction for transportation safety planning. **Transportation Research Record**, Washington, v. 2083, n. 1, p. 16-25, 2008.

TARKO, A. P. (2006). Calibration of safety prediction models for planning transportation networks. **Transportation Research Record**, Washington, v. 1950, n. 1, p. 83-90, 2006.

WASHINGTON, S., SCHALKYK, I.V., MEYER, M., DUMBAUGH, E., ZOLL, M., **Incorporating safety into long-range transportation planning.** NCHRP Report n. 546, TRB. National Cooperative Highway Research Program, Washington, 2006.

WHO – World Health Organization. **Global status report on road safety 2015.** Genebra, 2015. 340 p.

WIER, M.; WEINTRAUB, J.; HUMPHREYS, E. H.; SETO, E.; BHATIA, R. An area-level model of vehicle-pedestrian injury collisions with implications for land use and transportation planning. **Accident Analysis & Prevention**, v.4, n.1, p. 137-145. 2009.

WILLUMSEN, L. G. Simplified transport models based on traffic counts. **Transportation**, Washington, v. 10, p. 257-278, 1981.

ZENG, Q.; HUANG, H. Bayesian spatial joint modeling of traffic crashes on an urban road network, **Accident Analysis and Prevention**, v. 67, p. 105–112. 2014.

APÊNDICE A - VALOR MÉDIO E DESVIOS PADRÕES DA FREQUÊNCIA ESTIMADA DE ACIDENTES DE TRÂNSITO DAS ZONAS DE TRÁFEGO PARA OS GRUPOS DE ENTIDADES.

Tabela 15 – Resumo dos valores médios e desvios padrões dos acidentes com vítimas

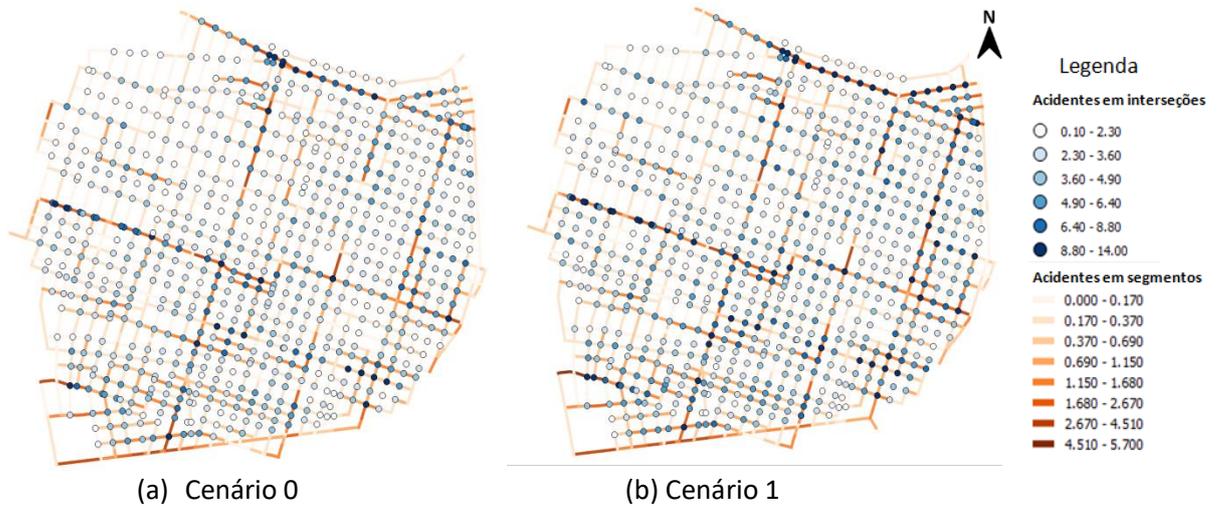
ZONA	Cenário 0				Cenário 1				Cenário 2			
	Interseções		Segmentos		Interseções		Segmentos		Interseções		Segmentos	
	Semaf	Não Semaf	Duplo	Simples	Semaf	Não Semaf	Duplo	Simples	Semaf	Não Semaf	Duplo	Simples
1	8,68 (2,94)	19,03 (4,36)	0,92 (0,96)	2,35 (1,53)	9,9 (3,14)	22,52 (4,74)	1,09 (1,04)	3,05 (1,74)	7,98 (2,82)	18,88 (4,34)	0,35 (0,59)	2,43 (1,55)
2	18,83 (4,33)	100,05 (10)	5,41 (2,32)	5,07 (2,25)	30,05 (5,48)	138,1 (11,75)	12,77 (3,57)	6,97 (2,64)	32,28 (5,68)	104,64 (10,22)	5,17 (2,27)	8,34 (2,88)
3	29,3 (5,41)	82,73 (9,09)	1,02 (1,01)	4,59 (2,14)	39,36 (6,27)	107,72 (10,37)	1,82 (1,34)	6,23 (2,49)	49,33 (7,02)	65,63 (8,1)	1 (1)	7,25 (2,69)
4	9,87 (3,14)	47,87 (6,91)	4,74 (2,17)	4,46 (2,11)	13,21 (3,63)	58,54 (7,65)	7,37 (2,71)	5,59 (2,36)	11,91 (3,45)	47,87 (6,91)	3,06 (1,74)	5,47 (2,33)
5	11,64 (3,41)	115,57 (10,75)	5,82 (2,41)	5,76 (2,4)	13,14 (3,62)	137,86 (11,74)	9 (3)	6,38 (2,52)	16,5 (4,06)	113,33 (10,64)	5,09 (2,25)	7,21 (2,68)
6	10,5 (3,24)	103,68 (10,18)	7,08 (2,66)	4,67 (2,16)	12,25 (3,5)	119,77 (10,94)	10,58 (3,25)	5,49 (2,34)	19,28 (4,39)	82,68 (9,09)	4,72 (2,17)	6,1 (2,46)
7	17,98 (4,24)	56,46 (7,51)	4,28 (2,07)	5,92 (2,43)	23,05 (4,8)	69,08 (8,31)	6,29 (2,5)	7,98 (2,82)	21,79 (4,66)	51,07 (7,14)	2,99 (1,72)	6,75 (2,59)
8	6,26 (2,5)	47,81 (6,91)	2,06 (1,43)	3,52 (1,87)	7,53 (2,74)	56,13 (7,49)	2,87 (1,69)	4,53 (2,12)	4,83 (2,19)	41,03 (6,4)	1,54 (1,24)	2,78 (1,66)
Total	113,09 (10,63)	573,24 (23,94)	31,37 (5,6)	36,38 (6,03)	148,49 (12,18)	709,72 (26,64)	51,79 (7,19)	46,22 (6,79)	163,9 (12,8)	525,13 (22,91)	23,92 (4,89)	46,33 (6,8)
	754,1 (27,46)				956,22 (30,93)				759,28 (27,55)			

Tabela 16 – Resumo dos valores médios e desvios padrões dos acidentes totais

ZONA	Cenário 0				Cenário 1				Cenário 2			
	Interseções		Segmentos		Interseções		Segmentos		Interseções		Segmentos	
	Semaf	Não Semaf	Duplo	Simples	Semaf	Não Semaf	Duplo	Simples	Semaf	Não Semaf	Duplo	Simples
1	51,22 (7,15)	71,13 (8,43)	5,31 (2,3)	10,78 (3,28)	55,68 (7,46)	84,68 (9,2)	5,84 (2,41)	12,3 (3,5)	47,93 (6,92)	70,57 (8,4)	2,93 (1,71)	10,39 (3,22)
2	106,29 (10,3)	373,92 (19,33)	35,11 (5,92)	22,33 (4,72)	146,14 (12,08)	522,38 (22,85)	58,89 (7,67)	26,36 (5,13)	173,33 (13,16)	394,62 (19,86)	30,55 (5,52)	29,32 (5,41)
3	173,64 (13,17)	309,48 (17,59)	8,56 (2,92)	19,39 (4,4)	211,15 (14,53)	407,03 (20,17)	12,1 (3,47)	22,88 (4,78)	275,1 (16,58)	215,9 (14,69)	8,05 (2,83)	20,82 (4,56)
4	56,84 (7,53)	179,02 (13,38)	32,54 (5,7)	17,78 (4,21)	69,08 (8,31)	220,49 (14,84)	42,25 (6,5)	20,46 (4,52)	69,19 (8,31)	179,68 (13,4)	20,22 (4,49)	21,19 (4,6)
5	58,08 (7,62)	435,21 (20,86)	43,51 (6,59)	19,73 (4,44)	63,47 (7,96)	522,18 (22,85)	56,88 (7,54)	21,6 (4,64)	85,9 (9,26)	428,36 (20,69)	38,48 (6,2)	22,48 (4,74)
6	59,12 (7,68)	389,63 (19,73)	55,4 (7,44)	20 (4,47)	66,15 (8,13)	452,85 (21,28)	67,76 (8,23)	21,45 (4,63)	107,05 (10,34)	310,03 (17,6)	41,08 (6,4)	23,46 (4,84)
7	99,32 (9,96)	210,54 (14,51)	25,98 (5,09)	26,71 (5,16)	117,15 (10,82)	259,67 (16,11)	31,7 (5,63)	30,53 (5,52)	121,44 (11,01)	190,63 (13,8)	18,36 (4,28)	28,81 (5,36)
8	34,41 (5,86)	179,41 (13,39)	14,1 (3,75)	15,8 (3,97)	38,95 (6,24)	212,06 (14,56)	16,79 (4,09)	17,57 (4,19)	28,61 (5,34)	152,88 (12,36)	12,21 (3,49)	13,77 (3,71)
Total	638,95 (25,27)	2148,37 (46,35)	220,54 (14,85)	152,56 (12,35)	767,77 (27,7)	2681,34 (51,78)	292,21 (17,09)	173,15 (13,15)	908,55 (30,14)	1942,67 (44,07)	171,88 (13,11)	170,24 (13,04)
	3160,44 (56,22)				3914,47 (62,56)				3193,34 (56,51)			

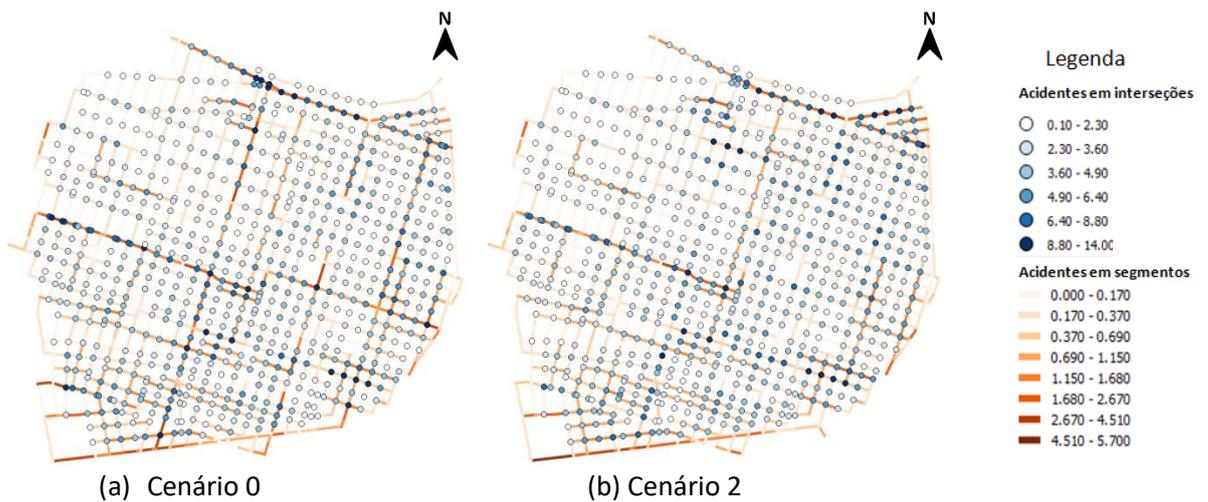
APÊNDICE B - MAPAS DA FREQUÊNCIA DE ACIDENTES TOTAIS ESTIMADOS PELOS MPA

Figura 30 - Mapa da frequência de acidentes totais para cenários 0 e 1



Fonte: O autor.

Figura 31 - Mapa da frequência de acidentes totais para cenários 0 e 2



Fonte: O autor.

ANEXO A - FATORES DE EXPANSÃO E ESTIMAÇÃO DO VOLUME DIÁRIO MÉDIO ANUAL (VDMA)

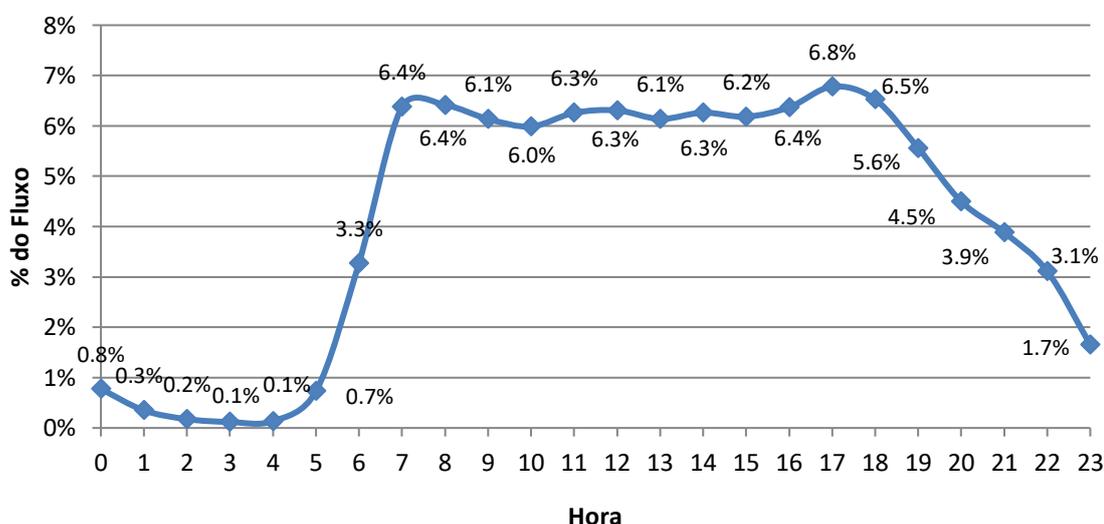
A presente pesquisa se apoiou nos resultados apresentados no Relatório de Modelagem no Apoio à Decisão no Planejamento, Operação e Gestão dos Sistemas de Transporte Público e de Circulação Viária de Fortaleza (ASTEF/UFC, 2015), desenvolvida pela Universidade Federal do Ceará em parceria com a Prefeitura de Fortaleza (PMF).

Nesse relatório foi desenvolvida a consolidação de um banco de dados de volumes de tráfego que integrasse as contagens contínuas de laços detectores do CTAFOR. Esse banco, além de reunir todas essas informações, verifica a qualidade dos dados, através do reconhecimento de valores errôneos e/ou perdidos, a partir de rotinas que identifiquem, controlem e filtrem essas possíveis inconsistências.

O banco de dados permitiu a estimação do Volume Diário Médio Anual (VDMA) e fatores de expansão (horário, diário e mensal) para os segmentos de vias com contagens disponíveis. Foram utilizadas as informações de 367 laços detectores, referentes ao ano de 2013, para a estimação do perfil do fluxo bem como dos fatores de expansão.

O comportamento da demanda ao longo do dia é um aspecto importante para identificação das horas em que a rede viária é mais solicitada. Foram utilizadas as contagens do mês de outubro, considerando somente os dias úteis, para a estimação do percentual do fluxo veicular ao longo do dia. A Figura 32 apresenta os resultados do exposto.

Figura 32 - Distribuição percentual do fluxo veicular por faixa horária – CTAFOR.



Fonte: ASTEF/UFC, 2015

A partir dos percentuais dos fluxos apresentados é possível estimar o Volume diário (VD) para qualquer volume horário (VH) de um dia útil, como mostra a Equação 13.

$$VD = \frac{VH}{\% \text{ do Fluxo}} \quad (13)$$

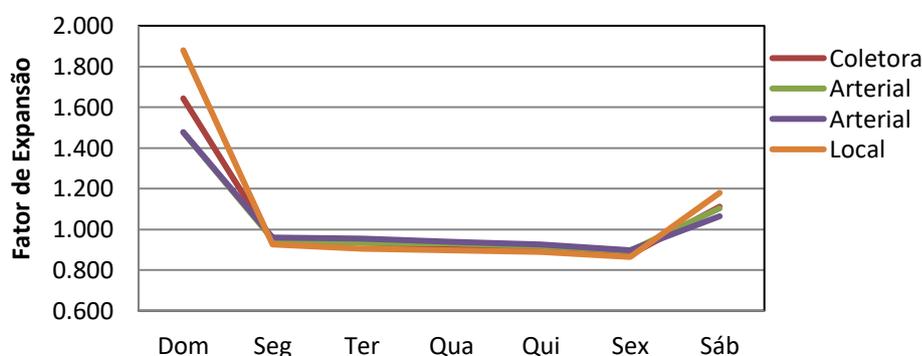
As informações disponíveis após a consolidação dos registros dos equipamentos do CTAFOR foram utilizadas para estimar fatores de expansão diários e fatores de expansão mensais. Utilizaram-se equipamentos que apresentaram pelo menos uma semana completa de informação sobre o fluxo veicular para os meses de análise, os quais corresponderam a 367 laços detectores do CTAFOR. A Tabela 17 apresenta os valores médios dos fatores de expansão diários para os equipamentos do CTAFOR. O gráfico da Figura 33 apresenta a visualização dos fatores médios de expansão ao longo da semana.

Tabela 17 - Valores médios dos fatores de expansão diários por classe da via - CTAFOR

Classe Funcional	# Equip.	Dom	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sáb
Expressa	31	1,15	0,996	1,007	0,992	0,989	0,938	0,959
Arterial	90	1,36	0,97	0,971	0,954	0,945	0,913	1,020
Coletora	6	1,29	0,974	0,978	0,964	0,965	0,919	0,990
Local	10	1,47	0,953	0,952	0,943	0,938	0,897	1,064
Média		1,32	0,97	0,98	0,96	0,96	0,92	1,01

Fonte: ASTEF/UFC, 2015

Figura 33 - Fatores de expansão diários – CTAFOR



Fonte: ASTEF/UFC, 2015

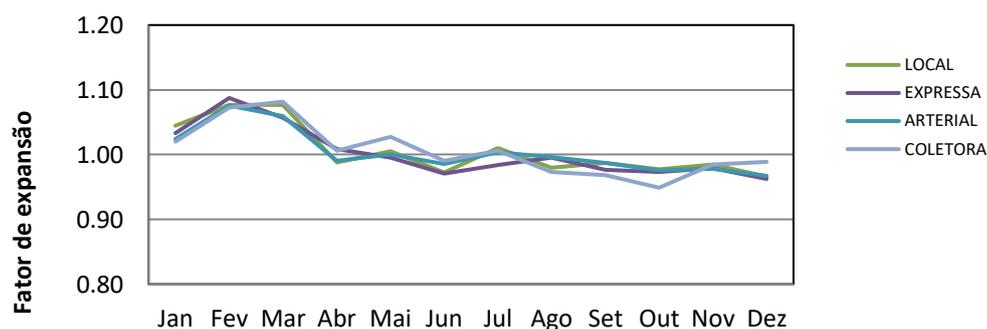
A Tabela 18 apresenta os valores médios dos fatores de expansão mensais para os equipamentos do CTAFOR. O gráfico da Figura 34 ilustra a visualização dos fatores médios de expansão ao longo dos meses.

Tabela 18 - Valores médios dos fatores de expansão mensais por classe da via - CTAFOR

Classe Funcional	Equip.	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
EXPRESSA	4	1,033	1,087	1,057	1,008	0,996	0,971	0,984	0,996	0,977	0,973	0,979	0,962
ARTERIAL	238	1,024	1,076	1,059	0,990	1,000	0,985	1,003	0,996	0,987	0,976	0,978	0,967
COLETORA	29	1,020	1,073	1,082	1,006	1,028	0,991	1,006	0,973	0,968	0,949	0,985	0,988
LOCAL	96	1,044	1,077	1,077	0,988	1,005	0,972	1,010	0,980	0,987	0,977	0,984	0,966
Média		1,030	1,078	1,069	0,998	1,007	0,980	1,001	0,986	0,980	0,969	0,982	0,971

Fonte: ASTEF/UFC, 2015

Figura 34 - Fatores de expansão mensais – CTAFOR



Fonte: ASTEF/UFC, 2015

Aplicando os fatores apresentados é possível estimar o VDMA nos casos em que se dispõe somente de contagens diárias isoladas. Essa estimativa pode ser calculada a partir da Equação 14.

$$VDMA_{estimado} = VD * FED_d * FEM_m \quad (14)$$

Em que:

VD Volume diário;

FED_d Fator de Expansão Diário;

FEM_m Fator de Expansão Mensal

ANEXO B - METODOLOGIA DE CLASSIFICAÇÃO DAS VIAS DA REDE PILOTO

O Anexo B apresenta os critérios propostos para a classificação das vias desenvolvida por Maia (2007) a partir da metodologia de PAULA (2006) adaptada, bem como os valores de cada critério, e ainda, definição dos limites para as quatro classes determinadas no método de classificação. Apresentados nas Tabelas 19 e 20.

Tabela 19 - Critérios propostos para a classificação das vias

Critérios	Valores
Tipo de seção transversal	<ul style="list-style-type: none"> • Pista dupla / Múltiplas faixas por sentido / Sentido duplo • Pista dupla ou simples / Duas faixas por sentido / Sentido duplo • Pistas simples / Duas faixas / Sentido único
Adensamento do uso do solo do entorno	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo – Uso residencial e/ou comercial / Edificações de baixo gabarito • Médio – Uso residencial e/ou comercial / Edificações de alto gabarito • Elevado – Uso comercial / Edificações de alto gabarito
Manobras de estacionamento	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa – Pouco ou nenhum estacionamento • Médio – Com a maioria dos estacionamentos em recuo • Elevado – Com a maioria dos estacionamentos ao longo da via
Densidade semaforica	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa (0 a 1 semáforos/km) • Média (2 a 3 semáforos/km) • Elevada (4 ou mais semáforos/km)

Fonte: Maia (2007)

Tabela 20 – Pontuação dos critérios para determinação das classes

Pontos	3	2	1	
Parâmetro I - Seção 1 ou 2 Sentidos 3 Faixas	2 Sentidos 2 Faixas	1 Sentido 1 ou 2 Faixas		
Parâmetro II - Estacionamento Alta	Média	Baixa		Até 4 pontos Tipo 1
Parâmetro III - Semáforos 4 ou mais	2 ou 3	0 ou 1		De 5 a 7 pontos Tipo 2
Parâmetro IV - Uso do solo Alto	Médio	Baixo		De 8 a 9 pontos Tipo 3
				De 10 a 12 pontos Tipo 4

Fonte: Maia (2007)

ANEXO C - PARÂMETROS E VARIÁVEIS PARA ESTIMAÇÃO DO FLUXO DA REDE FORTALEZA

O anexo C apresenta os resultados da calibração, desenvolvido por Maia (2007), dos parâmetros e variáveis necessárias para o processo de estimação dos fluxos. A rede de calibração utilizada corresponde a uma rede composta por 22 arcos e 15 nós, da qual se encontra dentro da área selecionada para o estudo dessa dissertação.

A capacidade de todos os arcos foi coletada em campo e o tempo de viagem no fluxo livre foi calculado através do comprimento dos arcos e da velocidade de fluxo livre.

Os parâmetros alfa e beta foram estimados a partir de um método iterativo a fim de igualar o valor do tempo de viagem em todos os arcos da rede (variável desempenho). Os valores encontrados para os parâmetros de calibração reproduziram com grande precisão os tempos de viagem observados nos arcos.

Na Tabela 21 podem ser visualizados os parâmetros médios estimados, no TransCAD, para cada grupo de vias classificadas seguindo o método do Anexo B.

Tabela 21 - Variáveis e parâmetros adotados para os grupos de vias no TransCAD

	Velocidade de Fluxo Livre	Capacidade	α	β
GRUPO 1				
JOSÉ LOURENÇO	40	1250	5,98	1,21
MOSENHOR BRUNO	40	1350	6,44	1,49
MÉDIA	40	1300	6,21	1,35
GRUPO 2				
CARLOS VASCONCELOS	40	1800	8,7	3,23
MÉDIA	40	1800	8,70	3,23
GRUPO 3				
COSTA BARROS	60	1900	6,83	0,45
SANTOS DUMONT	60	1750	7,48	0,22
PEREIRA FILGUEIRAS	60	1600	7,76	0,76
MÉDIA	60	1750	7,36	0,48
GRUPO 4				
BARÃO DE STUDART	60	1650	6,22	0,78
RUI BARBOSA	60	1350	5,2	0,14
MÉDIA	60	1500	5,71	0,46

Fonte: Maia (2007)

Assim, com a constatação da similaridade entre os valores dos parâmetros das vias de cada agrupamento, foi feita a média dos valores dos parâmetros das vias e obteve-se o valor representativo de cada grupo.