

Guilherme Arpini Balvedi

**MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO APLICADA NA
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA
EM ROTATÓRIAS: UM ESTUDO DE CASO NA RÓTULA DA
UFSC/TRINDADE.**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós Graduação em Engenharia de
Transportes e Gestão Territorial da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
mestre em Engenharia de Transportes e
Gestão Territorial.
Orientador: Prof. Dr^a. Lenise Grando
Goldner.

Florianópolis
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Balvedi, Guilherme Arpini Microsimulação de tráfego aplicada na avaliação do desempenho da segurança viária em rotatórias: um estudo de caso na rótula da UFSC/Trindade / Guilherme Arpini Balvedi ; orientadora, Lenise Grando Goldner, 2018. 136 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, Florianópolis, 2018. Inclui referências. 1. Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. 2. Microsimulação de tráfego . 3. SSAM. 4. Indicadores proxy de segurança viária. 5. Rotatórias. I. Goldner, Lenise Grando . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. III. Título.

Guilherme Arpini Balvedi

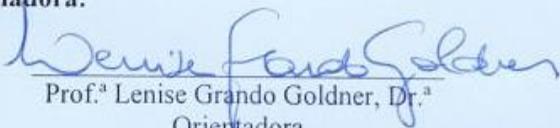
**MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO APLICADA NA
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA
EM ROTATÓRIAS: UM ESTUDO DE CASO NA RÓTULA DA
UFSC/TRINDADE.**

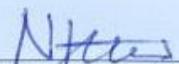
Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de
"Mestre em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial" e aprovada
em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de
Transportes e Gestão Territorial – PPGTG.

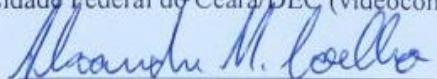
Florianópolis, 23 de fevereiro de 2018.

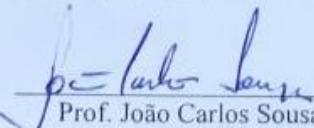

Prof. Norberto Hochheim, Dr.
Coordenador do PPGTG

Banca Examinadora:


Prof.ª Lenise Grando Goldner, Dr.ª
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina/PPGTG


p/ Prof. Flávio José Craveiro Cunto, Dr.
Universidade Federal do Ceará/DEC (videoconferência)


Prof. Alexandre Hering Coelho, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina/PPGTG


Prof. João Carlos Sousa, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina/PPGTG

Este trabalho é dedicado à Carolina que
será recebida em julho.

RESUMO

O contínuo aperfeiçoamento dos simuladores microscópicos de tráfego em conjunto com a intenção pelo desenvolvimento de técnicas capazes de proporcionar diagnósticos prévios de segurança, vem resultando na crescente utilização da simulação de tráfego aplicada na avaliação da segurança de interseções e demais componentes do sistema de tráfego. A fim de contribuir com a utilização da microssimulação de tráfego aplicada na avaliação de segurança de rotatórias, este trabalho utilizou o simulador de tráfego VISSIM para a modelagem de um objeto de estudo real e para a modelagem de uma alternativa de projeto para esse cenário, a luz dos conceitos da turbo rotatória. O cenário existente foi modelado com a utilização de um comportamento de condução que permite a ultrapassagem dentro da mesma faixa em função da largura lateral disponível e da velocidade dos veículos simulados. Foram construídas duas versões para o cenário existente, as quais utilizaram dados reais de um objeto de estudo, coletados durante o pico da tarde. Duas versões para a modelagem do cenário existente foram propostas, onde foram variados os parâmetros responsáveis pelo comportamento lateral, a fim de investigar como estes parâmetros exercem influência na análise de segurança. A análise de segurança foi feita com a utilização do software SSAM para derivação dos indicadores *proxy* sintéticos de segurança dos modelos de simulação. Duas análises são realizadas onde alterou-se o valor limite do indicador PET para a classificação de um evento como conflito (5,0s e 1,5s). Os indicadores obtidos indicam que o cenário alternativo proposto (turbo rotatória) é mais seguro e gera menos atrasos.

Palavras-chave: Segurança Viária. Microssimulação de tráfego. Simulação microscópica. Rotatória. Turbo Rotatória. VISSIM. SSAM. Indicadores *proxy* de segurança.

ABSTRACT

The continuous improvement of microscopic traffic simulators in addition with the intention to develop techniques capable of providing prior safety diagnoses has resulted in the increasing use of traffic simulation applied in the safety assessment of intersections and other components of the traffic system. In order to contribute with the use of traffic simulation applied in the assessment of roundabouts safety, this work uses the VISSIM traffic simulator to model a real study object and to model a design alternative for this scenario, following the turbo roundabout concepts. The existing scenario was modeled using a driving behavior that allows overtaking within the same depending on the available lateral width and the speed of the simulated vehicles. Two versions were constructed for the existing scenario, which used real data from a study object, collected during the afternoon peak. Two versions for the modeling of the existing scenario were proposed, where the parameters responsible for the lateral behavior were varied, in order to investigate how these parameters influence the safety analysis. The safety analysis is performed using the SSAM software for derivation of the surrogate safety measures from the simulation models. Two analyzes are performed where the threshold value of the PET measure is changed for the classification of an event as a conflict (5.0s and 1.5s). The obtained results indicates that the proposed alternative scenario (turbo roundabout) is safer and generates less delay.

Keywords: Road safety. Microscopic traffic simulation. Roundabout. Turbo roundabout. SSAM. Surrogate safety measures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da frota brasileira entre os anos 2000 e 2015.	21
Figura 2 - Estatísticas nacionais de mortos em acidentes de trânsito. ...	22
Figura 3 – Estatísticas nacionais de feridos graves em acidentes de trânsito.....	22
Figura 4 – Pirâmide de segurança (<i>continuum</i> da segurança viária).	33
Figura 5 - Curva empírica do TTC.....	34
Figura 6 - Gráfico para estimação da severidade dos conflitos.	36
Figura 7 - Conceito do PET.....	36
Figura 8 - Taxa de frenagem requerida para diferentes velocidades.	38
Figura 9 - Diagrama dos módulos utilizados nas análise de vídeo.....	39
Figura 10- Mini rótulas.	42
Figura 11 - Rótula simples.	43
Figura 12 - Rótula de múltiplas faixas.	43
Figura 13 - Pontos de conflitos de uma interseção em cruz e de uma rótula simples.....	45
Figura 14 - Pontos de conflitos para pedestres encontrados em uma interseção em cruz e numa rótula simples.	46
Figura 15 - Comportamento equivocado comum nas rótulas duplas. ...	46
Figura 16 - Conflitos comuns em rotatórias de duas faixas com entradas e saídas simples.	48
Figura 17 - Pontos de conflitos em rótulas duplas com entradas e saídas duplas.	48
Figura 18 - Turbo rotatória.....	50
Figura 19 - Tipos de turbo rotatórias de quatro ramos segundo fluxo dominante.....	50
Figura 20 - Elementos físicos divisores das faixas circulares	51
Figura 21 - Sinalização da turbo rotatória.	51
Figura 22 - Pontos de conflitos em uma rótula normal de duas vias e em uma turbo-rotatória.....	52
Figura 23 - Rótula dupla espiral.	53
Figura 24 - Rótula compacta de semi-duas faixas.....	53
Figura 25 - Rótula com <i>slip lane</i>	54
Figura 26 - Modelo de perseguição veicular psico-físico de Wiedemann (1974).....	61
Figura 27 - Fluxo de saturação em função dos parâmetros de calibração	62
Figura 28 - Ilustração dos processos de troca de faixa.....	63
Figura 29 - Regras de prioridade para rótula dupla.....	64
Figura 30 – Brecha frontal (a) e brecha traseira (b)	66

Figura 31 - Atributo fator distância de segurança.....	66
Figura 32 – Limite angular para cada tipo de conflito.....	71
Figura 33 – Codificação das rótulas e turbo-rótulas estudadas por Bernardo.....	73
Figura 34 – Rótula estudada por Al-Ghandour et al. (2011).....	74
Figura 35 - Fluxograma das etapas do método.....	82
Figura 36 - Ilustração do processo de ultrapassagem de motocicletas durante o sinal vermelho.....	88
Figura 37 – Imagem aérea do local de estudo.....	89
Figura 38 - Tentativas de melhoramento do objeto de estudo.....	90
Figura 39 – Fluxo coletado na rotatória pelo PLAMUS (por hora).....	91
Figura 40 – Fluxo coletado na rotatória pelo PLAMUS (intervalo de 15 minutos).....	91
Figura 41 - Posição dos observadores na pesquisa de campo.....	92
Figura 42 - Volume coletado para rotatória na pesquisa de campo (por hora).....	93
Figura 43 - Volume coletado para a rotatória na pesquisa de campo (intervalos de 15 minutos).....	94
Figura 44 - Matriz dos movimentos divergentes do objeto de estudo...	94
Figura 45 - Comportamento recorrente nas travessias de pedestres.	96
Figura 46 - Sobreposição de veículos em conectores adjacentes.....	98
Figura 47 – Distribuições de velocidades utilizadas.....	100
Figura 48 - Posição dos marcadores de velocidade e das áreas de velocidade reduzidas.....	101
Figura 49- Exemplo da importância do fator distância de segurança.	105
Figura 50 - Modelagem do cenário alternativo.....	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempos de viagens coletados.....	97
Tabela 2 - Largura dos <i>links</i> inseridos no simulador para o cenário existente.....	99
Tabela 3 - Demanda inserida no simulador.....	99
Tabela 4 - Valores dos atributos do comportamento lateral adotados.	104
Tabela 5 - Dados de fluxo de tráfego do cenário existente (v2).....	106
Tabela 6 - Desempenho operacional do modelo do cenário existente (v2).....	107
Tabela 7 - Dados de tempo de viagem para o cenário existente (v2)..	107
Tabela 8 – Frequência dos conflitos para o cenário A (v.1) TTC e PET >0,05 – 1ª análise.	108
Tabela 9 - Indicadores dos conflitos para o cenário A (v.1) TTC e PET >0,05 – 1ª análise.	109
Tabela 10 – Frequência dos conflitos para o cenário A (v.2) TTC e PET >0,05 – 1ª análise.	109
Tabela 11 - Indicadores dos conflitos para o cenário A (v.2) TTC e PET >0,05 – 1ª análise.	110
Tabela 12 - Frequência dos conflitos para o cenário A (v.1) TTC e PET >0,05 – 2ª análise.	111
Tabela 13 - Indicadores dos conflitos para o cenário A (v.1) TTC e PET >0,05 – 2ª análise.	111
Tabela 14 – Frequência dos conflitos para o cenário A (v.2) TTC e PET >0,05 – 2ª análise.	112
Tabela 15 - Indicadores dos conflitos para o cenário A (v.2) TTC e PET >0,05 – 2ª análise.	112
Tabela 16 - Resumo da frequência dos conflitos e colisões simuladas para o cenário A.	113
Tabela 17 - Análise estatística dos dados de conflitos do cenário A (v1) e com os dados do cenário A (v2).....	114
Tabela 18 - Largura dos links inseridos no simulador para o cenário alternativo.....	116
Tabela 19 - Dados de fluxo de tráfego do cenário alternativo.....	117
Tabela 20 - Desempenho operacional do modelo do cenário alternativo.....	118
Tabela 21 - Dados de tempo de viagem para o cenário alternativo em segundos.....	118
Tabela 22 - Frequência dos conflitos para o cenário B (v. única) TTC e PET >0,05.	119

Tabela 23 - Indicadores dos conflitos para o cenário B (v. única) TTC e PET >0,05 – 2ª análise.	119
Tabela 24 - Frequência dos conflitos para o cenário B (v. única) TTC e PET >0,05 – 2ª análise.	120
Tabela 25 - Indicadores dos conflitos para o cenário B (v. única) TTC e PET >0,05 – 2ª análise.	120
Tabela 26 - Resumo da frequência de veículos em conflitos e colisões simuladas para o cenário B.	121
Tabela 27 - Análise estatística dos dados de conflitos do Cenário B com os dados do Cenário A (v1).....	121
Tabela 28 - Análise estatística dos dados de conflitos do cenário B com os dados do Cenário A (v2).....	122
Tabela 29 - Comparação das filas médias dos modelos.....	123
Tabela 30 - Comparação das filas máximas dos modelos.....	124
Tabela 31 - Comparação dos atrasos dos modelos.....	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DATASUS - Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde do Brasil

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura dos Transportes

DPVAT - Seguro de Danos Pessoais Causados por Veículos Automotores de Vias Terrestre

DR – *Deceleration rate*

DSV – Desempenho da segurança viária

FHWA – *Federal Highway Administration*

GSV – Gerenciamento da segurança viária

MPA – Modelos de previsão de acidentes

PET – *Post encroachment time*

PLAMUS – Plano de mobilidade urbana sustentável da Grande Florianópolis

RSA – *Reduced speed area*

SSAM – *Surrogate Safety Assessment Model*

SV – Segurança viária

TACT – Técnicas de análise de conflitos de tráfego

TCT – Técnicas de conflito de tráfego

TTA – *Time to accident*

TTC – *Time to collision*

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

VMDA - Volume médio diário anual

W74 – Wiedemann 74

W99 – Wiedemann 99

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	21
1.2	OBJETIVOS	24
1.2.1	Objetivo geral	24
1.2.2	Objetivos específicos	24
1.3	JUSTIFICATIVA.....	24
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	25
2	SEGURANÇA VIÁRIA E ROTATÓRIAS.....	27
2.1	GERENCIAMENTO E ANÁLISE DA SEGURANÇA VIÁRIA.....	27
2.1.1	Modelos de previsão de acidentes e acidentes como medida de desempenho de segurança	28
2.1.2	Técnica de análise de conflitos de tráfego (TACT)	30
2.1.2.1	Indicadores <i>proxy</i> de segurança viária	33
2.1.2.2	Avanços nas técnicas de conflitos de tráfego.....	39
2.2	ROTATÓRIAS	40
2.2.1	Classificação das rótulas modernas	42
2.2.2	Benefícios da utilização de rotatórias	43
2.2.3	Problemas de operação	46
2.2.4	Turbo rotatórias.....	49
2.2.5	Rotatórias compactas de semi duas faixas	53
3	MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO APLICADA A SEGURANÇA.....	55
3.1	CARACTERÍSTICAS DA MODELAGEM.....	55
3.1.1	Algoritmo de perseguição veicular	59
3.1.2	Algoritmo de troca de faixas	63
3.1.3	Processo de Aceitação de brechas	63
3.2	<i>SURROGATE SAFETY ASSESSMENT MODEL (SSAM)....</i>	<i>67</i>

3.2.1	Indicadores <i>proxy</i> computados pelo SSAM	68
3.2.2	Deteção e classificação dos conflitos	70
3.2.3	SSAM na avaliação de rotatórias	72
3.3	ABORDAGENS, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	77
4	MÉTODO	81
4.1	FLUXOGRAMA DAS ETAPAS	81
4.2	DESCRIÇÃO DAS ETAPAS	82
4.2.1	Definição do objeto de estudo	82
4.2.2	Estudo do objeto.....	83
4.2.3	Modelagem do cenário existente.....	84
4.2.4	Modelagem do cenário alternativo	86
4.2.5	Comparação dos resultados	86
4.3	LIMITAÇÕES DO MÉTODO	87
5	ESTUDO DE CASO	89
5.1	DEFINIÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO	89
5.2	ESTUDO DO OBJETO	90
5.2.1	Fluxo de tráfego	90
5.2.2	Características geométricas	95
5.2.3	Tempos de viagens	96
5.3	MODELAGEM DO CENÁRIO EXISTENTE.....	97
5.3.1	Construção da interseção	97
5.3.2	Comportamento de condução	101
5.3.2.1	Perseguição veicular	102
5.3.2.2	Comportamento lateral	102
5.3.3	Áreas de conflitos	104
5.3.4	Resultados do cenário existente	106
5.3.4.1	Resultados do desempenho operacional	106
5.3.4.2	Resultados dos dados de conflitos simulados	108
5.4	MODELAGEM DO CENÁRIO ALTERNATIVO	114

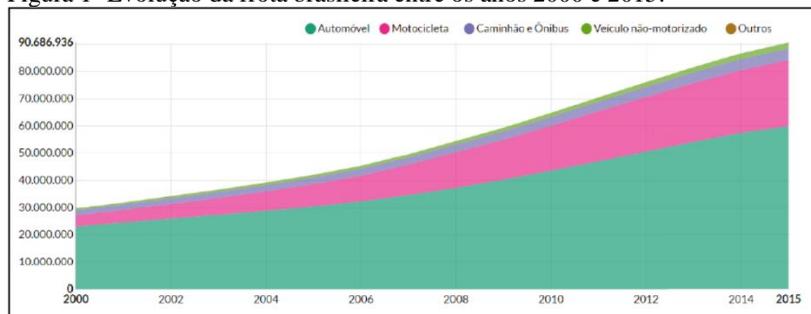
5.4.1	Construção da interseção	115
5.4.2	Resultados do cenário alternativo.....	116
5.4.2.1	Resultados do desempenho operacional.....	116
5.4.2.2	Resultado dos dados de conflitos simulados	119
5.5	ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	121
5.5.1	Desempenho de segurança.....	121
5.5.2	Desempenho operacional.....	122
6	CONCLUSÕES.....	125
6.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..	128
	REFERÊNCIAS	131

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os problemas de tráfegos são comuns em diversas cidades do mundo, sejam estes relacionados à segurança ou a fluidez. No Brasil isso pode ser percebido cada vez mais nitidamente, principalmente nas grandes cidades. Muitos são os fatores que estão relacionados com essa questão, entre os quais pode-se citar o aumento da frota nacional em conjunto com a precariedade do transporte coletivo e a saturação da infraestrutura ofertada, que não foi capaz de acompanhar o mesmo ritmo de crescimento. A Figura 1 traz números sobre a evolução da frota brasileira. Pode-se perceber um aumento próximo a 200% na quantidade de veículos nas vias em 15 anos, sendo as motocicletas a categoria que mais cresceu proporcionalmente (provavelmente devido a facilidade em ser adquirida e na agilidade que ela oferece).

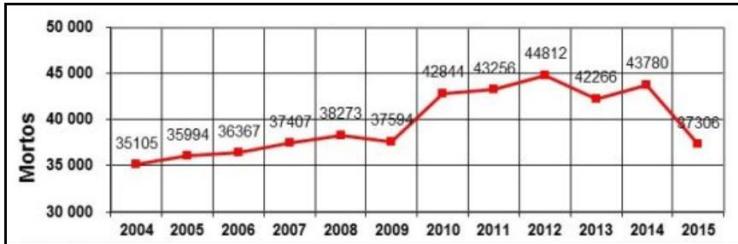
Figura 1- Evolução da frota brasileira entre os anos 2000 e 2015.



Fonte: Observatório nacional de segurança viária (acesso em 31 de maio de 2016).

Em termos de vítimas de acidentes de trânsito que perderam a vida, a Figura 2, traz a evolução dos números nacionais de 2004 a 2015, com base em informações divulgadas pelo Ministério da Saúde. A Figura 3 traz o número de feridos graves em acidentes de trânsito de 2005 a 2017 com base nas informações de internações divulgadas pelo Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde do Brasil (DATASUS) e pelo número de apólices por invalidez pagas divulgadas pelo Seguro de Danos Pessoais Causados por Veículos Automotores de Vias Terrestre (DPVAT).

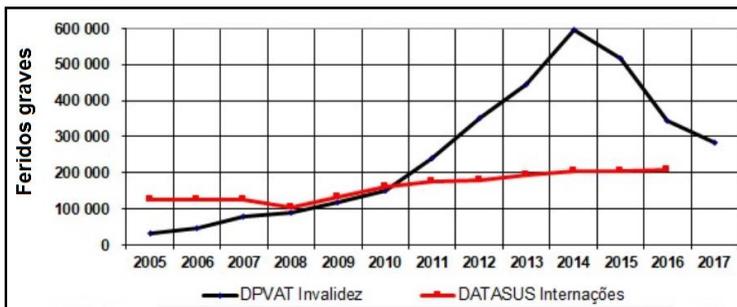
Figura 2 - Estatísticas nacionais de mortos em acidentes de trânsito.



Fonte: Ministério da Saúde, disponível em: http://www.vias-seguras.com/os_acidentes/estatisticas/estatisticas_nacionais. Acesso em 9 de fevereiro de 2018.

Em relação ao número de mortos, pode-se notar que o crescimento não foi tão expressivo em comparação ao número de feridos graves (que vem crescendo exponencialmente no período), inclusive apresentando uma redução no último levantamento. Entretanto segundo WHO (2013), o Brasil é o quarto país em números absolutos de mortos no trânsito, atrás apenas de China, Índia e Nigéria, o que faz com que a acidentalidade no trânsito ocupe uma posição de destaque em relação saúde pública nacional.

Figura 3 – Estatísticas nacionais de feridos graves em acidentes de trânsito.



Fonte: DPVAT e DATASUS, disponível em: http://www.vias-seguras.com/os_acidentes/estatisticas/estatisticas_nacionais. Acesso em 9 de fevereiro de 2018.

Em meio a esse contexto, a segurança viária é uma importante área de engenharia de tráfego e tem como uma de suas premissas acumular conhecimento técnico e disponibilizá-lo aos gestores públicos responsáveis, para que estes tenham meios de propor melhorias na malha viária que possam ser monitoradas, em especial nas interseções. Segundo

Macedo (2005) o fato dos cruzamentos serem pontos críticos da rede viária tanto em termos de segurança quanto em termos de escoamento, obriga a um estudo cuidadoso nesses locais. Pesquisadores e técnicos no assunto vêm realizando diversos esforços para obter melhores resultados em relação ao desempenho da segurança nas interseções, e uma das estratégias já comprovadas por FHWA (2010), é a utilização de rótulas modernas.

Normalmente para que uma interseção seja classificada como perigosa, há a necessidade de se recorrer aos dados de acidentes de trânsito: quanto maior a taxa de acidentes (n° de acidentes / volume médio diário anual - VMDA) um local tem registrado, mais perigoso ele é. Entretanto, uma das principais desvantagens desta técnica é comumente apontada no fato dos acidentes serem eventos raros e estocásticos o que faz com que seja necessário um longo período de tempo até que se consiga reunir uma quantidade representativa de registros de acidentes. Além disso, por ser um método reativo, tem sua aplicação limitada a locais de um determinado grupo de referência, o que torna mais complicada a análise de locais específicos. Diante disso, diversos países vem realizando estudos visando diagnosticar mais detalhadamente os problemas de segurança viária através da observação direta (GALENO, 2002), os quais foram originalmente chamados de Técnicas de Análise de Conflito de Tráfego (TACT). As TACT constituem uma das maneira alternativa e proativa para avaliar a segurança de instalações de tráfego, as quais utilizam o conceito do *continuum* da segurança viária e se apoiam em indicadores *proxy* de segurança (*surrogate safety measures*), ou seja, em indicadores que não dependem de dados de acidentes.

Para verificar isso, é utilizada uma ferramenta que vem ganhando cada vez mais espaço na engenharia de tráfego: a simulação microscópica. Com a utilização de um microssimulador de tráfego dois cenários distintos são modelados para condições similares, a fim de verificar o desempenho comparativo das duas alternativas sob a ótica do desempenho da segurança viária. Para isso são utilizadas indicadores *proxy* sintéticos de segurança viária, derivados do modelo de simulação. Para realização dessa etapa, o presente trabalho utiliza o software *Surrogate Safety Assessment Model* (SSAM) que verifica a interação entre os veículos simulados através da análise automatizada dos conflitos de tráfego gerados a partir do processamento dos arquivos das trajetórias dos veículos simulados, que é uma saída do software de microssimulação utilizado. Segundo Young et al. (2014), os modelos de simulação de tráfego têm sido utilizados com sucesso para avaliar o desempenho do sistema de trânsito e o impacto da introdução de novos componentes e

estratégias nesse sistema. Eles podem fornecer estimativas de capacidade do sistema de tráfego, atrasos, e condições gerais do fluxo de tráfego, entre outros dados. Recentemente pode-se perceber cada vez mais estudos sobre simulação microscópica de tráfego aplicada também na avaliação do desempenho da segurança viária de modelos de simulação.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Realizar uma aplicação da simulação microscópica na avaliação do desempenho da segurança viária em uma interseção rotatória moderna localizada em meio urbano.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Realizar um estudo de caso comparativo com a utilização do software SSAM entre dois cenários virtuais, sendo o primeiro deles a representação de uma rotatória real e o segundo uma proposta de melhoria para esse cenário.
- b) Verificar como os parâmetros de condução podem influenciar na representação da realidade do local escolhido e como eles exercem influência nos conflitos simulados em rotatórias.
- c) Investigar o desempenho operacional dos modelos simulados, a fim de verificar se a melhora no desempenho de segurança não foi acompanhado de uma piora no desempenho operacional.

1.3 JUSTIFICATIVA

Uma das grandes questões a respeito do tema segurança viária reside no desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas para tratar da acidentalidade no trânsito. Para isso, é necessário somar esforços para o contínuo desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas proativas, buscando mitigar danos causados por falhas oriundas do sistema viário.

O presente trabalho busca explorar os potenciais da utilização da simulação microscópica de segurança aplicada a interseções rotatórias, como forma de gerar conhecimento técnico e contribuir com o desenvolvimento e disseminação desta abordagem, a qual apesar de incipiente já é referenciada positivamente devido ao seu potencial por

diversos autores da área. Mais especificamente, não foram encontrados trabalhos que utilizaram a simulação de segurança para modelagem de rotatórias a partir da utilização de um comportamento de condução orientado pela largura lateral disponível. Por isso, acredita-se que o presente estudo contribuirá com a disseminação desta técnica, através da exploração dos recursos oferecidos pela plataforma de simulação e por tentar colocar em prática esta técnica inovadora num objeto de estudo real.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O Capítulo 1 traz a contextualização do tema para o leitor, além de expor os objetivos que serão perseguidos no desenvolvimento trabalho. Aqui também está contida a justificativa da escolha do tema.

O Capítulo 2 diz respeito a fundamentação teórica sobre qual esta pesquisa está inicialmente estruturada, onde se encontra a revisão literária sobre segurança viária e sobre interseções rotatórias. Em relação a segurança viária são apresentados as principais métodos utilizados por engenheiros de tráfego para gerenciamento e avaliação deste aspecto. A parte referente às rotatórias, traz sua contextualização histórica e mostra os principais motivos pelos quais sua utilização vem ganhando cada vez mais espaço no exterior a partir do surgimento das rótulas modernas, além de trazer as classificações das rotatórias e os principais componentes destas interseções.

O Capítulo 3 dá continuidade a fundamentação teórica de segurança iniciado no Capítulo 2, abordando os temas microssimulação de tráfego aplicada na avaliação da segurança e o software SSAM.

O Capítulo 4 descreve o método proposto para a aplicação da simulação microscópica como ferramenta na avaliação do desempenho de segurança em interseções rotatórias.

O Capítulo 5 aplica o método proposto em um estudo de caso realizado com dados coletados de um objeto de estudo real.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e as limitações do trabalho, bem como recomendações para trabalhos futuros.

2 SEGURANÇA VIÁRIA E ROTATÓRIAS

2.1 GERENCIAMENTO E ANÁLISE DA SEGURANÇA VIÁRIA

Ferraz et al. (2012) trazem que a gestão da segurança viária envolve as seguintes principais atividades: quantificação e qualificação da acidentalidade, definição de ações visando à redução do número e da severidade dos acidentes de trânsito, tratamento de locais críticos, aplicação de técnicas de conflitos de tráfego, realização de auditoria de segurança viária, monitoramento da acidentalidade, etc. Segundo o autor, os componentes dos acidentes viários podem ser categorizados em: componente humano, componente viário ambiental e componente veicular, sendo necessário que as ações para melhoria da segurança sejam desenvolvidas em pelo menos um desses componentes.

Para Hauer (1998) *apud* Framarim (2003), existem dois modelos extremos de Gerenciamento da Segurança Viária (GSV), um modelo com estilo pragmático e o outro com estilo racional. O modelo pragmático é caracterizado por basear o processo de tomada de decisões na intuição ou na experiências dos técnicos. Percebe-se sua adoção quando as decisões forem tomadas sem o conhecimento das consequências das ações, quando não for fornecido treinamento ou equipamento para se adquirir conhecimentos sobre a segurança viária, e quando não forem aplicadas pesquisas para se aprender com o sucesso ou falha de ações. Já o estilo racional tem as decisões fundamentadas em estudos e pesquisas que quantificam e qualificam as consequências das ações adotadas. Para o autor, o sistema racional implica em utilizar técnicas que possibilitem justificar as intervenções propostas com base em estudos e pesquisas que monitorem as consequências das ações, e traz como ideal reduzir os danos causados pelos acidentes de forma eficiente. A partir disso fica claro a necessidade da sistemática adoção do Gerenciamento da Segurança Viária baseado no estilo racional, uma vez que a escassez de recursos disponíveis exige que as intervenções sejam embasadas em conhecimento técnico.

Nodari (2003) classifica o GSV em duas categorias distintas, de acordo com quando as ações são realizadas. A primeira diz respeito às iniciativas reativas, também chamadas corretivas. O exemplo clássico de iniciativas reativas é a análise de pontos críticos, referenciados amplamente na literatura internacional como *black spots* ou *accident prone locations*. Os programas reativos têm por objetivo promover a melhoria das condições de segurança através da utilização das informações constantes nos registros de acidentes.

A segunda categoria de ações de gerenciamento inclui iniciativas proativas, ou preventivas, das quais pode-se citar a Auditoria de Segurança Viária e as Técnicas de Análise de Conflitos de Tráfego (TACT). As medidas reativas objetivam resolver problemas revelados pela ocorrência excessiva de acidentes em determinados pontos da rede viária, enquanto as medidas proativas pretendem identificar situações potenciais de risco presentes na malha viária, antes que os acidentes venham a ocorrer. O autor traz que embora as ações reativas sejam necessárias e urgentes frente às indesejáveis estatísticas dos acidentes e mortes nas rodovias e vias urbanas de todo Brasil, acredita que seja através de medidas preventivas que avanços significativos poderão ser alcançados na melhoria da segurança viária.

De acordo com Sousa (2012), tradicionalmente as análises de segurança viária são focadas basicamente na aplicação de modelos de previsão de acidentes, e em muitos casos restringe-se apenas ao período pós-implantação e consolidação de alguma medida de alteração do sistema viário.

2.1.1 Modelos de previsão de acidentes e acidentes como medida de desempenho de segurança

Uma medida de desempenho de segurança comumente encontrada na literatura diz respeito a utilização dos Modelos de Previsão de Acidentes (MPA). Os Modelos de Previsão de Acidentes (MPA) segundo Boffo (2011), são modelos matemáticos que buscam explicar a relação entre a frequência de acidentes de trânsito e características geométricas e operacionais de rodovias. Segundo o autor, através da utilização modelos calibrados, é possível estimar o número esperado de acidentes de diferentes alternativas de projeto, ainda antes da sua implantação, gerando subsídios para a tomada de decisão e privilegiar projetos mais seguros.

Ainda segundo Boffo (2011) pode-se encontrar diferentes métodos de modelagem adotado pelos pesquisadores. Entre os mais adotados encontram-se os “Modelos de Regressão Linear” e os “Modelos Lineares Generalizados”. O Modelo de Regressão Linear inicialmente utilizado foi a Regressão Linear Múltipla, os quais partiam do pressuposto de erros distribuídos normalmente e de homocedasticidade, que significam variância do erro igual para quaisquer valores da variável preditora. Tal suposição mostrou ser violada por dados de acidentes de trânsito. A fim de contornar essa limitação, os pesquisadores passaram a adotar os Modelos Lineares Generalizados, na forma da Regressão de Poisson e da Regressão Binomial Negativa. Em relação a utilização da Regressão de

Poisson detectou-se algumas limitações. Uma delas consiste no fato de que o número esperado de acidentes por unidade de tempo é igual à variância. Entretanto, ainda segundo Boffo (2011), em muitas análises de dados de acidentes de trânsito, a variância mostrou-se superior à média.

A fim de contornar essa questão, os pesquisadores da área de segurança viária passaram a adotar a utilização da Regressão Binomial Negativa, para o desenvolvimento de modelos de previsão de acidentes. Nesses modelos a média e a variância podem ser tratados separadamente, possibilitando a análise de casos onde os acidentes apresentam um padrão disperso. Cunto, Neto e Barreira (2012) trazem que esses modelos de previsão de acidentes lidam com relativo sucesso com o elevado grau de aleatoriedade desse fenômeno, e têm sido amplamente considerados como uma das ferramentas mais promissoras na modelagem da natureza aleatória e rara associada aos acidentes de trânsito.

Em relação a utilização de registros de acidentes de trânsito como medida de desempenho da segurança viária, Framarim (2003) traz que os principais problemas encontrados são o Fenômeno de Regressão à Média (distorção de natureza quantitativa, resultante de influências estatísticas), e o Fenômeno de Migração de Acidentes (distorção de natureza qualitativa).

O Fenômeno de Regressão à Média, FRM, caracteriza-se como um efeito distorcido na análise de registros de acidentes, onde valores distantes da média se aproximam da mesma no período subsequente de seu registro, inclinando-se para o valor da tendência central, e sofre influência do Grupo de Referência (a qualidade do Grupo de Referência provém de sua semelhança com o local de estudo). Os elementos do grupo devem possuir características físicas (geometria, condições do pavimento) e operacionais (fluxo de veículos, fluxo de pedestres, histórico de acidentes, classificação veicular) semelhantes entre si e o local em estudo. Para a exclusão do efeito indesejado da FRM nos dados, utiliza-se o Método Empírico Bayesiano. O método possui uma estrutura que permite combinar as características de acidentes regionais (grupo de referência) com o histórico de acidentes de um local específico para avaliar a potencialidade do mesmo aos acidentes. O Método Empírico Bayesiano, utiliza informações provenientes do histórico de acidentes do local em análise e do histórico de acidentes do grupo de referência.

Já o Fenômeno de Migração de Acidentes (FMA) consiste em uma distorção qualitativa e está associada ao comportamento do motorista frente a uma mudança operacional ou na infraestrutura viária. O termo “migração” atribuído a este fenômeno baseia-se no deslocamento dos acidentes para locais adjacentes ao local estudado, onde a redução do

número de acidentes em um ponto crítico pode ser acompanhada por um aumento do número de acidentes na “vizinhança” deste local.

2.1.2 Técnica de análise de conflitos de tráfego (TACT)

Segundo Parker e Zegeer (1988) por muitos anos os engenheiros de tráfego fizeram observações em pontos críticos a fim de identificar quais características viárias e operacionais estavam contribuindo para os problemas de segurança. Eventos de tráfego como quase acidentes, motoristas frenando bruscamente e/ou mudando de trajetória para evitar colisões longitudinais eram comumente notados e as vezes documentados. O problema, entretanto, era que com a simples observação sem a utilização de critérios objetivos ou medidas pré-definidas, a mente humana não consegue sempre ordenar, categorizar, medir e contar o que está sendo visto. A solução para mitigar essa questão, foi inicialmente proposta em 1967, por dois pesquisadores da General Motors, Perkins e Harris, que desenvolveram um conjunto de definições e procedimentos formais para observação de conflitos de tráfego em interseções, baseado em situações observáveis pré-definidas e testadas para a repetitibilidade (variação na contagem em um mesmo local sob condições idênticas) e confiabilidade (variação entre dois observadores diferentes registrando o mesmo evento). Os pesquisadores identificaram padrões de conflitos de tráfego para mais de vinte tipos de acidentes correspondentes. Como cada conflito de tráfego aparece relacionado a um tipo de acidente específico, a técnica foi considerada ser uma medida para estimar o potencial de acidente. Segundo Perkins e Harris (1967) *apud* El-Basyouny e Sayed (2013), um conflito de tráfego foi inicialmente definido como qualquer situação potencial de acidente que leve a ocorrência de manobras evasivas como frenagem ou mudança de trajetória.

As Técnicas de Análise de Conflitos de Tráfego (TACT) ou Técnicas de Conflitos de Tráfego (TCT) surgiram a partir da necessidade de se desenvolver uma metodologia que permitisse diagnosticar falhas de operação, antes que os acidentes ocorressem. Segundo Hydén (1987) as TCT surgiram a partir da intenção em sobrepor os desafios metodológicos impostos pela avaliação da segurança viária baseada unicamente em dados de acidentes de trânsito. Para justificar a utilização das TCT, Framarim (2003), faz uma analogia com o setor aéreo, onde os acidentes geralmente resultam em fatalidades, fato esse que aumenta as atenções para a área da segurança preventiva. Além disso, o reduzido número de acidentes aéreos impossibilita que sejam gerados dados suficientes para

inferir as causas do problema. De maneira similar, as TCT têm a intenção de contribuir com diagnósticos preventivos da segurança viária.

Segundo Zheng, Ismail e Meng (2014), apesar do potencial da utilização das TCT para avaliar a segurança de um determinado local, décadas de desenvolvimento conceitual já se passaram desde a concepção da ideia inicial e de sua aplicação mundial, e ainda permanecem algumas controvérsias sobre o que é um conflito de tráfego. Segundo os autores, existem duas vertentes que agrupam quase todas as definições operacionais dos conflitos de tráfego: conflitos baseado em ações evasivas e conflitos baseado na proximidade temporal (ou espacial) dos envolvidos no evento.

Os conflitos baseados em ações evasivas definem a ocorrência de um conflito de tráfego quando pode-se observar a realização de ações evasivas pelos usuários envolvidos no evento como frenagem ou mudança de faixa. Essa definição traz que conflitos e acidentes são de natureza similar, exceto pelo sucesso ou não da manobra evasiva realizada. De acordo com Zheng, Ismail e Meng (2014), os observadores podem estar habilitados para registrar a ocorrência de conflitos de tráfego com o auxílio de uma lista contendo a especificação das possíveis ações evasivas que podem vir a ocorrer em determinado local. Essa abordagem, entretanto, sofre alguns questionamentos, entre os quais:

1. Criar uma lista exaustiva contendo todas as ações evasivas possíveis não é uma tarefa simples. Além disso, a frenagem realizada isoladamente apresenta variações em função do tempo de início e da intensidade da ação, que são difíceis de serem percebidas pelo observador.
2. Se uma ação evasiva pode ser totalmente caracterizada pela simples observação de campo.
3. Se a presença e intensidade de uma ação evasiva é a única dimensão de estimar a severidade das interações conflituosas (sem dizer respeito a proximidade dos usuários).

Além disso, existe um desafio em estabelecer a correlação dos conflitos de tráfego com acidentes de trânsito, tendo em vista que alguns acidentes podem ocorrer sem a realização prévia de ações evasivas, e algumas ações como frenagem ou mudança de faixa podem ser realizadas com o intuito cautelar e não indicar situações perigosas. Segundo os autores a utilização de ações evasivas como definição de um conflito é propenso a criar uma relação vaga entre conflitos e eventos regulares (menos severos).

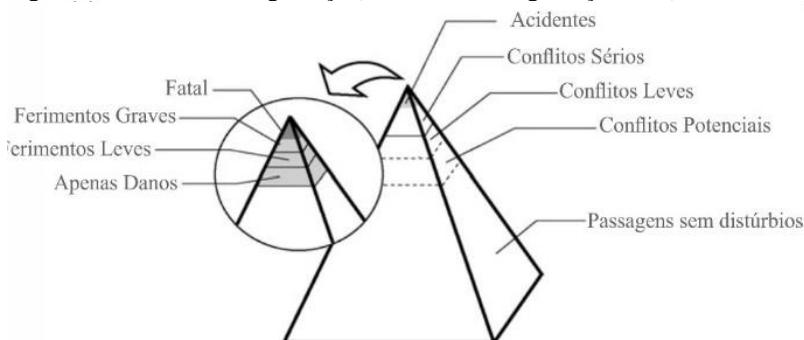
Já os conflitos baseados na proximidade temporal (ou espacial) são definidos como “uma situação observável onde dois ou mais usuários da

via se aproximam entre si a tal ponto que existe risco de colisão, se seus movimentos permanecerem inalterados” (HYDÉN, 1977). Porém, essa é uma definição mais teórica-conceitual e para ser aplicada a nível operacional, muitos pesquisadores desenvolveram indicadores de proximidade (*surrogate safety measures*), também conhecidos por indicadores “*proxy*” de segurança viária. Os indicadores mais populares são baseados na proximidade temporal tendo em vista que integram além da proximidade temporal a velocidade. Também existem variáveis baseadas somente na proximidade temporal. Os conflitos de tráfego são registrados quando os valores das variáveis observadas são menores que limites pré-estabelecidos. Segundo Zheng, Ismail e Meng (2014) pode-se observar nas últimas cinco décadas um crescente desenvolvimento por estudos voltados para os indicadores *proxy* de segurança viária.

Guido et al., (2011) *apud* Zheng, Ismail e Meng (2014) trazem que as medições de proximidade desempenham um papel importante nas técnicas de conflitos de tráfego, porém há algumas questões relacionadas ao emprego desses indicadores. A primeira questão apontada pelos autores é o fato de existirem diversos indicadores dessa natureza e ainda não ter sido estabelecido um consenso a respeito de quais indicadores utilizar. A razão pode ser que pelo fato das variáveis terem naturezas distintas, e estas terem suas condições de aplicação preferencial, uma vez que diferentes variáveis geram diferentes interpretações a nível de segurança. Por isso alguns pesquisadores sugerem a integração de diferentes indicadores (Kaparias et al. 2010; Laureshyn et al. 2010; Ismail et al. 2011; Salamati et al. 2011; Lu et al. 2012 *apud* Zheng, Ismail e Meng 2012). A segunda ressalva é que quase todos os indicadores se limitam a estimar o risco do acidente acontecer, sem contemplar as consequências de um acidente em potencial. Essa limitação coloca a severidade dos conflitos de tráfego (proximidade de colisão) e a severidade dos acidentes (apenas danos materiais, feridos leves, graves ou mortos) em duas dimensões distintas, trazendo dificuldades em relacionar todos os eventos de tráfego sob a ótica do *continuum* da segurança viária (Figura 4). O *continuum* da segurança viária foi proposto por Hydén (1987) e busca relacionar todos os eventos de tráfego (definidos como eventos elementares) dentro da “pirâmide da segurança”, com o objetivo de estratificar a segurança de determinado local. Além disso, muitos estudos sobre a severidade dos acidentes mostram que as consequências dos mesmos depende não somente da velocidade, mas também da massa envolvendo os usuários e o ângulo de colisão, então apenas a consideração da velocidade também não é satisfatória. A terceira questão está relacionada ao fato da suposição “movimentos inalterados”.

Devido ao comportamento complexo dos condutores, essa simples suposição e extrapolação apresenta muitas limitações. Alguns autores sugerem considerar todas as opções possíveis para os usuários durante o encontro (Saunier and Sayed 2008; Saunier et al. 2010; Berthelot et al. 2012, *apud* Zheng, Ismail e Meng 2012).

Figura 4 – Pirâmide de segurança (*continuum* da segurança viária).



Fonte: Adaptado de Hydén (1987).

2.1.2.1 Indicadores *proxy* de segurança viária

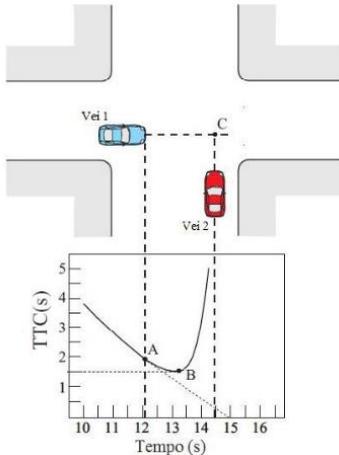
Os indicadores *proxy* podem ser agrupados de acordo com a medida que buscam representar, sendo classificados naqueles que buscam representar a proximidade temporal dos veículos envolvidos em conflitos e àqueles baseados na energia dissipada na frenagem durante o conflito. Também pode-se encontrar índices de segurança, os quais incorporam o tempo de exposição dos veículos a um determinado nível de conflito. Cunto (2008) traz que pode-se encontrar na literatura diversos indicadores *proxy* baseados no tempo previsto para uma colisão potencial. Entre os mais comuns, têm-se: tempo para a colisão (TTC – *time to collision*); tempo para o acidente (TTA – *time to accident*); tempo após a invasão (PET – *post-encroachment time*) e suas variantes tempo de invasão (ET – *encroachment time*) e o tempo de intervalo (GT – *gap time*).

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

O Tempo para colisão é um dos indicadores *proxy* mais difundidos. O TTC foi proposto por Hayward (1972), que definiu o TTC como sendo o “tempo necessário para dois veículos colidirem se estes manterem suas velocidades e trajetórias constantes”. Cunto (2008) traz que a estimativa do TTC implica na existência de um curso de colisão, por exemplo,

veículos viajando no mesmo sentido necessitam estar se aproximando (velocidade do seguidor maior que a do líder), e para colisões potenciais em ângulo, a posição projetada dos veículos deve se sobrepor em determinado instante. A Figura 5 mostra a curva empírica do TTC para um conflito de cruzamento.

Figura 5 - Curva empírica do TTC.



Autor: Cunto (2008).

Segundo Cunto (2008), normalmente o menor TTC (mais crítico) é detectado após o início da ação evasiva, devido ao tempo de reação necessário para motorista realizar tal manobra. O ponto “A” refere-se ao início da ação evasiva (TTC = 2s); o ponto “B” refere-se ao menor TTC detectado durante o conflito (TTC = 1,5s). O ponto “C” determina o local da colisão potencial. Nesse caso, de uma colisão transversal, o cálculo do TTC pode ser realizado segundo a expressão (2.1):

$$TTC_{i,t} = \frac{D_{i,t}}{V_{i,t}} \quad (2.1)$$

Onde:

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

Para o cálculo do TTC em situações de conflitos longitudinais utiliza-se a expressão (2.2):

$$TTC_{i,t} = \frac{(X_{i-1,t} - X_{i,t}) - L_{i-1,t}}{V_{i,t} - V_{i-1,t}} \quad (2.2)$$

Onde:

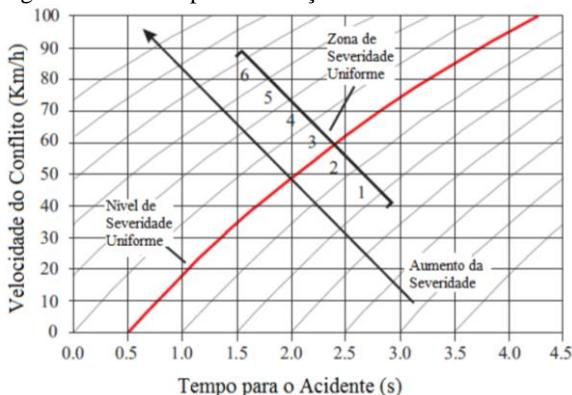
- t : intervalo de tempo considerado;
- $i-1$: veículo líder;
- i : veículo seguidor;
- X : posição dos veículos;
- L : comprimento do veículo; e
- V : velocidade.

Sousa (2012) traz que assim como outros indicadores *proxy* o TTC precisa ter uma escala arbitrária para definição da ocorrência ou não do conflito. Nesta escala o TTC pode variar de infinito, quando os veículos não estão em rota de colisão até valores mínimos definidos como os limites para o início da interação. Um valor que comumente é trazido como limite para as interações urbanas é 1,5 segundo para o tempo do TTC.

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

O tempo para o acidente foi proposto por Hydén (1987) e constitui uma tentativa de simplificar a coleta do TTC em campo. O TTA, segundo Hydén (1987) é definido como “o tempo decorrido entre o momento em que um usuário da via reagiu e iniciou a ação evasiva até o momento em que o usuário envolvido teria chegado ao ponto de colisão se ambos envolvidos tivessem mantido suas velocidades e trajetórias constantes”. Em outras palavras, equivale ao TTC no início da ação evasiva, de modos que para os observadores fica mais fácil perceber o início de uma ação evasiva do que detectar uma colisão iminente antes de qualquer manobra evasiva acontecer. Hydén (1987) *apud* Cunto (2008) propôs uma escala de severidade baseada em funções lineares paralelas equidistantes, as quais consideraram a taxa de desaceleração média para evitar colisões em diferentes velocidades (utilizando um coeficiente de atrito padrão). A Figura 6 expressa o gráfico de Hydén (1987), onde a linha vermelha determina o limite entre conflitos severos (a direita) e os não severos (à esquerda).

Figura 6 - Gráfico para estimação da severidade dos conflitos.

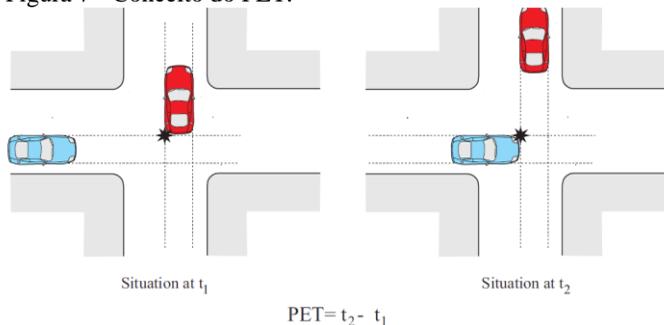


Fonte: Hydén (1987) *apud* Sousa (2012).

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

O tempo após a invasão (PET) corresponde a diferença de tempo que decorre entre o instante em que um veículo deixa uma área de colisão potencial e o momento em que outro veículo chega a mesma área. A Figura 7 mostra o conceito do PET.

Figura 7 - Conceito do PET.



Fonte: Cunto (2008).

Hydén (1987) traz que segundo estimativas diretas realizadas pela equipe responsável pelo desenvolvimento da Técnica de Conflito de Tráfego Canadense, o limite para o PET entre conflitos sérios e não sérios encontrado foi de 1,5 segundo.

Em relação aos indicadores baseados na energia dissipada na frenagem durante o conflito, o principal deles é a “taxa de desaceleração necessária para evitar a colisão”, ou DRAC (*deceleration rate to avoid the crash*). Segundo Saccomano et al. (2008), a DRAC foi considerado por Gettman e Head (2003) e Archer (2005) como sendo um melhor indicador do desempenho de segurança, com base no trabalho prévio de Darzentas et al. (1980). Este indicador considera intrinsecamente o papel dos diferenciais de velocidade e desacelerações na ocorrência de colisões. A DRAC pode ser definida usando as relações de tempo e espaço aplicadas a um determinado par de veículos como a desaceleração requerida pelo veículo seguidor para efetuar uma parada em tempo ou atingir uma velocidade correspondente a do veículo líder, a fim de evitar uma colisão traseira. Para veículos trafegando na mesma direção a DRAC é calculada segundo a expressão (2.3):

$$DRAC_{i,t+1} = \frac{(V_{i,t} - V_{i-1,t})^2}{2[(X_{i-1,t} - X_{i,t}) - L_{i-1,t}]} \quad (2.3)$$

Onde:

t = intervalo de tempo

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

L = comprimento do veículo

V = velocidade

Para conflitos transversais, as estimativas da DRAC são obtidas pela expressão (2.4):

$$DRAC_{i,t+1} = \frac{V_{i,t}^2}{2D_{i,t}} \quad (2.4)$$

Onde:

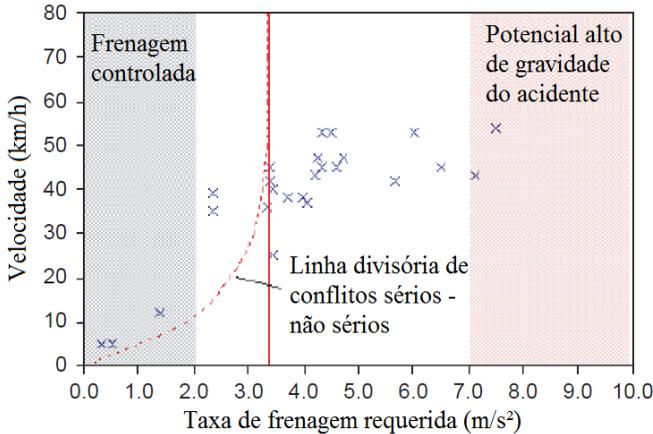
$D_{i,t}$ = distância entre o ponto projetado de colisão e o veículo i na via principal

Archer (2005) estabeleceu uma relação entre a velocidade e a taxa de frenagem necessária para dois níveis de conflito: sério e não sérios (Figura 8). A partir desta figura, um valor de DRAC superior a 3,35 m/s² parece refletir condições inseguras.

Segundo Saccomano et al. (2008) alguns pesquisadores argumentaram que a medida convencional da DRAC falha em refletir com precisão conflitos de tráfego e na identificação de situações de

colisões potencial, tendo em vista que a DRAC não considera a capacidade de travagem do veículo disponível em momentos específicos. Por exemplo, é de se esperar que um determinado valor da DRAC em condições úmidas seja mais crítico para a segurança do que o mesmo valor em condições secas.

Figura 8 - Taxa de frenagem requerida para diferentes velocidades.



Fonte: Archer (2005) *apud* Saccomano et al. (2008).

Tendo em vista isso, em sua investigação do risco de colisão nas interseções, Cunto e Saccomano (2007) *apud* Saccomano et al. (2008), propuseram um índice de segurança denominado CPI (*crash potencial index*) que considera a desaceleração máxima disponível para um veículo individual, com base no tipo do veículo e nas condições de tráfego. Isto é referido como “taxa máxima de desaceleração disponível” (MADR – *maximum available deceleration rate*). Como a MADR leva em consideração diferenças nas condições de travagem do veículo e da estrada, é necessário especificar valores separados para cada veículo no fluxo de tráfego. Um índice CPI pode ser obtido usando a expressão (2.5):

$$CPI_i = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} P(DRAC_{i,t} > MADR_{i,t}) \times \Delta t \times b}{T_i} \quad (2.5)$$

Onde:

P : probabilidade;

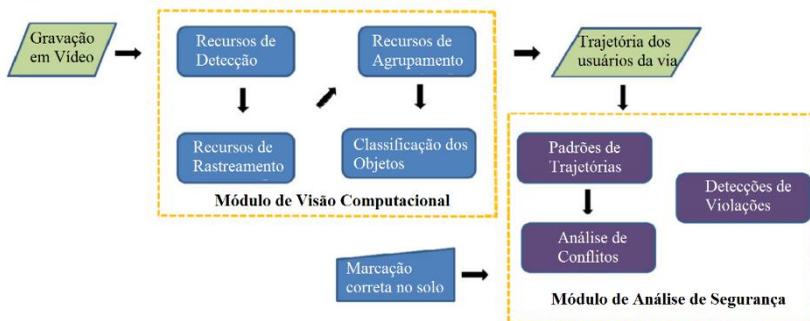
CPI : índice potencial de acidente para o veículo i ;

t_{ii} : intervalo de tempo inicial para o veículo i ;
 t_{fi} : intervalo de tempo final para o veículo i ;
 $DRAC_{i,t}$: taxa de desaceleração para evitar a colisão para o veículo i no instante t ;
 $MADR$: taxa máxima de desaceleração disponível para o veículo i ;
 Δt : intervalo de tempo de observação [s];
 T_i : tempo total observado para o veículo i (s); e
 b : variável de estado binária (1 se $DRAC_{i,t} > 0$, caso contrário 0)

2.1.2.2 Avanços nas técnicas de conflitos de tráfego

Sousa (2012) traz que os últimos avanços relacionados a utilização das TACT são basicamente voltados para as metodologias de detecção veicular com o uso de filmagens e posterior tratamento computacional. Neste sentido, Saunier e Sayed (2007), *apud* Sousa (2012) relatam que este tipo de abordagem pode ser denominada “visão computacional” e que tradicionalmente é composta por dois módulos: (i) um módulo de processamento de vídeo para a detecção e rastreamento de veículos e (ii) um módulo de interpretação para a detecção de conflitos de tráfego. A Figura 9 traz o diagrama dos módulos normalmente utilizados para a detecção e classificação dos conflitos gravados em vídeos.

Figura 9 - Diagrama dos módulos utilizados nas análise de vídeo.



Fonte: Adaptado de Sayed, Zaki e Autey (2013).

Sayed, Zaki e Autey (2013) trazem que a utilização da visão computacional ainda passa pela fase de “prova conceitual” e ainda são necessárias novas pesquisas a fim de aprimorar a utilização de algoritmos mais precisos para o rastreamento e classificação dos usuários das vias. Saunier e Sayed (2007) trazem que o monitoramento viário baseado na visão computacional para a detecção de conflitos é uma tarefa complexa,

onde a aplicação em interseções é mais complicada em relação a sua aplicação em rodovias. Isso se deve ao fato a estrutura altamente variável das interseções, a presença de múltiplos fluxos de veículos executando movimentos de conversões e ao tráfego misto que pode variar de pedestres à veículos pesados, e tráfego que realizam paradas em função de semáforos e afins. Nesses casos, os autores trazem que são necessárias técnicas específicas de classificação e gerenciamento de oclusão.

Segundo Sousa (2012), um dos principais desafios dessa nova abordagem apontado na literatura consiste na dificuldade de aplicação de forma prática do método, tendo em vista que a detecção com os detalhes necessários sobre os veículos envolvidos e suas trajetórias é uma tarefa difícil e não pode ser alcançado com precisão suficiente para uso prático. Apesar das dificuldades existentes, muitos avanços significativos vem sendo feitos nesse campo e segundo Zheng, Ismail e Meng (2014), essas técnicas oferecem um forte potencial futuro para lidar com as deficiências clássicas encontradas na utilização das técnicas de conflito de tráfego baseadas em observadores.

2.2 ROTATÓRIAS

Rotatórias ou rótulas constituem um tipo de interseção de vias em nível, o qual segundo DNIT (2005), é composto basicamente por um sistema de circulação de mão-única em torno de uma ilha central, e utiliza sinalização vertical e/ou horizontal para determinar a preferência de passagem. Para FHWA (2010), rotatória é uma forma de interseção geralmente circular em que o fluxo segue uma orientação anti-horária ao redor de uma ilha central, onde o tráfego que entra tem de dar a preferência ao tráfego que circula.

A utilização de interseções com características giratórias, segundo Silva et al (2008), remete a idade média, muito antes do aparecimento do automóvel, onde sua utilização estava associada a renovação da malha viária das cidades. Waddell (1997) traz que registros do planejamento urbano da cidade de Washington, datados de 1791, mostram a inserção de círculos em locais estratégicos na malha viária urbana, com propósitos estéticos e militares. Com o surgimento dos automóveis o controle do tráfego nas interseções mais movimentadas passou a ser realizado por um policial que ficava no centro da interseção orientando os motoristas de acordo com sua percepção. Para os movimentos de giro a esquerda, o oficial orientava os motoristas a realizarem a conversão à sua frente ou à sua volta, sendo que nesse último caso ele atuava como um pivô. Alguns anos depois, com o aumento do fluxo e do perigo de exposição, o policial

foi substituído por um pequeno poste, e posteriormente por uma ilha central.

Inicialmente, as rótulas primitivas (também referenciadas por rótulas convencionais) funcionavam com base na “regra de prioridade a direita” (a qual era praticamente difundida em todo o mundo). Nesse tipo de rotatória, a preferência de passagem era concedida ao tráfego que se aproximava da interseção o que causava interrupções do fluxo circular. Com o aumento da demanda veicular, as rótulas convencionais começariam a apresentar problemas relacionados a atrasos excessivos devido ao grande número de paradas que os veículos tinham de realizar enquanto trafegavam em torno da ilha central, podendo inclusive culminar no bloqueio total do tráfego. Waddell (1997) traz que a fim de mitigar essa questão, os primeiros estudos realizados sobre o tema nos Estados Unidos tinham como premissa que a capacidade de uma rotatória convencional estava diretamente ligada ao comprimento do trecho de entrelaçamento das vias. Via de regra, quanto maior fosse a distância entre uma entrada e uma saída, maior seria a capacidade da rotatória. Essa teoria foi responsável pela utilização de diâmetros elevados para as ilhas centrais, o que além de favorecer a alta velocidade de entrada limitava sua aplicação devido ao espaço necessário para construção desses dispositivos. Para FHWA (2010) esse fator, associado ao desenvolvimento do controle semafórico contribuiu para que as rotatórias convencionais comesçassem a cair em desuso a partir da década de 20, e somente em 1966 com o advento do conceito da “rótula moderna” no Reino Unido, voltou-se a utilizar esse tipo de solução.

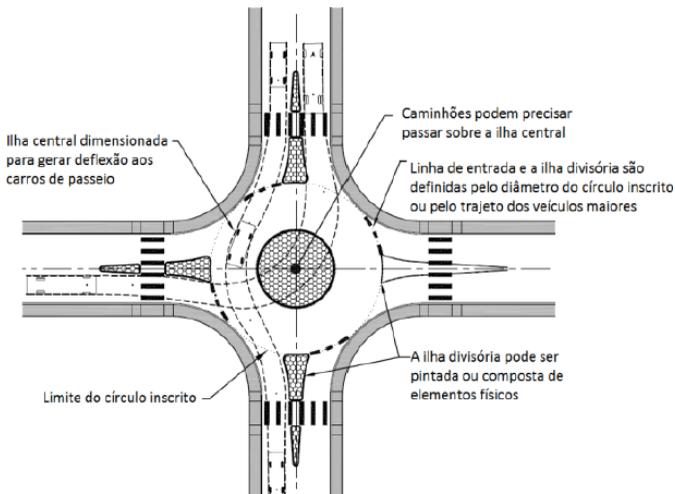
Cabe frisar que não é incomum encontrar divergências na literatura (especialmente na brasileira) sobre a utilização dos termos “moderna” e “convencional”. Neris (2014), por exemplo, utiliza o termo “rotatória convencional” em seu resumo para se referir a uma rótula moderna “padrão”. Tollazzi (2015) traz que em alguns países europeus, as “rótulas modernas” são referenciadas como “rótulas convencionais”, o que para o autor é aceitável, tendo em vista que as “rótulas modernas” já são as rótulas convencionalmente construídas há um bom tempo (desde 1966). Tendo em vista que o foco do presente trabalho são as rótulas que concedem a preferência de passagem ao tráfego circular (rótulas modernas), optou-se por suprimir o termo “moderna” ao longo do desenvolvimento dessa dissertação. Quando aparecer o somente o termo “rótula” ou “rotatória”, refere-se às rótulas modernas tradicionais.

2.2.1 Classificação das rótulas modernas

FHWA (2000), classifica as rótulas modernas, de acordo com as dimensões do círculo inscrito e números de faixas, podendo ser mini-rótulas, rótulas de faixas simples e rótulas de múltiplas faixas.

As mini-rótulas (Figura 10) apresentam como característica principal o diâmetro reduzido do círculo inscrito e a ilha central, que neste caso não é fisicamente elevada em relação ao nível do pavimento (como nas outras rótulas modernas). Essa configuração serve para facilitar a utilização da interseção por veículos maiores, que teriam dificuldade em realizar manobras de giro a esquerda caso não fosse possível transpor a ilha central, uma vez que este tipo de rotatória é utilizado em locais que não comportariam uma rotatória de maiores dimensões.

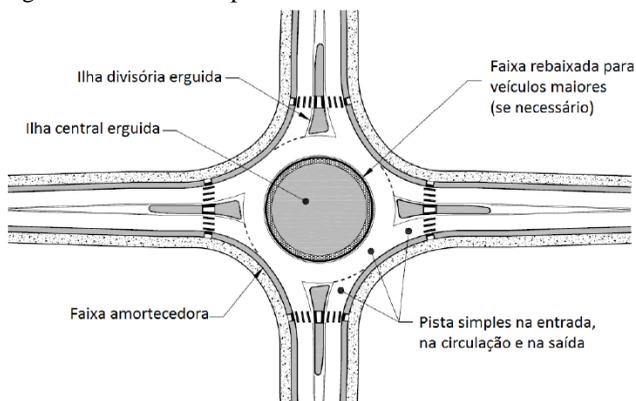
Figura 10- Mini rótulas.



Fonte: FHWA (2010).

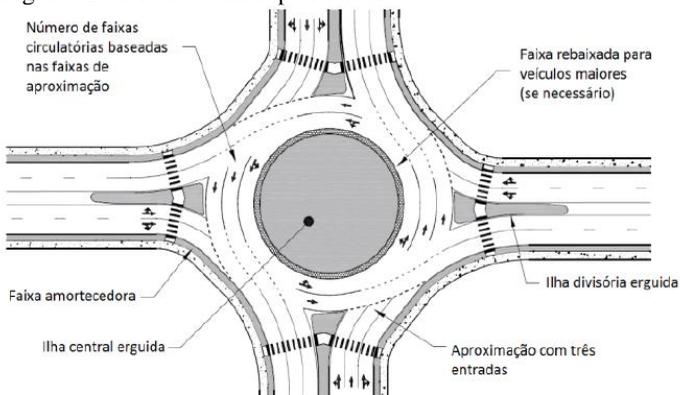
Nas rótula moderna simples (Figura 11), todas as entradas, saídas e pista circular são compostas por apenas uma faixa de rolamento, enquanto nas rótulas modernas de múltiplas faixas (Figura 12), o número de faixas na pista circular equivale ao número de faixas da aproximação anterior.

Figura 11 - Rótula simples.



Fonte: FHWA (2010).

Figura 12 - Rótula de múltiplas faixas.



Fonte: FHWA (2010).

2.2.2 Benefícios da utilização de rotatórias

Para Silva, Vasconcelos e Santos (2014), as rótulas vêm se firmando ao longo das últimas décadas, como excelentes soluções em termos de custo-benefício, tendo em vista que podem alcançar elevados níveis de eficiência relacionados a múltiplas funções, como regulação do trânsito, moderação do tráfego, requalificação urbana e paisagística.

Para FHWA (2010), quando dentro da capacidade, rotatórias normalmente operam com menores atrasos em relação a outros dispositivos, como interseções em cruz reguladas por placas de “PARE”

ou por controles semaforicos. Isso ocorre pois nas rotatórias o tráfego não precisa efetuar uma parada completa quando não são observadas situações conflituosas.

Em relação à segurança, FHWA (2007) realizou um estudo do tipo antes-depois comparando 4 anos de dados (2 antes da intervenção e 2 após) referentes a 55 interseções em cruz (18 controladas por semáforos; 10 com placas de “PARE” em todas as vias, e 27 com placas de “PARE” nas vias secundárias), as quais foram convertidas em rotatórias simples. Nesse estudo, constatou-se uma redução de 35% no número geral de acidentes, e uma redução de 76% no número de acidentes com vítimas. Pode-se perceber que a rotatória só não apresentou melhores resultados para a frequência de colisões nas interseções em cruz controladas por placas de “PARE” em todas as vias (esse tipo de controle não é comumente encontrado no Brasil). Nesse caso ocorreu um aumento de 28% no número geral de acidentes. Entretanto, apesar desse aumento o número de acidentes com vítimas nessas interseções foi reduzido em 87%.

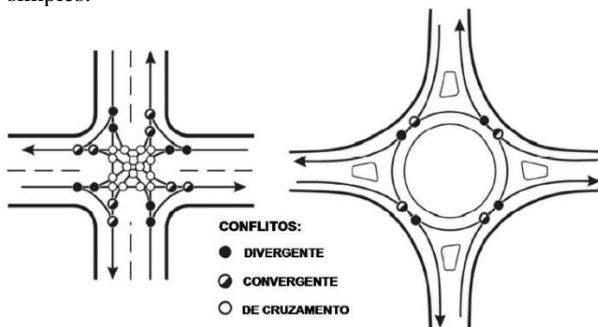
Outro estudo do tipo antes-depois foi realizado por Jansen (2012), que estudou 332 interseções convertidas em rotatórias na Dinamarca. Seu banco de dados contou com 2497 acidentes sem vítimas, 1271 com feridos e 57 com vítimas fatais. Constatou que a instalação de rotatórias resultou em reduções no número de acidentes em 27%, e no número de lesões em 60%. O autor traz que os acidentes se tornam menos graves (diminuição de 87% nas fatalidades), ao passo que a redução dos acidentes em que houveram apenas danos materiais decresceu 16%. Além disso, segundo o autor, a segurança de longo prazo (3 a 9 anos após a conversão de interseções em rotatórias) são 12-13 pontos percentuais melhores do que efeitos de segurança de curto prazo (no primeiro e segundo ano após as conversões) tanto em áreas urbanas e rurais, quanto em acidentes e feridos. Isto é principalmente relacionado a um período de adaptação dos motoristas, o que impacta nas colisões de um único veículo.

Os principais motivos responsáveis pelo incremento na segurança podem ser apontados como a eliminação de pontos de conflitos graves, associado à deflexão da trajetória dos veículos causada pela geometria da rotatória. Segundo Tollazzi (2015), a principal vantagem de uma rotatória de uma faixa (rotatória simples), comparada a uma interseção “padrão” (em cruz), é a eliminação de pontos (ou locais) de conflitos do primeiro (cruzamento) e segundo (entrelaçamento) gêneros, e a redução dos pontos de conflitos do terceiro gênero (convergência e divergência). Teoricamente, uma interseção clássica em cruz possui 32 pontos de

conflitos (16 de cruzamento, 8 convergentes e 8 divergentes), enquanto uma rotatória simples possui apenas 8 locais de conflitos (4 convergentes e 4 divergentes). A Figura 13 traz a comparação do pontos de conflitos encontrados em uma interseção em cruz e em uma rótula simples. Já a deflexão causada pela geometria da rotatória, principalmente devido à presença da ilha central, tem como objetivo fazer com que os motoristas diminuam suas velocidades para utilizar o dispositivo de maneira segura, mesmo que não existam outros veículos utilizando a interseção no momento. Hydén and Várhelyi (2000) trazem que a geometria da rotatória é de grande importância para a segurança dos usuários, onde uma deflexão de 2 metros na trajetória dos veículos é suficiente para gerar uma redução considerável na velocidade, ao passo que maiores deflexões não geram melhores resultados, apenas aumentam o desconforto dos usuários. Esses dois fatores trabalhando em conjunto fazem com que as colisões que venham a ocorrer se desenvolvam a velocidades mais baixas e em ângulos não tão perigosos, quando comparados a uma interseção tradicional em cruz, diminuindo a severidade das colisões e o número de vítimas.

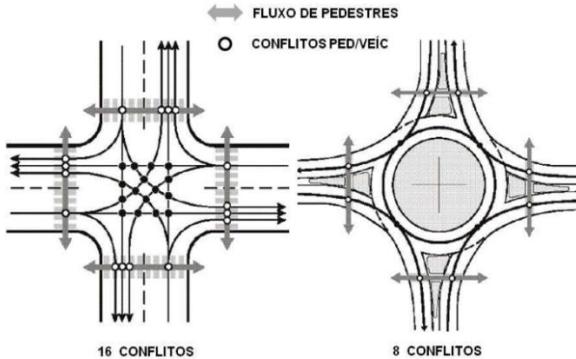
A redução do número de pontos de conflitos também se estende aos pedestres. A Figura 14 mostra uma redução de 16 pontos de conflitos veículo-pedestre em uma interseção de quatro vias, para 8 pontos de conflitos veículo-pedestre para o caso da rotatória. Além dessa redução, os pedestres precisam olhar para apenas um lado a fim de verificar se é possível realizar a travessia em segurança.

Figura 13 - Pontos de conflitos de uma interseção em cruz e de uma rótula simples.



Fonte: FHWA (2010) *apud* Coelho (2012).

Figura 14 - Pontos de conflitos para pedestres encontrados em uma interseção em cruz e numa rótula simples.

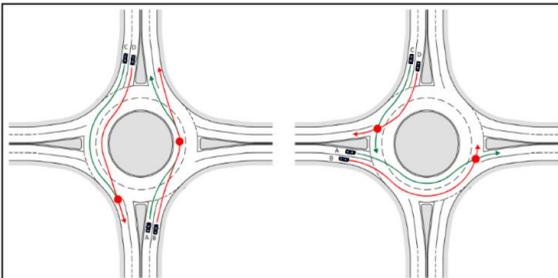


Fonte: FHWA (2010) *apud* Coelho (2012).

2.2.3 Problemas de opera o

Segundo Silva et al (2014), os problemas operacionais mais significativos encontrados nas interse es rotatórias estão relacionados ao comportamento equivocado dos motoristas ao utilizar rótulas de múltiplas faixas. Em seu estudo, o autor traz que em Portugal, cerca de 40% dos condutores que se aproximam da rotatória utilizando a faixa da direita invadem a faixa circulatória esquerda, a fim de seguir um caminho mais retilíneo. Além disso, aproximadamente 20% dos condutores que se aproximam pela faixa da esquerda buscam a faixa direita da saída adjacente, visando minimizar inconvenientes de condu o (Figura 15). Isso ocorre pois em Portugal, bem como noutros países, não existe uma disposi o legal que especifique o procedimento correto acerca das negocia es veiculares nas rotatórias.

Figura 15 - Comportamento equivocado comum nas rótulas duplas.

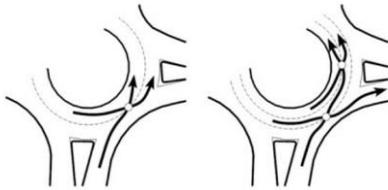


Fonte: Silva et al (2014).

De acordo com Tollazzi (2015), a razão inicial para a construção de rotatórias de duas faixas e rotatórias com múltiplas faixas era a expectativa de que a capacidade dessas interseções fosse duplicada. Consequentemente, rotatórias de dois formatos foram implementadas no passado: (i) com aproximações e saídas com faixas simples e pista circular com duas faixas, e; (ii) entradas/saídas com faixas duplas e duas faixas na pista circular. Esses formatos foram muito utilizados no Reino Unido durante o início dos anos setenta do século passado, e mais tarde em alguns outros países Europeus. Com o passar do tempo, a realidade contradisse todas as premissas técnicas e cálculos numéricos que sustentavam a introdução deste tipo de rotatórias. Através da experiência de alguns países (Áustria, Lituânia, Alemanha e Eslovênia) percebeu-se que a adição da segunda faixa à pista circulatória somente aumentava a capacidade em 30-40 % (e não em 100 % como esperado originalmente). Segundo o autor, isso se deve principalmente a questão de que no passado, as rotatórias de duas faixas possuíam dimensões muito pequenas, o que contradizia a regra do uso da faixa interna nos casos em que os motoristas não pretendiam deixar a interseção na primeira saída (adjacente) em relação à sua entrada (um motorista mediano não tinha espaço suficiente para realizar a mudança de faixa ao longo da pista circulatória). Isso fazia com que motoristas jovens (inexperientes) e motoristas com idade mais avançada, evitassem utilizar a faixa interna devido à sensação de insegurança em realizar mudanças de faixas na pista circulatória.

Como visto no item anterior, a principal vantagem de uma rotatória simples, comparada com uma interseção “padrão” (em cruz), é a eliminação de pontos de conflitos do primeiro e segundo gênero (cruzamento e entrelaçamento, respectivamente), e a redução de conflitos do terceiro gênero (convergência e divergência). No caso das rotatórias com duas faixas na pista circular, o número de pontos de conflitos aumenta de acordo com o número de pontos de entrelaçamento, o qual teoricamente é igual ao número de braços da rotatória, entretanto, este número ainda é menor que 32 (Figura 16). Porém, do ponto de vista prático, não se trata de locais de conflitos, e sim, de seções de conflitos (sequência de pontos de conflitos), tendo em vista que os locais onde os condutores irão realizar a mudança de faixa dentro da pista circular não são predefinidos.

Figura 16 - Conflitos comuns em rotatórias de duas faixas com entradas e saídas simples.

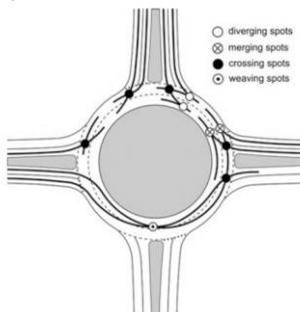


Fonte: Tollazzi (2015).

Nas rotatórias duplas com aproximações e saídas duplas, as condições de segurança são ligeiramente piores em relação às rotatórias duplas com aproximações simples. Neste caso, existem conflitos nos locais de cruzamento da corrente circular nas entradas e nas mudanças de faixa durante o contorno da ilha central, como ocorre nas rotatórias duplas com aproximações simples, porém no caso das entradas/saídas duplas esses conflitos são mais notáveis. Entretanto, segundo Tollazzi (2015), sem dúvida o maior perigo está relacionado às manobras para sair da rotatória. Os pontos de conflitos em rotatórias de múltiplas faixas com duas faixas de entradas e duas faixas de saídas estão localizados nas seguintes áreas (Figura 17):

- Nas aproximações (entrelaçamento, durante a aproximação)
- Entrada na rotatória (cruzamento da corrente circulatória)
- Faixa circular (entrelaçamento durante a mudança de faixas dentro da rotatória)
- Saída da rotatória (novamente ocorre o cruzamento da corrente circulatória)

Figura 17 - Pontos de conflitos em rotatórias duplas com entradas e saídas duplas.



Fonte: Tollazzi (2015).

Com o passar dos anos, as rotatórias de múltiplas faixas foram ganhando uma reputação ruim devido a questão da segurança e devido ao fato da capacidade não aumentar como o esperado. Esses fatores associados a questão destas interseções demandarem mais espaço para sua instalação, contribuíram para que as rotatórias de múltiplas faixas começassem a cair em desuso, obrigando os engenheiros de tráfego a buscar soluções alternativas a fim de mitigar esses problemas.

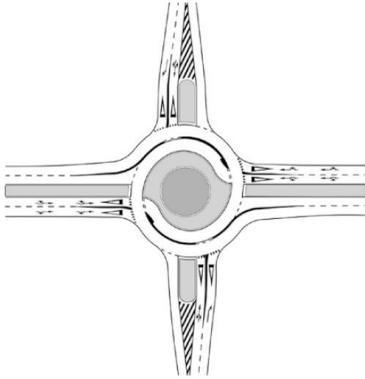
2.2.4 Turbo rotatórias

Segundo Silva, Vasconcelos e Santos (2013), o conceito de turbo rotatória surgiu recentemente, como solução alternativa à rótula de múltiplas vias tradicional (especialmente às duplas). O objetivo deste tipo de rotatória consiste em resolver os problemas de segurança relacionados aos conflitos de entrelaçamentos no anel de circulação, sem que possam ser percebidos prejuízos para a capacidade da interseção. Os autores trazem que embora sejam poucos os estudos científicos que abordam esta matéria, a experiência estrangeira mostra que esta solução assegura elevados níveis de desempenho geral. Crow (2008) *apud* Tollazzi (2015) traz que a turbo rotatória foi desenvolvida na Holanda pelo professor Dr. L.G.H. Fortuijn da Universidade de Delft em 1996, e sua primeira instalação foi no final dos anos 1990, também na Holanda. Desde o aparecimento das turbo rótulas a construção das rótulas duplas foi suspensa na Holanda, e sua utilização se disseminou por vários países europeus, entre os principais, estão Alemanha, Dinamarca, República Tcheca e Hungria. Ao passo que em 2007 na Holanda existiam 70 turbo rótulas em operação, ao final de 2013 contava-se mais de 200.

A turbo rotatória (Figura 18) é um tipo especial de rótula (normalmente rótula dupla), baseado em um sistema de espirais que utiliza elementos físicos para segregar a corrente que circula em torno da ilha central. Segundo Fortuijn (2009), este tipo de rotatória apresenta as seguintes características:

- Não é possível realizar a mudança de faixas dentro da rotatória;
- Os veículos que entram precisam ceder a preferência a no máximo duas faixas de tráfego;
- Baixa velocidade durante a utilização das faixas circulares devido a presença de divisores físicos elevados.

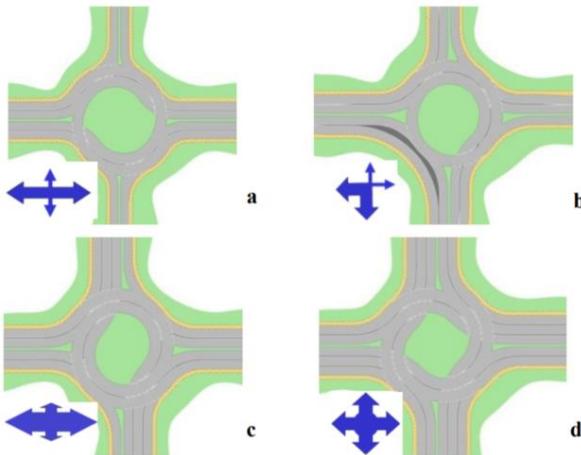
Figura 18 - Turbo rotatória.



Fonte: Tollazzi (2015).

A Figura 19 traz os quatro modelos existentes de turbo rotatórias, os quais tem suas aplicações em função dos fluxos dominantes. Somente foram encontrados na literatura modelos de turbo rótulas com 3 e 4 ramos.

Figura 19 - Tipos de turbo rotatórias de quatro ramos segundo fluxo dominante.



Fluxos dominantes e *Layouts* tipo: (a) Oval; (b) *Knee*; (c) *Spiral*; (d) *Rotor*

Fonte: Silva, Vasconcelos e Santos (2014).

Devido a separação física das faixas circulares (Figura 20), os motoristas necessitam escolher corretamente a faixa desejada antes de ingressar na interseção. Para facilitar essa tarefa, os condutores precisam ser alertados e assistidos por uma boa sinalização (horizontal e vertical),

a qual foi desenvolvida especialmente para o caso das turbo rotatórias (Figura 21).

Figura 20 - Elementos físicos divisores das faixas circulares



Fonte: Tollazzi (2015).

Figura 21 - Sinalização da turbo rotatória.

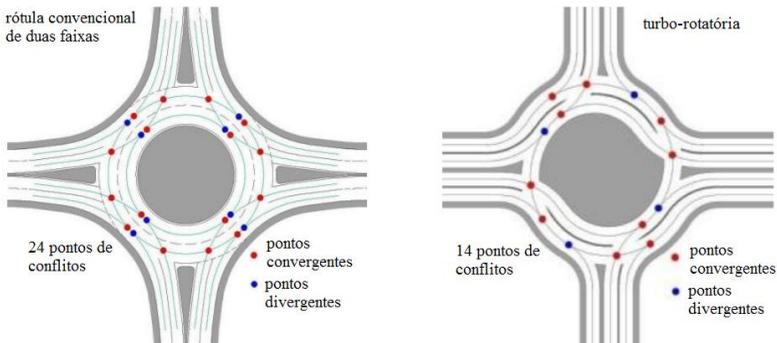


Fonte: Tollazzi (2015).

Segundo Silva, Santos e Gaspar (2013), comparada as rótulas de duas faixas tradicionais, a literatura internacional traz três importantes vantagens das turbo rotatórias: (i) redução no número de conflitos; (ii) redução de velocidade durante a entrada, circulação e saída da rotatória; (iii) risco baixo colisões laterais. A Figura 22 demonstra os pontos de conflitos encontrados em uma rótula dupla tradicional e aqueles encontrados em uma turbo-rotatória. Para Fortuijn (2009), além das turbo rotatórias apresentarem menos pontos de conflitos em relação às rótulas duplas, elas eliminam as zonas de entrelaçamento na pista circular, uma vez que estas são fisicamente divididas. Outro benefício que o autor traz como resultado da separação das faixas circulares, constitui na

impossibilidade dos motoristas que se aproximam pelas faixas da direita invadirem a faixa interna de circulação, a fim de desenvolver uma trajetória mais retilínea. Isso faz com que as deflexões impostas pela ilha central precisem ser respeitadas, e a trajetória mais curvada a ser percorrida pelos veículos faz com que estes necessitem utilizar velocidades menores, a fim de diminuir o desconforto causado por acelerações laterais.

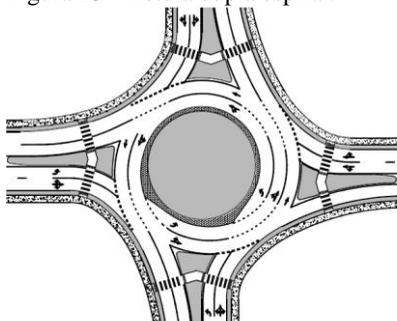
Figura 22 - Pontos de conflitos em uma rótula normal de duas vias e em uma turbo-rotatória.



Fonte: Silva et al. (2013).

Brilon (2011) traz que as turbo-rotatórias são chamadas por esse nome especial apenas na Europa Central. Nas diretrizes dos Estados Unidos, rotatórias que utilizam marcações espirais para delimitação de faixas exclusivas para o giro a esquerda (Figura 23) não aparecem referenciadas por um termo especial (como turbo-rotatórias), e são tratadas como soluções normais. Porém, estas rotatórias não utilizam elementos físicos para dividir as faixas de tráfego (como as turbo), apenas faixas sinalizadoras. Nesse sentido, Tollazzi (2015), traz que a principal razão para a experiência com turbo rotatórias não ser tão benéfica em alguns países (como Alemanha) é o fato destes países utilizarem apenas faixas sinalizadoras para separar as faixas de tráfego, o que não impede os motoristas de mudar de faixa dentro rotatória. O autor traz que o incremento na segurança e na capacidade das turbo rotatórias está associado à diminuição dos pontos de conflitos causado a partir da canalização do tráfego pelos elementos físicos, e a utilização de faixas sinalizadoras para canalizar o tráfego não tem o poder de desempenhar o mesmo efeito para os motoristas que os elementos físicos divisores.

Figura 23 - Rótula dupla espiral.



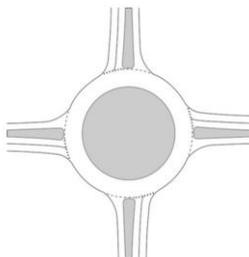
Fonte: FHWA (2010).

2.2.5 Rotatórias compactas de semi duas faixas

Outra alternativa às rótulas duplas, segundo Brilon (2005), são as rotatórias compactas de semi duas faixas (*compact-semi-two lane roundabout*), apresentada na Figura 24, as quais tem seus projetos similares ao das rótula de uma faixa. A principal diferença é a largura da faixa circular. Ela é larga o suficiente para carros de passeio trafegar lado a lado, se preciso. Entretanto, não há marcações na pista circular. Veículos grandes como caminhões e ônibus são forçados a utilizar toda a largura da pista circular durante seu percurso através da interseção. As características fundamentais desse tipo de rótulas são:

- Diâmetro externo: 40 a 60 metros
- Largura da pista circular: 8 a 10 metros (sem marcações para evitar que os motoristas realizem ultrapassagens)
- Aproximações simples ou duplas
- Saídas somente simples
- Não são permitidos ciclistas no interior da pista circular

Figura 24 - Rótula compacta de semi-duas faixas.

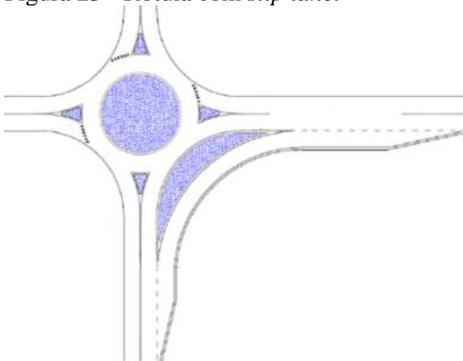


Fonte: Tollazzi (2015).

Segundo Brilon (2011) os resultados dos estudos alemães trazem que essas rotatórias, assim como as rótulas simples, apresentam elevados níveis de segurança. Embora tenha sido percebido um pequeno acréscimo nas taxas de acidentes em relação às rótulas simples, a grande maioria deles continua sendo sem feridos. Os resultados são especialmente benéficos nos casos em que as aproximações são todas simples e o volume de usuários não-motorizados é pequeno. De acordo com autor, na Alemanha, as rotatórias compactas de semi-duas faixas são aceitas pelos comitês responsáveis como sendo as soluções estado-da-arte das rotatórias. As diretrizes alemãs trazem que alargamentos desnecessários devem ser evitados para a construção ou modificação de interseções rotatórias, e trazem as seguintes orientações:

- Se a demanda permitir, somente rotatórias simples devem ser construídas;
- Se a rotatória simples não alcançar a capacidade necessária, alargamentos devem ser testados na seguinte ordem:
 1. Faixas de passagem para separar o tráfego que gira a direita – *slip lane* (Figura 25).
 2. Rotatórias compactas de semi-duas faixas com aproximações simples;
 3. Duplicar as aproximações podem ser necessárias

Figura 25 - Rótula com *slip lane*.



Fonte: Brilon (2011).

Pode-se perceber que tanto os estudos realizados na Alemanha, quanto na Holanda, buscam encontrar soluções alternativas às rótulas de múltiplas faixas tradicionais, tendo em vista os problemas operacionais e de segurança que podem ser encontrados a partir da utilização de mais de uma faixa para circulação da ilha central.

3 MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO APLICADA A SEGURANÇA

De acordo com Young et al. (2014) a utilização de modelos computacionais de simulação do comportamento do motorista, com o objetivo de replicar a interação entre os fatores que contribuem para a ocorrência dos conflitos e/ou do processo de acidentes, consiste numa abordagem alternativa na avaliação do desempenho da segurança viária que vem recebendo cada vez mais atenção, principalmente ao longo da última década. A aplicação da microsimulação de tráfego nos estudos de segurança viária baseia-se na análise dos indicadores *proxy* “sintéticos” de segurança, os quais seguem os preceitos da técnica de análise de conflitos de tráfego que toma como base o *continuum* da segurança viária proposto por Hydén (1987). Os indicadores *proxy* podem ser utilizados para auxiliar na avaliação das alternativas de engenharia de tráfego no que diz respeito à segurança para interseções sinalizadas e não sinalizadas, uma vez que esses indicadores procuram representar de maneira contínua o nível de interação espaço temporal entre os veículos da rede simulada. (GETTMAN e HEAD, 2003; ARCHER, 2005; HUGUENIN et al., 2005 *apud* SOUSA, 2012). Segundo Cunto (2008), um dos recursos mais atraentes encontrados na utilização da simulação é a possibilidade de se testar alternativas potenciais em um “mundo virtual”. Esta característica é especialmente atraente em situações onde alterações geométricas e operacionais são custosas e podem resultar em efeitos operacionais indesejados.

Gettman e Head (2003) investigaram o potencial dos modelos comerciais de simulação existentes para a derivação de indicadores *proxy* de segurança, visando a análise da segurança de interseções de tráfego. O estudo foi resultado de um projeto da FHWA que teve como objetivo avaliar a capacidades de 9 modelos de simulação para a produção de indicadores *proxy*. Também foram especificados algoritmos para o cálculo de tais indicadores. O relatório não indicou superioridade de nenhum modelo de simulação, mas apontou que o software alemão VISSIM, desenvolvido pela PTV, apresentou o maior número de características requeridas para estudos de segurança com razoável nível de confiança.

3.1 CARACTERÍSTICAS DA MODELAGEM

O relatório de Gettman e Head (2003) teve entre seus objetivos investigar os mecanismos que os simuladores necessitavam ter a fim de

possibilitar a obtenção de indicadores *proxy* de segurança a partir da utilização da simulação microscópica. Segundo os autores, pelo lado científico, os elementos-chaves para a obtenção de tais indicadores são a modelagem comportamental e a calibração, e parametrização dos modelos e componentes. Para a avaliação dos indicadores *proxy* de segurança, as simulações microscópicas devem modelar os comportamentos-chave dos motoristas que produzem oportunidades de colisões. Esses comportamentos são principalmente os comportamentos referentes à perseguição veicular, aceitação de brechas e a mudança de faixas. À época do estudo, todos os modelos microscópicos de simulação de tráfego analisados incluíam esses comportamentos em diferentes níveis de resolução e realismo. Entretanto, os autores atentaram que modelos com componentes comportamentais especialmente detalhados e realistas serão mais acessíveis para a avaliação dos indicadores *proxy* de segurança. Os principais atributos responsáveis apontados pelos autores em relação à modelagem comportamental são exibidos a seguir:

1. Velocidade de conversão parametrizada

A velocidade em que as conversões são feitas deve poder ser ajustável pelo usuário ou variável com base no raio de giro, número de faixas e assim por diante. É concebível que o modelo de velocidade de conversão possa influenciar o cálculo dos indicadores *proxy*. O VISSIM disponibiliza um recurso denominado “áreas de velocidade reduzidas” que auxiliam na modelagem deste comportamento. Às áreas de velocidade reduzida (*reduced speed áreas – RSA*), os veículos desaceleram automaticamente antes de entrar na área para ingressar com uma velocidade reduzida. Depois de deixar a RSA, o veículo acelera automaticamente até atingir a velocidade desejada novamente.

2. Reação à luz semafórica amarela

A modelagem deste quesito é importante para medir o desempenho dentro da zona de dilema.

3. Tempo de reação do motorista variável

O tempo variável de reação do motorista reflete a capacidade do modelo para representar o atraso experimentado entre a identificação pelo motorista de uma colisão potencial e a aplicação de medidas de controle (frenagem, aceleração ou mudança de faixa) a fim de evitar uma colisão. No mundo real, os tempos de reação dos motoristas variam de acordo com a experiência, idade e assim por diante.

4. Movimentos nas áreas de conflitos

Para avaliação dos indicadores *proxy* de segurança, é importante que a simulação modele os movimentos dos veículos na interseção com fidelidade significativa.

5. Taxas de aceleração e desaceleração variáveis

As simulações devem modelar as diferentes capacidades dos veículos por classe de veículo. Taxas de desaceleração não condizentes com a realidade (e as distribuições da taxa de desaceleração máxima) podem subestimar as estatísticas verdadeiras dos indicadores *proxy*.

6. Limite da visibilidade

Modelos que limitam as distâncias de visibilidade dos motoristas durante a tomada de decisão (ou que modelam as distâncias de visibilidade pelo tipo de condutor) podem modelar mais precisamente a ciência dos condutores em relação às estatísticas dos indicadores *proxy*. Aqui se incluem a modelagem de restrições de visibilidade impostas por elementos geométricos do sistema viário, como curvas horizontais e verticais, ou impostas por outras questões, como aquelas que ocorrem quando um veículo está perseguindo um ônibus, por exemplo.

7. Cessão da preferência de passagem

A modelagem precisa dos pontos de cessão da preferência de passagem é crucial para a coleta precisa dos indicadores *proxy*.

8. Interação com pedestres

A segurança dos pedestres é de extrema importância para os engenheiros de tráfego. Simulações que modelem as interações dos pedestres com os veículos podem ter a capacidade de avaliar os efeitos de várias alternativas na segurança dos pedestres.

9. Entrelaçamento amigável

O entrelaçamento amigável é o fenômeno em que certos tipos de motoristas retardam ou param para permitir que os veículos se entrelacem com (mais) segurança. Essa situação ocorre no mundo real. Isso se opõe à modelagem de desaceleração ou parada apenas em um sentido reativo. O entrelaçamento amigável indica que o veículo seguidor pode criar uma brecha para um veículo entrar na corrente.

Em relação à calibração e parametrização, Gettman e Head (2003) trazem que os principais atributos necessários são:

1. Tempo de resolução variável

Simuladores que permitem variar o tempo de resolução são preferíveis àqueles com tempo de resolução fixos para avaliação da sensibilidade dos indicadores *proxy*. Além disso, simuladores com tempo de resolução variável tipicamente possuem modelos comportamentais mais robustos, tendo em vista que as equações dinâmicas são parametrizadas.

2. Tempo de resolução menor que 1 segundo

A precisão da avaliação de um indicador *proxy* depende da constante atualização das variáveis envolvidas em seu cálculo. As escalas temporais de tomada de decisão para a avaliação do indicador *proxy* estão na ordem de décimos de segundo. O estado-da-arte dos softwares de microssimulação inclui tempo de resolução ajustável, podendo (e sendo o ideal) que este seja de 0,1 segundo.

3. Critério para aceitação de brechas associado ao atraso

Muitos motoristas no mundo real mudam seu comportamento com base em quanto tempo eles esperaram (ou seja, eles aceitam brechas menores e aplicam acelerações maiores quanto maior for o tempo de espera para realizar um movimento oposto particular). Simulações que modelam esse comportamento são preferidas.

4. Comprimento dos veículos

A segurança de algumas manobras conflituosas depende dos tamanhos dos veículos envolvidos. Todos os simuladores analisados contemplam este quesito.

5. Comprimento dos veículos considerado pela lógica de aceitação de brechas

Os indicadores *proxy* baseados nas proximidades de dois veículos no espaço e no tempo são afetados se os veículos forem modelados como pontos e não como retângulos. Alguns resultados de animação indicam que alguns modelos não consideram adequadamente o comprimento do veículo durante a aceitação de brechas, ou as rotinas de animação não são precisas o suficiente para indicar que os veículos não teriam colidido no mundo real.

6. *Headways* variáveis

Diferentes tipos de motoristas mantêm diferentes *headways* entre o veículo que eles estão perseguindo, com base no nível de risco aceito.

Isso deve ser refletido na simulação para representação precisa dos indicadores *proxy*. Todos os modelos incluem essa característica em graus variados.

7. *Headway* variável na dissipação de filas

A medida que a fila se dissipa em um sinal de trânsito, diferentes tipos de motoristas reagem a taxas diferentes que podem ter efeito sobre indicadores *proxy* (principalmente indicadores de conflitos de extremidade traseira).

Para Li et al (2013), três elementos chaves no VISSIM exercem impacto crítico no desempenho operacional de modelos de simulação de rotatórias. Esses elementos incluem: (1) Regras de Prioridade ou Áreas de Conflitos, para o controle da lógica de preferência; (2) Zonas de Velocidades Reduzidas; e, (3) O modelo de perseguição veicular adotado, Wiedeman 74 ou Wiedeman 99.

A seguir serão exibidos detalhes dos principais algoritmos dos comportamentos de condução (perseguição, troca de faixas e aceitação de brechas), que buscam representar a modelagem comportamental dos veículos simulados. Será dado ênfase especial ao pacote de simulação que será utilizado no estudo de caso, o VISSIM.

3.1.1 Algoritmo de perseguição veicular

Olstam e Tapani (2004) trazem que os modelos de perseguição veicular são comumente classificados em classes de acordo com a lógica sobre os quais estão embasados, entre as quais, pode-se citar:

1. Gazis-Herman-Rothery (GHR). Neste modelo, a aceleração do veículo seguidor é proporcional a sua velocidade, a velocidade diferencial em relação ao veículo predecessor, e à distância frente-traseira (*headway*).
2. Distância de segurança: a premissa é que o veículo seguidor sempre mantém uma distância de segurança do veículo que está perseguindo.
3. Psico-físicos: utilizam limites de percepção, os quais permitem ao motorista detectar se está se aproximando do veículo líder através de variações em seu tamanho aparente.

Brackstroke e McDonald, (1999), *apud*, Sousa (2012) realizaram uma análise crítica sobre os modelos de perseguição veicular com

ênfoque na segurança viária. Os autores apontaram que a base sobre qual o modelo psico-físico está estruturado é sem dúvida a mais coerente e a que melhor pode descrever a maioria das características observadas no comportamento de condução cotidiano. O modelo psico-físico de Wiedeman (1974) é o modelo adotado pelo microssimulador de tráfego VISSIM. Este modelo conta com quatro regimes de condução:

1. Direção livre (sem reação)

Não se observa influência de um veículo predecessor dentro do limite estipulado (padrão é 150 metros). Nesse regime, o motorista busca alcançar e manter a sua velocidade desejada. Especificamente, a velocidade em direção livre vai variar devido às imperfeições do controle do acelerador, e sempre irá oscilar em torno da velocidade desejada.

2. Aproximação

É o regime em que o motorista adapta a velocidade em função da menor velocidade do veículo predecessor. Durante a aproximação o motorista desacelera, de modo que não se observa diferença de velocidades após a distância de segurança desejada ser atingida.

3. Perseguição (reação inconsciente)

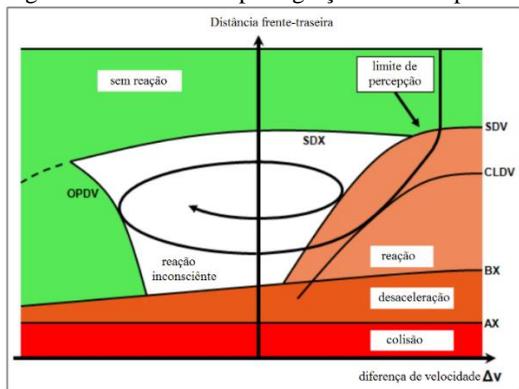
O motorista segue um veículo predecessor sem executar nenhuma aceleração ou desaceleração consciente. Nesse regime, ele busca manter a distância de segurança constante. Novamente, devido às imperfeições no controle da aceleração, a diferença de velocidades oscila próximo a zero.

4. Frenagem (desaceleração)

O motorista aplica taxas médias a elevadas de desaceleração se a distância ao veículo predecessor cair abaixo da distância de segurança desejada. Esse regime pode acontecer quando o veículo predecessor mudar sua velocidade repentinamente, ou quando o veículo de uma faixa adjacente forçar uma brecha durante uma troca de faixas, se colocando entre o veículo seguidor e seu predecessor.

A Figura 26 apresenta os limites de percepção e de reação e as distâncias do modelo de Wiedemann.

Figura 26 - Modelo de perseguição veicular psico-físico de Wiedemann (1974)



Fonte: PTV (2015).

Onde:

SDX = distância máxima de perseguição;

SDV = ponto de aproximação. Esse limite é utilizado para expressar o ponto em que o motorista percebe que está se aproximando de um veículo mais lento;

CLDV = diminuição da diferença de velocidade;

OPDV = aumento da diferença de velocidade. Esse limite descreve o ponto aonde o motorista percebe que está mais lento que o veículo líder.

Pode-se optar por dois modelos de perseguição veicular: o Wiedemann 74 e o Wiedemann 99. De acordo com o modelo de perseguição escolhido, os parâmetros do modelo mudam. PTV (2015) traz que o modelo de Wiedemann 74 é adequado para o tráfego urbano e áreas de convergência, ao passo que o modelo de Wiedemann 99 é indicado para modelar o tráfego em “freeways” sem áreas de convergências. Também é possível escolher uma terceira opção, denominada “sem interação”, na qual os veículos não se reconhecem. Essa última opção é indicada para modelar o fluxo de pedestres de uma maneira simplificada. Nesse estudo, optou-se por utilizar o modelo de Wiedemann 74 (W74), tendo em vista que a rotatória a ser modelada conta com áreas de convergência. No modelo W74, a distância frente-traseira desejada, “ d ”, é calculada pela expressão (3.1):

$$d = ax + bx \quad (3.1)$$

Onde:

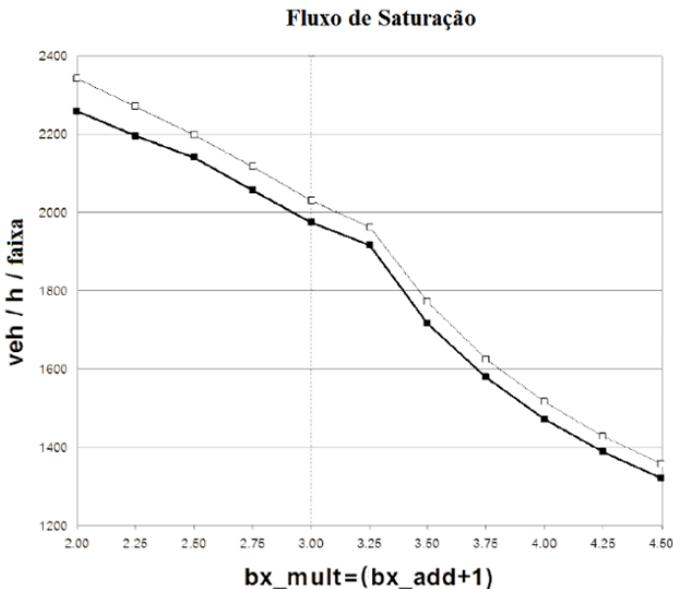
ax é a distância média desejada entre dois veículos;

$$bx = (bx_{add} + bx_{mult} * z) * \sqrt{v}$$

Segundo Olstam e Tapani (2004), bx é a mínima distância de perseguição desejada para baixas diferenças de velocidades, onde os parâmetros bx_{add} e bx_{mult} são parâmetros de calibração. O termo “ z ” é um valor de alcance que varia de 0 a 1 e é normalmente distribuído em torno de 0,5 com um desvio padrão de 0,15. O termo “ v ” é a velocidade do veículo em metros por segundo.

A Figura 27 traz a título de exemplo a relação entre os parâmetros de calibração e o fluxo de saturação para um cenário hipotético. A diferença entre as linhas diz respeito a inserção de caminhões (a linha inferior conta com 5% de veículos pesados).

Figura 27 - Fluxo de saturação em função dos parâmetros de calibração



Fonte: PTV (2015).

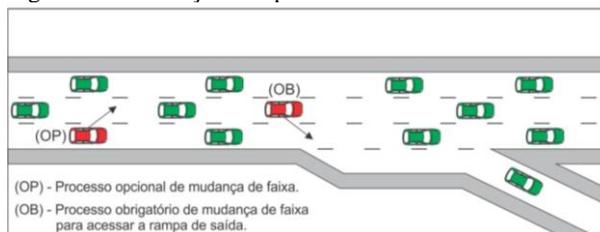
Pode-se perceber que conforme os valores de bx_{add} e bx_{mult} decrescem, o fluxo de saturação aumenta. De acordo com o estudo de Li et al. (2013), com a diminuição desses valores, percebe-se que o *headway* de acompanhamento (denominado *follow-up headway*) diminui. O

headway de acompanhamento diz respeito a mesma brecha ser aceita por dois veículos em fila, de modo que sua diminuição faz com que o veículo que está seguindo o líder aceite brechas menores, oportunizando seu ingresso conjunto na interseção. Quanto maior for o valor do *headway* de acompanhamento, menor é a capacidade da rotatória, uma vez que os veículos realizam mais paradas na linha de preferência.

3.1.2 Algoritmo de troca de faixas

Segundo Sousa (2012) e Cunto (2008), na simulação microscópica modelagem de troca de faixas é realizada com base em um processo hierárquico. Existem dois tipos de mudança de faixa: o processo opcional e o processo obrigatório, os quais são ilustrados na Figura 28. A primeira mudança, a opcional, consiste no desejo de mudar de faixa devido à obstruções ou veículos lentos na faixa atual, tornando a faixa de destino mais atrativa. Já o processo obrigatório, consiste em mudar de faixa a fim de conseguir chegar ao destino desejado. Para a realização da mudança de faixas os motoristas que querem realizar tal mudança irão acelerar ou frear a fim de encontrar ou criar brechas para se inserirem nas faixas adjacentes.

Figura 28 - Ilustração dos processos de troca de faixa



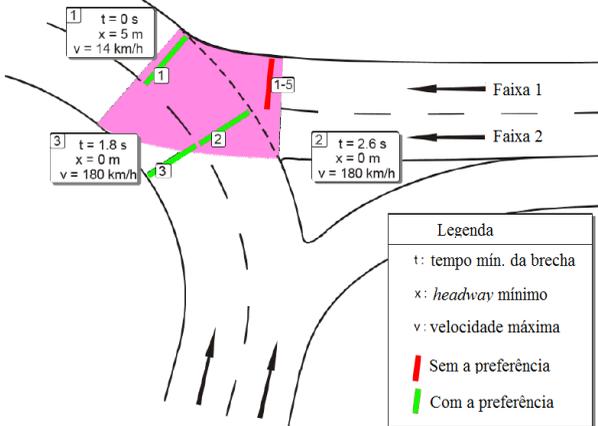
Fonte: Adaptado de Al-Kaisy *et al.* (1999) *apud* Sousa(2012).

3.1.3 Processo de Aceitação de brechas

No VISSIM o processo de aceitação de brechas pode ser modelado com a utilização de “regras de prioridade” ou com as “áreas de conflitos”. As regras de prioridade consiste no posicionamento de detectores virtuais e na determinação de um valor para a brecha crítica e de um valor de *headway*. O valor da brecha que o veículo necessita para ingressar em determinada interseção deve ser maior que o da brecha crítica estipulada. Já o valor de *headway* tem a função de evitar que o veículo ingresse na

interseção caso exista a formação de uma fila no interior da interseção. A mostra um exemplo de como utilizar as regras de prioridades no VISSIM. A Figura 29 traz um exemplo de como utilizar as regras de prioridades em rótulas duplas.

Figura 29 - Regras de prioridade para rótula dupla



Fonte: PTV (2015).

O marcador “1” serve para evitar que os veículos ingressem na rotatória caso o tráfego esteja lento ou congestionado, e os marcadores “2” e “3” são para as condições de fluxo normal, os quais utilizam o valor da brecha crítica inserida como base. As regras de prioridade possibilitam a inserção de marcadores por classe de veículo, de modo que para ônibus e veículos pesados deve-se utilizar regras de prioridades específicas com valores maiores para as brechas.

Por outro lado, as áreas de conflitos correspondem a área de sobreposição de dois *links* (ou conectores), a qual é gerada automaticamente pelo VISSIM quando este detecta tal sobreposição. Segundo PTV (2015), é preferível utilizar áreas de conflito às regras de prioridade para modelar o comportamento de condução. As áreas de conflito permitem que o comportamento de condução seja melhor modelado, tendo em vista que os condutores irão planejar como irão percorrer tal área. Um motorista que se aproxima observa os veículos no fluxo de tráfego principal e então decide quando entrar. Ele então planeja acelerar nos próximos segundos. A aceleração permite que ele passe a área de conflito. Ele contabiliza o tráfego para juntar-se à área de conflito. Caso ele saiba que terá que parar ou dirigir lentamente por causa de outros

veículos, contará mais tempo para atravessar a área do conflito ou optará por esperar mais tempo.

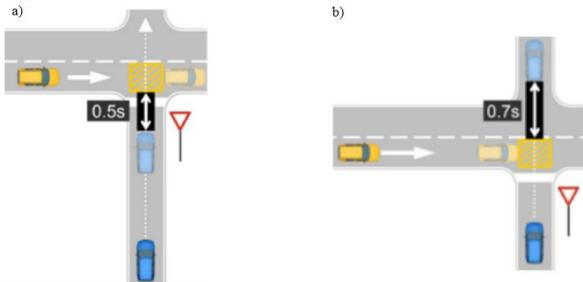
Os veículos no fluxo principal de tráfego também reagem às áreas de conflito: se um veículo não conseguir atravessar toda a área de conflito porque o motorista julgou mal a situação, o veículo no fluxo de trânsito principal irá travar ou mesmo parar a fim de evitar uma colisão. Se uma fila estiver se formando devido a presença de um semáforo a jusante da área de conflito (por exemplo), os motoristas do fluxo de tráfego principal tentam não parar dentro da área de conflito a fim de evitar bloqueios no cruzamento. Assim como os motoristas que irão ceder a preferência, os motoristas com o direito de preferência também irão realizar um processo de tomada de decisão comparável para o cruzamento das áreas de conflitos, similarmente àqueles que não possuem a preferência de passagem. Para isso, o VISSIM utiliza um atributo denominado “evitar bloquear o tráfego secundário”, o qual é determinado em porcentagem. O padrão do VISSIM é 100%, o que significa dizer que todos os veículos da corrente principal irão buscar não bloquear as áreas de conflitos em casos de congestionamentos, mesmo que estejam na corrente principal

O primeiro passo para a configuração das áreas de conflitos consiste na determinação do *status* da área. O *status* da área pode ser verde-vermelho, ambas vermelho, e ambas amarelo. O primeiro caso, verde-vermelho, é utilizado quando uma via com preferência de passagem (marcada em verde) exige que a outra via (marcada em vermelho) ceda a preferência de passagem aos veículos que se aproximam pela corrente principal (rotatória). O segundo caso, ambas vermelho, deve ser utilizada quando não há uma preferência de passagem estabelecida. Esta configuração é utilizada para que os veículos se reconheçam e não se sobreponham, de modos que permaneçam em sua sequência original de chegada. A configuração ambas vermelho deve ser utilizada nos conflitos de ramificação. O terceiro caso, ambas-amarelo é o *status* que é atribuído automaticamente quando o VISSIM detecta uma área de conflito. Nessa configuração não há preferência de passagem estabelecida e os veículos não se reconhecem. A configuração amarela-amarela só deve ser utilizada quando a lógica de preferência utilizada for regida pelas regras de prioridades.

Para a computação dos tempos das brechas, o VISSIM utiliza a brecha frontal e a traseira (Figura 30). A brecha frontal de acordo com PTV (2015) é “a mínima brecha em segundos entre a extremidade traseira de um veículo da corrente principal e a extremidade dianteira de um veículo na via secundária. Este atributo é utilizado nos casos dos conflitos convergentes e de cruzamento. A brecha traseira é o tempo que deve ser

previsto após um veículo sem a preferência de passagem deixar a área de conflito e antes de um veículo prioritário entrar na mesma área. Somente para os conflitos de cruzamento.

Figura 30 – Brecha frontal (a) e brecha traseira (b)

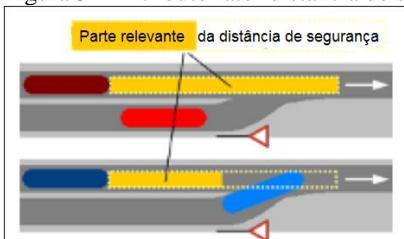


Fonte: PTV (2015).

A distância máxima que um veículo que se aproxima pela corrente secundária pode observar veículos de outros segmentos, é denominada “visibilidade” da área de conflito. Assim, os veículos podem planejar seu movimento com certa antecedência. O padrão deste atributo é 100 metros.

Outro atributo utilizado pelo VISSIM para a modelagem do processo de aceitação de brechas em áreas de conflitos é denominado fator distância de segurança, o qual é aplicado somente aos conflitos convergentes (padrão 1,5). Segundo PTV (2015), este fator é multiplicado pela distância de segurança desejada de cada veículo da corrente principal visando determinar a mínima distância que um veículo da corrente secundária (que deve conceder a preferência) deve manter quando está completamente em áreas de conflitos convergentes. A Figura 31 mostra situações idênticas com diferentes fatores: acima = 1,0; abaixo = 0,5. Isso faz com que o veículo vermelho tenha de parar, enquanto o veículo azul consegue aproveitar a brecha.

Figura 31 - Atributo fator distância de segurança



Fonte: PTV (2015).

3.2 SURROGATE SAFETY ASSESSMENT MODEL (SSAM)

Após o estudo realizado por Gettman e Head (2003), foi constatado que os modelos de microssimulação de tráfego eram promissores para a coleção de indicadores *proxy* “sintéticos” de segurança. Sintéticos pois eles são obtidos a partir de modelos de simulação e não a partir de estudos de campo. A partir de então, somaram-se esforços a fim de desenvolver um aplicativo que conseguisse incorporar os algoritmos propostos para detecção e classificação de conflitos visando realizar automaticamente essa tarefa. O *Surrogate Safety Assessment Model* (SSAM) é um software desenvolvido pela FHWA em conjunto com alguns dos principais desenvolvedores de software de microssimulação para realizar análises estatísticas de dados de trajetória de veículos simulados, extraídos a partir da utilização de modelos de simulação microscópica (PU e JOSH, 2008). O SSAM estima indicadores *proxy* sintéticos com base na identificação, classificação e avaliação dos conflitos de tráfego que ocorrem no modelo de microssimulação. Sousa (2012) traz que o SSAM é o aplicativo para estimação de interações veiculares mais bem documentado. Vasconcelos, Silva e Seco (2013) trazem que a abordagem do SSAM elimina a subjetividade associada a uma análise tradicional de conflitos de tráfego e permite avaliar a segurança de determinada facilidade em um ambiente controlado, antes da ocorrência de acidentes. Entretanto, os autores apontam que a experiência prática com o SSAM é limitada e os resultados não são consensuais.

Segundo Gettman et al. (2008), os objetivos do SSAM são:

- Fornecer uma ferramenta para engenheiros de tráfego realizarem análises comparativas de segurança.
- Ser compatível com o maior número de modelos de segurança possível.
- Utilizar os melhores indicadores *proxy* (i.e. os mais representativos da colisão de risco).
- Embasar análises flexíveis (e.g. diferentes tratamentos estatísticos, diferentes tipos de visualizações).

Wang (2012) aponta que o SSAM fornece duas classes de indicadores *proxy*: indicadores da severidade do conflito e indicadores da severidade de acidentes que aconteceriam a partir do evento conflituoso. O tempo para colisão (TTC), o tempo de pós-invasão (PET) e a taxa de desaceleração (DR) são indicadores da severidade do conflito, enquanto a velocidade máxima dos veículos envolvidos (MaxS) e a velocidade

relativa máxima (DeltaS) são indicadores para determinação da severidade de acidentes que aconteceriam. Segundo o autor, a utilização do SSAM mostrou uma relação entre o indicador *proxy* TTC, conflitos e acidentes (aumento no número de conflitos com $TTC \leq 1,5$ s resulta no aumento do número de acidentes).

3.2.1 Indicadores *proxy* computados pelo SSAM

A seguir são expostos os principais termos e definições dos indicadores *proxy* utilizados pelo SSAM. As informações completas estão disponíveis em Gettman et al. (2008).

1. TTC

É o menor valor do tempo-para-colisão observado durante o conflito. Esta estimativa é baseada na atual localização, velocidade e trajetória futura dos dois veículos em dado instante. O valor de TTC é definido a cada passo de tempo durante o evento conflituoso. O evento de conflito é concluído depois que o valor de TCC sobe novamente acima do valor limite crítico. Este valor é registrado em segundos.

2. PET (*post encroachment time*)

É o menor “tempo após a invasão” observado durante o conflito. O tempo após a invasão é o tempo decorrido entre o primeiro veículo envolvido no conflito deixar de ocupar determinada posição e o segundo veículo chegar a tal posição. Um valor de zero indica uma colisão, uma vez que ambos veículos ocuparam o mesmo lugar no espaço ao mesmo tempo. Um tempo após a invasão é associado a cada passo de tempo durante o conflito. Um evento conflituoso é concluído quando o valor final do PET é registrado na última posição em que o valor do tempo para colisão ainda permanecia abaixo do valor crítico para o limite estabelecido. Este valor é registrado em segundos.

3. MaxS

É a velocidade máxima de qualquer um dos veículos envolvidos no conflito (enquanto o TTC está abaixo do limite estabelecido).

4. DeltaS

É a diferença de velocidade entre veículos observada no tMinTTC. Mais precisamente, esse valor é matematicamente definido como o módulo da diferença entre as velocidades dos veículos (ou trajetórias),

sendo que, se v_1 e v_2 são os vetores de velocidade do primeiro e do segundo veículo, respectivamente, então $\Delta S = \|v_1 - v_2\|$.

5. DR (*deceleration rate*)

É a taxa inicial de desaceleração do segundo veículo, gravada como a taxa de aceleração instantânea. Se o veículo freia (reage), este é o primeiro valor de aceleração negativa observado durante o conflito. Se o veículo não freia, esse é o menor valor de aceleração observado durante o conflito.

6. MaxD

É a desaceleração máxima do segundo veículo, registrada como a taxa de aceleração instantânea mínima observada durante o conflito. Um valor negativo indica desaceleração (travagem ou liberação do pedal do acelerador). Um valor positivo indica que o veículo não desacelerou durante o conflito.

7. MaxDeltaV

É o valor máximo de ΔV observado em qualquer um dos veículos envolvidos no conflito. O ΔV é a mudança na alteração da velocidade do conflito, (obtido através da velocidade do veículo registrada no instante do mínimo TTC e do *heading*) e pela velocidade de pós-colisão calculada. O *heading* expresso como o ângulo medido no sentido anti-horário a partir do eixo x (que é assumido como apontando para a direita), de modo que 0° o veículo está voltado para a direita, 90° o veículo está voltado para cima, 180° para a esquerda e 270° está para baixo. O ângulo varia de 0° a 360° .

O valor dos indicadores TTC, PET e DR destinam-se a indicar a severidade do evento conflituoso. Isso mede a probabilidade de uma colisão resultar de um conflito, de modo que:

- TTC menores indicam maiores probabilidades de colisões.
- PET menores indicam maiores probabilidades de colisões.
- DR maiores indicam maiores probabilidades de colisões.

MaxS e ΔS são utilizados para indicar a gravidade provável da colisão (potencial) resultante, se o evento de conflito tivesse resultado em uma colisão ao invés de um quase acidente, de modo que:

- MaxS maiores indicam maior gravidade da colisão resultante.

- DeltaS maiores indicam maior gravidade da colisão resultante.

A nova versão do SSAM lançada em setembro de 2017 (SSAM v.3) incorporou três novos indicadores proxy:

1. P(EUA) - Probabilidade da ação evasiva não ter êxito (*probability of unsuccessful evasive action*), proposto por Mohamed e Saunier (2013).
2. mTTC - múltiplo TTC.
3. mPET. – múltiplo PET.

Esses indicadores utilizam as posições iniciais e as velocidades do par de veículos como base para gerar 100 caminhos para cada veículo, usando combinações de aceleração e orientação que são geradas independentemente a partir de duas funções de distribuição triangulares, e para detectar todos os pontos de colisão entre cada par de caminhos projetados. P (UEA) é a porcentagem resultante da divisão do número de pontos de colisão pelo número total de combinações de caminhos. mTTC é o TTC total do conjunto de pontos de colisão para o par de veículos, e o mPET é o PET total do conjunto de pontos de colisão para o par de veículos. Maiores explicações sobre P(UEA) pode ser encontradas em Mohamed e Saunier (2013).

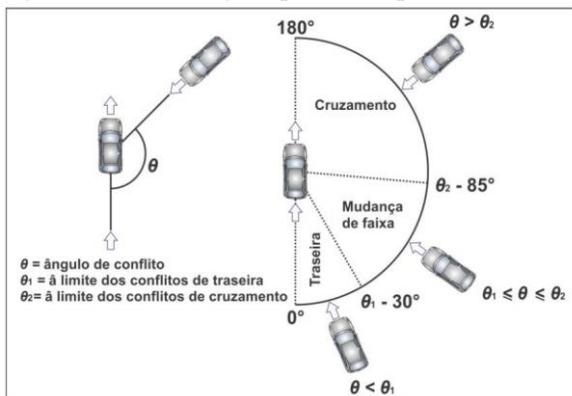
3.2.2 Detecção e classificação dos conflitos

Para a detecções de conflitos o software utiliza dois valores limiares para indicadores *proxy* de segurança a fim de delinear quais interações veiculares são classificadas como conflitos. Estes dois limiares são aplicados ao valor de tempo para colisão (TTC) e tempo após a invasão (PET). O software fornece valores de limites padrões para esses indicadores, que o analista pode substituir opcionalmente com seus valores alternativos preferidos (máximo para o TTC = 5,0s e para o PET = 9,95s). O SSAM utiliza um valor TTC padrão de 1,5 segundo, como sugerido por Sayed, Brown e Navis (1994) e por Hayward (1972) em pesquisas anteriores. Segundo Souleyrette e Hochstein (2012), o valor de 1,5 segundo resultou de estudos realizados em interseções urbanas semaforizadas, (velocidade entre 40 e 50 km/h aproximadamente). Os autores trazem que com base na velocidade do conflito, no tempo para o acidente e na relação da severidade dos conflitos desenvolvida por Hydén (1987) e expressa na Figura 6, o valor limite do TTC para identificação

de conflitos sérios pode ser estimado em 4,50 segundos para uma rodovia com limite de velocidade de 105 Km/h. Já para o PET o valor limite padrão é 5 segundos, conforme estudo de Hydén (1987) (GETTMAN et al., 2008). Entretanto, para Souleyrette e Hochstein (2012) não é claro como o valor padrão de 5,0 segundos para o limite máximo do PET foi inicialmente selecionado ou derivado no SSAM. Segundo os autores, as interações precisam satisfazer os dois critérios para serem identificados pelo SSAM como conflito.

O Tipo do conflito (*ConflictType*) descreve se o conflito é resultado de um conflito longitudinal (*rear end*), mudança de faixa (*lane change*) ou de um movimento de cruzamento (*crossing*). Se a informação de *link* e de faixa não está disponível para os dois veículos então o tipo de evento é classificado baseado unicamente no valor absoluto do ângulo de conflito que segue, de acordo com Figura 32.

Figura 32 – Limite angular para cada tipo de conflito



Autor: Adaptação de Gettman et al. (2008) apud Sousa (2012).

O conflito é classificado como longitudinal se o ângulo de conflito for menor que 30 graus. Um conflito de cruzamento se o ângulo de conflito for maior que 85 graus, ou ainda um conflito de mudança de faixa. Contudo o modelo de simulação que produz os dados da trajetória do veículo pode, geralmente, gerar informação de *link* e de faixa para ambos os veículos. Se a informação de *link* e de faixa estão disponíveis, essas informações são utilizadas para classificação caso ambos veículos estejam utilizando a mesma faixa (do mesmo *link*), ao início e ao final do evento de conflito. Se os dois veículos ocupam a mesma faixa no início e no final do evento, então isso é classificado como um evento

longitudinal. Se algum veículo finaliza o evento conflituoso em uma faixa diferente da que começou (sem que haja mudança de *link*), então o evento é classificado como mudança de faixa. Se algum dos veículos muda o segmento sobre o percurso do evento, então o ângulo conflito determina a classificação como descrito anteriormente. Entretanto, em alguns casos como por exemplo nas mudanças de faixas para uma faixa adjacente de conversão, ou na entrada de uma área de interseção, podem ser considerados como mudanças de *links*, dependendo do modelo de simulação subjacente. Isso ocorre pois em algumas situações, veículos que aparentam estar trafegando na mesma faixa podem, na realidade, estar sendo considerados pelo modelo de simulação como trafegando em *links* diferentes que estão sobrepostos.

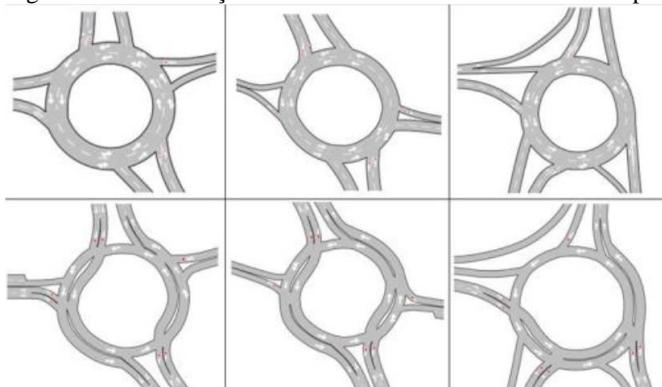
A lógica de classificação foi aprimorada durante o desenvolvimento do SSAM. Inicialmente a classificação era realizada segundo outros limites angulares. Embora a lógica revisada tenha aprimorado a classificação, ainda existem casos de “áreas cinzas” (e.g. um veículo entrando em uma rotatória colide com um veículo dentro da rotatória) onde a classificação do evento como de cruzamento, troca de faixa ou extremidade traseira é indiscutivelmente um julgamento subjetivo.

3.2.3 SSAM na avaliação de rotatórias

A utilização do SSAM para a avaliação do desempenho de segurança de rotatórias é uma área ainda pouco explorada, de modos que poucos trabalhos foram publicados sobre esse tema. Segundo Roach, Christofa e Knodre (2015) enquanto o SSAM tem sido extensivamente utilizado para avaliações de segurança de interseções, as aplicações do SSAM em rotatórias são limitadas.

Bernardo (2015) utilizou o simulador AIMSUM em conjunto com o SSAM para comparar o desempenho de segurança de uma solução proposta para um corredor composto por três interseções do tipo rótulas duplas. O cenário proposto consiste na alteração das interseções para turbo-rótulas, conforme Figura 33. O autor desconhece a existência de trabalhos científicos que avaliem a nível de segurança a utilização de turbo rotatórias de forma conjunta. Considerou para seu trabalho, que a calibração não necessitou ser muito exaustiva, tendo em vista que não teve como objetivo retratar exatamente a realidade, mas sim comparar o desempenho associado a duas soluções distintas. Os parâmetros que o autor calibrou foram a velocidades em regime livre de circulação e o tempo de reação.

Figura 33 – Codificação das rótulas e turbo-rótulas estudadas por Bernardo.



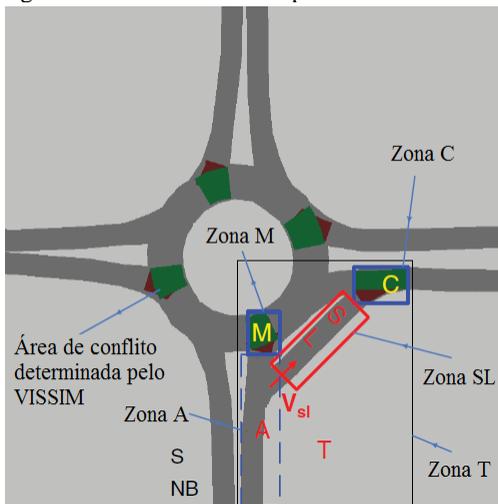
Fonte: Bernardo (2015).

Em seu estudo, Bernardo (2015) percebeu que a utilização de turbo rótulas no corredor estudado eleva a frequência de conflitos registrados pelo SSAM. Entretanto estes apresentam média de TTC superior e média de DeltaS inferior em relação ao corredor composto por rótulas duplas tradicionais, o que indica que segundo o indicador TTC, é menor a probabilidade destes conflitos resultarem em colisões, e segundo o indicador DeltaS, as colisões que resultarem dos conflitos serão menos severas, uma vez que apresentam menor diferencial de velocidade relativa entre os veículos envolvidos nos conflitos. Foi percebido que com o aumento da demanda, o TTC médio do corredor existente foi aumentando, ao passo que o TTC médio do cenário proposto se manteve constante. Em relação ao indicador DeltaS, este mostrou-se sensível para o incremento da demanda em ambos os cenários analisados, tendo sido observada uma diminuição em seu valor médio conforme o aumento da demanda. O autor traz que o aumento de procura de tráfego ocasiona congestionamento na rede que resultam na pratica de velocidades mais reduzidas pelos condutores (tendo em vista que assim demorarão mais tempo para colidirem se permanecerem na mesma trajetória), fazendo com que a gravidade dos conflitos tenda a ser menor. Para o autor, os resultados obtidos mostram de forma consensual e robusta que a transformação de um corredor de rótulas de duas vias num corredor de turbo-rótulas, funcionando próximo da saturação, se traduz num aumento considerável do número de conflitos. Esses conflitos resultam majoritariamente da interação dos veículos nos trechos de ligação entre as interseções, tendo em vista que as separação física entre as faixas de

tráfego no anel circular obriga os motoristas a trocarem de faixa nesses trechos.

Al-Ghandour et al. (2011) utilizaram a simulação microscópica de segurança aplicada a uma rotatória simples e utilizaram o SSAM para realização das análises dos indicadores *proxy* simulados. Os autores se preocuparam em investigar quais os efeitos da incorporação de uma “*slip lane*” em uma das saídas da rotatória (Figura 34). A utilização da faixa exclusiva de conversão desvia parte do fluxo do interior do anel circular, entretanto cria dois pontos de conflitos adicionais: um conflito de ramificação na aproximação e um conflito de convergência na saída. Em seu estudo, tiveram o objetivo de: (i) desenvolver modelos de conflitos para previsão da segurança nas principais zonas de conflitos das rotatórias; (ii) quantificar a redução dos conflitos de tráfego dentro da rotatória a partir da utilização de três tipos controle na saída da *slip lane* (preferência, parada obrigatória, fluxo livre), e comparando os resultados de cada caso com o cenário base sem a *slip lane*, e; (iii) validação do desempenho da segurança simulada nas rotatórias através de comparação com os modelos de acidentes existentes e dados de acidentes empíricos, coletados em campo a partir de uma amostra representativa de rotatórias de pista simples.

Figura 34 – Rótula estudada por Al-Ghandour et al. (2011)



Fonte: adaptado de Al-Ghandour et al. (2011).

Os autores concluíram que a instalação de uma *slip lane* com saída livre reduz a ocorrência global dos conflitos, em especial nos casos em que há muito tráfego realizando a conversão a direita, enquanto por outro lado, a utilização da *slip lane* associada com a placa de “PARE” na saída gera mais situações de conflitos, mesmo em comparação com o caso onde não há a existência da *slip lane*. Os resultados encontrados, segundo os autores, demonstraram que o SSAM é útil para avaliação da segurança em rotatórias e para o desenvolvimento de uma relação empírica entre conflitos simulados e acidentes observados em campo. Também trazem que a simulação do VISSIM demonstrou que quando a capacidade da rotatória se torna saturada, o número de conflitos não mais se alteram (curvas se tornam linhas retas) devido aos veículos adicionais não poderem entrar na rede altamente congestionada. Por isso, os número de conflitos oriundos de uma condição saturada devem ser tratados com cuidado, pois eles podem subestimar o número real de conflitos que ocorreriam em uma rotatória real nessas condições.

Vasconcelos, Silva e Seco (2013) utilizaram o AIMSUN e o SSAM para avaliar o desempenho de segurança de uma turbo rotatória em comparação a uma rótula simples e a uma rótula dupla. Para a classificação de um evento como conflito, os autores utilizaram apenas o indicador TTC, e para a severidade dos conflitos, o DeltaS registrado no instante de mínimo TTC. Os três modelos foram simulados para a mesma demanda de tráfego e para a mesma alocação da demanda. A análise do SSAM indicou, como era esperado, que a rótula dupla apresentou os piores resultados, tanto em número de conflitos, quanto na severidade dos mesmos, devido principalmente a manobra de entrelaçamento. A turbo-rótula, comparada com a rótula simples, apresentou menos conflitos, mas estes foram mais severos, devido ao incremento no ângulo de entrada com a trajetória circular. A partir de seu estudo, os autores apontaram duas conclusões principais: (i) apesar de algumas limitações relacionadas a natureza dos modelos de microsimulação existentes, a análise SSAM é uma abordagem muito promissora para avaliar a segurança de novas facilidades ou de projetos inovadores, e (ii) com base em uma validação conceitual limitada, foi encontrado que o desempenho de segurança de uma turbo rotatória é parecido com o de uma rótula simples, mas com a vantagem de oferecer níveis de capacidade muito superiores.

Vasconcelos et al. (2014) realizaram uma pesquisa cujo objetivo específico consistiu em validar os resultados obtidos a partir da utilização do SSAM em interseções. A pesquisa utiliza dois métodos para a validação: o primeiro compara o número de conflitos simulados e o número de acidentes com vítimas previsto por três diferentes modelos

analíticos de regressão. O segundo método compara os resultados do SSAM com os conflitos observados em campo, através da aplicação das TCT em interseções, entre as quais, duas rotatórias. A observação dos conflitos seguiu as instruções presentes em FHWA (1989), com alguns pequenos ajustes não especificados pelos autores. Somente foram observadas interações veiculares, sendo pedestres desconsiderados. Os autores não registraram em campo a severidade dos conflitos (não foram estabelecidos limites para TTC ou PET). Para fins comparativos, foram registradas todas as vezes que os usuários da via com o direito de preferência eram levados a efetuar modificações em seus comportamentos, sendo estes caracterizado por manobras evasivas (freadas ou mudança de direção). Nas rotatórias somente foram considerados os conflitos que ocorreram na faixa circulatória, logo os conflitos referentes à colisões traseiras nas aproximações não foram contabilizados. Foram realizadas 9 horas de observação por local (7:30 às 10:30; 12:00 às 15:00; 16:00 às 19:00), em dias diferentes. Concluíram que os resultados obtidos a partir da utilização do SSAM apresentaram uma forte correlação com os resultados obtidos a partir da utilização de modelos de previsão de acidentes, uma vez que a curva obtida para os conflitos em função do fluxo é muito parecida com a curva obtida para as colisões em função do fluxo obtidas a partir dos modelos de regressão utilizados. Em relação à comparação entre os resultados obtidos a partir da observação de campo e os resultados do SSAM, puderam notar uma tendência à subestimação dos resultados gerados pelo software, porém ressaltam que o SSAM foi capaz de representar a evolução horária dos conflitos e de identificar o local mais propício a ocorrência destes.

Embora não tenham utilizado o SSAM em seu trabalho, Saccomanno et al. (2008) utilizaram o VISSIM para comparar os padrões de conflitos relacionados exclusivamente às colisões traseiras, ocorridos em rotatórias e em interseções semaforizadas em cruz com giro à esquerda permitido. Em seu estudo, os autores utilizaram dois indicadores *proxy*, TTC e DRAC, e um índice de segurança, CPI para a avaliação dos cenários. Foram simuladas doze combinações de cenários (seis para a rotatória e seis para a interseção), as quais variaram o fluxo (baixo, médio e alto) e a condição do pavimento (seco ou molhado). O número de veículos em conflito, a porcentagem de veículos em conflitos, e o tempo de exposição aos conflitos foram calculado para cada situação, para cada indicador. Os resultados sugerem que o sistema de conceder a preferência nas rotatórias reduz o tempo de exposição aos conflitos relacionados às colisões traseiras, em comparação com as interseções semaforizadas. Em média, as interseções semaforizadas apresentam um número superior de

veículos em conflito e da porcentagem de veículos em conflito. A relação encontrada é mantida para os diferentes volumes e para as diferentes condições do pavimento, e mostrou coerência para os três indicadores de segurança utilizados.

3.3 ABORDAGENS, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Gettman e Head (2003) propõe três abordagens para a validação dos indicadores *proxy* de segurança viária oriundos de microssimuladores, cada caso precisa ser satisfeita para avançar à próxima, ao passo que o nível de esforço para completar as tarefas vai aumentando gradativamente, uma vez que cada vez mais informações vão sendo necessárias. As três abordagens para a utilização dos indicadores *proxy* a partir da microssimulação são:

1. A discriminação entre os indicadores *proxy* sintéticos de segurança entre duas alternativas de projetos de interseções simulados;
2. Correlação dos indicadores *proxy* sintéticos com estudos reais de conflitos (indicadores *proxy* coletados em campo);
3. Correlação entre a melhoria dos indicadores *proxy* derivados do modelo de simulação e melhoria dos indicadores *proxy* de conflitos de tráfego reais obtidos em campo.

1ª Abordagem: comparação entre alternativas de projetos para interseções

Hipótese: duas alternativas de projetos distintas produzem frequências diferentes de eventos de tráfego conflituosos previstas pelo microssimulador. Isso indica que um projeto ou estratégia é mais segura que outra.

Resultado positivo: validação de que os resultados da simulação de tráfego podem ser utilizados para avaliação de futuras alternativas propostas para intervenções viárias. Permitir a conclusão de que a distribuição dos indicadores *proxy* de segurança são discriminadores apropriados do desempenho relativo da segurança da interseção.

Passos:

1. Codificar a interseção A no modelo de simulação.
2. Codificar a interseção B no modelo de simulação.
3. Simular as alternativas de projetos variando o volume e as probabilidades de giros dos cenários.
 - a. Replicar n vezes por cenário para significância estatística.

4. Coletar os indicadores *proxy* para cada alternativa e comparar as distribuições estatísticas de várias agregações (distribuições das distribuições)

Teste de comparação de:

- a. Número total de eventos
- b. Números de eventos por tipos.
- c. Número de eventos total de uma aproximação ou movimento particular.
- d. Outros tipos de agregações apropriadas.

Para cada par de alternativas de projetos, os indicadores de segurança são comparados estatisticamente a fim de identificar a significância da diferença entre as alternativas. O teste-*t* de Student é utilizado para comparar cada indicador *proxy* e a frequência dos tipos de conflitos para cada alternativa de projeto. O teste-*t* calcula a probabilidade da diferença de duas médias não ser decorrente do acaso. Neste teste, a hipótese nula (H_0) indica que a diferença entre as médias de duas amostras é 0. Com base no nível de diferença da variância de duas amostras, os valores de *t* e o grau de liberdade são calculados de diferentes maneiras.

Para que as hipóteses seguintes possam ser testadas, essa hipótese precisa ser satisfeita.

2ª Abordagem: correlação com conflitos de tráfego

Hipótese: a elevada frequência de conflitos de tráfego previstas pelo modelo simulado está correlacionada com a alta frequência de conflitos de tráfego medidas em campo através da aplicação das TACT.

Resultado positivo: validação de que os resultados da simulação de tráfego podem substituir ou serem utilizados em conjunto com os dados coletados para as tradicionais análises de segurança viária.

3ª Abordagem: predição da redução dos conflitos de tráfego

Hipótese: A frequência de eventos de conflito de tráfego previstos pelo modelo de simulação para uma alternativa de melhoria de uma interseção particular está correlacionada com a mudança real na frequência de eventos de conflito no mundo real, conforme medido em um estudo no mundo real.

Resultado positivo: validação de que as melhorias de segurança previstas pelo modelo de simulação não são apenas comparáveis

relativamente, mas também são comparáveis em um sentido absoluto (número total de eventos de conflito de tipos específicos).

Sousa (2012) traz que nas aplicações da microssimulação voltada para análises do DSV a calibração dos modelos baseada unicamente em medidas de desempenho da fluidez não faz sentido, tendo em vista que a variável de interesse é um indicador *proxy* que, por sua vez, é estimado a partir de expressões matemáticas que combinam parâmetros como diferença de velocidade e espaçamento veicular captados de forma desagregada. Deste modo, o autor traz que as abordagens tradicionais de calibração e validação podem não garantir a eficiência dos modelos de microssimulação nesse tipo de análise. O autor também pontua que a calibração/validação efetuada com base nos indicadores *proxy* não é uma tarefa trivial, tendo em vista as dificuldades de obtenção desses indicadores no mundo real. Esse fato faz com que o nível de esforço aumente gradualmente para a correta execução das abordagens 2 e 3.

4 MÉTODO

Este capítulo apresenta o método proposto para a aplicação da microsimulação de tráfego na avaliação da segurança viária em interseções rotatórias localizadas em meio urbano. A base deste método consiste na avaliação dos indicadores *proxy* de segurança, obtidos a partir das trajetórias dos veículos simulados.

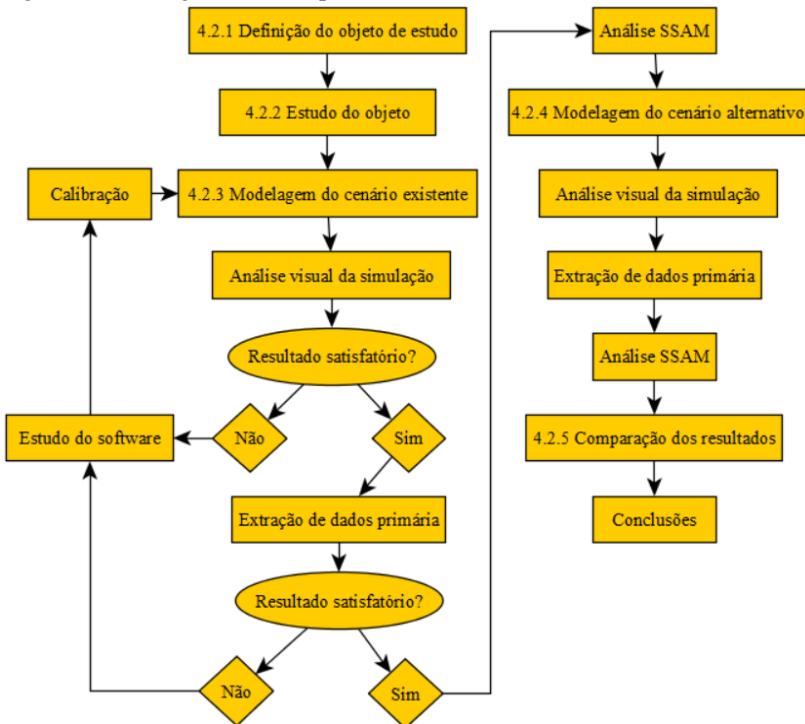
Uma discriminação entre duas alternativas de projetos para interseções rotatórias é proposta. Para isso, são simulados dois cenários: “Cenário A” e “Cenário B”. O primeiro cenário busca representar um objeto de estudo real escolhido, da forma mais fidedigna possível, através de pesquisas de campo e da calibração do modelo. O segundo cenário, consiste na representação de um projeto alternativo proposto, e utiliza os mesmos dados de entradas aos utilizados no Cenário A.

Conforme revisado no Capítulo 3, a hipótese desta abordagem é a de que duas alternativas de projetos distintas produzam frequências diferentes de eventos de tráfego conflituosos, previstas pelo microsimulador. Segundo Gettman e Head (2003), esse é o passo inicial para indicar que um projeto ou estratégia é mais segura que outra.

4.1 FLUXOGRAMA DAS ETAPAS

A fim de facilitar a visualização do método proposto, a Figura 35 traz em forma de fluxograma as etapas a serem seguidas.

Figura 35 - Fluxograma das etapas do método.



Fonte: Autor.

4.2 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS

Este item descreve em pormenores as etapas a serem seguidas na aplicação do método.

4.2.1 Definição do objeto de estudo

Sousa (2012) recomenda que a motivação para seleção do local a ser estudado leve em consideração duas questões muito comuns nos estudos de segurança viária:

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

Nesse sentido, o local a ser estudado para a realização do experimento deve desempenhar um importante papel na malha viária urbana, que apresente sintomas evidentes de problemas operacionais e de segurança, a fim de justificar sua escolha. Se possível, a obtenção dos registros de acidentes pode auxiliar nessa etapa.

4.2.2 Estudo do objeto

A etapa relativa ao estudo do objeto tem como objetivo principal coletar dados para alimentar o modelo de simulação a ser construído na etapa seguinte (4.2.3), bem como familiarizar o pesquisador com as características da operação do tráfego na rotatória, a fim de tentar reproduzi-las no modelo computacional. Para isso, esse estudo deve responder a duas questões principais:

1. Qual a demanda veicular na interseção no horário de pico de um dia típico;
2. Qual a origem e o destino dos veículos na hora mais crítica.

Essas perguntas devem ser respondidas através de uma pesquisa veicular classificatória, a ser realizada durante um período de duas horas de um dia típico (tornando possível a escolha da hora mais crítica do pico a ser simulada), dividido em intervalos de 15 minutos (comumente utilizado em pesquisas dessa natureza). Essa pesquisa deve contar com um grupo de observadores instruídos a registrar os algarismos das placas dos veículos em postos pré-estabelecidos, de modos que todas as aproximações e todas as saídas da interseção estejam cobertas. Complementarmente devem ser cronometrados tempos de viagens a fim de obter indiretamente a velocidade média dos veículos que utilizam a interseção. Medidas geométricas do local de estudo também devem ser obtidas, tais como largura das faixas de circulação, das ilhas central e divisórias de acesso, entre outros elementos que possam ser específicos do local escolhido e que sejam relevantes para que a modelagem do cenário existente seja a mais realista possível. Após a coleta, os dados devem ser tabulados e os possíveis erros (como a não observação à equação da continuidade) devem ser apurados, bem como as possíveis causas e correções dos mesmos.

Preliminarmente a realização das pesquisas de campo deve ser feito o estudo do objeto e a definição do escopo da simulação. Essa tarefa tem como objetivo principal a familiarização do pesquisador com as peculiaridades do objeto de estudo escolhido, fornecendo informações sobre qual o horário com o maior fluxo de tráfego a ser pesquisado e

detalhes preliminares a respeito da geometria do objeto de estudo. Para isso, diversas visitas ao objeto de estudo podem ser necessárias. Complementarmente devem ser pesquisados estudos que tenham sido realizados no local escolhido e que possam conter informações úteis.

O escopo da simulação deve buscar representar a hora com o maior número de interações veiculares no local. A resolução da simulação a ser utilizada deve ser a máxima disponibilizada pelo simulador, a qual atualmente é de 1 décimo de segundo, a fim de proporcionar o maior detalhamento possível das trajetórias veiculares simuladas.

4.2.3 Modelagem do cenário existente

A modelagem do cenário existente deve ser realizada até que se chegue a melhor representação possível da realidade do local escolhido. Para isso, primeiramente é muito importante que a disposição da infraestrutura proporcione aos veículos simulados as trajetórias e interações mais próximas àquelas observadas em campo. Essa etapa deve ser desenvolvida com apoio de uma imagem de satélite de alta resolução, em combinação com as medidas coletadas em campo, para maior precisão das larguras das faixas virtuais (que podem impactar na simulação de acordo com o comportamento de condução adotado).

Em relação ao fluxo de tráfego simulado e à alocação da demanda de tráfego, estes devem garantir fluxos e movimentos similares àqueles encontrados na hora crítica do objeto de estudo. Em se tratando da simulação de uma interseção isolada, onde há apenas um caminho para ser percorrido entre uma aproximação e uma saída, assume-se aqui que os usuários ao se dirigirem à interseção já predefiniram sua rota, sendo as alterações nas trajetórias realizadas apenas em função da escolha da faixa a ser utilizada (em caso de mais de uma faixa de tráfego disponível na aproximação). Esse tipo de alocação da demanda corresponde a uma alocação “tudo ou nada”. Segundo Ortúzar e Willumsen (2011), esta forma de alocação de demanda é o método mais simples para alocação e escolha de rotas e efeitos de congestionamento não são levado em conta pelos veículos na escolha das rotas a serem seguidas. Isso assume que condutores não terão a possibilidade de optar por rotas mais rápidas (uma vez que estas também inexistem, conforme ocorre nas aproximações das interseções rotatórias). No VISSIM esta alocação é realizada através da ferramenta denominada “rotas estáticas”, a qual utiliza informações da porcentagem de movimentos divergentes para a interseção. Nas rotas estáticas, é inserido um detector virtual em cada aproximação, partir do qual os veículos são roteados para qualquer seção de destino especificada,

com base em uma porcentagem estática atribuída para cada destino. As rotas estáticas são compostas por uma sequência de *links* e de conectores pré-definidos a serem percorridas pelos veículos.

O sistema de preferência deve ser modelado com a utilização das “áreas de conflitos”, as quais segundo PTV (2015), levam a um comportamento do motorista "mais inteligente" durante a simulação, proporcionando uma interação mais parecida com a realidade. Os atributos referentes às áreas de conflitos também devem ser estudados e testados. A representação visual da simulação em três dimensões disponibilizada no VISSIM deve ser muito utilizada nesta etapa, uma vez que através dela é possível analisar o comportamento dos veículos simulados durante a simulação e perceber possíveis comportamentos irreais a serem alterados.

O modelo de perseguição veicular adotado deve ser o Wiedeman 74, porque é o modelo indicado por PTV (2015) para ser utilizado na simulação de áreas urbanas onde existem zonas de convergências.

Outra questão de grande importância é que os parâmetros do comportamento de condução consigam proporcionar as interações veiculares mais próximas possíveis às observadas. Para isso é necessário estudar os atributos dos parâmetros de condução e realizar diversas tentativas a fim de detectar como as alterações dos parâmetros interferem na simulação.

Para que os veículos simulados possam desenvolver velocidades compatíveis com aquelas observadas em campo, deverá ser calibrada uma curva de distribuição das velocidades com base nos dados coletados no item 4.2.2. Também devem ser posicionadas as “zonas de velocidade reduzidas” nas aproximações, com o objetivo de desacelerar os veículos que se aproximam da interseção, gerando o efeito de “velocidade de conversão parametrizada”, descrito em 3.1

Após ser definida a construção dos elementos virtuais responsáveis pela infraestrutura viária da interseção e o parâmetro de condução a ser utilizado, devem ser feitos testes a fim de verificar a sensibilidade da frequência dos conflitos registrados a partir da alteração de atributos de condução.

Para a avaliação dos resultados extraídos do modelo, devem ser posicionados detectores virtuais a fim de coletar dados do modelo gerado. Os arquivos de trajetórias não necessitam detectores para serem obtidos. Esses arquivos são obtidos automaticamente ao selecionar-se no menu de avaliações do VISSIM, na aba *Direct Output* a caixa do SSAM.

O modelo deverá ser reproduzido com um mínimo de 10 repetições, utilizando sementes aleatórias diferentes, visando obter uma

média estatisticamente significativa. A resolução da simulação deve ser a máxima possível, ou seja 10 eventos por segundo. Devem ser realizados cinco minutos de aquecimento do sistema, cujos resultados devem ser descartados da análise.

Os dados a serem extraídos primariamente são o fluxo de veículos simulados em cada aproximação e em cada saída, os tempos de viagens, os atrasos e a formação de filas. Se os dados obtidos forem coerentes com o objeto de estudo pode-se prosseguir para a análise dos arquivos de trajetórias com o SSAM. Caso sejam detectado valores para as medidas de desempenho que apresentem discrepâncias entre o cenário real e o cenário real simulado, estas devem ser devidamente apuradas e justificadas.

A análise com o SSAM deve inicialmente ser realizada com a utilização dos limites TTC e PET em seus valores originais (1,5s e 5s respectivamente). Devem ser filtrados dos resultados os eventos conflituosos com TTC e PET iguais a zero, que por definição são colisões simuladas (limitações da simulação, uma vez que os simuladores são projetados para serem livres de acidentes). Caso seja oportuno, a análise deve ser refeita utilizando novos valores limites para TTC e o PET.

4.2.4 Modelagem do cenário alternativo

A modelagem do cenário alternativo deve seguir as mesmas diretrizes do item 4.2.3. Os dados de entrada do simulador referentes ao fluxo de tráfego, a distribuição das rotas e das curvas de velocidades devem ser iguais àqueles utilizados no cenário existente.

Os parâmetros de condução a serem utilizados no cenário alternativo, também devem ser similares àqueles utilizados no cenário existente. Caso seja feita a alteração de algum parâmetro, esta deve ser acompanhada de justificativa.

Devem ser utilizadas as mesmas sementes aleatórias usadas no cenário anterior.

4.2.5 Comparação dos resultados

Nesta etapa é realizada a análise comparativa dos dados de conflitos obtidos a partir do processamento dos arquivos de trajetórias dos modelos simulados pelo SSAM.

São comparados a frequência dos conflitos simulados, a média dos indicadores *proxy* computados, a localização dos conflitos simulados (por aproximação, faixa circular ou saída).

Deve ser realizada a aplicação do F-teste e o t-teste (incorporado no SSAM) para verificar se a diferença entre as médias dos indicadores e dos tipos de conflitos simulados apresenta diferença estatisticamente significativa.

Também devem ser expostos os dados referentes ao desempenho operacional dos cenários, como tamanho das filas médias e máximas, atrasos e tempo de viagens.

O intuito de realizar comparações que englobem tanto desempenho operacional como o desempenho de segurança, consiste em apresentar uma visão global a respeito do desempenho dos cenários.

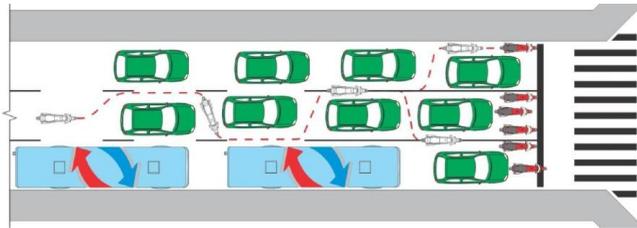
4.3 LIMITAÇÕES DO MÉTODO

A validação dos resultados dos conflitos simulados não será realizada, uma vez que essa tarefa demanda um elevado nível de esforço para obtenção dos indicadores *proxy* com a precisão necessária para realizar tal tarefa, uma vez que torna-se necessária a utilização de visão computacional para isso. Também não se busca através da aplicação deste método o estabelecimento de uma correlação entre os conflitos de tráfegos simulados com os acidentes de trânsito ocorridos. Embora o estabelecimento de tais correlações constitua um importante desdobramento da utilização dos indicadores *proxy* de segurança viária, é necessário um banco de dados de acidentes de trânsito confiável. Para o estudo específico em rotatórias a aquisição destes dados é dificultada pelo fato das rotatórias representarem um número relativamente baixo das interseções viárias das cidades (em comparação à outros tipos de interseções).

A modelagem de bicicletas e motocicletas, apesar de possível no VISSIM, exige um esforço adicional a parte para ser realizada de maneira similar ao encontrado no trânsito brasileiro (principalmente durante os horários de pico), por isso não serão incluídas na modelagem. Sousa (2012), traz que a circulação desses veículos é um importante aspecto característico do meio urbano brasileiro, o qual gera uma preocupação adicional na modelagem. As bicicletas por compartilharem os mesmos espaços com os veículos automotores; e as motocicletas por circularem nos “corredores” entre os veículos, como exposto na Figura 36. Embora o autor saliente que o VISSIM permita a modelagem deste tipo de comportamento, através da alteração dos parâmetros de condução de distância lateral mínima e concessão de permissão de ultrapassagem dentro da mesma faixa, ele atenta ao fato de não ter encontrado na literatura modelos adequados sobre a representação deste tipo de

comportamento. O modelo gerado também não conta com pedestres, devido ao trabalho extra necessário para obtenção de dados e para sua modelagem.

Figura 36 - Ilustração do processo de ultrapassagem de motocicletas durante o sinal vermelho



Fonte: Sousa (2012).

Planejamento Urbano de Florianópolis (IPUF), a fim de gerar esforços para aumentar a segurança na interseção (Figura 38). Na ocasião, foi realizado um teste com cones visando estreitar a largura de algumas vias a fim de diminuir a velocidade dos veículos e o percurso de cruzamento a ser percorrido pelos pedestres nas faixas de segurança.

Figura 38 - Tentativas de melhoramento do objeto de estudo



Fonte: <https://ndonline.com.br/florianopolis/noticias/teste-de-estreitamento-de-pista-na-rotatoria-da-ufsc-em-florianopolis-reduz-velocidade-da-via>. Acesso em 22 de dez. de 2016.

Em relação a caracterização dos acidentes de trânsito ocorridos na rotatórias, os acidentes envolvendo colisões veiculares no horário de pico normalmente resultam em pouca gravidade, uma vez que os veículos desenvolvem velocidades baixas devido à grande ocorrência de conflitos. Entretanto, o local escolhido já foi palco de atropelamentos, inclusive com vítima fatal, envolvendo um ônibus do transporte público e uma ciclista estudante da UFSC.

Pelos motivos expostos, acredita-se que essa rótula é propensa à estudos que busquem investigar a segurança, e que sua escolha justifique a realização de esforços de intervenções de engenharia de segurança viária, conforme trazidos no item 4.2.1.

5.2 ESTUDO DO OBJETO

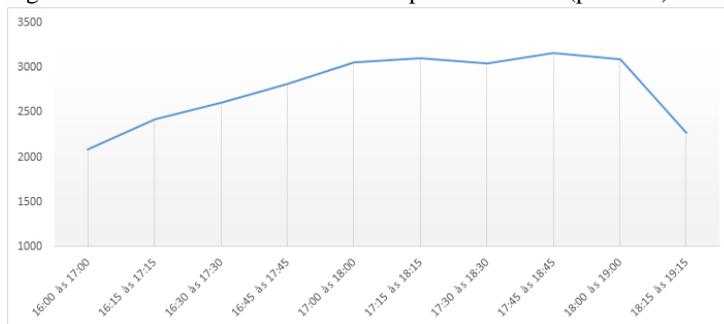
5.2.1 Fluxo de tráfego

Primeiramente buscou-se descobrir se o trânsito mais intenso no objeto de estudo se dá no pico da manhã ou no pico da tarde. O Plano de Mobilidade Urbana Sustentável da Grande Florianópolis (PLAMUS)

realizou contagens veiculares direcionais no objeto de estudo em 2014. No período da manhã foram realizadas contagens das 6:30 às 10:00 e no período da tarde das 16:00 às 19:30. Segundo os resultados do estudo, o período da tarde apresentou 54% do total de veículos registrados, ao passo que o período da manhã, 46%. A Figura 39 e a Figura 40 trazem os volumes coletados por hora e agrupados por intervalo de 15 minutos, respectivamente. Pode-se perceber que o pico da tarde começa a partir das 17:00 horas e por volta das 19:00 a solicitação começa a diminuir rapidamente.

A partir disso, durante o mês de agosto e setembro do ano de 2016 foram realizadas diversas visitas ao objeto de estudo no período do pico da tarde, com o intuito de conhecer melhor o comportamento dos usuários.

Figura 39 – Fluxo coletado na rotatória pelo PLAMUS (por hora)



Fonte: PLAMUS (2014).

Figura 40 – Fluxo coletado na rotatória pelo PLAMUS (intervalo de 15 minutos)



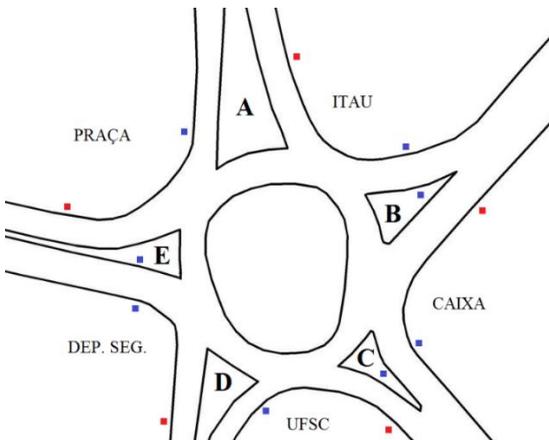
Fonte: PLAMUS (2014).

A demanda veicular pode ser conhecida com base na pesquisa realizada pelo PLAMUS, conforme a Figura 39 e a Figura 40. A origem e o destino dos veículos, entretanto, não pôde ser conhecida com base no levantamento realizado. Isso se deve ao fato dos movimentos que foram levantados pelo PLAMUS, não permitirem saber as rotas dos veículos, a fim de estimar a porcentagem dos movimentos divergentes na interseção. Para saber a origem e o destino dos veículos que utilizavam a rotatória foi realizada uma pesquisa com base no método das placas.

O método das placas consiste na anotação das placas dos veículos por observadores alocados na entrada e na saída da interseção. Assim, através do casamento das informações coletadas nos postos de entrada e de saída, torna-se possível conhecer a origem e o destino dos veículos, e consequentemente estabelecer a porcentagem de movimentos divergentes na interseção. Com base no gráfico da Figura 39 é possível estimar o horário do período de pico com mais chances de se encontrar a maior demanda veicular no objeto de estudo. Pode-se perceber que o período compreendido das 17:00 às 19:00 horas apresenta a maior solicitação. Por esse motivo, o levantamento foi realizado durante essas duas horas.

A pesquisa de campo foi realizada na data de 23 de novembro de 2016, quarta-feira. Ao todo, incluindo o autor que coordenou a pesquisa, foram necessários 13 observadores para realizar o levantamento. A Figura 41 traz a posição de cada observador.

Figura 41 - Posição dos observadores na pesquisa de campo.

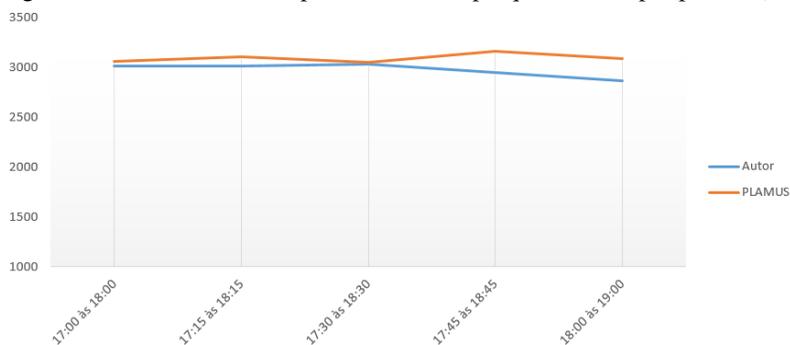


Fonte: Autor.

Os pontos azuis referem-se a posição dos observadores que coletaram as placas dos veículos que se aproximaram. Os pontos vermelhos referem-se a localização dos observadores que coletavam os dados dos veículos que saíam. Nas aproximações “B”, “C” e “E” foram alocados dois observadores, um responsável por coletar dados dos veículos da faixa da esquerda e outro dos veículos da faixa da direita. Isso foi necessário devido a questão da visibilidade das placas que ficam obstruídas devido a formação de filas. Nas demais aproximações bem como nas saídas, julgou-se adequado a utilização de apenas um único observador. Os veículos foram separados nas categorias automóveis, ônibus, caminhão, motocicletas, e bicicletas. As horas foram divididas em intervalos de 15 minutos.

As Figuras 42 e 43 trazem um comparativo dos dados coletados na pesquisa de campo, com os dados levantados pelo PLAMUS referente a todas as categorias de veículos, inclusive bicicletas. Pode-se perceber semelhança em relação ao volume coletado (Figura 42) e ao comportamento da variação da demanda (Figura 43).

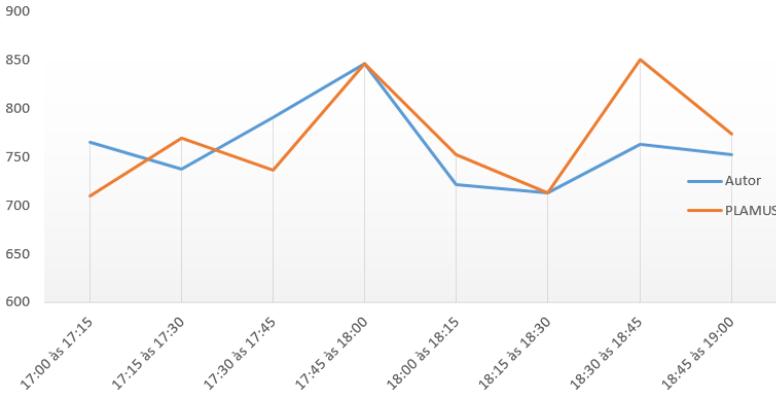
Figura 42 - Volume coletado para rotatória na pesquisa de campo (por hora).



Fonte: Autor.

Acredita-se que essa semelhança nos volumes coletados seja devida a interseção estar operando muito próximo a sua capacidade de saturação. Essa hipótese é fortalecida pela constante presença de filas no horário estudado.

Figura 43 - Volume coletado para a rotatória na pesquisa de campo (intervalos de 15 minutos).



Fonte: Autor.

O cruzamento das placas foi realizado com o auxílio de um algoritmo desenvolvido em *python*. O script desenvolvido casou apenas as placas que não apareceram mais de uma vez nos postos de entrada e nos postos de saída, ou seja, aquelas que apresentavam apenas uma correspondência exata. Devido a esse fato, foi necessário processar grande parte dos dados no *excel*. A Figura 44 traz em forma de matriz a porcentagem dos movimentos divergentes da interseção, com base nos dados coletados das 17:00 às 18:00. Optou-se por essa hora pois foi o período onde foi observado o maior número de automóveis na interseção. Para a determinação da matriz, foram utilizadas 2216 placas, referentes a todos as classes de veículos coletadas (exceto bicicletas).

Figura 44 - Matriz dos movimentos divergentes do objeto de estudo

		ORIGEM				
		A	B	C	D	E
DESTINO	A	1%	12%	30%	22%	31%
	B	20%	2%	22%	49%	49%
	C	23%	6%	0%	20%	14%
	D	15%	20%	9%	1%	5%
	E	41%	60%	39%	8%	1%

Fonte: Autor.

5.2.2 Características geométricas

Em relação à disposição geométrica dos elementos que fazem parte do objeto estudado, pode-se perceber inicialmente que a rótula escolhida não é uma rótula moderna tradicional com quatro ramos convergindo em ângulo reto, e sim uma rótula com cinco ramos com ângulos de aproximações variáveis. A ilha central não apresenta uma forma simétrica. Além disso, percebe-se que as ilhas divisórias de acesso apresentam formas distintas umas das outras, apresentando larguras diferentes. Também pode-se perceber visualmente diferença de nível na rotatória da aproximação “A” (mais elevada) para a “C”. Tal diferença impacta principalmente os ciclistas que ao percorrerem o trecho em aclive desenvolvam velocidades reduzidas.

Uma questão que merece destaque diz respeito ao posicionamento das faixas de segurança para travessia de pedestres, que estão localizadas a frente das aproximações e logo diante das saídas, pouco antes dos veículos ingressarem e deixarem a interseção. Teoricamente esse posicionamento deveria fazer com que os motoristas parassem seus veículos antes das faixas de travessia e procurassem uma brecha entre a corrente de pedestres e a corrente prioritária de veículos que trafega na rotatória, a fim de ingressar na interseção. Porém a parada no local indicado faz com que a distância a ser percorrida pelos motoristas até a faixa circular aumente, fazendo com que os motoristas tenham de esperar por brechas maiores a fim de ingressar na rotatória. Essas brechas raramente são encontradas durante o período de pico. Além disso, a atenção do motorista precisa ser dividida entre a corrente de veículos que se aproxima pela esquerda e a corrente de pedestres que se aproxima por ambos os lados. Na prática o que acontece é um comportamento quase generalizado dos motoristas parando seus veículos em cima das faixas de segurança, obrigando os pedestres a “costurarem” entre os veículos da fila a fim de realizar a travessia, conforme pode ser observado na Figura 45. Essa manobra torna-se especialmente perigosa quando se leva em conta o comportamento das motocicletas que costumam trafegar nos “corredores” entre os veículos em situações de fila, expondo ainda mais os pedestres que podem ser surpreendidos pelas motocicletas se não estiverem atentos. Em relação aos veículos que estão completando sua transição pela rotatória e estão se dirigindo para a saída, esse posicionamento das faixas de pedestres faz com que veículos que respeitem as faixas de segurança tenham de parar na faixa circular a fim de permitir a realização da travessia, o que prejudica em muito o desempenho operacional do dispositivo, tendo em vista que pode-se

perceber a formação de filas dentro do anel circular, bloqueando o ingresso de novos veículos que queiram se dirigir para outras saídas.

Figura 45 - Comportamento recorrente nas travessias de pedestres.



Fonte: Google Earth (2017).

Em relação a formação de filas nas aproximações, pôde ser constatado através de observações que as entradas “B” e “E” por contarem com sinalização horizontal que divide as faixas da direita e da esquerda, apresentam formação de filas duplas. A aproximação “D” vem acompanhada de estacionamento paralelo até próximo do ingresso na rotatória, o que faz com que seja observada sempre a formação de uma fila simples de veículos. Na aproximação “A” ora percebe-se a formação de fila simples, ora percebe-se a formação de fila dupla, depende de como os condutores posicionam seus veículos na faixa.

A faixa circular também apresenta um comportamento ora de faixa simples, ora de faixa dupla, dependendo da velocidade dos veículos que estão trafegando na interseção, da largura e do comportamento do motorista. Essa característica classificou-se a rótula em estudo como uma rótula compacta de semi-duas faixas (*compact semi-two lane roundabout*), embora a largura disponível na faixa circular seja bem inferior àquela sugerida pela literatura pertinente (mínimo 8 metros).

5.2.3 Tempos de viagens

As viagens cronometradas foram classificadas em “com interferência” e “sem interferência”. Essa classificação diz respeito a interferência ou não interferência causada devido a ação de pedestres. Viagens referentes às conversões à direita não foram cronometradas, uma vez que seus tempos eram pequenos demais para serem estimados com precisão (devido ao tempo de reação dos observadores humanos). Foram

realizados dois dias de observações (29 e 23 de novembro de 2017). A pesquisa começou as 17:00 e terminou 18:00. O primeiro dia contou com dois observadores e o segundo dia com três. Os dados foram coletados de forma com que as observações contemplassem ciclicamente todas as aproximações. A Tabela 1 traz o resumo dos dados obtidos.

Tabela 1- Tempos de viagens coletados

Movimento	Nº de observações			Média (s)		D.P. (s)	
	Com	Sem	Total	Com	Sem	Com	Sem
A → B	18	7	25	19,7	12,2	5,6	1,15
A → C	11	24	35	15,1	9,87	3,28	1,2
B → D	11	20	31	15,3	9,93	2,56	2,1
B → E	24	56	80	10,9	6,89	2,2	1,1
C → A	15	34	49	17,8	6,61	9,63	0,8
C → E	28	44	74	16,4	10,9	4,7	1,5
D → B	16	27	43	11,4	6,51	2,21	1,11
E → A	16	37	53	26,5	15,4	7,9	2,1
E → B	18	50	68	18,9	11	3,5	1,8
Total	157	299	458				

D.P. = desvio padrão

Fonte: Autor.

5.3 MODELAGEM DO CENÁRIO EXISTENTE

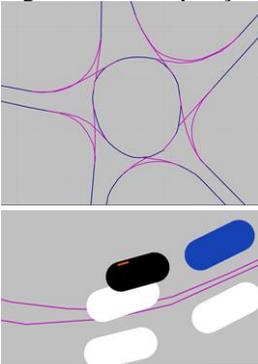
Foram concebidas duas versões para o cenário existente, as quais foram chamadas de “Cenário A versão 1” e “Cenário A versão 2”. As duas versões são semelhantes em relação a todos os itens envolvidos na construção da infraestrutura e dados de entrada do modelo. A diferença entre as duas versões são exclusivamente referentes aos parâmetros da modelagem da orientação lateral dos veículos e serão explicadas no decorrer do capítulo.

5.3.1 Construção da interseção

Para a modelagem dos conectores que unem os *links*, buscou-se desenhar estes de modo que seu comprimento fosse o menor possível, contanto que seu formato e disposição assegurassem trajetórias parecidas com àquelas observadas em campo. O objetivo disso foi assegurar que possíveis lapsos de modelagens, devido a limitações no reconhecimento de veículos em conectores adjacentes, fossem minimizados, diminuindo assim o número de “colisões” simuladas, como demonstrado na Figura 46, onde as linhas azuis representam os *links* e as rosas os conectores. Na

parte inferior da Figura 46, é demonstrada uma “colisão” envolvendo o veículo representado pela cor preta, com um dos veículos representados pela cor branca. Neste detalhe, o veículo de cor preta ocupa o conector que liga a aproximação à saída adjacente, responsável pela conversão à direita (o pequeno retângulo laranja representa a intenção em realizar tal manobra), ao passo que o veículo branco ocupa o conector que liga a aproximação à faixa circular.

Figura 46 - Sobreposição de veículos em conectores adjacentes



Fonte: Autor.

As conversões à direita foram feitas com a utilização de conectores. Nesses conectores foi modificado o atributo “distância da mudança de faixa”. A distância (ou posição) da mudança de faixa (*lane change distance*) define a posição à montante de um conector que um veículo começa a procurar por uma brecha aceitável para mudar de faixa e alcançar o conector desejado. O valor padrão deste atributo é 200 metros. O valor utilizado foi 300 metros. Essa modificação teve como base Habtemichael e Picado Santos (2012). Os autores constataram que para mudança de faixas obrigatórias, esse atributo é o que exerce mais influência no número de conflitos simulados. A utilização de 100 metros aumentou o número total de conflitos simulados em 295% e a utilização de 300 metros diminuiu em 58% (em relação ao valor padrão). Isso fez com que as vias de aproximação precisassem ser modeladas com comprimentos superiores a 300 metros. O valor utilizado para as vias de aproximação foi 500 metros.

A largura dos *links* seguiram as medidas presentes na Tabela 2. Todos os *links* foram desenhados com apenas uma faixa. As medidas

utilizadas no simulador buscaram representar a largura coletada em campo.

Tabela 2 - Largura dos *links* inseridos no simulador para o cenário existente.

<i>Link</i>	Largura
Aproximação A	5,00
Aproximação B	6,00
Aproximação C	5,00
Aproximação D	5,00
Aproximação E	6,00
Saída A	5,00
Saída B	3,75
Saída C	5,00
Saída D	5,00
Saída E	5,00
Faixa Circular	4,50

Fonte: Autor.

A Tabela 3 traz detalhes dos dados da demanda inserida, os quais tiveram como base a pesquisa descrita no item 5.3.1. Os volumes inseridos por intervalo de tempo apresentam equivalência horária. A última coluna, referente à média, reflete o volume total de automóveis e ônibus coletado em cada aproximação na pesquisa. Em relação a classes de veículos pesados, utilizou-se apenas a categoria “ônibus” uma vez que não foram observados na pesquisa de campo caminhões rebocadores (no VISSIM a classe responsável por essa categoria é denominada “HGV”).

Tabela 3 - Demanda inserida no simulador.

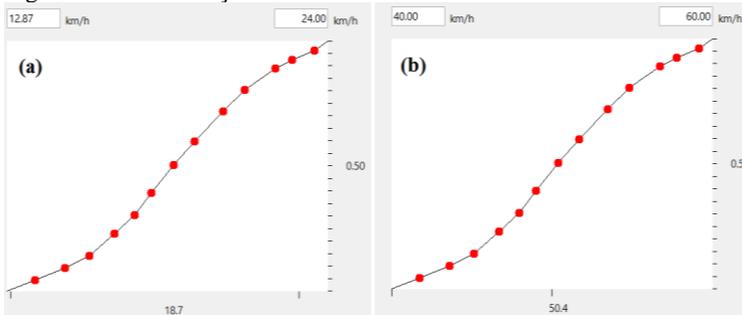
Aproximação	17:00 às 17:15		17:15 às 17:30		17:30 às 17:45		17:45 às 18:00		Média	
	Total	% ônibus	Total	% ônibus						
Aproximação A	556	5	456	5,3	572	5,6	280	1,4	466	4,3
Aproximação B	568	4,9	672	3,3	688	3,1	752	2,2	670	3,4
Aproximação C	628	1,9	608	4,6	556	4,7	524	2,2	579	3,4
Aproximação D	260	7,7	220	5,5	284	12,7	300	4	266	7,5
Aproximação E	608	2,7	680	2,1	748	0,7	724	5,6	690	2,8
Total de veículos	2620		2636		2848		2580		2671	

Fonte: Autor.

Para a alocação da demanda de tráfego, foi utilizado o recurso “rotas estáticas” do VISSIM. Nesse recurso, insere-se um marcador virtual nas aproximações da rotatória, contendo informações a respeito dos movimentos divergentes na interseção (de acordo com a matriz da Figura 44). Essa forma de alocação equivale a uma alocação “tudo ou nada”, tendo em vista que ao passar pelo marcador virtual o veículo simulado seguirá um caminho pré-determinado para chegar ao seu destino, independente das condições da via. Para cada rota é estabelecida uma sequência de *links* e conectores a serem percorridos, a fim que o veículo simulado chegue ao seu destino. O início da rota foi colocado o mais próximo possível do ponto de inserção dos veículos na rede. Os movimentos de retorno foram descartados.

A distribuições das velocidades desejadas, foram definidas com o auxílio das informações dos tempos de viagens obtidas na pesquisa de campo. Foram utilizadas duas distribuições de velocidades uma para as aproximações e saídas e outra para o tráfego na rotatória (Figura 47). As curvas das distribuições de velocidades apresentam o mesmo formato, suas diferenças restringem-se aos limites. A Figura 47 (a) mostra a distribuição utilizada para o tráfego na rotatória e a Figura 47 (b) mostra a distribuição utilizada para as aproximações e saídas.

Figura 47 – Distribuições de velocidades utilizadas



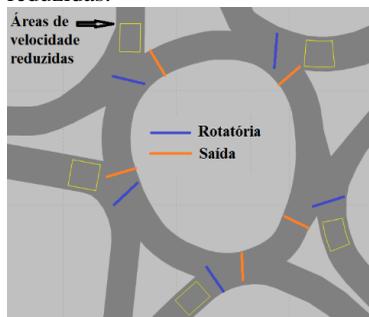
Fonte: Autor.

Nas aproximações utilizou-se as áreas de velocidades reduzidas (RSA) com taxa de desaceleração de $-2,00 \text{ m/s}^2$ (padrão do VISSIM) e a mesma distribuição de velocidade utilizada para a rotatória. O comprimento adotado para todas as RSAs foi de 5 metros. Esse comprimento tomou como base o trabalho de Li et al. (2013), onde foram analisado padrões de velocidades de veículos se aproximando de uma interseção rotatória, com o objetivo de coletar dados e fornecer

estimativas de campo para os parâmetros de entradas das RSA's no VISSIM. Na Figura 48 os marcadores laranjas estão alocados nos conectores que levam os veículos para os *links* de saídas. Os marcadores azuis estão alocados nos conectores que levam os veículos simulados para a faixa circular. O posicionamento dos sensores de velocidade desejada foi baseado em Gallelli e Vaiana (2008).

Para a extração de dados de filas e atrasos foi utilizado o recurso “avaliação do nó” disponibilizado pelo VISSIM. Para a extração dos tempos de viagens, foram alocados detectores virtuais nas mesmas posições em que os tempos de viagens foram obtidos em campo (após as faixas de segurança/RSA).

Figura 48 - Posição dos marcadores de velocidade e das áreas de velocidade reduzidas.



Fonte: Autor.

5.3.2 Comportamento de condução

O comportamento de condução no VISSIM, é regido pelos protocolos de perseguição veicular, de troca de faixas, de comportamento lateral, e pelo comportamento de reação à semáforos (que não foi explorado). As definições apresentadas a seguir foram extraídas do manual do VISSIM, PTV (2015), com o intuito de conhecer todos os parâmetros comportamentais que podem influenciar na simulação. Não foram feitas alterações nos atributos do algoritmo de mudança de faixas, uma vez que essas alterações são complexas de serem calibradas por dependerem de dados sobre o comportamento de condução difíceis de serem obtidos em campo.

5.3.2.1 Perseguição veicular

Inicialmente foram feitas tentativas de modelagem com os parâmetros bx_{add} e bx_{mult} nos valores *default* (2 e 3, respectivamente), e posteriormente foi adotada a combinação dos valores que proporciona o maior fluxo de saturação segundo a Figura 27, ou seja bx_{add} igual a 1, e bx_{mult} igual a 2. Os resultados obtidos a partir da utilização dos parâmetros de calibração mais baixos fez com que o número de veículos que ficassem de fora da simulação diminuísse. Também pode ser percebido que a utilização de valores menores para bx_{add} e bx_{mult} faz com que as filas se dissipem mais rapidamente. Através da visualização da simulação, acredita-se que a adoção dos valores mais baixos aproximou o modelo da realidade.

5.3.2.2 Comportamento lateral

O VISSIM é o único simulador disponível atualmente equipado com um protocolo de comportamento lateral que permite ultrapassagens dentro da uma mesma faixa. Por padrão, no VISSIM, um veículo utiliza toda a largura da faixa. Pode-se definir no comportamento de condução e nos parâmetros do comportamento lateral se os veículos dentro de uma faixa podem dirigir à esquerda, à direita, no meio, ou em qualquer posição da faixa, sem especificar uma orientação lateral. Porém, é possível criar um comportamento de condução que não é orientado pela quantidade de faixas disponíveis, mas sim pela largura disponível (chamado de *non-lane based*). Se a faixa é ampla o suficiente e a ultrapassagem é permitida, a ultrapassagem dentro da faixa é possível. Esse comportamento foi utilizado para a modelagem do cenário existente, por ter sido considerado o mais próximo possível da situação real encontrada.

Os parâmetros que exercem influência na modelagem desse comportamento que foram exploradas são:

1. Manter distância lateral dos veículos nas faixas adjacentes.

Se essa opção estiver marcada, os veículos consideram a posição e a orientação lateral dos veículos em faixas adjacentes e mantêm a distância lateral mínima especificada. Desta maneira, os veículos ajustam sua posição dentro da faixa para desviar dos veículos adjacentes. Esta opção foi selecionada.

2. Considerar a direção da próxima conversão.

Essa opção melhora a modelagem do comportamento lateral dos veículos em modelos que não são orientados pela quantidade de faixas e sim pela largura disponível. Essa opção também foi selecionada.

3. Distância lateral mínima durante a ultrapassagem.

É a mínima distância que deve existir entre veículos durante a ultrapassagem dentro da faixa, e mantendo distância de veículos em faixas adjacentes. O padrão é 1 metro. Essa distância é dividida em distância parado (0 km/h) e distância em movimento (50 km/h). Para outras velocidades a distância mínima é linearmente interpolada a partir destes dados. Se a opção “manter distância lateral dos veículos nas faixas adjacentes” não estiver selecionada, os veículos nas faixas adjacentes são ignorados, mesmo se estes forem mais largos que a faixa onde estão, exceto quando estes estiverem mudando de faixa.

4. Mudança de direção lateral - tempo mínimo (comportamento lateral).

Padrão 0,0s: define o mínimo de tempo de simulação que deve passar entre o início do movimento lateral em uma direção e o início do movimento lateral na direção oposta. Quanto maior esse valor, menores serão os movimentos laterais dos veículos. Estes movimentos laterais apenas ocorrem se for permitido ultrapassar na mesma faixa. Movimentos laterais para mudança de faixa não são afetados por esse parâmetro.

5. Velocidade mínima longitudinal.

A mínima velocidade longitudinal em que ainda são permitidos movimentos laterais. O Valor padrão de 1 km/h garante que os veículos ainda possam se movimentar lateralmente mesmo se eles estiverem quase parados.

6. Tempo de ganho para colisão.

Valor mínimo do ganho do tempo de colisão para o próximo veículo ou sinal adiante, que deve ser alcançado para que uma mudança da posição lateral na faixa valha a pena e seja realizada. O tempo de colisão é calculado com base na velocidade desejada do veículo. O valor padrão para o aumento do tempo de colisão é 2 segundos. Valores menores levam a comportamentos laterais mais animados.

7. Tempo entre mudança de direção.

Define o mínimo de tempo de simulação que deve transcorrer entre o início do movimento lateral em uma direção e o início do movimento lateral na direção oposta. O valor padrão é 0,0 segundo. Quanto maior esse valor, menores serão os movimentos laterais dos veículos. Estes movimentos laterais apenas ocorrem se for permitido ultrapassar na mesma faixa. Movimentos laterais para mudança de faixas não são afetados por esse parâmetro.

A Tabela 4 traz os valores que foram variados nas versões 1 e 2 do cenário “A” proposto. Os valores foram variados com base no estudo do manual do VISSIM e em vídeo-aulas disponíveis on-line em: <https://www.youtube.com/channel/UC6oGYj1owEwlgGTL3frXu4Q> (acesso em 11 de novembro de 2017).

Tabela 4 - Valores dos atributos do comportamento lateral adotados.

Atributo	Padrão	Versão 1	Versão 2
Tempo de ganho para colisão	2,0 s	2,0 s	1,0 s
Velocidade mínima longitudinal	1,0 Km/h	1,0 Km/h	1,0 Km/h
Tempo entre mudança de direção	0s	2,0 s	0 s
Distancia parado (0 Km/h)	1,0 m	0,5 m	0,2 m
Distância dirigindo (50 Km/h)	1,0 m	0,7 m	0,7 m

Fonte: Autor.

Outros parâmetros de condução que segundo PTV (2015) exercem influência no comportamento lateral e foram alterados estão relacionados à distância máxima de visibilidade a frente e atrás, e o número de veículos observados. Em relação a distância de visibilidade a frente foram utilizados os valores de 250 metros para a distância máxima e 27 metros para a distância mínima. Para a distância de visibilidade atrás, foram utilizados os valores de 150 metros para a distância máxima e 27 metros para a distância mínima. O número de veículos observados utilizado foi 2. Também selecionou-se a opção de suavizar o comportamento de aproximação (*smooth close-up behaviour*).

5.3.3 Áreas de conflitos

Para a modelagem das áreas de conflitos, primeiramente definiu-se o *status* de cada área, onde a preferência de passagem foi concedida aos veículos que estavam circulando na rotatória. Todos os outros

movimentos que não envolviam a cessão da preferência para o tráfego circular recebeu o *status* vermelho-vermelho.

Inicialmente foram realizadas simulações com os atributos das áreas de conflitos nos valores originais do VISSIM. Entretanto, a visualização da simulação apontou que muitas brechas que muito provavelmente seriam aceitas na realidade, estavam sendo recusadas pelos veículos simulados, fazendo com que o modelo gerasse filas superiores aquelas observadas em campo. Para tentar amenizar a situação, foram feitas alterações (diminuições gradativas) nos parâmetros das áreas de conflitos, buscando aumentar a aceitação de brechas. Entretanto, não foi possível estimar com precisão tais parâmetros. A distância de segurança mostrou exercer influência nessa questão, sendo que sua diminuição tem o poder de evitar “*gridlocks*” em rotatórias. A Figura 49 traz um exemplo prático dessa situação que foi observada durante a exploração do software. A situação ilustrada na Figura 49 não se repetia quando o fator distância de segurança era reduzido de 1,5 para 1,0. Importante salientar que a Figura 49 diz respeito a uma tentativa de modelagem do cenário existente como rótula dupla (apenas a título exploratório), sendo exibida aqui somente para ilustrar a importância de tal fator. Um procedimento de calibração destes valores para rotatórias é proposto em Valdez, Cheu e Duran (2011).

Figura 49- Exemplo da importância do fator distância de segurança.



Fonte: Autor.

Os parâmetros utilizados para as áreas de conflitos foram:

- 0,25s para as brechas frontal e traseira.
- 1,0s de distância de segurança.
- Evitar bloquear o tráfego na corrente secundária 20%

5.3.4 Resultados do cenário existente

5.3.4.1 Resultados do desempenho operacional

Este item apresenta dados de fluxo de tráfego, tempos de viagens e formação de filas obtidos para o cenário A. São apresentados os resultados referentes apenas a uma das versões do cenário A (versão 2), tendo em vista que as médias obtidas para as versões foram similares. A Tabela 5 traz os dados de fluxo de tráfego obtidos para a versão 2 do cenário A, trazendo os dados coletados em campo para balizamento. A maior diferença percebida entre as versões diz respeito ao número de veículos que ficaram de fora da simulação. Ao passo que na versão 2, uma média de 16 veículos por simulação não entram na rede (devido a demanda elevada), na versão 1, a média de veículos que ficaram de fora da rede foi de 43 por simulação. Essa diferença é influência direta dos parâmetros de comportamento lateral, tendo em vista que foram as únicas modificações entre as versões do cenário “A”.

Tabela 5 - Dados de fluxo de tráfego do cenário existente (v2).

Simulação (semente)	Aproximação					Saída					Total simulados	Não simulados	Total geral
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E			
1 (42)	431	657	582	230	671	525	639	334	291	782	2571	7	2578
2 (54)	482	650	592	226	687	525	667	291	292	862	2637	0	2637
3 (66)	501	661	584	256	651	528	688	297	287	853	2653	8	2661
4 (78)	468	676	539	243	692	513	688	282	287	848	2618	0	2618
5 (90)	469	703	577	238	671	514	669	294	306	875	2658	36	2694
6 (102)	483	619	534	209	740	524	685	279	285	812	2585	31	2616
7 (114)	432	619	553	256	666	526	648	311	278	763	2526	12	2538
8 (126)	455	600	575	230	684	526	649	323	286	760	2544	10	2554
9 (138)	428	637	573	255	743	566	710	260	309	791	2636	17	2653
10 (150)	445	651	555	232	735	524	716	264	299	815	2618	36	2654
Média	459	647	566	238	694	527	676	294	292	816	2605	16	2620
Desvio Padrão	25	30	20	15	33	15	26	24	10	42	46	14	50
Pesquisa de campo	463	668	578	266	686	518	734	273	292	844	2661	N/A	2661

Fonte: Autor.

A Tabela 6 traz os valores (média das 10 simulações) de desempenho referente à formação de filas (em metros) e atraso (em segundos).

Tabela 6 - Desempenho operacional do modelo do cenário existente (v2)

	Aproximação					Rótula
	A	B	C	D	E	
Fila média (m)	15,4	34,2	64,2	54,4	17,8	37,1
Fila max (m)	73,9	95,7	131,3	95,7	77,5	147,5
Atraso (s)	23,9	40,2	71,5	104,6	22,2	52,5

Fonte: Autor.

Tabela 7 - Dados de tempo de viagem para o cenário existente (v2).

Simulação (semente)	Rota			
	E → B	B → E	C → E	E → A
1 (42)	13,35	7,07	13,69	17,76
D.P.	0,67	0,12	0,36	0,60
2 (54)	13,29	7,21	14,19	17,75
D.P.	0,54	0,18	0,24	0,51
3 (66)	13,57	7,38	14,26	17,46
D.P.	0,63	0,18	0,57	0,42
4 (78)	13,27	7,10	13,73	17,73
D.P.	0,93	0,12	0,16	0,36
5 (90)	13,63	7,57	14,16	18,42
D.P.	1,12	0,40	0,45	1,23
6 (102)	13,27	7,36	14,22	18,11
D.P.	0,86	0,19	0,71	1,56
7 (114)	12,83	7,19	13,48	17,44
D.P.	1,05	0,05	0,65	0,70
8 (126)	13,37	7,30	13,86	17,56
D.P.	0,80	0,29	0,44	0,65
9 (138)	13,22	7,21	13,73	17,69
D.P.	0,69	0,10	0,17	0,64
10 (150)	13,19	7,25	14,51	17,60
D.P.	0,74	0,13	0,52	0,36
Média	13,30	7,26	13,98	17,75
D.P. das médias	0,22	0,15	0,33	0,30
Média coletada	11,03	6,89	10,91	15,43
Desvio Padrão	1,79	1,07	1,51	2,11

D.P. = Desvio Padrão.

Fonte: Autor

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos do modelo de simulação para os tempos de viagem do cenário simulado existente, e

apresenta um comparativo com os dados coletados em campo que não sofreram interferência devido a ação de pedestres.

5.3.4.2 Resultados dos dados de conflitos simulados

Em relação aos dados de conflitos obtidos com a utilização do SSAM, serão apresentados os resultados para as duas versões construídas do cenário existente, a fim de verificar como a alteração nos parâmetros do comportamento lateral influenciam nos resultados. A Tabela 8 apresenta os resultados da frequência dos conflitos registrados para a versão 1 do cenário existente (cenário A v.1), e a Tabela 9 apresenta os resultados de todos os indicadores computados pelo SSAM, exceto os incorporados na última atualização do SSAM (p(UEA), mTTC e mPET). Foram filtrados dos resultados as “colisões” simuladas, que constituem limitações do modelo de simulação (eventos com TTC e/ou PET iguais a zero), ao final da análise é apresentado um resumo dos dados das colisões removidas. Na primeira análise foram utilizados como limites para classificação de eventos como conflitos os valores padrões trazidos pelo SSAM: 1,5 segundo para o limite do TTC e 5,0 segundos para o limite do PET.

Tabela 8 – Frequência dos conflitos para o cenário A (v.1) TTC e PET >0,05 – 1ª análise.

Simulação (semente)	Cruzamento	Longitudinal	Troca de faixa	Total
1 (42)	0	948	45	993
2 (54)	1	1274	54	1329
3 (66)	0	1058	40	1098
4 (78)	0	1098	42	1140
5 (90)	0	1267	36	1303
6 (102)	0	1040	53	1093
7 (114)	0	747	45	792
8 (126)	0	892	54	946
9 (138)	1	1164	43	1208
10 (150)	1	1185	58	1244
Total	3	10673	470	11146
Média	0,55	1067,30	47,00	1114,60

Fonte: Autor.

Tabela 9 - Indicadores dos conflitos para o cenário A (v.1) TTC e PET >0,05 – 1ª análise.

Indicador	Min	Max	Média	Variância
TTC	0,10	1,50	1,27	0,05
PET	0,10	4,90	2,31	1,09
MaxS	0,02	17,05	5,27	9,43
DeltaS	0,00	16,83	3,42	8,78
DR	-8,09	2,33	-1,99	3,83
MaxD	-8,43	2,33	-5,09	4,75
MaxDeltaV	0,00	12,80	1,86	2,65

Fonte: Autor.

Pode-se perceber que foram detectados em média 1114,60 conflitos para a versão 1 do cenário existente. Como cada conflito envolve um par de veículos simulados, em média, 2229,2 veículos se envolveram em um evento conflituoso em cada simulação. Para a versão 1 do cenário A, esse valor indica que 88% dos veículos simulados se envolveram em conflitos segundo os critérios estabelecidos para detecção e classificação dos eventos conflituosos.

A seguir, são apresentados os resultados obtidos para a versão 2 do cenário existente, seguindo os mesmos critérios utilizados para a versão 1. A Tabela 10 apresenta os resultados da frequência dos conflitos registrados e a Tabela 11 apresenta os indicadores computados.

Tabela 10 – Frequência dos conflitos para o cenário A (v.2) TTC e PET >0,05 – 1ª análise.

Simulação (semente)	Cruzamento	Longitudinal	Troca de faixa	Total
1 (42)	1	678	50	729
2 (54)	1	1041	44	1086
3 (66)	0	791	51	842
4 (78)	1	718	32	751
5 (90)	0	901	40	941
6 (102)	1	738	52	791
7 (114)	1	602	54	657
8 (126)	1	713	39	753
9 (138)	0	658	58	716
10 (150)	0	703	59	762
Total	6	7543	479	8028
Média	0,60	754,30	47,90	802,80

Tabela 11 - Indicadores dos conflitos para o cenário A (v.2) TTC e PET >0,05 – 1ª análise.

Indicador	Min	Max	Média	Variância
TTC	0,1	1,5	1,23	0,09
PET	0,1	4,9	2,17	1,14
MaxS	0,02	16,97	5,81	10,86
DeltaS	0	16,59	4,04	9,66
DR	-8,2	2,79	-2,09	3,66
MaxD	-8,48	2,79	-4,93	5,31
MaxDeltaV	0	13,3	2,23	3,01

Fonte: Autor.

Pode-se perceber que o número de conflitos registrados na versão 2 do cenário existente, a partir da utilização dos parâmetros descritos na última coluna da Tabela 4 (que dizem respeito ao comportamento lateral dos veículos simulados), fez com que a frequência dos eventos de conflitos registrados pelo SSAM diminuísse. Entretanto, 62% dos veículos simulados ainda estão se envolvendo em conflitos.

Na análise que gerou os resultados expressos nas Tabelas 8, 9, 10 e 11, conforme trazido anteriormente, utilizou-se como limites para a identificação de um evento como conflito os padrões sugeridos pelo SSAM (TTC = 1,5 e PET = 5,0). Conforme revisado na fundamentação teórica, o limite de 1,5 segundo para o TTC é comumente utilizado em estudos de indicadores *proxy*. Já o limite de 5 segundos para o PET pode ter sua utilização questionada, principalmente em aplicações desta natureza de condições saturadas, somado ao fato de uma das rotas mais solicitadas da interseção (aproximação B para a saída E) ter tempo médio de viagem coletado pouco superior ao valor estabelecido para o limite do PET (6,89 segundos, conforme mostrado na Tabela 1). Além disso, o apontamento de Souleyrette e Hochstein (2012) traz que não é claro como o valor padrão de 5,0 segundos para o limite máximo do PET foi inicialmente selecionado ou derivado no SSAM. Tendo em vista que frequências dos conflitos obtidas para os limites utilizados foram elevadas, optou-se por refazer a análise alterando o valor limite para o PET.

A seguir serão apresentadas as tabelas referentes às versões 1 e 2 do cenário A para a segunda rodada de análise, onde utilizou-se 1,5 segundo para o limite do PET (mantendo o valor máximo do limite do TTC em 1,5 segundo). As Tabelas 12 e 13 referem-se a versão 1 do

cenário A. Os resultados seguem a ordem de apresentação da análise anterior.

Tabela 12 - Frequência dos conflitos para o cenário A (v.1) TTC e PET >0,05 – 2ª análise.

Simulação (semente)	Cruzamento	Longitudinal	Troca de faixa	Total
1 (42)	12	40	16	68
2 (54)	13	34	28	75
3 (66)	8	34	13	55
4 (78)	8	37	28	73
5 (90)	9	52	12	73
6 (102)	6	39	22	67
7 (114)	10	40	20	70
8 (126)	3	35	15	53
9 (138)	5	25	20	50
10 (150)	7	28	29	64
Total	81	364	203	648
Média	8,10	36,40	20,30	64,80

Fonte: Autor.

Tabela 13 - Indicadores dos conflitos para o cenário A (v.1) TTC e PET >0,05 – 2ª análise.

Indicador	Min	Max	Média	Variância
TTC	0,10	1,50	1,07	0,29
PET	0,10	1,40	0,92	0,18
MaxS	0,02	16,03	5,67	8,10
DeltaS	0,01	16,03	3,73	7,10
DR	-7,78	2,89	-1,59	6,60
MaxD	-8,01	2,89	-2,29	8,94
MaxDeltaV	0,01	11,68	2,28	2,85

Fonte: Autor.

Pode-se perceber que a partir da alteração do limite do PET para 1,5, apenas 5% dos veículos simulados se envolveram em conflitos. Há de se salientar, entretanto, que conflitos registrado dentro destes limites estabelecidos ilustram interações veiculares mais próximas de colisões, em relação aos eventos detectados dentro do limite de 5 segundos para o PET.

Pode-se perceber que o número de conflitos detectados cai a partir da utilização de 1,5 segundo para o valor limite do PET. As Tabelas 14 e 15 apresentam os resultados da segunda análise para a versão 2 do cenário A.

Tabela 14 – Frequência dos conflitos para o cenário A (v.2) TTC e PET >0,05 – 2ª análise.

Simulação (semente)	Cruzamento	Longitudinal	Troca de faixa	Total
1 (42)	7	54	35	96
2 (54)	7	66	30	103
3 (66)	2	63	21	86
4 (78)	7	61	19	87
5 (90)	9	82	32	123
6 (102)	4	64	21	89
7 (114)	9	61	24	94
8 (126)	8	76	17	101
9 (138)	4	57	26	87
10 (150)	4	61	22	87
Total	61	645	247	953
Média	6,10	64,50	24,70	95,30

Tabela 15 - Indicadores dos conflitos para o cenário A (v.2) TTC e PET >0,05 – 2ª análise.

Indicador	Min	Max	Média	Variância
TTC	0,10	1,50	1,08	0,29
PET	0,10	1,40	0,84	0,19
MaxS	0,02	15,93	5,40	7,45
DeltaS	0,01	15,51	3,25	6,52
DR	-8,06	2,81	-1,39	6,47
MaxD	-8,06	2,81	2,02	8,54
MaxDeltaV	0,01	12,02	1,91	2,48

Fonte: Autor.

Assim como para a versão 1 do cenário existente, a segunda análise utilizando 1,5 segundo para o limite do PET resultou numa grande diminuição na frequência dos conflitos registrados para a versão 2 do cenário existente. A Tabela 16 traz o resumo da porcentagem dos veículos simulados que se envolveram em conflitos de acordo com o filtro

utilizado e com o limite do PET (em função do fluxo médio simulado para cada versão do cenário existente). A coluna de “colisões” expressa o número de eventos filtrados pela aplicação dos filtros. O número entre parênteses consiste na porcentagem de eventos filtrados (colisões simuladas) em relação ao número total de conflitos registrados. Pode-se perceber que a versão 2, apresentou frequência menor de conflitos registrados na primeira análise (PET 5,0) e frequência ligeiramente superior de conflitos registrados na segunda análise (PET 1,5), apontando que os valores dos atributos utilizados na versão 2 do cenário existente geram menos conflitos, mas mais conflitos severos com base no indicador PET. O número de colisões simuladas apresentou uma porcentagem relativa superior para a versão 2 na primeira análise e uma porcentagem relativa similar para a segunda análise. O valor entre parênteses na coluna das colisões indica a porcentagem desses eventos em relação aos total de eventos registrados.

Tabela 16 - Resumo da frequência dos conflitos e colisões simuladas para o cenário A.

Cenário	Veículos Simulados	PET 5,0		PET 1,5	
		Veículos em conflito (%)	Colisoes	Veículos em conflito (%)	Colisoes
Av1	2541	88	182 (14%)	5	184,6 (72,9%)
Av2	2605	62	248,5 (23,5%)	7	256,2 (71,5%)

Fonte: Autor.

A análise estatística de todos os indicadores *proxy* das versões 1 e 2 do cenário A foi feita para a segunda análise (limite PET 1,5s) utilizando o teste t (com significância de 0,05) e o teste f (com significância de 0,01), para os resultados obtidos com a aplicação dos filtros TTC e PET ≥ 0.05 . Os resultados são apresentados na Tabela 17.

Pode-se perceber que o teste-*t* identificou diferenças significativas nas médias dos indicadores PET, MaxS, DeltaS, MaxD e MaxDeltaV. A média do PET menor para a versão 2 aponta que segundo este indicador os conflitos registrados nesta versão resultam em maior probabilidade de colisão em relação à versão 1. Já a análise dos cenários através do indicador MaxS e DeltaS indica que a versão 2 é mais segura, uma vez que estas apresentam valores médios mais baixos. Em relação ao indicador MaxD, o valor médio da desaceleração máxima do segundo veículo é menor para a versão 2, o que indica que as travagens não são tão fortes quanto aquelas realizadas pelos condutores na versão 1. Essa

hipótese é corroborada pelo indicador MaxDeltaV, que apresentou valor menor para a segunda versão, indicando menor severidade dos conflitos detectados na versão 2. Para os tipos de conflitos as diferenças obtidas entre as versões não foram estatisticamente significativas. Uma interpretação possível é que os parâmetros utilizados para a versão 2 fazem com que os veículos simulados diminuam seus limites para as interações laterais, através da alteração dos atributos “tempo de ganho para colisão” e “distância parado”, gerando mais conflitos com PET abaixo de 1,5 e uma média de PET menor em relação a versão 1. Isso pode ser responsável pela diminuição dos indicadores MaxS, DeltaS e MaxD (e consequentemente o MaxDeltaV) na versão 2, uma vez que em ambientes mais suscetíveis a ocorrência conflitos, é de se esperar que a velocidade dos veículos diminua, a fim de incrementar a cautela e compensar a maior probabilidade de colisões, a qual é indicada pelo valor mais baixo do PET, conforme observado por Bernardo (2015).

Tabela 17 - Análise estatística dos dados de conflitos do cenário A (v1) e com os dados do cenário A (v2)

Indicador	A versão 1		A versão 2		Valor de t	t crítico	Significativo	Diferença das médias
	Média	Variância	Média	Variância				
TTC	1,07	0,29	1,08	0,29	-0,22	1,66	NÃO	-0,01
PET	0,92	0,18	0,84	0,19	3,64	1,66	SIM	0,08
MaxS	5,67	8,10	5,40	7,45	1,85	1,66	SIM	0,26
DeltaS	3,73	7,10	3,25	6,53	3,55	1,66	SIM	0,47
DR	-1,59	6,60	-1,39	6,47	-1,54	1,66	NÃO	-0,20
MaxD	-2,29	8,94	-2,02	8,54	-1,81	1,66	SIM	-0,27
MaxDeltaV	2,28	2,85	1,91	2,48	4,44	1,66	SIM	0,37
Cruzamento	8,10	9,43	6,10	5,88	0,61	1,73	NÃO	3,64
Longitudinal	36,40	54,48	64,50	71,83	-1,19	1,73	NÃO	-51,09
Troca de faixa	20,30	40,67	24,70	35,12	-0,43	1,73	NÃO	-8,00
Total	64,80	81,73	95,30	132,68	-0,83	1,73	NÃO	-55,45

Fonte: Autor.

5.4 MODELAGEM DO CENÁRIO ALTERNATIVO

A modelagem do cenário alternativo, consistiu na remodelagem do cenário existente à luz dos conceitos das turbo rotatórias, que tem a premissa de eliminar pontos de conflitos dentro do anel circular. Para isso, a liberdade dos motoristas é restringida parcialmente, forçando-os a escolherem as faixas com antecedência a fim de conseguirem alcançar seus destinos.

No cenário alternativo, todos os parâmetros de calibração referente ao comportamento de condução e atributos das áreas de conflitos foram mantidos, com exceção da ultrapassagem dentro da mesma faixa, que no cenário alternativo não é mais permitida. Essa alteração foi necessária

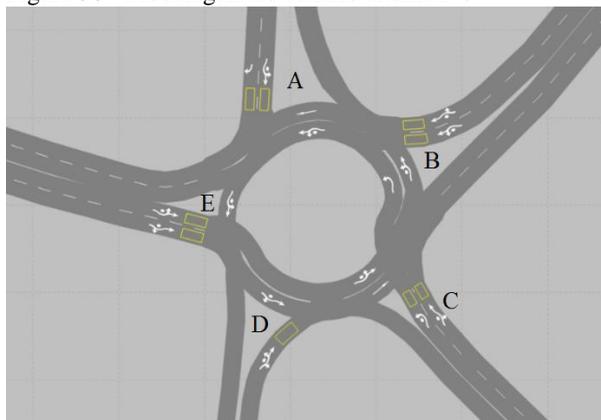
pois a ultrapassagem dentro da faixa é o atributo responsável por representar o comportamento encontrado na realidade do objeto de estudo durante o horário de pico da maneira mais realista possível, o qual é responsável por aumentar as interações veiculares e cuja instalação de uma turbo rotatória visaria eliminar, através de seus dispositivos geométricos característicos (cubos divisores das faixas circulares).

Todos os demais, dados de entrada da demanda, distribuições de velocidade, posição, tamanho e configuração das área de redução de velocidades foram mantidos, a fim de proporcionar uma equidade na estimação dos dados de conflitos.

5.4.1 Construção da interseção

Todas as aproximações, com exceção da “D”, foram construídas com duas faixas. A faixa da direita ficou responsável pelos movimentos da saída a direita e seguir em frente, e as da esquerda com os movimentos de seguir em frente e de conversão à esquerda. A única exceção é a faixa direita da aproximação “A”, a qual foi destinada exclusivamente para a conversão à direita (saída “E”). As saídas “B” e “E” foram modeladas com duas faixas, e as demais saídas todas simples. O anel circular foi construído com a utilização de duas faixas simples justapostas. A Tabela 18 traz a largura utilizada para os *links* do cenário alternativo.

Figura 50 - Modelagem do cenário alternativo



Fonte: Autor.

Tabela 18 - Largura dos links inseridos no simulador para o cenário alternativo

<i>Link</i>	Nº de faixas	Largura da faixa
Aproximação A	2	3,00
Aproximação B	2	3,00
Aproximação C	2	3,00
Aproximação D	1	5,00
Aproximação E	2	3,00
Saída A	1	5,00
Saída B	2	3,00
Saída C	1	4,00
Saída D	1	5,00
Saída E	2	3,00
Faixa Circular	1 / 2	3,50

Fonte: Autor.

O roteamento dos veículos foi equilibrado nas faixas das esquerda e da direita das aproximações duplas, mantendo a porcentagem dos movimentos divergentes para interseção. Isso fez-se necessário pois as aproximações do cenário alternativo contam com faixas duplas que encontram as faixas simples do anel circular. Assim como no cenário existente, os inícios das rotas foram posicionados com antecedência nas aproximações, a fim de proporcionar espaço suficiente para os veículos encontrarem brechas e realizarem a mudança de faixa.

5.4.2 Resultados do cenário alternativo

5.4.2.1 Resultados do desempenho operacional

Este item apresenta dados de fluxo de tráfego, tempos de viagens e formação de filas obtidos para o cenário alternativo (cenário B). A Tabela 19 traz os dados de fluxo de tráfego obtidos para o cenário B.

Pode-se perceber que no cenário B não foram deixados veículos de fora da simulação. Porém, alguns poucos veículos foram removidos da rede por não conseguirem alcançar sua rota (não conseguiram alcançar o próximo *link*/conector). Isso acontece quando o veículo simulado necessita realizar uma mudança de faixa obrigatória e não consegue encontrar brechas para ingressar na faixa devido a formação de filas. Então, o veículo simulado permanece parado na “distância de parada de

emergência” até encontrar uma brecha ou atingir o “tempo de difusão” estabelecido e ser removido da rede. Pôde-se perceber que se a ultrapassagem entre faixas for restringida nas aproximações (próximos a entrada da rotatória), a quantidade de veículos removidos aumenta. Por isso, não foi restringido a ultrapassagem entre as faixas próximo ao ingresso da interseção.

Tabela 19 - Dados de fluxo de tráfego do cenário alternativo.

Simulação (semente)	Aproximação					Saída					Total simulados	Removidos	Total geral
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E			
1 (42)	419	666	580	243	664	526	665	308	287	786	2572	0	2572
2 (54)	436	677	596	235	685	530	659	270	305	865	2629	1	2630
3 (66)	483	670	612	258	651	535	683	297	286	873	2674	1	2675
4 (78)	423	705	537	254	695	514	674	286	280	860	2614	0	2614
5 (90)	446	708	576	281	671	526	684	297	294	881	2682	4	2686
6 (102)	455	634	535	245	742	534	644	319	295	819	2611	2	2613
7 (114)	432	635	559	285	668	535	680	302	283	779	2579	1	2580
8 (126)	440	607	568	251	685	528	669	307	281	766	2551	4	2555
9 (138)	429	634	560	271	750	567	714	274	309	780	2644	2	2646
10 (150)	438	671	553	279	694	519	704	266	310	836	2635	0	2635
Média	440	661	568	260	691	531	678	293	293	825	2619	2	2621
Desvio Padrão	18	33	24	18	32	14	21	18	12	44	43	2	43

Fonte: Autor.

A Tabela 20 traz os valores de desempenho (média das 10 simulações) referente à formação de filas (em metros) e atrasos (em segundos). Pode-se perceber durante a visualização da simulação e nos resultados expostos na Tabela 20, que a aproximação “A” apresentou formação de filas superiores às outras aproximações. Não se sabe com certeza o motivo pelo qual isso aconteceu, porém, acredita-se que esteja relacionado com o aumento do comprimento das áreas de conflitos localizadas em frente a aproximação, em concordância com o aumento do fluxo conflitante causado pela maior vazão conferida ao fluxo oriundo da aproximação “B” (que se dirige predominantemente para a aproximação “E”).

A Tabela 21 apresenta os resultados obtidos para os tempos de viagem do cenário alternativo. Pode-se perceber que o cenário alternativo também apresentou tempos de viagens mais lentos que os coletados em campo (com exceção da rota E→A), e menos dispersos em relação à média. Há de se salientar, que a distância entre os detectores que

mensuraram os tempos de viagens aumentou em relação à distância real, devido a inserção de mais uma faixa no anel circular.

Tabela 20 - Desempenho operacional do modelo do cenário alternativo

	Aproximação					Rótula
	A	B	C	D	E	
Fila média (m)	146,0	13,4	31,1	16,6	22,4	46,1
Fila max (m)	230,6	65,9	99,2	65,8	92,0	234,6
Atraso (s)	121,8	14,9	33,5	32,4	21,3	44,8

Fonte: Autor.

Tabela 21 - Dados de tempo de viagem para o cenário alternativo em segundos.

Simulação (semente)	Rota			
	E → B	B → E	C → E	E → A
1 (42)	12,05	9,27	14,46	15,31
D.P.	0,14	0,16	0,48	0,20
2 (54)	12,03	9,35	14,47	15,26
D.P.	0,59	0,18	0,36	0,91
3 (66)	12,13	9,06	14,60	15,30
D.P.	0,71	0,26	0,36	1,10
4 (78)	11,68	9,32	14,58	14,77
D.P.	0,58	0,56	0,60	0,28
5 (90)	11,87	9,41	14,61	15,08
D.P.	0,22	0,20	0,26	0,29
6 (102)	11,78	9,66	14,51	14,72
D.P.	0,19	0,33	0,35	0,41
7 (114)	11,86	9,04	14,23	14,87
D.P.	0,31	0,50	0,28	0,49
8 (126)	11,76	9,22	14,33	14,55
D.P.	0,15	0,36	0,16	0,21
9 (138)	11,73	9,31	14,64	14,90
D.P.	0,10	0,25	0,45	0,37
10 (150)	11,62	9,09	14,34	14,93
D.P.	0,30	0,24	0,31	0,26
Média	11,85	9,27	14,48	14,97
D.P. das médias	0,17	0,19	0,14	0,26
Média coletada	11,03	6,89	10,91	15,43
Desvio Padrão	1,79	1,07	1,51	2,11

Fonte: Autor.

5.4.2.2 Resultado dos dados de conflitos simulados

Assim como realizado no cenário A, para o cenário alternativo “B” também foram realizadas duas análises, onde variou-se o limite do indicador PET para a classificação de um evento como conflito. Os resultados apresentados seguem a mesma ordem dos resultados apresentados para o cenário anterior. As colisões filtradas são apresentadas ao fim do subitem. As Tabelas 22 e 23 referem-se a primeira análise, a qual utilizou 1,5 para o limite do TTC e 5,0 para o limite do PET.

Tabela 22 - Frequência dos conflitos para o cenário B (v. única) TTC e PET >0,05.

Simulação (semente)	Cruzamento	Longitudinal	Troca de faixa	Total
1 (42)	1	616	26	643
2 (54)	2	598	19	619
3 (66)	0	643	12	655
4 (78)	2	679	32	713
5 (90)	1	721	20	742
6 (102)	0	500	13	513
7 (114)	1	447	28	476
8 (126)	1	600	25	626
9 (138)	1	552	17	570
10 (150)	1	545	15	561
Total	10	5901	207	6118
Média	1,00	590,10	20,70	611,80

Tabela 23 - Indicadores dos conflitos para o cenário B (v. única) TTC e PET >0,05 – 2ª análise.

Indicador	Mín	Max	Média	Variância
TTC	0,10	1,50	1,27	0,05
PET	0,10	4,90	2,21	1,06
MaxS	0,11	16,40	5,17	7,47
DeltaS	0,00	14,89	3,25	5,54
DR	-8,25	2,28	-1,98	3,55
MaxD	-8,31	2,28	-5,10	4,51
MaxDeltaV	0,00	12,10	1,82	1,89

Fonte: Autor.

Para o limite do PET fixado em 5 segundos, aproximadamente 46% dos veículos simulados se envolveram em conflitos no cenário B. A seguir, nas Tabelas 24 e 25 são exibidos os resultados obtidos para o cenário B referentes a segunda análise, a qual utilizou limite de 1,5 segundo para o TTC e para o PET.

Tabela 24 - Frequência dos conflitos para o cenário B (v. única) TTC e PET >0,05 – 2ª análise.

Simulação (semente)	Cruzamento	Longitudinal	Troca de faixa	Total
1 (42)	5	8	12	25
2 (54)	7	6	10	23
3 (66)	3	5	14	22
4 (78)	9	14	16	39
5 (90)	9	10	9	28
6 (102)	10	7	12	29
7 (114)	5	10	9	24
8 (126)	8	8	10	26
9 (138)	8	5	13	26
10 (150)	5	9	8	22
Total	69	82	113	264
Média	6,90	8,20	11,30	26,40

Fonte: Autor.

Tabela 25 - Indicadores dos conflitos para o cenário B (v. única) TTC e PET >0,05 – 2ª análise.

Indicador	Min	Max	Média	Variância
TTC	0,10	1,50	1,31	0,14
PET	0,10	1,40	1,10	0,11
MaxS	0,11	13,20	5,25	2,93
DeltaS	0,03	11,03	4,71	2,75
DR	-7,74	2,28	-0,89	3,20
MaxD	-8,03	2,28	-1,52	5,85
MaxDeltaV	0,02	8,96	3,15	1,94

Fonte: Autor.

A utilização de 1,5 segundo como limite do PET para a classificação de um evento como conflito, resultou que apenas 2% dos veículos simulados se envolveram em conflitos no cenário B. A Tabela 26 traz o

resumo do número médio de veículos envolvidos em conflitos em função do filtro aplicado e do limite utilizado. A coluna referente à colisões traz o número médio de eventos que foram removidos a partir da utilização dos filtros, trazendo a porcentagem desses eventos em relação ao total de eventos registrados pelo SSAM.

Tabela 26 - Resumo da frequência de veículos em conflitos e colisões simuladas para o cenário B.

Cenário	Veículos Simulados	PET 5,0		PET 1,5	
		Veículos em conflito (%)	Colisoes	Veículos em conflito (%)	Colisoes
B	2619	46,7	17 (2,7%)	2	18,2 (40%)

Fonte: Autor.

5.5 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

5.5.1 Desempenho de segurança

A Tabela 27 exibe a análise estatística comparativa dos dados de conflitos obtidos para o cenário “B” e para a versão 1 do cenário “A”, para a segunda análise (limite PET 1,5 segundo).

Tabela 27 - Análise estatística dos dados de conflitos do Cenário B com os dados do Cenário A (v1).

Indicador	Cenário B		Cenário A (v1)		Valor de t	t critico	Significativo	Diferença das médias
	Média	Variância	Média	Variância				
TTC	1,31	0,14	1,07	0,29	7,60	1,66	SIM	0,24
PET	1,10	0,11	0,92	0,18	6,76	1,66	SIM	0,18
MaxS	5,25	2,93	5,67	8,10	-2,68	1,66	SIM	-0,41
DeltaS	4,71	2,75	3,73	7,10	6,73	1,66	SIM	0,98
DR	-0,89	3,20	-1,59	6,60	4,68	1,66	SIM	0,70
MaxD	-1,52	5,85	-2,29	8,94	4,10	1,66	SIM	0,78
MaxDeltaV	3,15	1,94	2,28	2,85	7,97	1,66	SIM	0,86
Cruzamento	6,90	5,21	8,10	9,43	-0,35	1,73	NÃO	-2,18
Longitudinal	8,20	7,51	36,40	54,48	-2,37	1,73	SIM	-51,27
Troca de faixa	11,30	6,45	20,30	40,67	-1,21	1,73	NÃO	-16,36
Total	26,40	25,15	64,80	81,73	-1,72	1,73	NÃO	-69,82

Fonte: Autor.

A Tabela 28 exibe a análise estatística comparativa dos dados de conflitos obtidos para o cenário B e para a versão 2 do cenário A, também para a segunda análise.

Tabela 28 - Análise estatística dos dados de conflitos do cenário B com os dados do Cenário A (v2).

Indicador	Cenário B		Cenário A (v2)		Valor de t	t crítico	Significativo	Diferença das médias
	Média	Variância	Média	Variância				
TTC	1,31	0,14	1,08	0,29	7,99	1,66	SIM	0,23
PET	1,10	0,11	0,84	0,19	10,40	1,66	SIM	0,26
MaxS	5,25	2,93	5,40	7,45	-1,08	1,66	NÃO	-0,15
DeltaS	4,71	2,75	3,25	6,53	11,10	1,66	SIM	1,46
DR	-0,89	3,20	-1,39	6,47	3,62	1,66	SIM	0,50
MaxD	-1,52	5,85	-2,02	8,54	2,86	1,66	SIM	0,50
MaxDeltaV	3,15	1,94	1,91	2,48	12,38	1,66	SIM	1,24
Cruzamento	6,90	5,21	4,80	5,88	0,27	1,73	NÃO	1,45
Longitudinal	8,20	7,51	53,70	71,83	-2,72	1,73	SIM	-102,36
Troca de faixa	11,30	6,45	19,10	35,12	-1,54	1,73	NÃO	-24,36
Total	26,40	25,15	77,60	132,68	-2,19	1,73	SIM	-125,27

Fonte: Autor.

A comparação dos indicadores do cenário B com ambas versões do cenário A, indicam resultados similares. Segundo os indicadores TTC, PET, MaxS, DR e MaxD, o cenário B é mais seguro em relação ao cenário A, sendo a diferença dos valores das médias estatisticamente significativa (com exceção do indicador MaxS que não apresentou diferença estatisticamente significativa). Já os indicadores DeltaS, MaxDeltaV, indicam que as colisões que ocorreriam no cenário B teriam consequências mais severas do que aquelas que ocorreriam no cenário A.

Em relação à frequência dos conflitos registrados, o cenário B, apresentou uma diminuição estatisticamente significativa para os conflitos longitudinais e para os conflitos totais.

5.5.2 Desempenho operacional

Em relação aos dados do desempenho operacional, a Tabela 29 traz os dados comparativos das filas médias registradas para o cenário existente (cenário “A” versão 2) e para o cenário alternativo (cenário “B”). Para o cenário existente exibe-se apenas os valores para a versão 2 do cenário “A”, tendo em vista que esta apresentou o melhor desempenho operacional em relação à versão 1. Pode-se perceber que a fila média observada para a rotatória aumentou 24%, embora todas as aproximações, com exceção da “A”, tenham apresentado reduções na fila média formada.

Tabela 29 - Comparação das filas médias dos modelos.

	Aproximação					Rótula
	A	B	C	D	E	
Existente	15,4	34,2	64,2	54,4	17,8	37,1
Alternativo	146,0	13,4	31,1	16,6	22,4	46,1
Diferença (%)	846%	-61%	-52%	-69%	26%	24%

Fonte: Autor.

O motivo desse aumento, é justamente atribuído a formação de fila na aproximação “A”, a qual foi muito superior para o cenário alternativo em comparação ao cenário existente. Não se conseguiu identificar o motivo de tal formação de fila com precisão. Entretanto, a visualização das simulações permitiu observar que no cenário alternativo o fluxo conflitante da aproximação “A” (fluxo circular para o qual o fluxo da aproximação deve ceder a preferência) teve sua fluidez beneficiada, diminuindo assim as oferta de brechas necessárias para o ingresso na interseção dos veículos desta aproximação. Em especial, os ônibus pareceram ter grande parcela na formação dessas filas, uma vez que estes permaneciam um período de tempo maior na linha de preferência, aguardando brechas para ingressar (em relação ao tempo percebido visualmente em campo). Além disso, o *design* do cenário alternativo aumentou o tamanho da área de conflito em frente a aproximação “A” (devido a inclusão de mais uma faixa circular), fazendo com que os veículos simulados necessitem brechas maiores para cruzar a área de conflito. Foram realizadas tentativas de modificação dos atributos dessas áreas de conflitos, a fim de fazer com que os veículos simulados aceitassem brechas menores para que a fila se dissipasse mais rapidamente, porém não se obteve sucesso. Acredita-se que a diminuição do comprimento médio da formação de fila para essa aproximação demande uma remodelagem da infraestrutura virtual, demandando alterações no ângulo de aproximação a fim de diminuir o comprimento da área de conflito a ser percorrida.

A Tabela 30 traz as filas máximas obtidas para os modelos. A fila máxima é a maior fila registrada na aproximação. Novamente pode-se perceber que a aproximação “A” é responsável por aumentar as filas máximas registradas. Também pode-se perceber que a fila máxima registrada na aproximação “E” foi superior no cenário alternativo (embora a fila média tenha diminuído para essa aproximação).

Tabela 30 - Comparação das filas máximas dos modelos.

	Aproximação					Rótula
	A	B	C	D	E	
Existente	73,9	95,7	131,3	95,7	77,5	147,5
Alternativo	230,6	65,9	99,2	65,8	92,0	234,6
Diferença (%)	212%	-31%	-24%	-31%	19%	59%

Fonte: Autor.

A Tabela 31 traz os dados de atraso para os cenários simulados. Novamente a aproximação “A” apresentou piora significativa para o cenário alternativo em relação ao cenário existente. Apesar disso, pode-se perceber que o cenário alternativo apresentou tempo de atraso médio menor para a interseção.

Tabela 31 - Comparação dos atrasos dos modelos.

	Aproximação					Rótula
	A	B	C	D	E	
Existente	23,9	40,2	71,5	104,6	22,2	52,5
Alternativo	121,8	14,9	33,5	32,4	21,3	44,8
Diferença (%)	409%	-63%	-53%	-69%	-4%	-15%

Fonte: Autor.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho a simulação microscópica foi aplicada na avaliação do desempenho da segurança em interseções rotatórias. Foram propostos dois cenários, onde o primeiro buscou representar um objeto de estudo real e o segundo uma solução alternativa para esse objeto. A modelagem do cenário existente foi realizada com a utilização de um comportamento de condução que permite a ultrapassagem dentro da mesma faixa, e tem sua utilização ainda pouco explorada para a modelagem de rotatórias. Apesar disso, esse comportamento foi o que representou visualmente a realidade do objeto de estudo da maneira mais condizente com aquela encontrada em campo, mostrando um grande potencial para modelagem de ambientes de tráfego menos organizados e com alto fluxo de tráfego.

Pôde ser constatado que o comportamento de condução adotado e a forma como a interseção é codificada no simulador tem grande poder de influenciar os resultados, o que deve ser tratado com cuidado nas etapas de construção, calibração e validação do modelo. Entretanto, o processo de calibração e de validação dos resultados obtidos a partir da utilização da simulação microscópica é difícil de ser executado, tendo em vista o grande desafio a ser vencido para a obtenção desses indicadores em campo, uma vez que esse processo demanda utilização de técnicas avançadas como a visão computacional que ainda está em fase de desenvolvimento. Por isso é muito importante que sejam documentados todos os passos e detalhes referentes ao processo de construção do modelo no microssimulador. Dessa maneira a continuidade de pesquisas iniciadas em locais que necessitem ou necessitarão intervenção viária torna-se possível, uma vez que a aplicação da microssimulação de tráfego em estudos de segurança ainda é uma área em estágio inicial de desenvolvimento.

Em relação a utilização das áreas de conflitos, ao passo que se mostraram mais complicadas de modelar (uma vez que contêm mais atributos e geram comportamentos menos previsíveis) em relação às regras de prioridades, foram capazes de reproduzir no modelo um comportamento muito parecido com aquele encontrado em campo, no que tange a lógica de preferência. Embora durante o trabalho não tenham sido feitas menções à utilização das regras de prioridade como lógica de preferência para a modelagem dos cenários, uma vez que este processo é determinístico e não deve ser utilizado em estudos de segurança (corroborando com Young et al. (2014), que trazem que diferentes motoristas aceitarão diferentes brechas em diferentes situações), durante a fase de construção da rede e estudo do software utilizou-se tal sistema

para verificar como sua utilização exerce influência na simulação. Através da visualização da simulação, pôde ser percebido que a utilização das regras de prioridades beneficiam a fluidez e o escoamento (o que foi constatado devido a diminuição dos veículos em filas) em troca de uma representação menos realista e mais mecânica das interações veiculares encontrada no objeto de estudo.

Apesar de o manual do VISSIM apresente detalhes sobre os atributos referentes às áreas de conflitos, a compreensão de como as alterações desses parâmetros influenciam na aceitação ou rejeição de brechas não pareceu ser de simples compreensão durante a modelagem dos cenários estudados, e também são escassos trabalhos que investigaram a sensibilidade de tais parâmetros na simulação de segurança de rotatórias. Também parece ser interessante as áreas de conflitos incorporarem a opção de variar os valores de seus atributos em função da classe do veículo. No objeto estudado, por exemplo, é comum observar motoristas de ônibus na faixa circular cedendo cordialmente a preferência de passagem para outros ônibus ingressarem na rótula (uma vez que sabem da dificuldade em encontrar brechas adequada para ingressar na rotatória no horário de pico). Essa situação é realizada através da diminuição da velocidade durante a aproximação da área de conflito ou até mesmo efetuando a parada na faixa circular. De fato, é comum observar veículos cedendo a preferência de passagem a ônibus, seja por cordialidade ou pelos motoristas dos ônibus forçarem brechas.

A utilização do SSAM para identificação e classificação dos eventos de conflitos, e obtenção dos indicadores *proxy* sintéticos, mostrou que a utilização do limite de 5 segundos como valor máximo para o indicador PET gerou uma elevada frequência de eventos de conflitos no objeto estudado (88% dos veículos se envolveram em conflitos na versão 1 do cenário existente e 62% na versão 2). Entretanto, para a correta verificação da proximidade deste valor com a realidade, é necessária a validação destes dados, que foi tratada como limitação desta pesquisa. Não sendo possível no decorrer deste trabalho realizar tal procedimento, foi feita uma nova análise, a qual adotou 1,5 segundo como valor limite para o PET. A utilização do novo limite foi sugerida a partir da revisão da literatura e da coleta dos tempos de viagens no objeto estudado, onde foi constatado que o tempo de percurso entre algumas rotas era próximo a 5 segundos (conforme trazido na Tabela 1), indicando que este limite é muito elevado para o presente caso.

Tendo em vista que não se encontrou um consenso a respeito de quais indicadores *proxy* são mais apropriados para esse tipo de análise de segurança, este trabalho expõe os valores obtidos para todos os

indicadores computados pelo SSAM (exceto os incorporados na última versão do SSAM). Quanto aos resultados, os indicadores destinados a medir a severidade dos eventos conflituosos, através da probabilidade destes resultarem em colisões, indicam que o cenário alternativo (cenário B) é mais seguro em relação ao cenário existente (cenário A), uma vez que o cenário alternativo apresentou médias mais elevadas para os indicadores TTC e PET, e média mais baixa para o indicador DR, além do cenário alternativo ter apresentado frequência de conflitos inferior ao cenário existente.

Em relação aos indicadores que buscam expressar a gravidade provável da potencial colisão resultante MaxS (velocidade máxima dos veículos envolvidos no conflito) e DeltaS (diferença de velocidade entre veículos observada), os resultados são contra intuitivos, uma vez que segundo o indicador MaxS o cenário B é mais seguro (pois apresentou o menor valor médio), e segundo o DeltaS o cenário A (versão 2) é o mais seguro (pois apresentou o menor valor médio). Segundo o DeltaS o cenário B (turbo rotatória) é o menos seguro de todos os cenários analisados. Esses resultados vão ao encontro dos resultados obtidos por Vasconcelos, Silva e Seco (2013) que também indicam que a turbo rotatória apresenta menos conflitos, mas conflitos mais severos em relação à rotulas simples. A diferença das médias dos indicadores supracitados foi testada com o teste-*t* para um nível de significância de 95%, o qual rejeitou a hipótese nula (H_0), que indica que a diferença entre as médias dos indicadores para os cenários comparados é zero. Em relação ao indicador MaxDeltaV, acredita-se que para a sua correta utilização seja necessário que o modelo de simulação contemple os usuários mais vulneráveis das vias como motociclistas, ciclistas e pedestres, uma vez que este indicador leva em conta a massa dos veículos/usuários envolvidos no conflito a fim de estimar as consequências das colisões potenciais.

Em relação ao comportamento de condução, não foi possível calibrar o modelo de Wiedemann 74 com dados coletados em campo, devido a limitação de recursos da pesquisa, tendo sido adotado o valor de 1 para a parte aditiva da distância de segurança (*bx_add*) e de 2 para a parte multiplicativa da distância de segurança (*bx_mult*). Através da visualização da simulação foi possível perceber que a redução do valor desses parâmetros exerce influência na dissipação das filas, conforme apontado por Li et al. (2013) que perceberam que a alteração desses parâmetros impacta no tempo do *headway* de acompanhamento. Também, menos veículos ficaram de fora da simulação a partir da redução desses valores (para o cenário A, tendo em vista que no cenário B a

demanda conseguiu ser totalmente inserida na rede). Nesse sentido, Cabral e Cunto (2012) trazem que em se tratando de uma análise comparativa, a não calibração dos parâmetros em ambos os cenários analisados ocasiona um desvio (erro) de magnitude similar entre os cenários, fazendo com que a comparação entre as situações não sofra distorções. Partindo dessa lógica, a calibração equivalente de ambos os cenários também deve ocasionar um desvio de magnitude similar entre os cenários, o que também faz com que a comparação entre as situações não sofra distorção.

Por fim, salienta-se que embora os resultados obtidos para o cenário alternativo indiquem que esta é uma proposta mais segura (com exceção do Delta S), não se pode afirmar a partir do experimento realizado que uma turbo rotatória apresente desempenho de segurança superior a uma rótula compacta de semi-duas faixas. Isso pois as rótulas compactas de semi-duas faixas propostas na literatura apresentam características que não são encontradas no objeto estudado, como a largura da faixa circular próximo aos 8 metros. Entretanto o experimento indica que a modificação do cenário existente para uma turbo rotatória ocasione uma melhoria no desempenho de segurança segundo os indicadores *proxy* e segundo a frequência de conflitos registrados, e também resulte numa melhora do desempenho operacional, através da geração de tempo de atrasos menores.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se continuar estudando o local escolhido (rótula da UFSC), a fim de aumentar a quantidade de informações e subsídios técnicos para intervenções futuras por meio de técnicos e autoridades. Um dado importante que poderia ser obtido diz respeito a formação de filas e atrasos no objeto de estudo. Se esses dados fossem conhecidos, poderia ser realizada uma análise comparativa entre as filas geradas pelo modelo de simulação com os dados coletados em campo.

Também se recomenda a análise mais profunda em relação aos fatores responsáveis pelos tempos de viagens simulados serem mais lentos que àqueles observados em campo. Para isso, um estudo que contemplasse uma análise da sensibilidade dos atributos das áreas de conflitos, em relação ao desempenho operacional e ao desempenho de segurança, agregaria conhecimentos importantes para o melhor entendimento dessa lógica de preferência.

A repetição de experimentos comparativos de interseções rotatórias em outras plataformas de microsimulação também é recomendada. Isso tornaria possível verificar se os resultados obtidos a partir da utilização de outros *softwares* corroboram com a hipótese de que as turbo-rotatórias geram menos conflitos, mas estes apresentam médias superiores para os indicadores que buscam expressar a gravidade das colisões potenciais.

Outros tópicos que seriam interessantes para estudos futuros seriam a inclusão de pedestres, ciclistas e motociclistas no modelo simulado, bem como a exploração do comportamento de troca de faixa.

Tendo em vista que o comportamento de condução regido pela largura disponível é pouco explorado na simulação de rotatórias, mas demonstrou grande capacidade de representar visualmente o comportamento encontrado em campo, é sugerido que este seja melhor explorado.

REFERÊNCIAS

- AL-GHANDOUR, M. N. **Roundabout Slip Lanes: Performance and Safety Analysis**. North Carolina State University, 2011.
- AMBROS, J.; TUREK, R.; PAUKRTI, J. **Safety evaluation using traffic conflicts: pilot comparison of micro-simulation and observation**. International Conference on Traffic and Transport Engineering. Belgrado, 2014.
- BERNARDO, N. M. S. **Avaliação do desempenho de um corredor de turbo-rotundas – segurança**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Portugal, 2015.
- BOFFO, G. H. **Formatos e técnicas de modelos de previsão de acidentes de trânsito**. Dissertação de mestrado. Porto Alegre: Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- BRILON, W. **Studies on roundabouts in Germany: lessons learned**. In: Proceedings of International Roundabout Conference, Carmel, IN, USA. 2011.
- CABRAL, L. V. P. de; CUNTO, F. J. C. **Avaliação da frequência e severidade de conflitos veiculares simulados em interseções**. XXVI Congresso da Anpet. Joinville, 2012.
- COELHO, M. D. **Análise e sugestões para projetos geométricos de rótulas modernas em vias urbanas**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- CUNTO, F. J. C. **Assessing Safety Performance of Transportation Systems using Microscopic Simulation**. Tese (Doutorado). Department of Civil and Environmental Engineering, University of Waterloo, Ontário. 2008.
- CUNTO, F.; SACCOMANNO, F. F. **Calibration and validation of simulated vehicle performance at signalized intersections**. *Accid. Anal. Prev.*, 40, 1171–117, 2008.

CUNTO, F. J. C.; CASTRO NETO, M. M. de; BARREIRA, D. S. **Modelos de previsão de acidentes de trânsito em interseções semaforizadas de Fortaleza**. Transportes, v. 20, n. 2, p. 57-64, 2012.

Departamento Nacional de Infraestrutura dos Transportes (DNIT). **Manual de projetos de interseções**. Publicação 718. 2ª edição. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Rio de Janeiro. 2005.

EL-BASYOUNY, K.; SAYED, T. *Safety performance functions using traffic conflicts*. Safety Science, v. 51, n. 1, p. 160-164, 2013.

Federal Highway Administration (FHWA). *Mini-roundabouts. Technical summary*. FHWA-SA-10-007. Washington, D.C. 2010.

Federal Highway Administration (FHWA). *Roundabouts: an informational guide*. Report 672. Second edition. Department of Transportation. 2000.

Federal Highway Administration (FHWA). **Traffic conflict techniques for safety and operation: observers manual**. Technical Report. FHWA-IP-88-027. Washington, D.C. 1989.

FERRAZ, A.C.P.; RAIA JUNIOR, A. A.; BEZERRA, B. S.; BASTOS, J.T. SILVA, K.C.R. **Segurança Viária**. São Carlos, SP. ISBN 978-85-98156-69-9. Suprema Gráfica e Editora, 2012.

FORTUIJN, L. *Turbo roundabouts: design principles and safety performance*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 2096, p. 16-24, 2009.

FRAMARIM, C. S. da. **Procedimento para monitorar medidas voltadas à redução dos acidentes no sistema viário**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2003

GALENO, S. P. **Uma técnica de conflitos de tráfego aplicada aos pedestres: o caso de um corredor urbano em Belém**. Dissertação de mestrado. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2002.

GALLELLI, V.; VAIANA, R. **Roundabout intersections: evaluation of geometric and behavioural features with VISSIM**. In: TRB National Roundabout Conference, Kansas City, Mo. 2008.

GETTMAN, D.; PU, L.; SAYED, T.; SHELBY, S. **Surrogate safety assessment model and validation**. Final Report. FHWA-HRT-08-051, 2008.

GETTMAN, D.; HEAD, L. **Surrogate safety measures from traffic simulation models**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 1840, p. 104-115, 2003.

HABTEMICHAEL, F. G.; PICADO SANTOS, L. de. **Safety evaluations of aggressive driving on motorways through microscopic traffic simulation and surrogate measures**. In: Transportation Research Board 91st Annual Meeting. 2012.

HAYWARD, J.C., **Near-miss determination through use of a scale of danger**. Report No. HRR 384. Highway Research Board, pp. 24–35, 1972.

HYDÉN, C. **Traffic-conflicts technique for determining risk**. Bulletin 15 B. Lund, Sweden: Department of Traffic Planning and Engineering. Lund Institute of Technology; 1977.

HYDÉN, C.; VÁRHELYI, A. **The effects on safety, time consumption and environment of large scale use of roundabouts in an urban area: a case study**. Accident Analysis & Prevention, v. 32, n. 1, p. 11-23, 2000.

JENSEN, S. U. **Safety effects of converting intersections to roundabouts**. In: Transportation Research Board 92st Annual Meeting. 2013.

LI, Z.; DEAMICO, M.; CHITTURI, M.; BILL, A.; NOYCE, D. **Calibration of VISSIM Roundabout Model: A Critical Gap and Follow-up Headway Approach**. Artigo submetido ao 92º encontro anual da Transportation Research Board. No. 13-1176. Washington, 2013.

MACEDO, J. M. G. **Seleção da tipologia de cruzamentos em função da procura**. Dissertação de mestrado em Vias de Comunicação. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Portugal. 2005.

MOHAMED, G. M.; SAUNIER, N. **Motion prediction methods for surrogate safety analysis**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2386. Washington, D.C., 2013.

NERIS, D. F. **Melhoria do desempenho do tráfego em rotatórias com o emprego de semáforos próximos na via principal**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2014.

NODARI, C. T. **Método de Avaliação da Segurança Potencial de Segmentos Rodoviários Rurais de Pista Simples**. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

OLSTAN, J. J.; TAPANI, A. **Comparison of car-following models**. VTI meddelande 960A, Swedish National Road and Transport Research Institute: Linköping, Sweden. 2004.

ORTÚZAR, J. D. de; WILLUMSEN, L. G. **Modelling Transport**. 4ª edição. John Wiley & Sons, Ltd.: Chichester, UK, 2011.

PANDE, A.; WOLSHON, B. **Traffic Engineering Handbook**. 7ª edição. Institute of Transportation Engineers – ITE. John Wiley & Sons, Inc. Nova Jersey, 2016.

PARKER, M.R.; ZEGERER, C.V. **Traffic conflict techniques for safety and operations: engineers' guide**. Report No. FHWA/RD-84/042. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC. 1988.

PTV - Planung Transport Verkehr. PTV VISSIM 8 USER MANUAL. Karlsruhe, Alemanha, 2015.

ROACH, R.; CHRISTOFA, D.; KNODLER, M. A. **Roundabout safety assessment through microsimulation**. Artigo da 5ª Conferência Internacional em Segurança Viária e Simulação. Florida, 2015.

SAUNIER, N. e SAYED, T. **Automated road safety analysis using video data**. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2019, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 57-64, 2007.

SAYED, T.; BROWN, G.; NAVIS, F., *Simulation of traffic conflicts at unsignalized intersections with tsc-sim*. Accident Analysis and Prevention, Vol. 26, No. 5, pp. 593–607, 1994.

SAYED, T.; ZAKI, M. H.; AUTEY, J. *Automated safety diagnosis of vehicle–bicycle interactions using computer vision analysis*. Safety Science 59 (2013) 163–172. 2013.

SACCOMANNO, F. F.; CUNTO, F.; GUIDO, G.; VITALE, A. **Comparing safety at signalized intersections and roundabouts using simulated rear-end conflicts**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2078, pp. 90-95. ISSN: 0361-1981. Washington, D.C. 2008.

SILVA, K. C. R. **Aplicação Do Modelo de Previsão de Acidentes do HSM em Rodovias de Pista Simples do Estado de São Paulo**. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2011.

SILVA, A. B.; VASCONCELOS, L.; SANTOS, S. *Das rotundas convencionais às turborotundas*. In: 7º Congresso Rodoviário Português. CRP-Centro Rodoviário Português, 2013.

SILVA, A. B.; SANTOS, S. e GASPAR, M. **Turbo-roundabout use and design**, CITTA 6th Annual Conference on Planning Research, Coimbra, Portugal, 2013.

SILVA, A. B.; VASCONCELOS, L.; SANTOS, S. **Moving from Conventional Roundabouts to Turbo-roundabouts**. Procedia - Social and Behavioral Sciences 111, p. 137-146. 2014.

SOUSA, J. Q. **Modelagem microscópica aplicada na avaliação do desempenho da segurança viária em interseções urbanas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

TOLLAZZI T.; MAURO, R.; GUERRIERI, M; RENCELJ, M. *Comparative analysis of four new alternative types of roundabouts: “turbo”, “flower”, “target” and “four-flyover” roundabout*. Periodica Polytechnica Civil Engineering. Online ISSN: 1587-3773. Budapest University of Technology and Economics. 60(1), pp. 51–60, 2016.

TOLLAZZI, T. *Alternative types of roundabouts: an informational guide*. Springer Tracts on Transportation and Traffic (STTT), volume 6. Nova York, 2015.

VALDEZ, M.; CHEU, R.; DURAN, C. *Operations of modern roundabout with unbalanced approach volumes*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 2265, p. 234-243, 2011.

VASCONCELOS, A. L. P. *Avaliação do desempenho operacional de rotundas: modelos e aplicações*. Tese de doutorado da Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal, 2014.

VASCONCELOS, A. L. P.; SECO, A.; SILVA, A. B. *Comparison of procedures to estimate critical headways at roundabouts*. Promet-Traffic&Transportation, v. 25, p. 43-53, 2013.

VASCONCELOS, L., NETO L., SECO A. M., SILVA, A. B. **Validation of the surrogate safety assessment model for assessment of intersection safety**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2432 1981. Washington, D.C. 2014

WADDELL, Edmund. *Evolution of roundabout technology: a history-based literature review*. In: Institute of Transportation Engineers 67th annual Meeting. 1997.

WANG, Chen. *A new simulation-based conflict indicator as a surrogate measure of safety*. University of Kentucky, 2012.

World Health Organization (WHO). **Global status report on road safety: Supporting a Decade of Action**, 2013.

YOUNG, William et al. *Simulation of safety: A review of the state of the art in road safety simulation modelling*. Accident Analysis & Prevention, v. 66, p. 89-103, 2014.

ZHENG, L.; ISMAIL, K.; MENG, X. *Traffic conflict techniques for road safety analysis: open questions and some insights*. Canadian Journal of Civil Engineering. Volume 41: 633-641. 2014