

SUN HSIEN MING

**OPORTUNIDADES DE CONFLITO DE TRÁFEGO
MODELOS DE PREVISÃO**

**SÃO PAULO
2008**

SUN HSIEN MING

**OPORTUNIDADES DE CONFLITO DE TRÁFEGO
MODELOS DE PREVISÃO**

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

SÃO PAULO
2008

Data da Defesa: ___/___/___

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

SUN HSIEN MING

**OPORTUNIDADES DE CONFLITO DE TRÁFEGO
MODELOS DE PREVISÃO**

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Área de Concentração
Engenharia de Transportes

Orientador
Prof. Dr. Hugo Pietrantonio

SÃO PAULO
2008

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de outubro de 2008.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Ming, Sun Hsien

**Oportunidades de conflito de tráfego : modelos de previsão
/ S.H. Ming. --ed.rev. -- São Paulo, 2008.
293 p.**

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.**

**1.Engenharia de tráfego 2.Segurança de tráfego 3.Modelos
(Previsão) 4.Circulação de pedestresI.Universidade de São
Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de
Transportes II.t.**

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Hugo Pietrantonio, pela competência e dedicação na orientação desta dissertação e pela amizade e companheirismo durante esta longa jornada.

Aos colegas e amigos da CET/SP, Suely da Conceição Costa Gaiasso, Paulo Seiti Ueta, Altanir Augusto Bernardes, Luis de Carvalho Montans, Max Ernani Borges de Paula, Flávio Murilo Bueno Torres e Valter Casseb pelo apoio, pelas informações e dados fornecidos, bem como pela cessão de material e equipamentos de pesquisa. Em especial, à colega Rosemeire Giraldi Murad que forneceu preciosas informações sobre o diagnóstico e análise de segurança das interseções que foram objeto de validação de campo.

Ao colega da GDT/CET, Rafael Cosentino, que me ajudou na elaboração do sumário e na formatação digital do arquivo da dissertação.

Ao Vaudevire Ferreira Valadão e Maurício Demarchi da empresa Data Traffic que realizaram a pesquisa de velocidade, com equipamento radar estático, nas interseções que foram objeto de validação de campo.

Aos meus queridos amigos Luis Molist Vilanova, João Cucci Neto e Pedro Cury que sempre me incentivaram e me proporcionaram a coragem necessária para essa árdua e longa tarefa.

Aos meus filhos, que, além de terem sempre me dado apoio e incentivo, procuraram e localizaram artigos técnicos referentes ao assunto da dissertação em universidades americanas onde eles estudaram.

Finalmente, à minha esposa que, comigo compartilhou alegrias e tristezas, momentos de realização e frustração e que, sem o seu carinho (bem como paciência e perseverança), eu jamais teria conseguido trilhar esse difícil e espinhoso caminho e chegar ao fim da jornada.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento e proposição de modelos matemáticos que possam estimar, com a precisão necessária para efeitos de aplicação prática, o grau ou o nível de segurança de interseções, semaforizadas ou não, usando-se o conceito de oportunidades de conflito de tráfego.

O conceito de oportunidade de conflito de tráfego tem sido proposto para obter medidas analíticas de segurança, sendo uma medida correlata de segurança que pode substituir com vantagem as medidas usuais como histórico de acidentes e conflitos de tráfego. Os modelos que usam o conceito de oportunidades de conflito de tráfego necessitam apenas de dados operacionais das interseções, o que torna este parâmetro uma medida potencialmente útil para aplicações práticas na determinação do nível de segurança de um determinado local ou fazer projeções sobre a efetividade de projetos de segurança.

São apresentados e discutidos trabalhos de outros autores sobre o assunto, baseados nos quais foram desenvolvidas alternativas às propostas por eles formuladas. Foram analisados pontos não tratados como a aplicação do conceito de oportunidade de conflito de tráfego no período de entreverdes, bem como o estudo de pedestres nas diferentes situações de travessia (nos estudos revisados, somente foi encontrada a análise de travessia de pedestres diante do movimento de conversão à esquerda com fluxo oposto).

Foi realizado um estudo piloto numa interseção real com o objetivo de testar metodologias de trabalho de campo, o que permitiu estruturar um trabalho de validação de campo por meio de diagnósticos qualitativos.

ABSTRACT

The purpose of this work is, through the use of mathematic models, to estimate the level of risk using the concept of traffic conflict opportunity at signalized and unsignalized intersections.

The concept of traffic conflict opportunity has been proposed to measure the level of risk, and it is considered as an alternative measure of traffic safety, potentially more useful than the traditional safety measures like traffic accident data or traffic conflict technique. The traffic conflict opportunity models do not require complex field data, only the operational data of the intersection as traffic counts and control parameters are needed.

This work presents and analyses other authors' studies about this subject, based on which were proposed alternative methods for their formulations. Points such as the safety analysis of the intergreen period using traffic conflict opportunity, not found in those studies, were treated in this work, as well as the pedestrian crossing risk in various situations (in the revised studies, only the analysis of pedestrian crossing risk due to a left turn movement facing an opposing flow was found).

In order to test methodologies and to collect field data, it was performed a pilot study at a real intersection. The pilot study allowed to define the goals and the means needed to carry out a field validation by qualitative diagnostic analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 –	Número de mortos em acidentes de trânsito na cidade de São Paulo ...	3
Figura 1.2 –	Evolução da porcentagem de pedestres mortos em acidentes de trânsito	3
Figura 1.3 –	Comparação entre histórico de acidentes anuais estimados em interseções semaforizadas	9
Figura 1.4 –	Comparação entre regressões de total de acidentes anuais e totais de acidentes anuais estimados em interseções não semaforizadas	9
Figura 2.1a –	Manobra de travessia	14
Figura 2.1b –	Manobra de aproximação	15
Figura 2.2a –	Oportunidades de conflito angulares	16
Figura 2.2b –	Oportunidade de conflito traseira	17
Figura 2.2c –	Oportunidades de conflito com pedestres	17
Figura 2.3 –	Oportunidades de conflito teóricas típicas	19
Figura 2.4 –	Oportunidades de conflito típicas	19
Figura 2.5 –	Pontos e linhas de oportunidades de conflito	21
Figura 2.6 –	Chegada de veículo do movimento k na faixa l , conflitante com o movimento i na faixa j	23
Figura 2.7 –	Exemplo numérico hipotético	33
Figura 2.8 –	Indicação dos movimentos e fluxos	34
Figura 2.9 –	Tempo de parada do veículo da via principal	36
Figura 2.10 –	Oportunidades de conflito traseiras	39
Figura 2.11 –	Divisão do conflito R2 em dois tipos de conflito	40
Figura 2.12 –	Tempo de exposição da via principal igual à brecha crítica da via secundária	46
Figura 2.13 –	Oportunidade de conflito traseira na via principal pelo TRAF-Safe	49
Figura 2.14 –	Oportunidades de conflito traseiras na via principal	49
Figura 2.15 –	Falta de visibilidade devido à curva	52
Figura 2.16 –	Trajectoria do movimento de conversão à esquerda	55
Figura 2.17 –	Conversão à esquerda, fluxo oposto e pedestres	59
Figura 2.18 –	Determinação de Gq	61
Figura 2.19 –	Desenho ilustrativo dos movimentos	62
Figura 2.20 –	Conflito potencial entre veículos de conversão à esquerda com veículos do fluxo oposto e com pedestres	63
Figura 2.21 –	Conflito entre conversão à esquerda e pedestres	65
Figura 2.22 –	Formatos da distribuição de Weibull	83
Figura 2.23a –	Probabilidade de parar	87
Figura 2.23b –	Probabilidade de decisões conflitantes	87
Figura 2.24 –	Duas funções de probabilidade de parar com variâncias distintas	89
Figura 2.25a –	Distância de parada X_S	89
Figura 2.25b –	Distância de limpeza X_C	89
Figura 2.26a –	Zona de dilema $X_S > X_C$	91
Figura 2.26b –	Zona de opção $X_S < X_C$	92
Figura 2.27 –	Número de veículos na zona de dilema para semáforos a tempo fixo e atuados	98

Figura 2.28 –	Comparação entre a curva Normal e a Logit	100
Figura 2.29 –	Ilustração de PET	102
Figura 2.30 –	Laboratório móvel de Purdue University	103
Figura 3.1 –	Elementos geométricos da interseção	115
Figura 3.2 –	Interseção com conversão à esquerda e com fluxo oposto	133
Figura 3.3a –	Saída da interseção no entreverdes $Z \geq W$	139
Figura 3.3b –	Saída da interseção no entreverdes $Z < W$	140
Figura 3.4 –	Desenho ilustrativo mostrando a distância Z_e que o veículo que inicia a operação deve percorrer até chegar à região de conflito	146
Figura 3.5a –	Zonas de conflito de pedestre	155
Figura 3.5b –	Zonas de conflito de pedestre por faixa de tráfego	156
Figura 3.6a –	Interseção sem estágio de pedestres	162
Figura 3.6b –	Interseção com estágio de pedestres	164
Figura 4.1a –	Croquis da interseção Ministro Ferreira Alves x Raul Pompéia (sem escala)	235
Figura 4.1b –	Foto da interseção Ministro Ferreira Alves x Raul Pompéia	236
Figura 4.2a –	Croquis da interseção Cerro Corá x Pio XI	239
Figura 4.2b –	Foto da interseção Cerro Corá x Pio XI	239
Figura 4.3a –	Localização da câmera na interseção Ministro Ferreira Alves x Raul Pompéia	242
Figura 4.3b –	Localização da câmera na interseção Cerro Crá x Pio XI	242
Figura 4.4 –	Imagem do equipamento (radar) utilizado na pesquisa de velocidade	243
Figura 4.5a –	Nomenclatura dos movimentos veiculares e de pedestres da interseção com sinalização de prioridade: Ministro Ferreira Alves x Raul Pompéia	245
Figura 4.5b –	Diagrama com a indicação dos pontos de conflito da interseção com sinalização de prioridade: Ministro Ferreira Alves x Raul Pompéia	245
Figura 4.6 –	Resumo com os resultados obtidos para a interseção com sinalização de prioridade: Ministro Ferreira Alves x Raul Pompéia	258
Figura 4.7a –	Nomenclatura dos movimentos veiculares e de pedestres da interseção com sinalização de prioridade: Cerro Corá x Pio XI	262
Figura 4.7b –	Diagrama mostrando os pontos de conflito da interseção com sinalização semafórica: Cerro Corá x Pio XI	262
Figura 4.8 –	Resultados obtidos com a aplicação dos modelos	278

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 –	Total de pedestres e ocupantes mortos em acidentes de trânsito	2
Tabela 2.1 –	Oportunidades de conflito angulares	38
Tabela 2.2 –	COs traseiras	42
Tabela 2.3 –	Quadro comparativo entre fluxos conflitantes agregados e não agregados	47
Tabela 2.4 –	Quadro comparativo de oportunidades de conflito traseiras com fluxo conflitante agregado e não agregado (R2a + R2b)	50
Tabela 2.5 –	Porcentagem de intervalos em duas interseções	76
Tabela 3.1 –	Nomenclatura básica utilizada na apresentação dos modelos a estudar	108
Tabela 3.2 –	Resumo das expressões da Seção 3.1	188
Tabela 3.3 –	Oportunidades de conflito em interseções com sinalização de prioridade	190
Tabela 3.4 –	Relação de métodos propostos para COs angulares de movimentos prioritários em interseções com sinalização de prioridade	194
Tabela 3.5 –	Relação de métodos propostos para COs traseiras de movimentos prioritários em interseções com sinalização de prioridade	196
Tabela 3.6 –	Relação de métodos propostos para COs angulares de movimentos secundários em interseções com sinalização de prioridade	197
Tabela 3.7 –	Relação de métodos propostos para COs traseiras de movimentos secundários em interseções com sinalização de prioridade	199
Tabela 3.8 –	Oportunidades de conflito em interseções com semáforos	201
Tabela 3.9 –	Relação de métodos propostos para COs traseiras de movimentos protegidos em interseções com semáforo nos períodos de vermelho e dissipação de fila	205
Tabela 3.10 –	Método proposto para COs traseiras de movimentos protegidos em interseções com semáforo no período de restante de verde Gu	206
Tabela 3.11 –	Métodos propostos para COs angulares de movimentos de conversão à esquerda permitida	207
Tabela 3.12 –	Método proposto para COs angulares do movimento de fluxo oposto diante do movimento de conversão à esquerda permitida	208
Tabela 3.13 –	Métodos propostos para COs traseiras do movimento de conversão à esquerda permitida	209
Tabela 3.14 –	Método proposto para COs traseiras do movimento do fluxo oposto diante do movimento de conversão à esquerda permitida	210
Tabela 3.15 –	Método proposto para COs angulares no entreverdes	211
Tabela 3.16 –	Método proposto para COs traseiras no entreverdes	212
Tabela 3.17 –	Oportunidades de conflito com pedestres em interseções com sinalização de prioridade	212
Tabela 3.18 –	Métodos propostos para COs de pedestres em interseções com sinalização de prioridade	215
Tabela 3.19 –	Oportunidades de conflito com pedestres em interseções semáforos ...	216
Tabela 3.20 –	Métodos propostos para COs de pedestres em interseções com sinalização semafórica – movimentos concorrentes, conversões com fluxo oposto	219
Tabela 3.21 –	Métodos propostos para COs de pedestres em interseções com	

	sinalização semafórica – movimentos concorrentes, conversões sem fluxo oposto	221
Tabela 3.22 –	Métodos propostos para COs de pedestres em interseções com sinalização semafórica – movimentos veiculares em frente	222
Tabela 3.23 –	Métodos propostos para COs de pedestres em interseções com sinalização semafórica – período de entreverdes, final de verde, com foco de pedestre	223
Tabela 3.24 –	Métodos propostos para COs de pedestres em interseções com sinalização semafórica – período de entreverdes, final de verde, sem foco de pedestre	224
Tabela 4.1 –	Valores adotados na aplicação dos modelos	244
Tabela 4.2–	Dados de fluxos da interseção com sinalização de prioridade: Ministro Ferreira Alves x Raul Pompéia no período das 07:00 às 08:00 horas ..	246
Tabela 4.3–	Dados de velocidade (em fluxo livre) da interseção com sinalização de prioridade: Ministro Ferreira Alves x Raul Pompéia	246
Tabela 4.4a –	Dados físicos da interseção	246
Tabela 4.4b –	Dados do programa HCS+	246
Tabela 4.5a –	Método 0a para CO angular – movimentos prioritários	247
Tabela 4.5b –	Método 0b para CO angular – movimentos prioritários	248
Tabela 4.5c –	Método 1a para CO angular – movimentos prioritários	248
Tabela 4.5d –	Método 1b para CO angular – movimentos prioritários	248
Tabela 4.5e –	Método 2 para CO angular – movimentos prioritários	249
Tabela 4.6a –	Método 1 (CO primária) para CO traseira – movimentos prioritários ..	249
Tabela 4.6b –	Método 1 – CO traseira para CO traseira – movimentos prioritários	250
Tabela 4.6c –	Método 2 para CO traseira – movimentos prioritários	250
Tabela 4.6d –	Método 3 para CO traseira – movimentos prioritários	250
Tabela 4.7a –	Método 0 para CO angular – movimentos secundários	251
Tabela 4.7b –	Método 1 para CO angular – movimentos secundários	251
Tabela 4.7c –	Método 2 para CO angular – movimentos secundários	251
Tabela 4.8a –	Método 0a para CO traseira – movimentos secundários	252
Tabela 4.8b –	Método 0b para CO traseira – movimentos secundários	252
Tabela 4.8c –	Método 1 para CO traseira – movimentos secundários	253
Tabela 4.8d –	Método 2 para CO traseira – movimentos secundários	253
Tabela 4.8e –	Método 3a para CO traseira – movimentos secundários	253
Tabela 4.8f –	Método 3b para CO traseira – movimentos secundários	254
Tabela 4.8g –	Método 3c para CO traseira – movimentos secundários	254
Tabela 4.9a –	Método 1a para CO com pedestres – travessia integral	255
Tabela 4.9b –	Método 1b para CO com pedestres – exposição por zona de conflito ..	255
Tabela 4.9c –	Método 1c para CO com pedestres – exposição por zona de conflito e por movimento veicular conflitante.....	256
Tabela 4.9d –	Método 2 para CO com pedestres – ocupância da travessia	256
Tabela 4.9e –	Método 3a para CO com pedestres – travessia integral e chegadas livres	257
Tabela 4.9f –	Método 3b para CO com pedestres – ocupância da travessia com chegadas livres	257
Tabela 4.9g –	Método 4 para CO com pedestres – travessia integral e brechas de risco	257
Tabela 4.10 –	Resultado da aplicação dos modelos na interseção com sinalização de prioridade: Ministro Ferreira Alves x Raul Pompéia	259

Tabela 4.11 –	Síntese do diagnóstico dos especialistas da CET/SP na interseção com sinalização de prioridade: Ministro Ferreira Alves x Raul Pompéia	260
Tabela 4.12 –	Relação entre o diagnóstico e o resultado obtido pelos modelos de COs na interseção com sinalização de prioridade: Ministro Ferrera Alves x Raul Pompéia	261
Tabela 4.13 –	Dados de fluxos da interseção com sinalização semafórica: Cerro Corá x Pio XI no período das 18:30 às 19:30 horas	263
Tabela 4.14 –	Dados de velocidade (em fluxo livre) da interseção com sinalização semafórica Cerro Corá x Pio XI	263
Tabela 4.15a –	Dados físicos da interseção	264
Tabela 4.15b –	Tempos semafóricos	264
Tabela 4.15c –	Dados obtidos do programa HCS+	264
Tabela 4.16a –	Método 1 para CO traseira – movimentos protegidos em R e Gq	266
Tabela 4.16b –	Método 2a para CO traseira – movimentos protegidos em R e Gq	266
Tabela 4.16c –	Método 2b para CO traseira – movimentos protegidos em R e Gq	267
Tabela 4.16d –	Método 2c para CO traseira – movimentos protegidos em R e Gq	267
Tabela 4.16e –	Método 3a para CO traseira – movimentos protegidos em R e Gq	268
Tabela 4.16f –	Método 3b para CO traseira – movimentos protegidos em R e Gq	268
Tabela 4.16g –	Método 4a para CO traseira – movimentos protegidos em R e Gq	269
Tabela 4.16h –	Método 4b para CO traseira – movimentos protegidos em R e Gq	269
Tabela 4.16i –	Método 4c para CO traseira – movimentos protegidos em R e Gq	270
Tabela 4.17 –	Método 1 para CO traseira – movimentos protegidos em Gu	270
Tabela 4.18a –	Método 1a para CO angular – movimentos permitidos em Gu	271
Tabela 4.18b –	Método 1b para CO angular – movimentos permitidos em Gu	271
Tabela 4.19 –	Método 1a para CO angular – movimentos opostos em Gu, não considerando P[F]	272
Tabela 4.20a –	Método 1a para CO traseira – movimentos permitidos	272
Tabela 4.20b –	Método 1b para CO traseira – movimentos permitidos, considerando o risco de colisão traseira devido à desaceleração até a parada do veículo que quer fazer a conversão à esquerda	272
Tabela 4.21 –	Método para CO traseira – movimentos opostos	273
Tabela 4.22 –	Método para CO angular – entreverdes	273
Tabela 4.23 –	Método para CO traseira – entreverdes	274
Tabela 4.24a –	Método para CO de pedestres – conversões com fluxo oposto – Método de Zhang e Prevedouros	274
Tabela 4.24b –	Método para CO de pedestres – conversões à esquerda com fluxo oposto	275
Tabela 4.25a –	Método 1a para CO de pedestres – conversões sem fluxo oposto por pedestre	275
Tabela 4.25b –	Método 1b para CO de pedestres – conversões sem fluxo oposto por conversão	275
Tabela 4.26 –	Método para CO angular – entreverdes, com foco de pedestres	276
Tabela 4.27 –	Método para CO angular – entreverdes, sem foco de pedestres	277
Tabela 4.28a –	Cerro Corá B-C (movimentos M1A/M2A/M3A)	279
Tabela 4.28b –	Cerro Corá C-B (movimentos protegidos M1B/M2B)	279
Tabela 4.28c –	Cerro Corá C-B (movimentos permitidos M4B)	279
Tabela 4.28d –	Cerro Corá B-C (movimentos M1A/M2A)	279
Tabela 4.28e –	Pio XI (movimentos M5b/M6b/M7b/M8b/M9b)	280
Tabela 4.29 –	Síntese do diagnóstico dos especialistas da CET/Sp na interseção com sinalização semafórica: Cerro Corá x Pio XI	281

Tabela 4.30 – Relação entre o diagnóstico e o resultado obtido pelos modelos de COs na interseção com sinalização semafórica: Cerro Corá x Pio XI . 282

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Aspectos gerais	1
1.2	Objetivo da Dissertação	4
1.3	Justificativas de Interesse de Trabalho	5
1.4	Estrutura do trabalho	10
2.	ANÁLISE DE SEGURANÇA VIÁRIA COM MODELOS DE OPORTUNIDADES DE CONFLITO DE TRÁFEGO	11
2.1	Análise geral do problema	12
2.2	Descrição da formulação utilizada pelo <i>Software</i> TRAF-Safe.....	18
2.2.1	Características gerais da formulação do TRAF-Safe.....	19
2.2.1.1	Características gerais de oportunidades de conflito angulares no TRAF-Safe	21
2.2.1.2	Características gerais de oportunidades de conflito traseiras no TRAF-Safe .	22
2.2.1.3	Outros tipos de oportunidades de conflito no TRAF-Safe	22
2.2.2	Previsão de oportunidades de conflito angulares e traseiras no TRAF-Safe...	23
2.2.2.1	Previsão de oportunidades de conflito angulares.....	26
2.2.2.2	Previsão de oportunidades de conflito traseiras.....	26
2.2.3	Oportunidades de conflito anuais	28
2.2.4	Modelo de previsão de acidentes anuais	29
2.2.5	Modelo para previsão de acidentes com vítima e com vítima grave/fatal.....	31
2.2.6	Exemplo numérico do algoritmo do TRAF-Safe	32
2.2.6.1	Estimativa de oportunidades de conflito angulares	34
2.2.6.2	Estimativa de oportunidades de conflito traseiras	38
2.2.6.3	Estimativa de acidentes	42
2.2.7	Análise crítica do algoritmo TRAF-Safe	43
2.2.7.1	Análise do método para oportunidades de conflito angulares	43
2.2.7.2	Análise do método para oportunidades de conflito traseiras	48
2.2.7.3	Análise do método para oportunidades de conflito – outros aspectos	51
2.3	Análise de formulações de outros estudos	53
2.3.1	As Formulações de HA e BERG (1995) para veículos em interseções semaforizadas	53
2.3.1.1	Modelo de oportunidades de conflito angulares (conversão à esquerda permitida)	54

2.3.1.2	Modelo para oportunidades de conflito traseiras	57
2.3.2	As formulações de ZHANG e PREVEDOUROS (2003) para veículos e pedestres contra conversões à esquerda permitidas	59
2.3.2.1	Oportunidades de conflito veiculares (entre a conversão à esquerda e o fluxo oposto)	60
2.3.2.2	Oportunidades de conflito com pedestres (veículos de conversão à esquerda contra pedestres).....	65
2.3.3	Análise crítica das contribuições dos outros estudos.....	69
2.4	Aspectos complementares	78
2.4.1	Trabalhos relacionados com modelos de previsão de colisões	79
2.4.1.1	Modelo de previsão de colisões em WANG <i>et alli</i> (1999)	80
2.4.1.2	Modelo de previsão de colisões em WANG <i>et alli</i> (2002)	80
2.4.1.3	Modelo de previsão de colisões em WANG e NIHAN (2003)	84
2.4.1.4	Análise dos modelos de previsão de colisões revisados	85
2.4.2	Trabalhos relacionados com a segurança no entreverdes	86
2.4.2.1	Segurança no entreverdes em MAHALEL e PRASHKER (1987)	87
2.4.2.2	Segurança no entreverdes em EASA (1993)	89
2.4.2.3	Segurança no entreverdes em ZIMMERMAN e BONNESON (2004)	96
2.4.2.4	Segurança no entreverdes em TARKO <i>et alli</i> (2006)	98
2.4.2.5	Análise da segurança no entreverdes nos trabalhos revisados	100
2.4.3	Trabalho de SONGCHITRUKSA, TARKO (2006)	101
2.5	Análise e avaliação geral	103
3.	DESCRIÇÃO DE MÉTODOS PARA ESTIMAR OPORTUNIDADES DE CONFLITO ANGULARES E TRASEIRAS EM INTERSEÇÕES	106
3.1	Aspectos gerais para os modelos de oportunidades de conflito de tráfego ...	107
3.1.1	Área de influência da interseção	109
3.1.2	Distribuição de intervalos e de chegada de veículos e de interferências	109
3.1.3	Forma básica e forma inversa para estimativa de oportunidades de conflito	110
3.1.4	Tempo de exposição	111
3.1.4.1	Oportunidades de conflito angulares	112
3.1.4.2	Oportunidades de conflito traseiras	116
3.1.5	Restrições de visibilidade e da distância de parada: tratamento empírico ...	124
3.1.6	Restrições de visibilidade e da distância de parada: tratamento teórico	125
3.1.7	Formulações gerais com efeitos aleatórios: visibilidade e tempo de reação .	127
3.1.8	Formulações gerais com efeitos aleatórios: frenagem e interferências	129
3.2	Aspectos específicos para modelos de oportunidades de conflito de diferentes tipos ou em diferentes contextos	131
3.2.1	Análise da operação semafórica para movimentos veiculares	132
3.2.1.1	Períodos de operação para movimentos veiculares em semáforos	134
3.2.1.2	Período de entreverdes veicular	135
3.2.1.2.1	Zona de dilema	137
3.2.1.2.2	Oportunidades de conflito e zona de dilema	142
3.2.2	Análise de interferências dos movimentos de conversão em fluxo	149
3.2.3	Formulações gerais para oportunidades de conflito secundárias	150
3.2.4	Análise dos movimentos de pedestres, com ou sem semáforos	152
3.2.4.1	Análise de travessias de pedestres em interseções não semaforizadas	154
3.2.4.2	Análise de travessias de pedestres em interseções semaforizadas	161
3.3	Proposição de modelos de oportunidades de conflito	187

3.3.1	Movimento veicular em interseções com sinalização de prioridade	189
3.3.1.1	Movimentos principais em interseções com sinalização de prioridade	190
3.3.1.2	Movimentos secundários em interseções com sinalização de prioridade	196
3.3.2	Movimento veicular em interseções semaforizadas	200
3.3.2.1	Movimentos veiculares protegidos	202
3.3.2.2	Movimentos veiculares permitidos	206
3.3.2.3	Entreverdes	210
3.3.3	Movimento de pedestres em interseções com sinalização de prioridade	212
3.3.4	Movimento de pedestres em interseções semaforizadas	215
3.3.4.1	Movimento de pedestres protegido, sem fluxo conflitante simultâneo	217
3.3.4.2	Movimento de pedestres com fluxos veiculares concorrentes	218
3.3.4.3	Entreverdes	222
4.	APLICAÇÃO DE CAMPO – METODOLOGIA E RESULTADOS	225
4.1	Métodos de validação em trabalhos anteriores.... ..	226
4.1.1	A validação do TRAF-Safe	226
4.1.2	Outros estudos	227
4.1.3	Comparação de opções para validação	229
4.2.	Descrição da aplicação prática	232
4.2.1	Interseções selecionadas para aplicação prática	234
4.2.1.1	Interseção com sinalização de prioridade: Ministro Ferreira Alves x Raul Pompéia	235
4.2.1.2	Interseção com sinalização semafórica: Cerro Corá x Pio XI	238
4.2.2	Obtenção de dados de campo	241
4.2.3	Aplicação dos modelos propostos	244
4.2.3.1	Interseção cm sinalização de prioridade: Ministro Ferreira Alves x Raul Pompéia	245
4.2.3.2	Interseção cm sinalização semafórica: Cerro Corá x Po XI	262
4.3	Avaliação e conclusões sobre validação	283
5.	CONCLUSÕES	287

1. INTRODUÇÃO

1.1. Aspectos Gerais

O crescente aumento do índice de motorização e o correspondente aumento da frota de veículos acarretam, inevitavelmente, o agravamento da exposição a riscos de acidentes de trânsito, com um crescimento preocupante no número de vítimas e prejuízos materiais. A insegurança no trânsito é um problema de tal ordem que é considerado como um dos maiores problemas de saúde pública, com custos estimados em 3,8 bilhões de reais por ano no Brasil.

Segundo WANG *et alli* (1999), os acidentes de trânsito continuam aumentando no Japão, apesar de terem sido empregadas várias medidas para reduzi-los. Lá, as fatalidades estão em torno de 10 mil por ano, mas o número de vítimas de acidentes de trânsito continua crescendo desde 1990.

Nos Estados Unidos da América, ocorreram em 2005 mais de 39 mil casos fatais, conforme *NHTSA – National Highway Traffic Safety Administration – USA* (2005). Para se ter uma idéia da amplitude do problema de segurança de trânsito, no ataque terrorista de 11 de setembro de 2001, o qual chocou o mundo inteiro e mudou a história geopolítica do planeta, morreram cerca de 3 mil pessoas, enquanto que, naquele mesmo ano, morreram 40 mil pessoas, vítimas de acidentes de trânsito.

No Brasil, segundo o Anuário Estatístico do DENATRAN (2005), houve 26.400 vítimas fatais de acidentes de trânsito em 2005. Entretanto, essa estatística não computa todos os casos, conforme pode-se ver nas observações do próprio Anuário.

- a) Em alguns Estados, não há dados do interior.
- b) No DF, não estão computados os acidentes em rodovias.
- c) No RJ, estão computados somente os acidentes em rodovias federais e estaduais.
- d) Em SC, os dados vão até setembro de 2005 e não estão computados os dados da Capital.
- e) Em SP, não constam os dados das rodovias federais.

Na cidade de São Paulo, houve 1505 mortes por acidentes de trânsito, o que equivale a mais de 4 mortos por dia, segundo CET-SP (2005).

Estima-se que morrem por acidentes de trânsito cerca de 1,26 milhões de pessoas por ano no mundo todo (Folha-Uol, 2003).

Historicamente, os estudos relacionados com segurança de tráfego tratam basicamente de movimentos veiculares, reservando pouca atenção à segurança de pedestres. Isso é particularmente verdadeiro para o caso de estudos de técnicas de análise de conflitos de tráfego e oportunidades de conflito.

Entretanto, a preocupação com a segurança de pedestres deveria ter prioridade. É bem sabido que, de todos os atores envolvidos no trânsito, o pedestre constitui a parte mais fraca e vulnerável. Na cidade de São Paulo, segundo o IML (Instituto Médico Legal), no ano de 2004 morreram 549 pedestres atropelados, representando 41% de todas as mortes ocorridas em acidentes de trânsito naquele ano, sendo que esse percentual cresce para quase 50% em 2005. Pode-se observar pela Tabela 1-1 que, enquanto o número de ocupantes mortos esteve estável de 2004 para 2005, o número de pedestres mortos em acidentes de trânsito cresceu 36% no mesmo período, o que dá uma média de 2 pedestres mortos em atropelamento por dia¹. Esses dados mais do que justificam a necessidade de priorizar os estudos sobre a segurança do pedestre, principalmente em cidades como São Paulo, onde não é dada a devida preferência ao pedestre pelos condutores dos veículos, em franco desrespeito ao Código de Trânsito Brasileiro.

Tabela 1-1 – Total de pedestres e ocupantes mortos em acidentes de trânsito

Ano	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Pedestre	1432	1339	1109	862	862	692	632	559	458	549	748
Ocupante (*)	846	906	933	696	821	825	894	811	810	776	757
Total	2278	2245	2042	1558	1683	1517	1526	1370	1268	1325	1505
% Ped/Total	62,9	59,6	54,3	55,3	51,2	45,6	41,4	40,8	36,1	41,4	49,7

(*) Ocupante = condutor + passageiro; baseado em CET (2005)

A Figura 1.1 apresenta a evolução do número de mortes em trânsito na cidade de São Paulo.

¹ Esses dados são conservadores, pois não estão computadas as mortes ocorridas após o atendimento hospitalar.

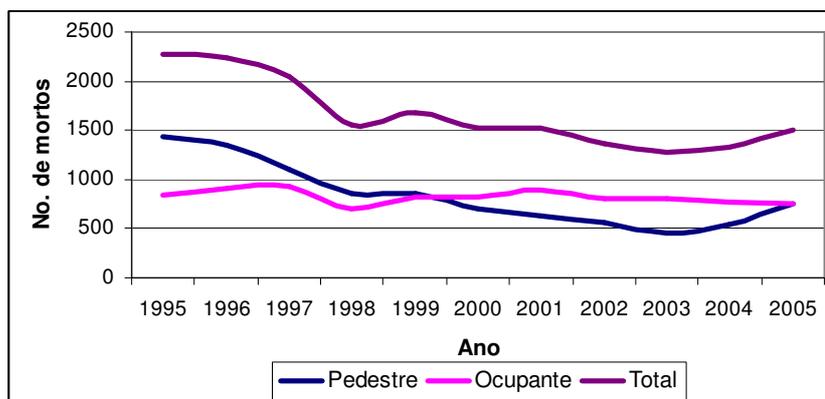


Figura 1.1 – Número de mortes em acidentes de trânsito na cidade de São Paulo

A Figura 1.2 mostra a evolução da porcentagem de pedestres mortos em acidentes de trânsito em relação ao total de mortos em acidentes de trânsito na cidade de São Paulo.

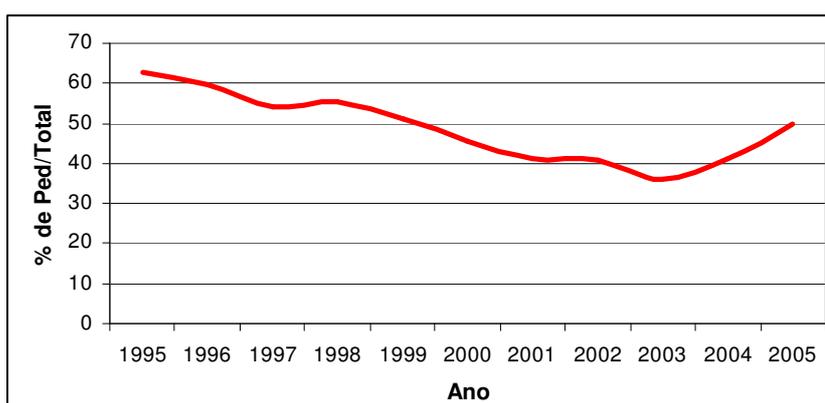


Figura 1.2 – Evolução da porcentagem de pedestres mortos em acidentes de trânsito

Apenas mais recentemente estudos têm sido desenvolvidos voltados especificamente ao pedestre.

Os estudos de PIETRANTONIO e TOURINHO (2005 e 2006) utilizaram a técnica de conflitos de tráfego na análise de segurança de pedestres.

VASCONCELOS (2004) fez uma análise exploratória dos conceitos de oportunidades de conflito aplicada a pedestres em uma interseção semaforizada da cidade de São Paulo.

Pode-se citar, ainda, os trabalhos de LORD (1996) e de ZHANG e PREVEDOUROS (2003) que tratam do problema de conflitos potenciais entre veículos de conversão à esquerda com pedestres em interseções semaforizadas.

Dessa forma, a segurança de tráfego tem sido objeto constante de investigação e estudo por parte de órgãos de trânsito, de engenheiros e de pesquisadores no mundo todo, resultando na criação de medidas de graus e/ou níveis de segurança viária.

1.2. Objetivo da Dissertação

Diversas técnicas de análise de segurança vêm sendo desenvolvidas e novos conceitos têm sido estabelecidos visando fornecer ferramentas que ajudem a detectar e diagnosticar problemas de segurança no sistema viário. Um problema correlato é o de caracterizar e classificar o nível/grau de segurança de um cruzamento ou de uma seção de via, de uma forma que possibilite uma hierarquização entre diversos locais ou a seleção de tratamentos em um determinado local.

Uma medida objetiva que possa refletir o nível de segurança, de forma análoga aos critérios que caracterizam os níveis de serviço em termos de fluidez, permitiria a priorização de projetos e de investimentos. Assim como ocorre com as medidas de níveis de serviço em relação à capacidade, essa medida complementar poderia gerar uma escala de “níveis de serviço de segurança”. Como exemplo, pode-se citar um trecho do estudo sobre interseção semaforizada com conversão à esquerda de ZHANG e PREVEDOUROS (2003): “num contexto comparativo, o uso do atraso como a única medida de nível de serviço penaliza as interseções que apresentam conversão à esquerda protegida” (em relação às interseções análogas, mas com conversão à esquerda permitida). Em geral, as interseções com conversão à esquerda protegida apresentam maior atraso, mas possuem maior nível de segurança para quem executa a conversão, enquanto que a conversão permitida propicia menor atraso mas envolve maior risco para a manobra. Assim, uma comparação mais justa entre os dois tipos de interseção seria considerar também o grau/nível de risco.

Esse trecho do texto representa muito bem a dualidade e o dilema que todo o engenheiro de tráfego enfrenta: priorizar a fluidez do tráfego ou a segurança. Na maior parte das situações, fluidez e segurança são antagonicas. Fluidez significa movimento. Entretanto, os veículos, ao

se movimentarem, precisam dividir, entre si e com pedestres, o tempo e o espaço disponíveis. Onde existe movimento, existe perigo, conflito, risco de colisão. Por outro lado, com o aumento do número de veículos, as vias ficam mais saturadas. Daí, os dois grandes desafios para o controle de tráfego: garantir, simultaneamente, o máximo de segurança e fluidez.

Tradicionalmente, os estudos e pesquisas se concentravam em teorias sobre a fluidez (problemas de otimização de capacidade e redução de filas, por exemplo). Apenas mais recentemente, a atenção voltou-se para a segurança.

O objetivo da dissertação é o desenvolvimento e proposição de modelos matemáticos que possam estimar, com a precisão necessária para efeitos de aplicação prática, o grau ou o nível de segurança de interseções. Para tanto, será feita a avaliação e a comparação das diversas ferramentas de análise de segurança disponíveis, análise dos procedimentos, princípios e conceitos utilizados no *software* TRAF-Safe, desenvolvido por KAUB (2005), bem como de trabalhos de outros autores, visando a obtenção de projeções ou estimativas das condições de segurança viária. Onde for possível, o presente trabalho procurará dar ênfase especial à segurança de pedestres.

1.3. Justificativas de Interesse do Trabalho

A segurança é mais difícil de ser tratada que a fluidez. Medidas de fluidez e níveis de serviço já são consagrados na literatura. Contudo, medidas de segurança ainda apresentam problemas de aplicação.

A medida mais natural para medir o grau de segurança de um local seriam os dados ou estatísticas de acidentes de trânsito. Entretanto, os dados ou as estatísticas de acidentes revelam-se um instrumento inadequado para efeitos de análise, diagnóstico e projeto de segurança, pois:

- a) levam um longo tempo para serem acumulados, durante o qual podem ter mudadas as condições locais que afetam o volume e o padrão de tráfego, como mudança de uso de solo, colocação/retirada de pontos de ônibus, feiras livres, escolas, mudança de circulação, estacionamento, etc., além de mudanças de condições macro-econômicas do País, tais como crescimento da economia, preço da gasolina, aumento da frota circulante, etc.;

- b) não permitem comparações do tipo “antes-depois” em virtude de possíveis alterações durante o período de avaliação, conforme o item “a” acima;
- c) podem conter vieses decorrentes dos critérios de escolha dos locais, tais como a regressão para a média²;
- d) não são passíveis de observação direta (no máximo, podem ser objeto de um estudo de reconstituição do acidente), dificultando as inferências sobre a relação entre os fatores intervenientes;
- e) não permitem medidas preventivas, uma vez que a insegurança somente será detectada após a ocorrência dos acidentes;
- f) precariedade do registro dos acidentes, pois nem todos os acidentes são registrados com a precisão necessária, em termos de localização, diagrama de colisão, etc.

A evolução dos conceitos ou parâmetros que medem a segurança de um local a partir de medidas mais operacionais, em complementação ou substituição (conforme a disponibilidade) aos dados de acidentes de trânsito, pode ser resumida no desenvolvimento dos conceitos e técnicas de análise de medidas correlatas de segurança: técnicas de análise de conflitos de tráfego e de estimativas de medidas de oportunidades de conflito de tráfego.

Um conflito de tráfego é um evento envolvendo a interação de um ou mais usuários do sistema viário (condutores e/ou pedestres), onde pelo menos um dos usuários envolvidos toma uma ação evasiva como frear, desviar ou acelerar para evitar uma colisão. Um conflito de tráfego representa uma situação potencial de acidente. Se a manobra evasiva adotada não for suficiente para evitar a colisão, ter-se-á um acidente de trânsito. Assim, pode-se considerar que todo acidente é precedido por um conflito de tráfego, onde a manobra evasiva, ou não existiu, ou não foi suficiente para evitar a colisão.

Conforme citado por VASCONCELOS (2004), o ICTCT – *International Comitee on Traffic Conflict Technique* define conflito de tráfego como sendo “um evento caracterizado pela evidência do risco de colisão entre dois ou mais usuários ou um usuário e um elemento externo, que se identifica pela presença de uma ação evasiva”.

Podem ser enumeradas várias vantagens da técnica de análise de conflitos de tráfego em relação ao tradicional uso do índice de acidentes:

² Regressão para a média, em estatística, é o fenômeno onde, em uma observação, foram selecionados membros de uma população com valores extremos e que, por razões puramente estatísticas, provavelmente resultarão em valores extremos opostos em outras observações.

- a) ao contrário dos dados de acidentes, que não são diretamente observáveis, os conflitos de tráfego são eventos observáveis no momento da sua ocorrência;
- b) enquanto que os dados de acidentes levam um longo tempo para serem acumulados, os conflitos de tráfego podem ser medidos diretamente numa pesquisa de campo;
- c) o estudo dos conflitos de tráfego é um estudo de segurança que possui caráter preventivo, cujo diagnóstico permite a adoção de medidas de forma a evitar que os acidentes ocorram.

A técnica de conflitos de tráfego supre as deficiências características dos dados de acidentes apontadas. Entretanto, a sua pesquisa em campo exige um esforço adicional e está sujeita a algum grau de subjetividade do pesquisador na interpretação dos eventos, o que pode explicar porque essa técnica ainda não é aplicada em larga escala, apesar de estar sendo investigada desde 1968, com os estudos iniciais de PERKINS e HARRIS (1968) e de GLAUZ e MIGLETZ (1984), conforme referências apresentadas por LORD (1996). A formulação da técnica de análise de conflitos por PERKINS e HARRIS (1968) do GMRL – *General Motors Research Laboratory* também é analisada no documento elaborado pela Seção de Engenharia de Tráfego e Transporte de Passageiros do IPT (1991).

Contudo, acredita-se que o fator preponderante de a técnica de análise de conflitos de tráfego não ter sido aplicada em larga escala é a dificuldade de encontrar uma forma de associar os conflitos de tráfego a variáveis operacionais de tráfego. O uso de relações entre contagens anormais de conflitos de tráfego ou taxa de acidentes/conflito com variáveis físicas e de tráfego dos locais tem-se revelado difícil. Modelos estatísticos usuais, por não estarem apoiados em uma relação intrínseca entre as variáveis envolvidas, são suspeitos de não ter resultados transferíveis de um local para outro.

Em face da dificuldade de coletar dados suficientes sobre acidentes, da importância de ter um método preventivo (aplicável tanto às fases iniciais da operação quanto às etapas de projeto) e da necessidade de considerar as especificidades das formas alternativas de tratamento em um determinado local, seria desejável que houvesse uma medida que pudesse ser estimada em função de dados de tráfego fáceis de coletar, como volumes de tráfego e de pedestres, dados físicos dos locais e decisões de tratamento, como geometria, estágios/tempos semafóricos, etc.

Para suprir a dificuldade de obtenção direta de dados de acidentes e conflitos de tráfego, seria necessário um método que pudesse estimá-los de forma indireta por meio de um modelo

matemático usando dados mais fáceis de serem obtidos e que pudesse ser deduzido diretamente de variáveis físicas e de tráfego dos locais, de forma a contornar a principal desvantagem em usar os dados de acidentes ou mesmo de conflitos de tráfego (como medida operacional para determinar o grau de segurança).

Para este fim, o conceito de oportunidade de conflito de tráfego tem sido proposto para obter medidas analíticas de segurança. Essa abordagem permite o desenvolvimento de métodos para fazer estimativas de oportunidades de conflito de tráfego, o que torna este parâmetro uma medida potencialmente adequada para determinar o nível de segurança de um determinado local ou fazer projeções sobre a efetividade de projetos de segurança.

A estimativa de oportunidades de conflito de tráfego não é uma estimativa da probabilidade do acidente. Portanto, entre as condições que definem uma oportunidade de conflito de tráfego podem faltar aspectos essenciais para a ocorrência do acidente. A oportunidade de conflito de tráfego é uma estimativa mais simples e, por isso, mais facilmente de operacionalizar. Assim, é possível propor modelos de oportunidades de conflito de tráfego mais complexos ou mais simples. A questão é saber quanto o grau de simplificação torna a medida inadequada.

KAUB (2005) propôs um modelo (analisado com detalhes no Capítulo 2) que, conforme alega o autor, obteve um ótimo resultado, por meio de validação com o histórico de acidentes, em termos de previsão de acidentes (a partir de estimativas de oportunidades de conflito de tráfego). A validação do modelo foi feita comparando-se a média de 3 anos de histórico de acidentes de 100 locais semaforizados, escolhidos aleatoriamente entre 1000 interseções semaforizadas. A Figura 1.3³ apresenta um gráfico que mostra a relação entre o número previsto de acidentes pelo modelo desenvolvido por KAUB (2005) com a média de 3 anos de acidentes dos 100 locais escolhidos.

³ O autor apresenta o resultado da validação do modelo para interseções semaforizadas, mas a sua documentação não menciona nenhum detalhe da aplicação do modelo para as interseções semaforizadas.

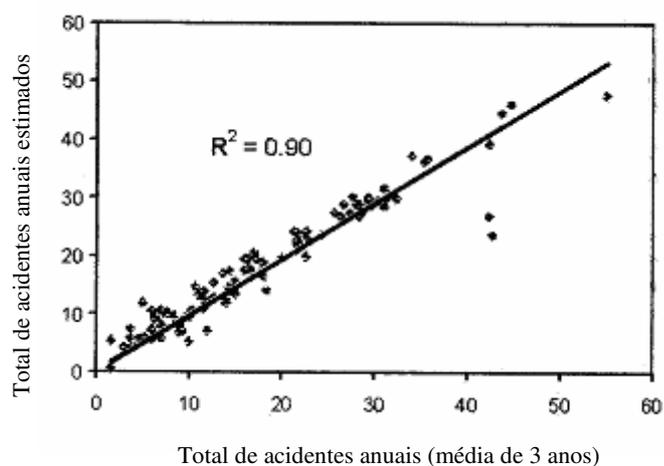


Figura 1.3 – Comparação entre histórico de acidentes anuais estimados em interseções semaforizadas e total de acidentes (média de 3 anos)

Com relação a interseções não semaforizadas, o autor não apresenta um gráfico semelhante à Figura 1.3, mas apresenta um gráfico que mostra as regressões dos acidentes previstos e dos acidentes ocorridos em função do volume diário médio (Figura 1.4). A validação foi feita em 65 interseções do tipo TWSC (“Two-Way Stop Control”) na região de Florida.

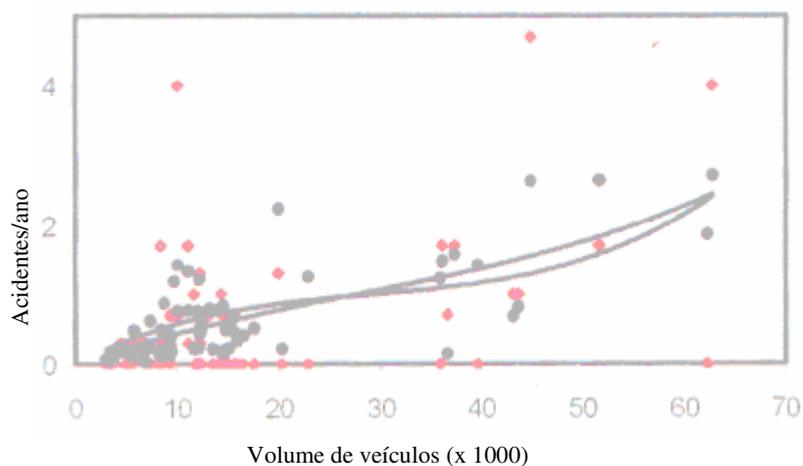


Figura 1.4 – Regressões de total de acidentes anuais e totais de acidentes anuais estimados em interseções não semaforizadas

1.4. Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado em 5 Capítulos.

O Capítulo 2 faz uma análise geral do problema sobre oportunidades de conflito e uma descrição detalhada do algoritmo do *software* TRAF-Safe, desenvolvido por KAUB (2005), além de apresentar outros modelos existentes na literatura. Em particular, faz uma descrição da metodologia de HA e BERG (1995) e ZHANG e PREVEDOUROS (2003), além de aspectos complementares.

O Capítulo 3 analisa e propõe várias alternativas de modelos em interseções semaforizadas e não semaforizadas.

O Capítulo 4 trata da realização de uma aplicação prática dos diversos modelos propostos em duas interseções reais, comparando-se os resultados obtidos com diagnósticos qualitativos, bem como do planejamento e da metodologia utilizada para a coleta de dados e a análise dos resultados, identificando as vantagens e desvantagens de cada modelo, a relação com as variáveis de operação específicas de cada local, bem como uma análise da sua confiabilidade como medida de segurança de uma interseção.

O Capítulo 5 contém as conclusões obtidas e a identificação de aspectos não tratados.

2. ANÁLISE DE SEGURANÇA VIÁRIA COM MODELOS DE OPORTUNIDADES DE CONFLITO DE TRÁFEGO

O objetivo deste Capítulo é revisar os principais trabalhos sobre análise de segurança de tráfego baseados em modelos de oportunidades de conflito de tráfego. Serão também analisados trabalhos que trataram de aspectos considerados relevantes para desenvolver os modelos de oportunidades de conflito de tráfego.

Inicialmente, o problema geral de análise de segurança de tráfego baseada em medidas de oportunidades de conflito de tráfego é caracterizado, especialmente através da conceituação de *oportunidades de conflito de tráfego* e sua relação com os conceitos de *conflito de tráfego*. Esta conceituação é relacionada com as medidas tradicionais de exposição ao risco de acidentes de trânsito, mais usuais.

Em seguida, descreve-se com maior detalhe a formulação operacional incorporada ao *software* TRAF-Safe, desenvolvido por KAUB (2005) e comercializado por sua empresa. Em princípio, por esta linha de pesquisa o autor pretendeu a obtenção de um produto aplicável a situações reais (o autor menciona ter obtido, inclusive, uma patente referente à tecnologia baseada em uma formulação para medidas de oportunidades de conflito de tráfego).

Outras formulações são então examinadas, anteriores e posteriores, de forma a complementar as diversas lacunas existentes na exposição sobre o TRAF-Safe e identificar eventuais alternativas operacionais. Este esforço é especialmente relevante em vista de ter-se observado que as lacunas são muitas e relevantes.

Em seqüência, são examinados trabalhos não diretamente relacionados com a análise de segurança de tráfego baseada em medidas de oportunidades de conflito de tráfego, mas relacionados com formulação ou resolução de modelos teóricos que incorporam aspectos não considerados nos trabalhos anteriormente revisados, pelo menos no nível de detalhe desejado.

Por fim, faz-se uma análise global das formulações existentes e das necessidades de desenvolvimento ou complementação exigidos para atingir uma forma plenamente operacional, que será buscada no capítulo seguinte, para viabilizar uma aplicação prática em campo.

2.1 ANÁLISE GERAL DO PROBLEMA

De início, é importante distinguir claramente os conceitos de conflito de tráfego e de oportunidade de conflito de tráfego.

Segundo PARKER e ZEGEER (1989a), *apud* PIETRANTONIO (1998), o conflito de tráfego é um evento “envolvendo dois ou mais usuários da via, em que a ação de um usuário faz com que o outro usuário realize uma manobra evasiva para evitar a colisão” e “para um conflito de tráfego ocorrer, os usuários da via têm de estar em um curso de colisão.”

Assim, o conflito de tráfego é um evento observável em que existe um curso de colisão e um dos usuários executa uma manobra evasiva (usualmente frenagem, eventualmente desvio, aceleração, ...) para evitar o acidente de tráfego. Na forma usual, o conflito de tráfego é pesquisado e observado diretamente no local do estudo, sendo analisado nos aspectos qualitativos e quantitativos.

Existem diversas técnicas operacionais para análise de conflitos de tráfego, que variam em alguns aspectos relevantes. Uma descrição comparativa, especialmente direcionada para conflitos de tráfego envolvendo pedestres, pode ser encontrada em PIETRANTONIO e TOURINHO (2005), onde é recomendado o uso da técnica norte-americana do U.S.FHWA, a mesma recomendada pela CET-SP (2001). A técnica norte-americana, apresentada originalmente em PARKER e ZEGEER (1989 a, b), detalha os aspectos operacionais da observação empírica dos conflitos de tráfego e distingue-se por ir além dos aspectos qualitativos. A sua quantidade é que indica o grau de segurança do local.

Entretanto, existe a dificuldade de interpretar um evento como conflito de tráfego, em função da intensidade da ação de frenagem ou desvio de rota, distinção entre frenagem evasiva ou uma manobra normal (como, por exemplo, a frenagem antes de fazer uma conversão), bem

como da dificuldade de identificar a proximidade entre os usuários envolvidos no evento (quanto menor é a distância entre os usuários envolvidos, maior é a gravidade do conflito de tráfego). A vantagem da técnica de conflitos de tráfego é que, como o evento é observável, pode-se determinar a natureza ou o tipo do conflito.

Assim, na forma usual de aplicação, o número de conflitos de tráfego, por tipo e por gravidade, é um dado empírico, obtido por contagem no local do estudo, assim como se conta o fluxo de veículos.

As medidas de oportunidades de conflito de tráfego, na forma usual, não são dados empíricos e nem são obtidas por contagens. São estimativas de frequência esperada de eventos relacionados com conflitos de tráfego, obtidas a partir de modelos matemáticos, baseadas na previsão da existência de **pré-condições** que podem propiciar a ocorrência de conflitos de tráfego, como, por exemplo, a presença simultânea de dois usuários conflitantes a uma certa distância. Embora não usuais, pesquisas para obtenção de medidas empíricas da frequência de oportunidades de conflito de tráfego também são possíveis, como em VASCONCELOS (2004), assim como também seriam possíveis modelos matemáticos para estimar a frequência de conflitos de tráfego (potencialmente mais complexos que os de oportunidades de conflito de tráfego).

Como frequência estimada ou observada, medidas de oportunidades de conflito de tráfego têm relação com a exposição ao risco. CHANG (1982) introduz algumas propostas de medidas de exposição ao risco. Como exemplo, o autor cita a medida de “milhas viajadas” (VMT – *Vehicle Miles of Travel*) como medida da frequência de eventos que geram risco, atribuindo a idéia a CARROL *et alli* (1971), mencionando também que HAIGHT (1971) melhora o conceito de medida de exposição relacionando-o com o porte e a potência dos veículos, a idade e a experiência dos condutores, condições de tempo, período do dia e classes de acidentes. Em interseções, o autor cita as fórmulas tradicionais de produto entre os fluxos conflitantes, atribuídas a HOLLAND (1967), entre outros.

Medidas de exposição ao risco desta natureza são ainda bastante utilizadas. Por exemplo, LORD (1996) fez uma verificação empírica da validade de um modelo de previsão de acidentes desta natureza, proposto por QUAYE *et alli* (1993).

O caminho entre os conceitos de medidas de exposição e de oportunidades de conflito de tráfego vem sendo percorrido e desenvolvido pelo menos desde estes esforços iniciais.

Após o trabalho de CHANG (1982), um estudo de COUNCIL (1983) liderou a formulação de diversas medidas de exposição baseadas no conceito de oportunidade de colisão (“*crash opportunity*”). Suas concepções não foram testadas empiricamente, mas deram luz a diversos desenvolvimentos posteriores. Uma avaliação restrita, comparando hierarquização baseada em taxas de acidentes convencionais e taxas de oportunidades de conflito de tráfego, foi feita por PLASS e BERG (1987). A partir deste trabalho, Berg orientou diversos outros estudos direcionados a obter medidas de nível de serviço relativas à segurança, em interseções ou segmentos de vias, citando-se os trabalhos com Kaub em 1988, Ha em 1995 e Lee em 1998, sendo que Kaub tornou-se o responsável pelo desenvolvimento do TRAF-Safe.

A expressão “Oportunidade de Conflito de Tráfego” consolidou-se a partir dos trabalhos orientados por Berg, em particular, pelo seu uso nos trabalhos de Kaub.

Um conceito mais específico de oportunidade de conflito de tráfego é relacionado à manobra. Entende-se por manobra a forma de se aproximar ou de cruzar um trecho de via ou interseção, isto é, a ação de aproximar-se ou de entrar e sair da área de conflito de um trecho de via ou de uma interseção. Usualmente, as manobras distinguem-se pela origem e destino do veículo no trecho ou na interseção (no caso de uma interseção, a manobra pode ser uma conversão à direita ou à esquerda, um retorno ou movimento de prosseguir em frente).

A Figura 2.1, (a) e (b), ilustra dois tipos de manobra.

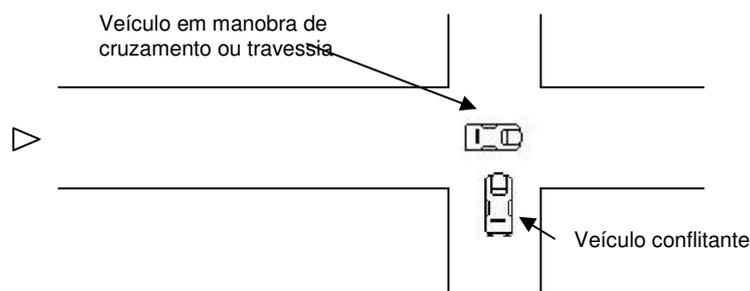


Figura 2.1 (a) – Manobra de travessia

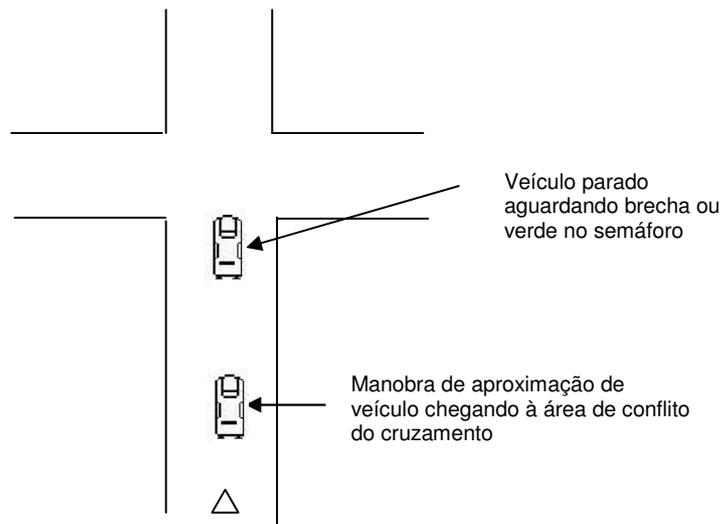


Figura 2.1 (b) – Manobra de aproximação

As **pré-condições** para a ocorrência de um conflito são a simultaneidade da manobra de risco de um veículo e chegada de um veículo conflitante, onde o tempo de exposição ao risco é a duração da manobra. Assim, colocando-se os eventos em um contexto probabilístico, a oportunidade de conflito de tráfego decorreria da **probabilidade** de ocorrência simultânea dos dois eventos: a manobra de risco e a chegada de um veículo conflitante.

Desta forma, pode-se caracterizar a oportunidade de conflito de tráfego por 3 elementos:

- a) um veículo em manobra,
- b) um tempo de exposição ao risco do veículo em manobra,
- c) a chegada de um veículo conflitante.

Em um modelo de previsão de oportunidades de conflito de tráfego, pode-se obter a sua frequência estimada no número de veículos nas manobras de risco e na chegada de veículos conflitantes. Esta é uma peculiaridade importante: em geral, a estimativa de oportunidades de conflito de tráfego é baseada em modelos teóricos que, preferencialmente, devem ser sensíveis às variáveis de operação específicas de cada local.

Naturalmente, para que o modelo teórico possa ser utilizado é necessário que ele represente, com a maior fidelidade possível, as condições reais do local. Para garantir essa fidelidade, é necessário que o modelo teórico seja validado comparando-se as estimativas obtidas com dados reais levantados em campo.

Como será discutido no Capítulo 4, existem diversas opções de validação, que podem envolver medidas empíricas de oportunidades de conflito de tráfego ou outras medidas relacionadas com segurança de tráfego (como acidentes ou conflitos de tráfego).

Há vários tipos de oportunidades de conflito de tráfego, os quais correspondem à mesma tipologia de conflitos de tráfego (por sua vez também é similar à tipologia dos acidentes), tais como oportunidades de conflito⁴ angulares, traseiras, frontais, laterais por mudança de faixa, oportunidades de conflito com objeto fixo e oportunidades de conflito com pedestres.

Devido à amplitude do tema, o escopo do presente trabalho será restrito às oportunidades de conflito angulares e traseiras e as oportunidades de conflito com pedestres.

A Figura 2.2 mostra: (a) oportunidades de conflito angulares, (b) oportunidade de conflito traseira e (c) oportunidades de conflito com pedestres.

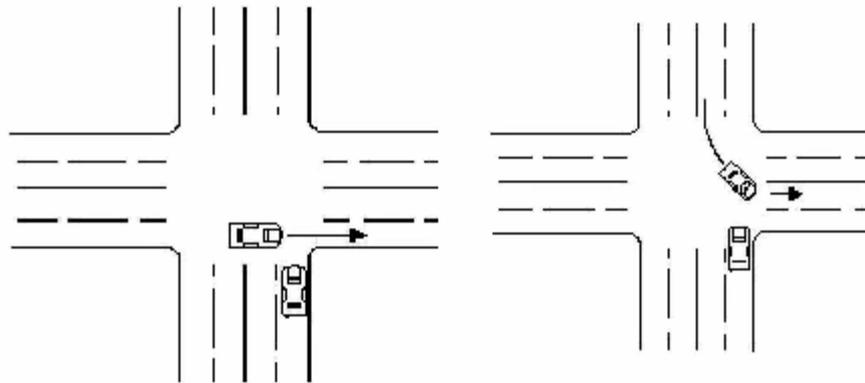


Figura 2.2 (a) – Oportunidades de conflito angulares

⁴ No presente trabalho, a expressão “oportunidade de conflito” será considerada como se fosse uma palavra única. Daí a concordância: oportunidades de conflito traseiras, angulares, etc. As **oportunidades de conflito** é que são traseiras, angulares, etc. Uma outra possibilidade é fazer a concordância com a palavra “conflito”: oportunidades de conflito traseiro, angular, etc. Neste caso, o conflito é que é traseiro, angular, etc. No nosso entender, as duas formas são corretas, porém preferiu-se a primeira forma porque quis se dar ênfase ao conceito de “oportunidade de conflito”.

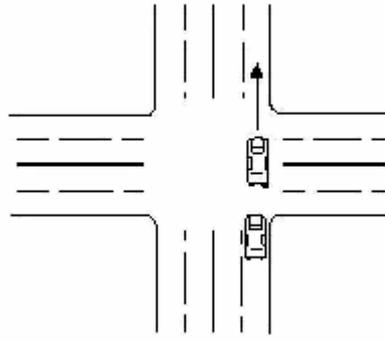


Figura 2.2 (b) – Oportunidade de conflito traseira

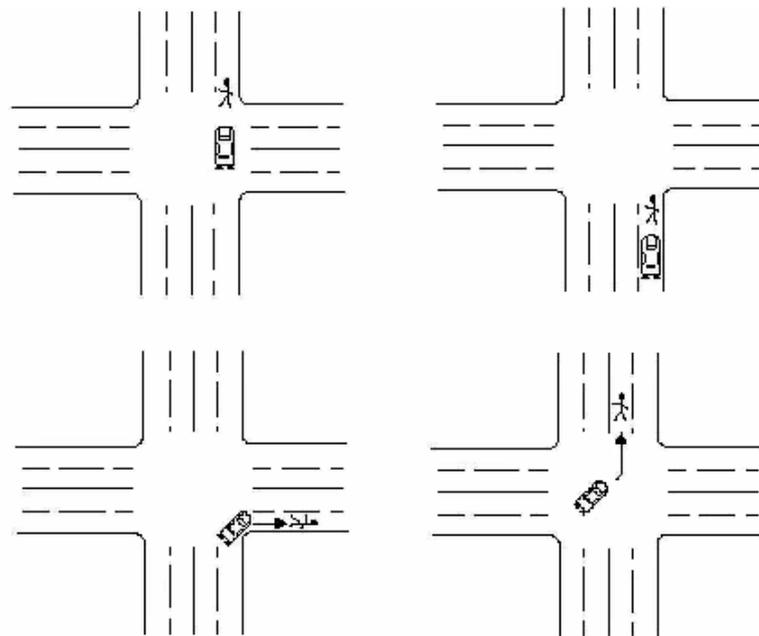


Figura 2.2 (c) – Oportunidades de conflito com pedestre

Além disso, no presente trabalho, serão analisadas oportunidades de conflito de tráfego envolvendo apenas dois veículos. Portanto, além de ignorar eventos que envolvem apenas um usuário e elementos da via ou seu entorno, não serão consideradas as oportunidades de conflito de tráfego múltiplas ou em cadeia. Apenas oportunidades de conflito de tráfego entre dois usuários serão consideradas.

2.2 DESCRIÇÃO DA FORMULAÇÃO UTILIZADA PELO SOFTWARE TRAF-Safe

Os estudos de KAUB (2005) introduzem o conceito de Oportunidade de Conflito Provável (PCO – *Probable Conflict Opportunity*)⁵, a partir do qual é desenvolvido um *software* denominado TRAF-Safe. O *software* TRAF-Safe utiliza o conceito de oportunidade de conflito para fazer estimativas do nível de segurança viária, complementadas por projeções relativas aos acidentes de tráfego, bem como a severidade dos mesmos.

Pela utilidade dos resultados alegados, mas ainda não claramente comprovados, no Brasil e mesmo no exterior, coloca-se o interesse do presente trabalho em estudar o procedimento do TRAF-Safe.

Na verdade, a análise da metodologia empregada por TRAF-Safe foi a motivação original deste trabalho e, por este motivo, é o ponto de partida da apresentação feita a seguir.

Esta tarefa exigiu uma cuidadosa revisão da literatura existente sobre o TRAF-Safe e sobre outros procedimentos para análise de segurança baseados em conceitos de oportunidade de conflito de tráfego, dado que muitos conceitos e modelos não estão claramente descritos e documentados nas referências básicas. Por exemplo, na documentação do TRAF-Safe não foi encontrada nenhuma menção detalhada relativa à formulação dos procedimentos para a análise de interseção semaforizada (apenas são apresentados os resultados da sua validação). A mesma carência de detalhes ocorre para oportunidades de conflito com pedestres.

As seções seguintes (2.2.1 a 2.2.6) descrevem a formulação geral e teórica do TRAF-Safe, enquanto a última seção (2.2.7) deste item faz a análise e a crítica da metodologia apresentada para oportunidades de conflito angulares e traseiras por meio da discussão de um exemplo numérico (hipotético), apresentado pelo próprio autor do TRAF-Safe. Adiante são revisados outros estudos.

⁵ A partir deste ponto, a “oportunidade de conflito provável” ou “oportunidade de conflito de tráfego” poderá ser designada como simplesmente oportunidade de conflito – CO (“*Conflict Opportunity*”).

2.2.1 Características Gerais da Formulação do TRAF-Safe

Segundo KAUB (2005), as “oportunidades de conflito” podem ser classificadas em: “lateral, em evento convergente” (*sideswipe, merge event*), “angular, em evento de cruzamento” (*angle, crossing event*), “traseiro, em evento divergente” (*rear-end, diverge event*) e “lateral, em entrelaçamento ou mudança de faixa” (*sideswipe, weave event*).

As Figuras 2.3 e 2.4 mostram os tipos de oportunidade de conflito predominantes em interseções, como apresentados em KAUB (2005).

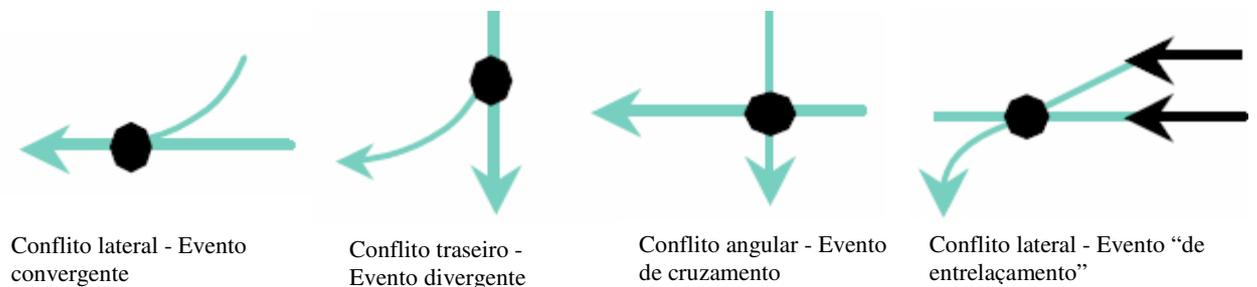


Figura 2.3 – Oportunidades de conflito teóricas típicas

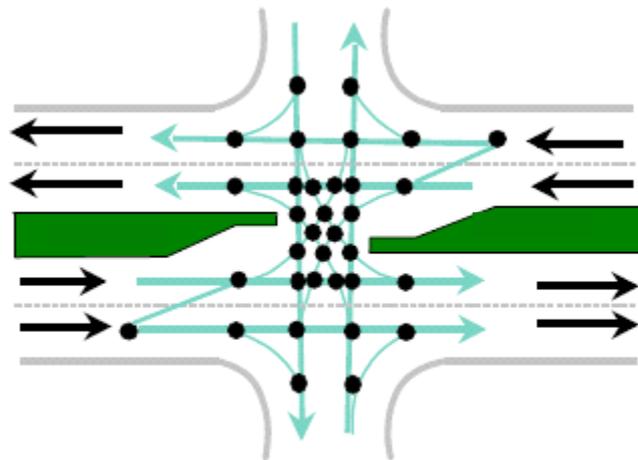


Figura 2.4 – Oportunidades de conflito típicas (8 divergentes, 8 convergentes, 4 entrelaçamentos ou por mudança de faixa, 16 cruzamentos; total de 36 pontos de oportunidade de conflito⁶)

Embora o TRAF-Safe mencione os 4 tipos de oportunidade de conflito ilustrados na Figura 2.3, para interseções semaforizadas ou não, e as oportunidades de conflito típicas envolvendo pedestres ou em rotatórias, a documentação oferecida apresenta apenas detalhes sumários para

⁶ Embora o texto fale em um total de 36 pontos de oportunidade de conflito, na Figura apresentada, como reproduzida aqui, estão indicados apenas 34.

pedestres, além de não apresentar nenhum detalhe sobre o procedimento adotado para interseções semaforizadas ou para rotatórias. Por este motivo, apenas as oportunidades de conflito angulares e traseiras em interseções não semaforizadas, como apresentadas na documentação do TRAF-Safe, serão discutidas a seguir⁷. Alguns métodos para interseções semaforizadas e para pedestres apresentados por outros autores serão analisados adiante.

Segundo KAUB (2005), adotando a distinção de GHAFFARI (1990) *apud* GETTMAN e HEAD (2003), as oportunidades de conflito podem ser classificadas em dois grandes tipos: as relacionadas com pontos de conflito e as relacionadas com linhas de conflito.

Admitindo uma interseção típica, existem eventos para os quais há um ponto de conflito que representa uma posição fixa no espaço onde os fluxos se interceptam. Segundo KAUB (2005), os fluxos podem se interceptar em várias regiões dentro da trajetória dos veículos mas, por simplicidade, é admitido que os pontos onde os fluxos se interceptam são fixos. Por exemplo, assume-se que os veículos de conversão sempre entram na mesma faixa da via transversal, de forma que o ponto onde os veículos se conflitam não mude.

Pontos de conflito definem as situações onde um veículo em movimento interrompe a progressão de um outro veículo, mas os veículos somente interagem em um ponto específico do espaço. É o caso típico de oportunidade de conflito angular.

Complementarmente, dada uma interseção típica, existem eventos nos quais há uma linha de conflito, que representa a região do espaço onde um veículo conflita com o veículo seguindo na mesma faixa. Isso pode se dar, segundo o autor, em 3 situações:

- a) veículo entrando na faixa na frente de um veículo que segue direto;
- b) veículos andando na mesma direção quando o da frente decide repentinamente virar à esquerda ou à direita;
- c) veículos mudando de faixa na frente de outro veículo, obrigando o veículo de trás a breicar.

Linhas de conflito descrevem as situações onde dois veículos interagem na mesma faixa por um período de tempo. É o caso típico de oportunidade de conflito traseira.

⁷ Na documentação do TRAF-Safe consta um procedimento detalhado para estimar as oportunidades de conflito decorrentes de mudanças de faixa, as quais, contudo, não serão discutidas no presente trabalho.

2.2.1.1 Características Gerais de Oportunidades de Conflito Angulares no TRAF-Safe

Os conflitos angulares são um dos casos associados aos pontos de conflito. O autor considera que, no esquema mostrado na Figura 2.5⁸, para uma interseção de duplo sentido de direção de tráfego, onde a via na horizontal (Leste-Oeste) é a via principal e a via vertical (Norte-Sul) é a via secundária, os pontos de conflito angular 1, 2, 7 e 8⁹ ocorrem:

- a) na conversão à esquerda do movimento a leste da via principal para a via secundária conflitando com o fluxo do movimento a oeste (ponto de conflito 1)
- b) na conversão à esquerda da via secundária para o sentido oeste da via principal conflitando com o fluxo da via principal no sentido leste (ponto de conflito 2)
- c) nos movimentos em frente da via secundária conflitando com o tráfego nos dois sentidos da via principal (pontos de conflito 7 e 8)

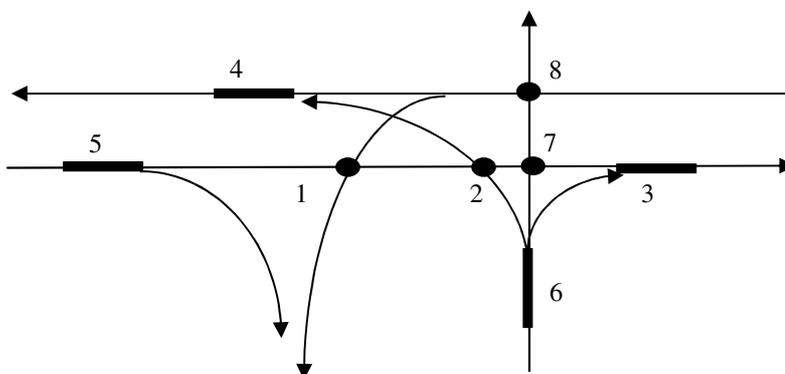


Figura 2.5 – Pontos e Linhas de oportunidades de conflito

O autor sublinha que os pontos de conflito acima modelam o risco de colisões angulares devido à aceitação de brechas muito pequenas. Menciona também que os eventos de conflito correspondentes aos movimentos de outras direções não estão mostrados, mas também são possíveis. Observa-se que as conversões à esquerda poderiam ser também associadas a conflitos frontais (e efetivamente podem gerar colisões frontais) mas o TRAF-Safe opta por relacioná-las apenas com os conflitos angulares¹⁰. Os conflitos frontais¹¹ seriam relacionados à ocorrência em ultrapassagens ou invasões do sentido oposto, por exemplo.

⁸ A Figura 2.5 é um desenho simplificado da figura apresentada pelo autor.

⁹ Foi mantida a numeração dada pelo autor na sua documentação.

¹⁰ O autor, na página 10 da sua documentação (KAUB, 2005), cita, sobre o exemplo dado (pontos de conflito 1, 2, 7 e 8) que “os pontos de conflito modelam o risco potencial de colisões angulares e **frontais**”. Contudo, no exemplo numérico na página 20 e nas seguintes, são detalhados apenas os cálculos de oportunidades de conflito angulares, incluindo as relacionadas com movimentos envolvendo conversões à esquerda (que no caso de conflito com fluxos opostos poderia também ser classificada como frontal).

¹¹ As oportunidades de conflito frontais não serão investigadas no presente trabalho. Conforme o escopo definido, serão estudadas apenas as oportunidades de conflito angulares e traseiras.

Uma questão importante para analisar as oportunidades de conflito angulares é a de selecionar uma medida para o tempo de exposição ao risco. No TRAF-Safe, o tempo de exposição ao risco é associado com a duração das brechas críticas aceitas pelos usuários da via secundária na operação sem semáforos. KAUB (2005) aponta explicitamente (ver pp.10) a utilização dos valores para brechas críticas obtidos do U.S. HCM (por exemplo, TRB, 2000) em interseções com sinalização de Parada Obrigatória (“*Two-Way Stop Control*”, TWSC) ou com a sinalização de Parada em Todas as Direções, usual nos EUA (“*All-Way Stop Control*”, AWSC).

2.2.1.2 Características Gerais de Oportunidades de Conflito Traseiras no TRAF-Safe

Os conflitos traseiros são associados às linhas de conflito. O autor considera que linhas de conflito denotam eventos de risco quando o veículo da frente faz uma conversão à direita ou à esquerda. Em ambos os casos, o veículo da conversão seria mais lento, causando ao veículo de trás uma desaceleração para evitar a colisão ou para gerar um conflito e acidente se a manobra de frenagem não for bem sucedida. Ainda segundo o autor, deve-se também incluir conflitos traseiros entre o veículo da frente em espera e o veículo de trás na aproximação com controle “PARE” ou aproximação semaforizada¹².

Na Figura 2.5 estão mostradas linhas de conflito de divergência na via principal (5) e na via secundária (6) e linhas de conflito de convergência (3 e 4). KAUB (2005) exemplifica também linhas de conflito relacionadas com mudanças de faixa. Pode-se ver que a discussão do autor não busca ser exaustiva. O próprio autor menciona que linhas de conflito adicionais são possíveis para trajetórias em outras direções, mas não são mostradas na Figura 2.5. Pode-se ver também que a mesma manobra pode gerar distintas situações (como 2 e 4).

2.2.1.3 Outros tipos de Oportunidades de Conflito no TRAF-Safe

Deve-se mencionar que o TRAF-Safe avalia outros tipos de oportunidades de conflito não considerados neste trabalho, incluindo oportunidades de conflito laterais geradas por manobras de mudança de faixas. Para alguns tipos de oportunidades de conflito, são geradas

¹² Contudo, na aplicação prática discutida pelo autor mais adiante é considerada apenas a situação de conflito traseiro com veículos em espera.

estimativas empíricas, como para oportunidades de conflito com apenas um veículo (oportunidade de conflito singular). Além disso, as estimativas são particularizadas para certos contextos, como rotatórias, onde os procedimentos gerais também seriam aplicáveis. Outros casos, como pedestres, são considerados somente com estimativa direta dos acidentes. Detalhes dos pontos não revisados aqui podem ser encontrados em KAUB (2005).

2.2.2 Previsão de Oportunidades de Conflito Angulares e Traseiras no TRAF-Safe

A expressão geral para a equação adotada pelo TRAF-Safe para previsão da frequência estimada de oportunidades de conflito relacionada com um dado tipo de evento, seguindo o esquema da Figura 2.6, é:

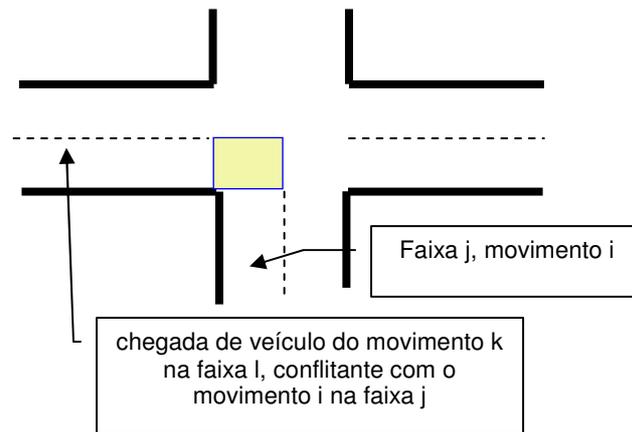


Figura 2.6 – Chegada de veículo do movimento k na faixa l, conflitante com o movimento i na faixa j

$$PCO(t) = E[\text{n}^\circ \text{ de oportunidades de manobras}]_{ij} \times P[\text{chegada de movimento conflitante}]_{kl} \quad (2.1)$$

onde:

$PCO(t)$ = número de oportunidades de conflito do tipo t

$E[\text{n}^\circ \text{ de oportunidades de manobra}]_{ij}$ = número esperado de veículos por unidade de tempo na manobra de um movimento específico i na aproximação ou faixa j ,

sendo:

$E[\text{n}^\circ \text{ de oportunidades de manobra}]_{ij} = P[\text{oportunidade de manobra por movimento}] \times$
(número de veículos do movimento i por unidade de tempo na aproximação ou faixa j)

$P[\text{chegada de movimento conflitante}]_{kl}$ = probabilidade de chegada de um ou mais veículos durante um período de tempo específico de exposição a um tipo particular de movimento kl

(ou a probabilidade de conflito durante o tempo de exposição pela chegada de um veículo do movimento conflitante k na aproximação l), em um segmento particular da via ou interseção.

Segundo o autor, a probabilidade de oportunidade de manobra por movimento pode ser 1, quando o conflito pode ocorrer para todos os veículos do movimento (por exemplo, para manobra de cruzamento de uma interseção), ou menor que 1 (por exemplo, quando decorre da probabilidade de que o veículo faça uma ultrapassagem em manobras de mudança de faixa).

Dada a identificação de uma manobra que fica sujeita a um risco potencial de conflito, determina-se cada fluxo conflitante e o tempo de exposição ao risco de conflito.

O risco efetivo é então relacionado com a probabilidade de chegada do fluxo conflitante durante o tempo de exposição, dada uma hipótese para os modelos de chegada ou intervalos entre veículos.

O modelo adotado pelo autor para a distribuição de chegada dos veículos é a distribuição de Poisson:

$$P[X = x] = \frac{(\lambda t)^x \cdot e^{-\lambda t}}{x!} \quad (2.2)$$

onde:

x = número de veículos que chegam no intervalo de tempo t

$\lambda = q$ = fluxo em v/s

$P[X = x]$ = probabilidade de chegarem x veículos no intervalo de tempo t

A probabilidade de não chegar nenhum veículo no tempo t é $P[X = 0] = e^{-\lambda t}$ e a probabilidade de chegar pelo menos um veículo é $P[X \geq 1] = 1 - P[X = 0] = 1 - e^{-\lambda t}$. Como é sabido, se a chegada de veículos for Poisson, então a distribuição de intervalos entre veículos tem distribuição exponencial negativa, cuja função de distribuição acumulada é:

$$F[t] = P[H \leq t] = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.3)$$

onde:

H = intervalo entre veículos

$\lambda = q =$ fluxo em v/s

$F_H[t] =$ probabilidade de ter um intervalo menor que ou igual a uma duração de tempo t

Uma hipótese implícita na suposição do autor é que os fluxos não apresentam pelotões (por exemplo, que não há nenhuma interseção semaforizada próxima à interseção em estudo) e não há separação mínima entre veículos (por exemplo, o fluxo de veículos ocorre em múltiplas faixas), dada a hipótese de que a chegada de veículos segue uma distribuição de Poisson.

Admitindo uma distribuição de Poisson, a probabilidade de chegada de veículos do movimento conflitante tem a seguinte forma:

$$P[X \geq 1] = 1 - P[X = 0] = 1 - \frac{e^{-m} \cdot m^0}{0!} = 1 - e^{-m} \quad (2.4)$$

sendo, para oportunidade de conflito angular ou traseira:

$$m = \frac{Q \cdot t}{3600} \quad (2.5)$$

$Q =$ fluxo médio do movimento conflitante por faixa de aproximação (em v/h)

$t =$ tempo de exposição ao risco na travessia (em s).

Considerando que a distribuição correspondente de intervalos é a distribuição exponencial, a mesma expressão pode ser associada com a probabilidade de um intervalo maior que o tempo de exposição.

Esta expressão usual é particularizada para cada tipo de elemento viário e situação específica.

A seguir, apenas são consideradas as interseções sem semáforo, como apresentadas pelo autor (os comentários sobre a formulação do autor serão feitos adiante).

2.2.2.1 Previsão de Oportunidades de Conflito Angulares

Para oportunidades de conflito angulares em interseções sem semáforo, KAUB (2005) distingue duas situações específicas: movimentos preferenciais e movimentos secundários.

Para movimentos secundários, o autor recomenda que, para efeitos práticos, o tempo de exposição do conflito angular t seja baseado nos valores de brecha crítica do HCM (*Highway Capacity Manual*)¹³ para interseções não semaforizadas ($t = \alpha$, onde α é a brecha crítica), sob a hipótese de que esses tempos estimam adequadamente a exposição dos veículos, apesar de admitir que novas pesquisas continuam a melhorar as medidas de exposição.

O autor nota ainda que, teoricamente, a probabilidade de exposição também pode ser avaliada usando expressões da forma:

$$P[H \geq t_{Li}] \text{ e } P[H \leq t_{Ui}] \quad (2.6)$$

onde:

t_{Li} = limite inferior (“*lower bound*”) do tempo de exposição do movimento i
 t_{Ui} = limite superior (“*upper bound*”) do tempo de exposição do movimento i

considerando que as manobras de risco ocorreriam somente para brechas no intervalo definido pelos limites mencionados. As expressões correspondentes não são empregadas no exemplo examinado adiante mas sua utilização é discutida nos trabalhos seguintes.

Para movimentos preferenciais, os tempos de exposição são calculados usando distâncias de parada segura ($t = d_p$) para veículos expostos a conflitos com veículos da via transversal.

2.2.2.2 Previsão de Oportunidades de Conflito Traseiras

Para oportunidades de conflito traseiras em interseções sem semáforo, KAUB (2005) distingue as mesmas duas situações específicas: movimentos preferenciais e movimentos secundários.

¹³ O autor menciona inicialmente que as brechas críticas adotadas são obtidas do U.S. HCM (*Highway Capacity Manual*) da versão 2000 (TRB, 2000, doravante referenciado como HCM/2000) e adiante cita a versão 1985 (TRB, 1985, doravante referenciado como HCM/85). Embora relevante em termos práticos (valores), a diferença não é conceitual e não é relevante neste ponto. A discussão será ampliada adiante.

Para movimentos preferenciais, o autor considera que não há oportunidades de conflito traseiras, uma vez que, teoricamente, são movimentos que não param e que, portanto, não gerariam riscos de oportunidades de conflito traseiras.

Para vias não preferenciais, o autor recomenda que, para efeitos práticos, o tempo de exposição a conflitos traseiros numa aproximação com controle “PARE” é a duração do tempo em que o veículo fica parado ($t = t_e$, onde t_e é o tempo de parada na aproximação considerada). No entanto, o autor calcula esse tempo de parada por meio da fórmula de Adams, que fornece o tempo de parada no topo da fila apenas.

Na formulação apresentada:

$$t = \text{Duração de parada} = E(\text{tempo de espera no sistema}) - E(\text{tempo de serviço}) \quad (2.7)$$

$$= (\text{número em espera no sistema} / \text{fluxo médio de chegada}) - \text{Brecha crítica}$$

sendo que o número em espera no sistema é calculado por:

$$\frac{1 - P[X = 0]}{P[X = 0]} = \frac{1 - e^{-m}}{e^{-m}} = (1 - e^{-m})e^m \quad (2.8)$$

tendo-se, então, para a duração de parada:

$$t = \frac{1 - e^{-q \cdot \alpha}}{q \cdot e^{-q \cdot \alpha}} - \alpha \quad (2.9)$$

onde:

q = fluxo de chegada dos veículos que param em v/h

α = brecha crítica em s

(que é a expressão usual para o atraso de Adams, obtido para a espera do veículo no topo da fila quando admitida a hipótese de a distribuição de chegadas ser poissoniana).

O autor comenta, ainda, que, com semáforo, a duração de parada pode ser o atraso de parada da fórmula de WEBSTER (1958). Este último comentário significaria que quaisquer das

fórmulas atualmente utilizadas para estimar atraso, com controle semaforizado ou não, seriam formas alternativas.

Para vias não preferenciais sem semáforo, o autor comenta, ainda, que a probabilidade de parar é 1. No entanto, em interseções com semáforos, esta não é uma suposição usual.

2.2.3 Oportunidades de Conflito Anuais

Com essa formulação de eventos prováveis para cada tipo de conflito e sua expansão para todas as faixas de uma aproximação e para todas as aproximações de uma interseção, um modelo para um valor anual esperado de oportunidades de conflito prováveis pode ser desenvolvido, representando a soma de todos os tipos individuais de conflitos.

No exemplo que será discutido adiante, o autor estima a frequência de oportunidades de conflitos prováveis anuais a partir de procedimentos mais simples. Considerando que as estimativas tenham sido obtidas com dados referentes à hora-pico de um dia útil típico, o autor acaba por utilizar fatores de conversão F para obter o valor referente ao dia todo (tipicamente um fator divisor $F = 0,10$ para COs baseadas em dados da hora-pico) e, deste total diário, para todo o ano (tendo sido usado um fator multiplicador $D = 365$ dias/ano).

Portanto, (admitindo a expansão com fatores uniformes para todos os tipos de oportunidade de conflito), o exemplo adota uma forma simplificada com:

$$ACO_t = CO_t \frac{D}{F} \quad (2.10)$$

onde:

ACO_t = número de COs anuais do tipo t

CO_t = número de COs do tipo t por hora pico

Fatores de expansão deste tipo são usualmente empregados para estimar os volumes de tráfego anuais (ou volumes de tráfego médios diários) a partir de volumes de hora-pico e, pelo menos inicialmente, poderiam ser assumidos para oportunidades de conflito (apesar das

relações não-lineares envolvidas), uma vez que fatores semelhantes não estão usualmente disponíveis para oportunidades de conflito.

Embora este procedimento possa ser considerado simplista¹⁴, não há dificuldade conceitual em torná-lo mais detalhado (a obtenção de fatores de conversão para diferentes períodos do dia, eventualmente por tipo de dia, assim como a obtenção de uma composição do ano típica para tipos de dia selecionados, seria uma dificuldade prática, sendo relevante apenas o problema de definir o método com melhor compromisso entre praticidade e validade em termos de tipos de períodos, tipos de dia, ...).

Observe-se, entretanto, que a expansão das estimativas para totais anuais não é estritamente necessária para um diagnóstico de segurança viária, sendo utilizada no TRAF-Safe como passo intermediário para obter estimativas dos totais de acidentes e da sua gravidade.

2.2.4 Modelo de Previsão de Acidentes Anuais

O autor também considera que a previsão de oportunidades de conflito anuais pode ser usada para estimar a frequência provável de acidentes anuais, a partir de coeficientes que refletem taxas de oportunidades de conflito por acidente calibradas através de modelos validados, que obtenham relações estáveis entre as oportunidades de conflito (em princípio, somando todos os tipos) e os acidentes anuais, específicos para cada tipo de controle de tráfego, para volumes, velocidades e geometria típicos, bem como para motoristas e veículos típicos. O mesmo procedimento poderia ser estendido para estimar a frequência de acidentes com vítima (ou de vítimas), de acidentes com vítimas graves (ou de vítimas graves) e de acidentes fatais (ou de fatalidades) decorrentes.

Naturalmente, pode-se conjecturar que as taxas e sua aplicação possam considerar os tipos de oportunidades de conflito, ponderando graus de periculosidade distintos para cada tipo de evento previsto (entendida como a propensão de uma oportunidade de conflito gerar um acidente), como é feito para conflitos de tráfego.

¹⁴ A expansão para COs anuais parte do número de COs na hora pico. Contudo, é justamente na hora pico que a hipótese do modelo de chegadas poissonianas geralmente não é atendida.

A exposição do autor é ambígua sobre esse aspecto e o seu exemplo efetivamente utiliza taxas de oportunidades de conflito por acidente distintas.

Segundo o autor, considerando todas as horas de um dia e todos os dias de um ano, o processo de projeção anual de acidentes numa interseção pode ser expressa como:

$$\text{Número de acidentes anuais} = \sum_{h=1}^n [CO_{th}/M] \quad (2.11)$$

onde:

n = número de horas do ano

th = tipo de CO t na hora h

M = modelo de COs/acidente = relação calibrada entre todos os tipos de oportunidades de conflito e a taxa anual de acidentes para cada tipo de controle de tráfego, para volumes, velocidades e geometria típicos, bem como para motoristas e veículos típicos.

Como foi visto na Seção 2.2.3, a expansão das COs por hora para COs anuais não é feita de acordo com a expressão (2.11), mas, sim, utilizando-se dos fatores F e D .

O autor não detalha a forma de obtenção da taxa de COs por acidente. Pelos exemplos numéricos apresentados, é utilizada a taxa de COs por acidente de 1.291.700 COs/acidente para CO angular e CO traseira, mas com uma correção específica para CO traseira, além de uma correção genérica para ambas (em função do tamanho da área urbana considerada).¹⁵

O fator de correção específico para CO traseira é dado por $V(\text{mph})/8$ e a taxa específica para CO traseira é minorada para $1.291.700/(V(\text{mph})/8)$. O autor não explica porque para CO angular não há influência da velocidade e, tampouco, como foi calibrado o fator 8, que modifica a taxa correspondente para CO traseira.

¹⁵ Na página 26, o autor cita também a taxa de 1.193.756 COs angulares por acidente (7,58% menor que a utilizada). Para COs laterais (por mudança de faixa), o autor utiliza uma taxa básica de 1.216.855 COs laterais por acidente e um fator de correção específico para uma taxa específica $M/(V(\text{mph})/300)$.

Para interseções com PARE Múltiplo (AWSC), o autor cita taxas de 0,80/MEV para acidentes totais. Para rotatórias, o autor cita taxas de 0,48/MEV para acidentes totais. Os fatores correspondentes para acidentes com vítima não são claramente apresentados (MEV = *Million Entry Vehicles*).

O fator de correção genérico é função do tamanho da área (medido pela sua população). O exemplo numérico usa um fator de correção igual a 0,89 (-11%) para uma área urbana de 225.000 habitantes. Este valor não corresponde exatamente aos modelos de correção apresentados pelo autor: $0,4+0,00005*Pop/1000$ para interseções com PARE e $0,6+0,00005*Pop/1000$ para interseções semaforizadas, para os acidentes totais.

No entanto, além dos aspectos mencionados, a exposição do autor faz diversas alusões (sem explicitar seu conteúdo) a procedimentos de “calibração local” (que implicaria a algum tipo de ajustes aos totais de acidentes observados em uma dada cidade ou região) e exclusão de “acidentes atípicos” (por exemplo, pela exclusão de acidentes claramente relacionados a fatores peculiares, como o uso de álcool ou drogas).

A calibração local poderia justificar a utilização de fatores de correção distintos, tendo-se:

$$AA_t = ACO_t / M * f[V]_t * f_{Pop} * f_{loc} \quad (2.12)$$

sendo:

AA_t = acidentes anuais do tipo t

$f[V]_t$ = fator de correção específico (função de velocidade)

f_{pop} = fator de correção genérico (função da população da área)

f_{loc} = fator de calibração local obtido dos dados de acidentes da área

2.2.5 Modelo para Previsão de Acidentes com Vítima e com Vítima Grave/Fatal

Para acidentes com vítimas, o autor propõe também uma correção específica e uma correção genérica. Além disso, o autor propõe uma correção específica para acidentes com vítimas graves/fatais (níveis 5 e 6 na escala abreviada de severidade adotada pelo U.S.FHWA, MAIS – *Maximum Abbreviated Injury Scale*). Em ambos os casos, a base de previsão é o total de pessoas envolvidas em acidentes, obtida multiplicando o total de acidente pela ocupação média dos veículos.

Para acidentes com vítima, o autor propõe um fator de correção específico dado pela expressão simplificada $V(\text{mph})/100$ e um fator de correção genérico em função do tamanho da área urbana (novamente medida pela população): $0,98+0,00014*Pop/1000$ para interseções com PARE e $1,06-0,00008*Pop/1000$ para interseções semaforizadas.

Para acidentes com vítima grave/fatal, o autor propõe um fator de correção específico, dado por $0,005*e^{0,04.V(\text{mph})}$, para a proporção de acidentes com vítima que resultam graves/fatais. A correção é igual para todos os tipos de acidente e, segundo o autor, deve utilizar a maior velocidade entre as aproximações da interseção.

Os fatores de correção específicos mencionados acima são apresentados apenas no exemplo numérico. No mesmo exemplo, o fator de correção utilizado (1,18 para a área urbana com 225.000 habitantes) novamente não corresponde ao modelo apresentado.

Novamente, a calibração local poderia justificar a utilização de fatores de correção distintos:

$$AV_t = AA_t * g[V]_t * g_{Pop_t} * g_{loct} \quad (2.13)$$

sendo:

AV_t = acidentes com vítima ou vítima grave/fatal do tipo t

$g[V]_t$ = fator de correção específico (função de velocidade)

g_{Pop_t} = fator de correção genérico (função da população da área)

g_{loct} = fator de calibração local obtido dos dados de acidentes da área

2.2.6 Exemplo Numérico do Algoritmo do TRAF-Safe

Para ilustrar a aplicação do procedimento utilizado pelo TRAF-Safe, o autor utiliza um exemplo hipotético, simplificado, conforme mostrado na Figura 2.7¹⁶.

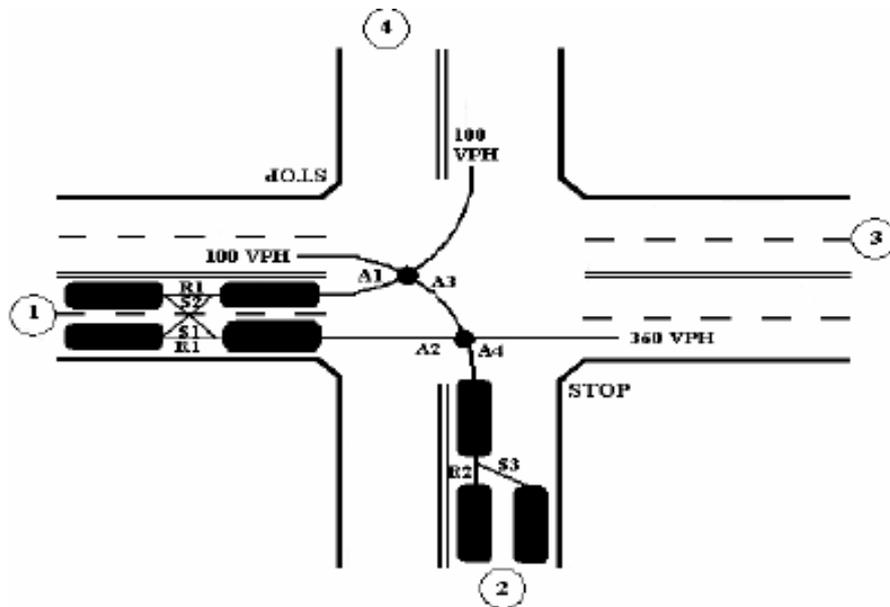


Figura 2.7 – Exemplo numérico hipotético apresentado por KAUB (2005)

A Figura 2.7 mostra uma interseção com prioridade definida por sinais “PARE” em uma pequena área urbana (menos que 225.000¹⁷ habitantes). Com o propósito de simplificar a análise do cruzamento, são adotadas pelo autor as seguintes hipóteses simplificadoras:

- as aproximações 3 e 4 não apresentam fluxo;
- a aproximação 1 apresenta duas faixas de tráfego, com movimentos em frente e à esquerda (não existe conversão à direita);
- a aproximação 2 também apresenta duas faixas de tráfego, com movimento de conversão à esquerda (não existe movimento em frente e tampouco conversão à direita);
- a aproximação 1 é da via preferencial, segundo a sinalização de prioridade;
- a aproximação 2 é da via secundária, recebendo o sinal “PARE”.

¹⁶ O autor não apresenta um exemplo numérico para interseção semaforizada. Na documentação apresentada do TRAF-Safe não consta nenhuma informação de como é o método adotado para interseções semaforizadas.

¹⁷ A informação é inicialmente utilizada para obter o valor das brechas críticas para os movimentos secundários. O HCM/85 menciona áreas urbanas maiores ou menores que 250.000 habitantes (e não 225.000 como menciona o autor). O HCM/2000 abandonou a diferenciação dos valores recomendados para as brechas pelo porte da área urbana em que se encontra a interseção. A informação também será considerada para a previsão dos acidentes, um aspecto complementar incluído no TRAF-Safe.

Supõe-se, ainda, que:

- a) em nenhuma aproximação há baia protegida para conversão à esquerda;
- b) todas as aproximações apresentam largura de 7,3 m (24 ft) e duas faixas;
- c) a velocidade fixada em todas as aproximações é de 96,6 km/h (60 mph);
- d) a brecha crítica para a conversão à esquerda da via secundária é de 7,0 s e a brecha crítica para a conversão à esquerda na via principal é de 6,65 s¹⁸;
- e) o fluxo na via secundária (aproximação 2) é de 100 v/h (conversão à esquerda);
- f) os fluxos na via principal (aproximação 1) são 360 v/h para o movimento em frente e 100 v/h para a conversão à esquerda;
- g) todos os fluxos têm uma distribuição de chegada poissoniana.

Os movimentos e os fluxos da Figura 2.7 podem ser ilustrados no esquema apresentado na Figura 2.8, abaixo.

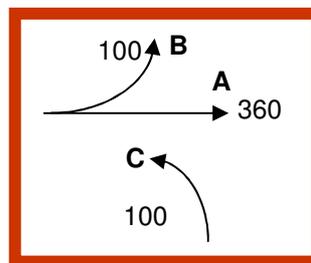


Figura 2.8 – Indicação dos movimentos e fluxos no exemplo de KAUB (2005)

Como o escopo do presente trabalho é a análise e proposição de modelos que forneçam estimativas de oportunidades de conflito angulares e traseiras, a seguir será apresentado apenas o conteúdo correspondente ao método de TRAF-Safe para estes tipos de oportunidades de conflito (angulares e traseiras). Não serão analisadas as oportunidades de conflito por mudança de faixa, tratadas de forma similar pelo autor, nem as demais oportunidades de conflito, como as de rotatórias, com objeto fixo e com pedestres, tratadas de forma mais empírica.

¹⁸ Algumas observações podem ser feitas sobre os valores do HCM adotados por KAUB (2005):

- Apesar de o autor citar o HCM/2000, pg. 17-7, tal página fornece brechas críticas de 7,5 e 4,1 s para a conversão à esquerda da via secundária e conversão à esquerda da via principal, respectivamente. O HCM/2000 não vincula os valores das brechas críticas à velocidade e ao tamanho da área urbana.

- O HCM/85 atrela os valores das brechas críticas à velocidade (30 e 55 mph) e ao tamanho da área urbana. Para a velocidade de 55 mph e área urbana menor que 250.000 habitantes, as brechas críticas são 8,5 e 6,0 s para a conversão à esquerda da via secundária e para conversão à esquerda da via principal, respectivamente (para áreas maiores, as brechas seriam 0,5 s menores)

- Portanto, os valores de 7,0 e 6,65 s adotados pelo autor não correspondem aos recomendados pelo HCM/85 ou pelo HCM/2000 (apesar deste último ser citado nominalmente).

2.2.6.1 Estimativa de Oportunidades de Conflito Angulares

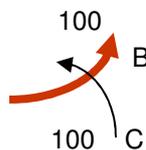
Existem 4 pontos de conflito angular, marcados na Figura 2.7:

- a) A1 – Conversão à esquerda da via principal x conversão à esquerda da via secundária (100 v/h de B × 100 v/h de C)
- b) A2 – Movimento em frente da via principal x conversão à esquerda da via secundária (360 v/h de A × 100 v/h de C)
- c) A3 – Conversão à esquerda da via secundária x conversão à esquerda da via principal (100 v/h de C × 100 v/h de B)
- d) A4 – Conversão à esquerda da via secundária x movimento em frente da via principal (100 v/h de C × 360 v/h de A)

Deve-se observar que o exemplo mostra que a metodologia de TRAF-Safe considera as COs do ponto de vista do usuário que faz a manobra inicial e, em cada situação de potencial conflito, a exposição de ambas as manobras é considerada separadamente.

Por exemplo, o ponto de conflito A1 é tomado sob o ponto de vista dos veículos da via principal que fazem a manobra de conversão à esquerda e que se expõem a risco (provável conflito) devido aos veículos da via secundária que fazem a conversão à esquerda para a via principal, enquanto que o ponto de conflito A3 é tomado do ponto de vista dos usuários que estão na via secundária efetuando a manobra de conversão à esquerda e que se expõem a prováveis conflitos com os veículos da via principal que fazem a conversão à esquerda para a via secundária. Não há dupla contagem se o usuário exposto é distinto em cada caso.

Cálculo de COs em A1 (B × C – manobra de B)



$CO(A1)/h = Q_B * P[\text{exposição de B}] * P[\text{chegada do fluxo oposto C durante o tempo de exposição } t]$

$P[\text{chegada do fluxo oposto C durante o tempo de exposição } t] = 1 - e^{-\lambda t}$

$Q_B = 100 \text{ v/h}$

$\lambda = q_C = 100/3600 = 0,027778 \text{ v/s}$

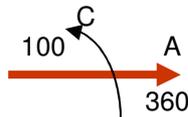
$P[\text{exposição de B por movimento de conversão}] = 1$

$t = \text{tempo de exposição de B} = \text{brecha crítica de B} = 6,65 \text{ s}$

$$CO(A1)/h = 100 * 1 * (1 - 0,831335) = 16,87 \text{ COs/h}$$

Note que o autor considera como tempo de exposição ao risco de um movimento não preferencial o valor correspondente à brecha crítica da manobra realizada. No caso, embora o movimento B seja da via principal e preferencial em relação a C, o mesmo é tratado como movimento secundário (a brecha correspondente refere-se ao cruzamento do fluxo oposto de B, no outro sentido da via principal, que foi admitido nulo). Portanto, embora entenda-se o princípio, sua aplicação pelo autor seria equivocada, como discutido adiante.

Cálculo de COs em A2 (A × C – manobra de A)



$CO(A2)/h = Q_A * P[\text{exposição de A}] * P[\text{chegada do fluxo oposto C durante o tempo de exposição } t]$

$$P[\text{chegada do fluxo oposto C durante o tempo de exposição } t] = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$Q_A = 360 \text{ v/h}$$

$$\lambda = q_C = 100/3600 = 0,027778 \text{ v/s}$$

$$P[\text{exposição de A por movimento direto}] = 1$$

$$t = \text{tempo de exposição de A} = \text{tempo de parada de A} = 8,9 \text{ s}$$

$$CO(A2)/h = 360 * 1 * (1 - 0,780967) = 78,85 \text{ COs/h}$$

Portanto, o autor considera que o tempo de exposição ao risco do fluxo preferencial como sendo o tempo necessário para parar de forma segura (por exemplo, se houver um veículo interferente da via secundária na área de conflito ou outro evento que exija parada). Esse tempo é uma função da velocidade da aproximação e, segundo o autor, varia de 6,8 s (20 mph) a 9,0 s (60 mph). Contudo, embora o autor tenha admitido uma velocidade de 60 mph no exemplo da Figura 2.4, ele adota o valor de 8,9¹⁹ s (em vez de 9,0 s).

¹⁹ O autor não justifica o valor utilizado de 8,9 s.

A Figura 2.9 ilustra o conceito utilizado por TRAF-Safe.

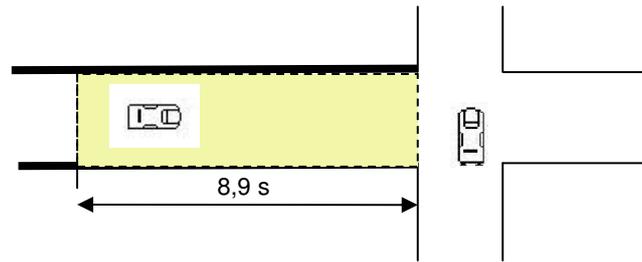
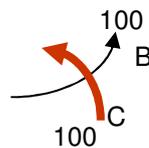


Figura 2.9 – Tempo de parada do veículo da via principal

Em princípio, esta avaliação corresponderia à passagem pela interseção dos veículos vindos de A (da via principal) e adotar o tempo de parada como tempo de exposição é o aspecto peculiar. No entanto, não fica claro se o autor foge do conceito utilizado de que a CO é calculada para quem faz a manobra. No caso, a CO é calculada para o veículo da via principal, mas quem faz a manobra buscando brechas é o veículo da via secundária. Este caso está avaliado adiante (A4) e, neste caso, haveria uma potencial dupla contagem.

Esta visão corresponde a admitir que está sendo considerada a potencial colisão de C contra A (e não de A contra C) e, normalmente, o tempo de exposição teria de ser limitado ao tempo de percorrer a área de conflito da interseção ou de cada faixa (quando uma invasão do fluxo vindo de C poderia causar a colisão mencionada).

Cálculo de COs em A3 (C × B – manobra de C)



$CO(A3)/h = Q_C * P[\text{exposição de C}] * P[\text{chegada do fluxo oposto B durante o tempo de exposição } t]$

$P[\text{chegada do fluxo oposto B durante o tempo de exposição } t] = 1 - e^{-\lambda t}$

$Q_C = 100 \text{ v/h}$

$\lambda = q_B = 100/3600 = 0,027778 \text{ v/s}$

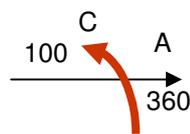
$P[\text{exposição de C por movimento de conversão}] = 1$

$t = \text{tempo de exposição de C} = \text{brecha crítica de C} = 7,0 \text{ s}$

$$CO(A3)/h = 100 * 1 * (1 - 0,823292) = 17,67 \text{ COs/h}$$

Esta situação corresponde ao caso padrão de cruzamento na via secundária e chegada conflitante na via principal. No entanto, como será comentado adiante, pode-se considerar que não faz sentido separar as chegadas conflitantes dos fluxos A ou B (ambos usam as mesmas faixas e não são distinguíveis na chegada).

Cálculo de COs em A4 (C × A – manobra de C)



$$CO(A4)/h = Q_C * P[\text{exposição de C}] * P[\text{chegada do fluxo oposto A durante o tempo de exposição } t]$$

$$P[\text{chegada do fluxo oposto A durante o tempo de exposição } t] = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$Q_C = 100 \text{ v/h}$$

$$\lambda = q_A = 360/3600 = 0,1 \text{ v/s}$$

$$P[\text{exposição de C por movimento de conversão}] = 1$$

$$t = \text{tempo de exposição de C} = \text{brecha crítica de C} = 7,0 \text{ s}$$

$$CO(A4)/h = 100 * 1 * (1 - 0,496585) = 50,34 \text{ COs/h}$$

Esta situação também corresponde ao caso padrão de cruzamento na via secundária e chegada conflitante na via principal, havendo a mesma crítica com relação a separar as chegadas conflitantes dos fluxos A ou B, que será apresentada adiante.

Total de COs angulares por hora:

Tabela 2.1- Oportunidades de conflito angulares

		TRAF-Safe
A1	B × C	16,87
A2	A × C	78,85
A3	C × B	17,67
A4	C × A	50,34
Total		163,73

2.2.6.2 Estimativa de Oportunidades de Conflito Traseiras

Considere a Figura 2.10 para aplicação do algoritmo.

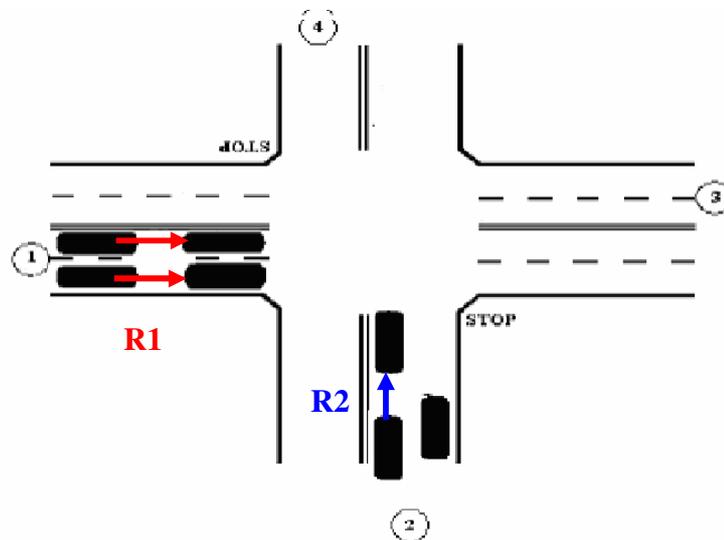


Figura 2.10 – Oportunidades de conflito traseiras

Embora qualquer manobra de redução de velocidade possa ocasionar colisões traseiras ou o evento possa resultar mesmo de diferenciais de velocidade normais na corrente de tráfego, no TRAF-Safe somente são consideradas oportunidades de conflito traseiras contra veículos parados. Esta é a hipótese inicial da discussão feita a seguir.

A Figura 2.10 mostra os dois pontos de conflito traseiro, R1 e R2.

- a) R1 é o ponto de conflito traseiro na via principal.
- b) R2 é o ponto de conflito traseiro na via secundária.

Cálculo de COs em R1

A metodologia de TRAF-Safe considera que, como o fluxo principal nunca pára, as oportunidades de conflito traseiras são nulas.

Portanto: $CO(R1)/h = 0$

O movimento da via principal é constituído de dois movimentos: A e B. O movimento A é, evidentemente, o movimento prioritário. Contudo, de forma inconsistente, o movimento B foi tratado pelo TRAF-Safe nas COs angulares como movimento secundário (o que seria inadequado) e, aqui, como movimento prioritário (agora adequadamente).

Cálculo de CO em R2

Como esquematizado na Figura 2.11, o método de TRAF-Safe subdivide o conflito R2 em dois casos:

- R2a = conflito traseiro de um veículo de trás com um veículo da frente parado, aguardando uma brecha do movimento A
- R2b = conflito traseiro de um veículo de trás com um veículo da frente parado, aguardando uma brecha do movimento B

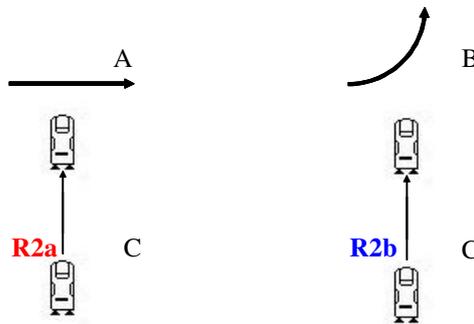


Figura 2.11 – Divisão do conflito R2 em 2 tipos de conflito

Assim, tem-se:

$$R2a = C \times A$$

$$R2b = C \times B$$

O método de TRAF-Safe considera o tempo de exposição de risco do veículo da frente como sendo o tempo em que ele está parado aguardando uma brecha dentro do movimento A (R2a) ou uma brecha dentro do movimento B (R2b). Se nesse tempo de exposição, vier um veículo de trás, haveria CO. Portanto:

$$t = te$$

O tempo parado para aguardar a brecha é calculado segundo a expressão de Adams (2.9), anteriormente apresentada, simplificada para

$$te = \frac{e^{q \cdot \alpha} - 1}{q} - \alpha$$

onde:

te = atraso em s

q = fluxo de veículos do movimento oposto em v/s

α = brecha crítica do movimento secundário em s

Cálculo de CO em R2a

q = fluxo oposto $q(A) = 360/3600 = 0,1$ v/s

α = brecha crítica de C = 7,0 s

$$te = \frac{(e^{-q(A)\alpha} - 1)}{q(A)} - \alpha = 3,1375 \text{ s}$$

$CO(R2a)/h = Q_C * P[\text{exposição em C}] * P[\text{chegada de outro veículo de C atrás durante o tempo de exposição } te]$

$$P[\text{chegada de outro veículo de C atrás durante o tempo de exposição } te] = 1 - e^{-\lambda te}$$

$Q_C = 100$ v/h

$\lambda = q_C = 100/3600 = 0,027778$ v/s

$P[\text{exposição em C por movimento secundário}] = 1$

te = tempo de exposição de C = tempo de espera de C = 3,1375 s

$$CO(R2a)/h = 100 * 1 * (1 - 0,916537) = 8,35 \text{ COs/h}$$

Cálculo de CO em R2b

q = fluxo oposto $q(B) = 100/3600 = 0,027778$ v/s

α = brecha crítica de C = 7,0 s

$$te = \frac{(e^{q(B)\alpha} - 1)}{q(B)} - \alpha = 0,7269 \text{ s}$$

$CO(R2b)/h = Q_C * P[\text{exposição em C}] * P[\text{chegada de outro veículo de C atrás durante o tempo de exposição } te]$

$$P[\text{chegada de outro veículo de C atrás durante o tempo de exposição } te] = 1 - e^{-\lambda te}$$

$Q_C = 100$ v/h

$\lambda = q_C = 100/3600 = 0,027778$ v/s

$P[\text{exposição em C por movimento secundário}] = 1$
 $t_e = \text{tempo de exposição de C} = \text{tempo de espera de C} = 0,7269 \text{ s}$

$$\text{CO}(\text{R2b})/\text{h} = 100 * 1 * (1 - 0,980011) = 1,99 \text{ COs/h}$$

Total de COs traseiras por hora:

Tabela 2.2 – COs traseiras

	COs/h
R1	0
R2a	8,35
R2b	1,99
Total	10,34

2.2.6.3 Estimativa de Acidentes

Utilizando os valores do exemplo numérico, a estimativa dos acidentes totais seria obtida por:

Total de COs angulares por ano: $163,73 * 365 / 0,10 = 597,614,50 \text{ COs/ano}$

Total de COs traseiros por ano: $10,34 * 365 / 0,10 = 37.741 \text{ COs/ano}$

Total de acidentes angulares por ano: $597,614,50 / 1.291.700 * 0,89 = 0,4123 \text{ acc/ano}$

Total de acidentes traseiros por ano: $37.741 / 1.291.700 * (60/8) * 0,89 = 0,1950 \text{ acc/ano}$

(assumindo o fator por população de 0,89).

Total de acidentes angulares com vítima por ano: $0,4123 * 1,0 * 60 / 100 * 1,18 = 0,32 \text{ acv/ano}$

Total de acidentes traseiros com vítima por ano: $0,1950 * 1,0 * 60 / 100 * 1,18 = 0,16 \text{ acv/ano}$

(assumindo 1,0 passageiros por veículo acidentado e o fator por população de 1,18).

Total de acidentes angulares com vítima grave/fatal por ano: $0,32 * 0,005 * e^{0,04 \cdot 60} = 0,0161 / \text{ano}$

Total de acidentes traseiros com vítima grave/fatal por ano: $0,16 * 0,005 * e^{0,04 \cdot 60} = 0,0076 / \text{ano}$

Note-se que os valores apresentados acima correspondem aos relatados em KAUB (2005), com exceção dos acidentes com vítima grave/fatal (que não são apresentados por tipo, como feito acima). A maior parte deles concorda com os cálculos mostrados.

No caso dos acidentes com vítima, os valores obtidos tem uma divergência pequena mas relevante (seriam 0,29 e 0,14, ao invés de 0,32 e 0,16).

No entanto, uma divergência maior ocorre no caso dos acidentes com vítimas graves/fatais. Em KAUB (2005) é relatado apenas o total de 0,023/ano, incluindo os decorrentes de acidentes laterais e singulares (cerca de 1/4 dos acidentes no exemplo numérico apresentado), mas somente as parcelas apresentadas, calculadas com o total de acidentes com vítima de 0,29 e 0,14, chegam a 0,0237/ano (relativas a acidentes angulares e traseiros apenas).

2.2.7 Análise Crítica do Algoritmo do TRAF-Safe

A descrição teórica e o exemplo numérico do procedimento utilizado em KAUB (2005) permitem formar uma visão mais concreta do procedimento de aplicação e avançar uma série de críticas ou alternativas possíveis para aplicação do método. Mesmo antes de revisar os demais trabalhos sobre o tema, vale a pena resumir algumas críticas principais.

A seguir, estas críticas serão apresentadas para cada tipo de oportunidade de conflito analisada (angular e traseira) e utilizará o mesmo exemplo numérico para ilustração.

2.2.7.1 Análise do Método para Oportunidades de Conflito Angulares

Desenvolvendo alguns dos pontos comentados anteriormente, pode-se sugerir alguns aprimoramentos ao método proposto para estimar oportunidades de conflito angulares do TRAF-Safe. Em alguns pontos, o próprio autor menciona opções não adotadas e detalhadas, que serão também examinadas a seguir.

Tempo de exposição ao risco de movimentos secundários

Para as manobras secundárias, o autor adota a brecha crítica da manobra como tempo de exposição ao risco, utilizando valores recomendados pelo HCM. Com essa hipótese, o tempo de exposição ao risco depende de levantamentos difíceis. Nas recomendações do HCM, as brechas independem de muitas características geométricas da interseção, sendo apenas função do tipo de manobra e dados gerais como o número de faixas na via principal e alguns poucos detalhes físicos da manobra.

No lugar de brechas críticas, o autor menciona a possibilidade do uso de um “*lower bound*” e de um “*upper bound*”. Nesse sentido, poderia ser usada uma faixa de valores: $(t - \tau, t + \tau)$, onde τ = tolerância e t = brecha crítica ou tempo da manobra. Tempos menores que $t - \tau$, não haveria COs pois as brechas seriam tão pequenas que os condutores não se arriscariam a fazer a manobra e brechas maiores que $t + \tau$ também não haveria COs pois as brechas seriam tão grandes que não haveria risco na manobra. Só haveria COs para travessias com intervalos de $(t - \tau, t + \tau)$. Como será discutido adiante, outros autores (anteriores e posteriores), sugerem critérios similares (por exemplo, no intervalo $t - 2$ s a $t + 2$ s) em relação ao valor da brecha crítica ou do tempo de manobra.

Como exemplo, ZHANG e PREVEDOUROS (2003), conforme descrito na seção correspondente, usa $t + 2$ s e $t - 2$ s no seu estudo de oportunidades de conflito entre veículos de conversão à esquerda e o fluxo do movimento oposto, onde t é o tempo da manobra. Porém, essa metodologia pode levar a distorções, conforme mostrado na mesma seção.

Uma hipótese mais simples parece ser aquela que considera que o tempo de exposição ao risco é o tempo em que o veículo permanece na área de conflito, isto é, o tempo que o veículo leva para fazer a manobra. Com essa hipótese, o tempo de exposição ao risco torna-se dependente da largura da interseção e pode ser obtido de simples modelos cinemáticos da manobra. Quanto mais larga a interseção, maior é o tempo em que o veículo fica exposto ao risco. As características de aceleração e as dimensões físicas dos veículos também poderiam ser consideradas (e diferenciariam veículos leves e pesados, por exemplo).

Este conceito mais simples (por sua vez, relacionado com variáveis que também afetam a brecha crítica) corresponde mais diretamente à idéia de exposição ao risco.

Tempo de exposição ao risco do movimento principal

O autor considera que os veículos do movimento principal estão sujeitos a um tempo de risco igual ao tempo necessário para parar de forma segura caso haja um veículo da transversal na área de conflito. E, depois, calcula a probabilidade de chegar um veículo da via transversal durante esse tempo. Esse raciocínio pode não ser considerado consistente, pois a parada é uma ação evasiva em si mesmo, portanto é uma reação a algum conflito concreto.

Pode ser julgado mais coerente considerar que esse tempo (de parada) é o tempo de exposição ao risco de um eventual veículo da via secundária que está executando a manobra. Isto é, haveria uma CO para o veículo da via secundária que esteja fazendo a travessia se houver a presença de um veículo da via principal a menos de 8,9 s de distância. Mas, neste caso, o risco é do veículo da via transversal e não o da via principal. Se a parada na via principal decorreria da presença do veículo secundário, haveria dupla contagem. O cálculo pela ótica da via principal seria uma alternativa que deveria produzir, sob hipóteses consistentes, resultados iguais (ou similares, ao menos).

No conceito inicialmente suposto, quem faz a manobra inicial deveria ser o veículo da via principal e não o veículo da via secundária (no método de TRAF-Safe, o veículo da via principal executa a ação de parar e não a manobra de cruzar a interseção).

Adotando a interpretação inicial de que quem faz a manobra é A, o tempo de exposição seria ainda mais reduzido e corresponderia ao tempo de passagem pela área de conflito, isto é,

$$t = \frac{W + L}{v} \quad (2.14)$$

onde:

W = largura da via secundária na interseção em m

L = largura do veículo em m

v = velocidade do veículo de A em m/s.

Note que uma chegada livre dependeria também de não haver fila de espera na aproximação secundária. As pré-condições poderiam, então, ser estabelecidas como uma chegada livre durante a passagem do veículo do fluxo principal pela interseção, adicionando a avaliação da probabilidade de ausência de fila no instante da chegada no fluxo secundário.

Mesmo dentro do raciocínio desenvolvido pelo autor, que julgamos equivocados, a idéia poderia ser melhorada. Sendo a brecha crítica do movimento da via secundária 7,0 s, estando o veículo a 8,9 s da interseção, quando este último chegar na área de conflito, o veículo da via transversal já terá completado a travessia, saindo da área de conflito da interseção.²⁰ A mesma

²⁰ Uma velocidade de 60 mph corresponde a 26,822 m/s = 96,6 km/h. Para $t = 8,9$ s, a desaceleração b e a distância percorrida antes de parar x_p , são, respectivamente (supondo um tempo de percepção e reação $\tau = 2$ s):

$$t_b = 8,9 - 2,0 = 6,9 \text{ s}$$

$$b = 26,822/6,9 = 3,89 \text{ m/s}^2$$

$$x_p = 26,822*2,0 + 26,822*6,9 - 3,89*6,9**2/2 = 146 \text{ m}$$

crítica poderia ser desenvolvida a partir do conceito alternativo de tempo de exposição ao conflito angular correspondente ao tempo de manobra para cruzar a interseção.

Para caracterizar melhor a possibilidade de conflito, a possível zona de exposição poderia estar situada a 7,0 s, que é a brecha crítica de C (em vez de 8,9 s), conforme mostra a Figura 2.12. Assim, se, no exato instante em que o veículo de A chega a uma distância da interseção equivalente a 7,0 s, chegasse na área da interseção um veículo da via transversal, poderia estar criada uma condição que pode gerar um conflito.

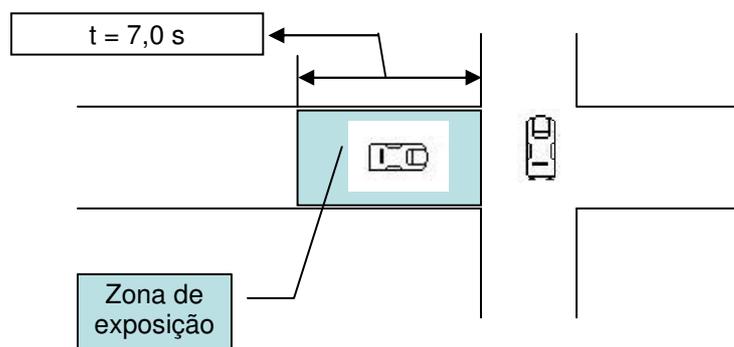


Figura 2.12 – Tempo de exposição da via principal igual à brecha crítica da via secundária

Note que o tempo de exposição passaria, então, a ser a brecha crítica (ou o tempo para cruzar a interseção), aproximando a estimativa do cálculo feito para o fluxo secundário.

COs com cada fluxo conflitante ou simultânea

Como foi assinalado anteriormente, quando o fluxo oposto da manobra secundária tem mais de um movimento, como A e B no exemplo para a manobra secundária C, em vez de proceder ao cálculo movimento a movimento: $C \times A$ e depois $C \times B$ por exemplo, poderia ser feito $C \times (A + B)$. Afinal, o movimento C, para avaliar a brecha, tem que avaliar o movimento A e o movimento B de forma simultânea, e não por etapas (primeiro o A e depois o B).

Em termos práticos, em vez de considerar:

Com $t = 8,9$ s, o veículo percorreu 146 m (mais de um quarteirão) antes de parar, ou seja, o veículo deve iniciar a desaceleração 146 m antes da interseção! Muito provavelmente, até o veículo parar, o veículo da via transversal já saiu da interseção, uma vez que a sua brecha crítica é de 7,0 s ($< 8,9$ s).

$$C \times A \rightarrow Q_C \cdot (1 - e^{-q_A t_C})$$

$$C \times B \rightarrow Q_C \cdot (1 - e^{-q_B t_C})$$

e obter o total

$$C \times A + C \times B \rightarrow Q_C \cdot (1 - e^{-q_A t_C}) + Q_C \cdot (1 - e^{-q_B t_C})$$

deveria ser considerado:

$$C \times (A + B) \rightarrow Q_C \cdot (1 - e^{-(q_A + q_B) t_C})$$

A seguir, é apresentado um quadro comparativo (Tabela 2.2) entre os resultados numéricos, que são distintos, obtidos dos dois métodos.

Tabela 2.3 – Quadro comparativo entre fluxos conflitantes agregados e não agregados

$C \times A + C \times B$	$C \times (A + B)$	%
68,0	59,1	- 13,1

A definição sobre o método correto decorre de observar que o método de TRAF-Safe está baseada na hipótese de que os eventos $C \times A$ e $C \times B$ são eventos mutuamente exclusivos, o que não é verdade, pois C pode “enfrentar” os veículos de A e de B de forma simultânea.

A hipótese de agregar os fluxos dos movimentos conflitantes é suportada por duas argumentações:

- a) O modelo de HAGRING (1998), para distribuição de Cowan (M3) em múltiplas faixas, quando simplificado para a distribuição exponencial (M1), onde as faixas múltiplas podem ser consideradas como faixas oriundas de diferentes direções, mostra a agregação dos fluxos²¹.

²¹ $F_H[h] = 1 - \frac{A}{Q} \prod_{i=1}^n \frac{q_i(1-\theta_i)}{\lambda_i} e^{-A(h-\tau)}$, $A = \sum \lambda_i$, $Q = \sum q_i$, $\lambda_i = \frac{\theta_i \cdot q_i}{1 - q_i \cdot \tau}$ onde: n = número de faixas

Se considerarmos que a distribuição M1 é um caso particular de M3, fazendo $\tau = 0$, $\theta_i = 0$, $\lambda_i = q_i$, a expressão de Hagrings então resume-se a: $F_H[h] = 1 - \prod_{i=1}^n e^{-q_i h} = 1 - e^{-(q_1 + q_2 + \dots + q_n)h}$, como esperado.

- b) Se houver dois movimentos conflitantes A e B, o procedimento de TRAF-Safe estaria correto se A e B estivessem na mesma faixa (ou vem veículo de A, ou vem veículo de B, nunca simultaneamente). Neste caso, A e B seriam mutuamente exclusivos e $P(A \cap B) = 0$. Entretanto, no exemplo da Figura 2.7 há duas faixas, portanto o cálculo do autor está equivocado quando não agrega os fluxos conflitantes.

Portanto, para mais de uma faixa, deve-se agregar os movimentos considerando a probabilidade de chegadas em ambas as faixas, conforme exposto abaixo:

$$\begin{aligned} P(A \cup B) &= P(A) + P(B) - P(A \cap B) = \\ &= (1 - e^{-q_A t}) + (1 - e^{-q_B t}) - (1 - e^{-q_A t})(1 - e^{-q_B t}) = 1 - e^{-(q_A + q_B)t} \end{aligned}$$

(obtendo-se a expressão correspondente à análise simultânea com o fluxo total)

Além disso, no caso de uma faixa, dever-se-ia considerar a probabilidade de o veículo que se aproxima ser do movimento A ou do B. No entanto, na chegada, os veículos de cada fluxo são indistinguíveis (apenas adiante da interseção define-se a trajetória de A ou de B).

A separação dos COs por fluxo conflitante somente seria justificada, portanto, se os eventos ocorressem em locais independentes da interseção (como o cruzamento, pela manobra considerada, de duas pistas distintas, separadas por um canteiro suficientemente largo).

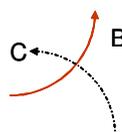
2.2.7.2 Análise do Método para Oportunidades de Conflito Traseiras

Da mesma forma que para oportunidades de conflito angulares, pode-se sugerir alguns aprimoramentos ao método proposto para estimar oportunidades de conflito traseiras do TRAF-Safe, desenvolvendo alguns dos pontos comentados anteriormente.

Cálculo de COs traseiros na via principal (R1)

A hipótese de que os movimentos A e B não estão sujeitos a COs traseiros, por serem prioritários e não sofrerem atraso, naturalmente não se transfere aos acidentes.

O algoritmo do TRAF-Safe corresponderia à simplificação ilustrada na Figura 2.13.



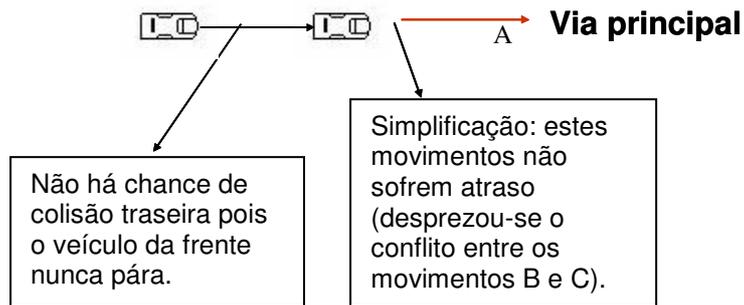


Figura 2.13 – Oportunidade de conflito traseiro na via principal pelo TRAF-Safe

Justamente, por serem movimentos que não param, qualquer parada será súbita, inesperada e repentina, gerando um conflito sério. É de se esperar que os conflitos traseiros na via principal sejam mais sérios que os conflitos traseiros na via secundária, devido à maior velocidade de aproximação. Na análise de conflitos de tráfego seguindo o método do U.S.FHWA, por exemplo, são pesquisados apenas os eventos em que o veículo principal realiza a manobra evasiva (em geral uma frenagem diante da manobra inicial dos veículos secundários).

O risco de colisão traseira decorreria de outra chegada no fluxo principal durante a manobra evasiva do primeiro veículo que reagiu à interferência inicial. Nos termos da análise de conflito de tráfego, seria um conflito secundário (o evento inicial seria o conflito primário). A Figura 2.14 ilustra a situação discutida.

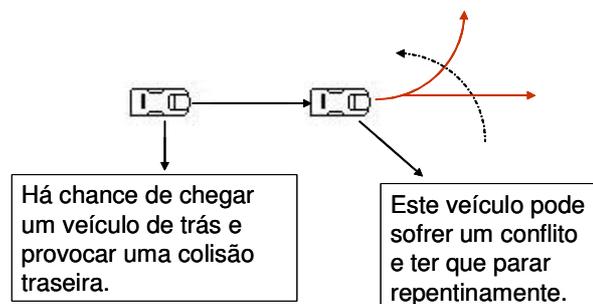


Figura 2.14 – Oportunidades de conflito traseiras na via principal

Este aspecto não invalida a formulação apresentada, desde que seja aceito que a relação entre tipos de acidentes e de oportunidades de conflito não é simples e direta, podendo haver colisões traseiras geradas por oportunidades de conflito angulares.

Se for desejado manter a relação simples e direta, parece forçoso alterar a hipótese do autor pois o potencial de colisão traseira efetivamente existe para os veículos da via principal

(embora seja realmente mais presente em interseções semaforizadas). Neste caso, o algoritmo deveria adicionar as COs secundárias geradas pelas interferências adiante.

Além disso, dos casos usuais, esta ponderação pode ser importante em casos específicos. A faixa da esquerda pode ter uma propensão maior de ocorrência de conflitos traseiros devido à desaceleração do veículo que quer fazer a conversão à esquerda. Como será visto adiante, outros trabalhos consideram este potencial de colisão traseira, conforme HA e BERG, (1995).

Cálculo de COs traseiras na via secundária (R2)

Considere o tempo de exposição com o atraso de Adams. Novamente, uma vez que a travessia não é feita por etapas, em vez de calcular as COs movimento por movimento, $(C \times A) + (C \times B)$, deveria ser feito $C \times (A + B)$. O veículo de C, que está parado, aguarda uma brecha no conjunto dos fluxos de A e B e não de uma forma separada. O correto seria agregar os fluxos de A e B. O tempo de espera para aguardar uma brecha no fluxo agregado $(A + B)$ é maior do que a soma dos tempos de espera devido a A e a B, de forma individual.

A seguir, é apresentado um quadro comparativo entre os resultados dos dois métodos.

Tabela 2.4 – Quadro comparativo de oportunidades de conflito traseiras com fluxo conflitante agregado e não agregado ($R2a + R2b$)

$C \times A + C \times B$	$C \times (A + B)$	%
10,3	11,3	+ 9,7

Parece desnecessário argumentar pela correção de adotar a análise simultânea, pelo menos quando a manobra não é realizada em etapas.

No entanto, a discussão adiante trará uma crítica mais importante ao critério adotado. Além do atraso de Adams não ser a expressão adequada para estimar o tempo de espera para as manobras secundárias, o tempo de espera não é a variável a ser considerada na estimativa do tempo de exposição para uma CO traseira. Admitindo apenas a exposição primária, o veículo fica exposto apenas durante o tempo em que é o último da fila (e não durante todo seu tempo de espera pela oportunidade de manobra). Uma melhor avaliação seria, portanto, justificada.

Como dito, para o autor, o tempo de exposição ao risco é o tempo de espera do veículo da frente (enquanto ele fica parado à espera de uma brecha). Esse tempo é calculado pela fórmula de atraso dada pela expressão de Adams.

Segundo COWAN (1984), Adams desenvolveu a fórmula da expressão (2.9) para estimar o atraso sofrido pelo pedestre antes de atravessar uma via. Como os pedestres atravessam em grupo (e não em fila), o atraso de Adams, para o caso veicular, corresponde à espera do veículo no topo da fila, e não o atraso total em fila. Naturalmente, qualquer outra expressão poderia ser usada em substituição. A expressão de Adams estima o atraso no topo da fila (não inclui o atraso em fila).

No entanto, somente o último veículo da fila fica exposto a uma colisão traseira e uma variável alternativa seria o tempo médio de espera como último veículo na fila. Se houver fila, o tempo de exposição é menor que o atraso de Adams, uma vez que cada chegada faz o veículo deixar de ser o último da fila. Portanto, outros critérios poderiam ser adotados também para o tempo de exposição.

2.2.7.3 Análise do Método para Oportunidades de Conflito – Outros Aspectos

Embora permita incorporar diversas características das interseções e do fluxo de tráfego, a análise apresentada parece omitir aspectos importantes para a segurança viária.

Por exemplo, as condições de visibilidade podem não ser boas em todas as aproximações de uma interseção. Ora, dificilmente, em condições de boa visibilidade à distância, um veículo da via secundária que se aproxima da interseção, ao ver um veículo parado à frente, vai provocar uma colisão traseira. Com exceção de causas anômalas como alcoolismo, drogas ou sonolência durante a direção, a probabilidade de ocorrer colisão traseira é bastante menor que no caso de um conflito angular ou de um conflito traseiro com visibilidade restrita. Portanto, parece necessário diferenciar a propensão a gerar acidentes e/ou aperfeiçoar a estimativa de frequência de oportunidades de conflito traseiras.

O critério adotado pelo TRAF-Safe se justificaria se nunca houvesse boas condições de visibilidade. Neste caso, o veículo de trás não vê o veículo da frente a uma distância

adequada. Então, o tempo em que o veículo da frente ficar parado é o tempo de exposição ao risco, por exemplo, após uma curva, conforme ilustrado na Figura 2.15.

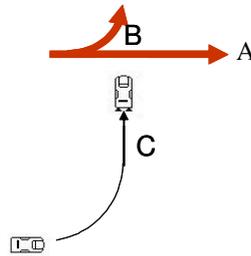


Figura 2.15 – Falta de visibilidade devido à curva

No entanto, outros casos poderiam ocorrer, como veículos chegando com curto intervalo e freando simultaneamente após um diferencial de tempo de decisão ou atuação. A obstrução de visibilidade poderia ocorrer em qualquer ponto em que a fila de espera ou as manobras de frenagem mencionadas estivessem presentes.

O mesmo comentário aplica-se também às COs angulares (apenas são distintos os fatores que geram obstrução de visibilidade). Ponderando a possibilidade de conflitos secundários, os fatores anteriormente mencionados novamente estariam presentes.

Salvo restrições desta natureza, o potencial de acidentes teria de decorrer de fatores que justificassem erros de percepção, avaliação, decisão ou manobra por parte dos condutores.

A importância destes aspectos é bastante grande. Portanto, seu efeito teria de ser incorporado de uma ou outra maneira para que os resultados da análise fossem válidos.

A crítica não deve, necessariamente, ser dirigida aos modelos de estimativas das COs. Em qualquer formulação, deve-se esperar que uma série de fatores residuais possa ter um efeito importante em um ou outro contexto específico. Um método prático teria de ter critérios complementares que permitissem ajustá-lo com facilidade a problemas práticos diversos, em geral através de fatores de correção empíricos. Por exemplo, os modelos de COs/acidentes podem ser ajustados a variáveis específicas (a visibilidade, assim como a velocidade).

2.3 ANÁLISE DE FORMULAÇÕES DE OUTROS ESTUDOS

Esta seção tem como objetivo apresentar e analisar estudos e formulações de outros autores, bem como aspectos complementares não tratados pelo TRAF-Safe, no que diz respeito aos modelos de estimativa da frequência de oportunidades de conflito angulares e traseiras, inclusive envolvendo pedestres, em interseções semaforizadas.

Os trabalhos analisados são:

- a) Seção 2.3.1 – HA e BERG (1995) “*Development of Safety-Based Level-of-Service Criteria for Isolated Signalized Intersections*”
- b) Seção 2.3.2 – ZHANG e PREVEDOUROS (2003) “*Signalized Intersection Level of Service Incorporating Safety Risk*”

Esses trabalhos estão analisados a seguir, no que se refere às oportunidades de conflito angulares e traseiras em interseções, que são o objeto do presente estudo. A seção final deste item faz uma análise crítica da contribuição destes novos estudos.

2.3.1 As Formulações de HA e BERG (1995) Para Veículos em Interseções Semaforizadas

O estudo de HA e BERG (1995) trata das oportunidades de conflito angulares e traseiras em interseções semaforizadas. As oportunidades de conflito angulares consideradas são geradas por movimentos de conversão à esquerda contra um movimento oposto, cujo modelo inspirou o trabalho de ZHANG e PREVEDOUROS (2003) (ver adiante). Assim como ZHANG e PREVEDOUROS (2003), o estudo também não trata do período de entreverdes e não detalha a análise de movimentos protegidos no semáforo (isto é, aqueles que operam sem fluxo oposto conflitante ou com prioridade em relação aos fluxos conflitantes simultâneos).

2.3.1.1 Modelo de Oportunidades de Conflito Angulares (Conversão à Esquerda Permitida)

As oportunidades de conflito envolvendo veículos virando à esquerda são o resultado da exposição ao risco devido à chegada de veículos do movimento oposto durante a manobra da conversão. Segundo os autores, há dois possíveis cenários para a chegada de veículos da conversão à esquerda:

1 – O veículo da conversão à esquerda, quando chega, já encontra um *lag* adequado e consegue completar a manobra sem precisar parar totalmente o veículo.

2 – O veículo da conversão à esquerda quando chega, não encontra um *lag* adequado e precisa desacelerar e, eventualmente, parar na interseção.

No primeiro caso, não há oportunidades de conflito.

No segundo caso, para que haja oportunidades de conflito é necessário que estejam presentes duas condições:

- a) chegar veículo de conversão à esquerda
- b) não haver brechas adequadas no fluxo do movimento oposto

Para os autores, brechas muito pequenas são rejeitadas pelos condutores, não apresentando risco e brechas muito grandes não representam perigo para a manobra. O problema seria identificar uma faixa de brechas que podem produzir oportunidades de conflito.

Pesquisas sobre aceitação de brechas, referidas pelos autores, indicam que uma brecha típica aceita pelos condutores para a manobra de conversão à esquerda tem uma média de 4 a 5 segundos e um desvio padrão de aproximadamente dois segundos. Assim, assume-se que a faixa de brechas que podem criar oportunidades de conflito seria o tempo de travessia ± 2 segundos, para refletir o desvio padrão das brechas aceitas. O tempo de cruzamento depende da largura da via destinado ao movimento oposto, da aceleração e do comprimento dos veículos. Portanto, apenas alguns poucos parâmetros precisam ser definidos e estimados para o desenvolvimento de um modelo de oportunidades de conflito.

O primeiro parâmetro é o tempo de cruzamento. A Figura 2.16 mostra a trajetória típica de uma conversão à esquerda, bem como as várias características geométricas da interseção.

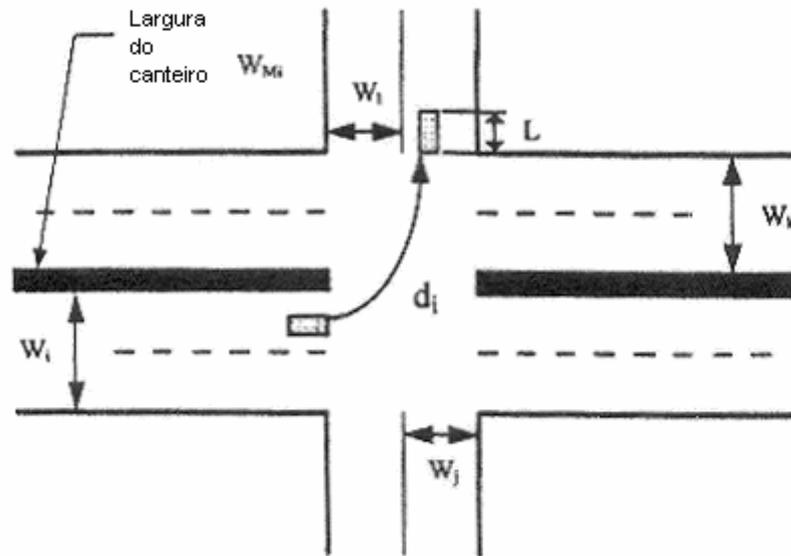


Figura 2.16 – Trajetória do movimento de conversão à esquerda

Com hipótese de aceleração constante, os autores indicam que o tempo de cruzamento para um veículo de comprimento L (valor típico de 6,7 m) pode ser calculado como:

$$t_i = \sqrt{\frac{2 \cdot (d_i + L)}{a}} \quad (2.15)$$

onde, admitindo trajeto circular e cruzamento em ângulo reto, a distância a ser vencida seria

$$d_i = \frac{\pi}{2} \cdot \left(W_K + W_{Mi} + \frac{W_i}{2 \cdot N_i} \right) \quad (2.16)$$

sendo que

a = aceleração em m/s^2

W_K = largura total da aproximação K em m

W_{Mi} = largura do canteiro central da aproximação i em m

W_i = largura total da aproximação i em m

N_i = número de faixas da aproximação i .

Dependendo da situação ou do momento em que o veículo da conversão à esquerda chega, ele pode fazer a manobra a partir de uma posição estacionária ou não. No modelo, é admitido que todos os veículos fazem a manobra a partir do repouso. Também é suposto que a aceleração a

é $1,3 \text{ m/s}^2$ (ou $4,64 \text{ km/h/seg}$), consistente com os valores usados no cálculo de distâncias de visibilidade de parada. A expressão para distância a ser vencida parece assumir um raio de curva dado por $\left(W_K + W_{Mi} + \frac{W_i}{2.N_i} \right)$, o que não decorre da situação apresentada. Sua expressão foi aprimorada pelo estudo posterior de ZHANG e PREVEDOUROS (2003).

Os autores ainda adicionam o tempo de percepção e reação. Se o tempo de travessia é t_i , o tempo total da manobra é de $t_i + 2$ (assumindo um tempo de percepção e reação de dois segundos). Então, qualquer veículo do movimento oposto que chega com intervalo entre $[(t_i + 2) - 2]$ e $[(t_i + 2) + 2]$ será contado como uma oportunidade de conflito. Qualquer intervalo menor que t_i e maior que $t_i + 4$ não será considerado no cálculo de oportunidades de conflito. A adição do tempo de reação é, naturalmente, discutível e, aparentemente, arbitrária.

O modelo utiliza, então, a distribuição exponencial negativa para estimar a probabilidade de um intervalo entre t_i e $t_i + 4$.

$$P[t_i \leq h \leq t_i + 4] = e^{-N_K \lambda t_i} - e^{-N_K \lambda (t_i + 4)} \quad (2.17)$$

onde:

$$\lambda = \frac{q_k}{3600 N_K} \quad (2.18)$$

sendo que:

q_k = fluxo total do movimento oposto da aproximação K em v/s
 N_K = número de faixas do movimento oposto.

O número total de oportunidades de conflito será:

$$CO_{LT}(\text{angular})/h = Q_{LT} . P \quad (2.19)$$

onde P é dada pela expressão (2.17) e Q_{LT} é o volume de veículos da conversão à esquerda.

O trabalho de HA e BERG (1995) não é explícito quanto a analisar as variações no fluxo das aproximações ao longo do ciclo, embora apresente um esquema com a usual divisão do verde em dissipação da fila oposta e verde útil para as conversões permitidas. Para os fluxos veiculares, considerando que as oportunidades de conflito ocorrem apenas durante o verde útil para as conversões permitidas, as variações seriam realmente irrelevantes (pois as condições do fluxo oposto retornam aos valores médios de chegada).

Outros tipos de oportunidades de conflito angulares não são mencionados e seriam os tipos normalmente eliminados ou minorados com a implantação de semáforos. Um julgamento extremo, mas plausível, seria supor que os autores consideram que sua frequência seria nula.

2.3.1.2 Modelo para Oportunidades de Conflito Traseiras

O modelo assume chegadas uniformes. O ciclo é dividido em 3 períodos:

- 1 – durante o período de vermelho
- 2 – durante a dissipação de fila
- 3 – durante o resto do verde

Cada um destes períodos é distinguido explicitamente pelos autores e será apresentado a seguir.

Durante o período de vermelho

Durante o período de vermelho, todos os veículos são forçados a parar. A desaceleração dos veículos que param podem gerar conflitos com os veículos de trás. Portanto, numa faixa, com exceção do primeiro, todos os veículos que chegam durante a formação de fila sofre exposição a risco de conflito traseiro. A estimativa de frequência por hora é:

$$CO(traseira) / h = \frac{3600}{T_c} (q.R - 1) \quad (2.20)$$

q = fluxo em v/s

R = tempo de vermelho em s

T_c = ciclo em s

A parcela “- 1” corresponderia a retirar o primeiro veículo da fila. Neste caso, estaria sendo adotada a visão do veículo que chega (e não daquele que espera). Na visão do veículo que espera, até o último veículo que pára tem o risco de uma colisão traseira.

Durante o período de dissipação de fila

Enquanto a fila se dissipa com o fluxo de saturação s , os novos veículos que chegam ao final da fila são forçados a desacelerar até que a fila tenha se escoado por completo. Esses veículos irão se juntar ao final da fila existente. Cada um desses veículos está exposto ao risco de conflito traseiro. A estimativa de frequência por hora é:

$$CO(traseira)/h = \frac{3600}{T_c} (s.G_q - q.R) \quad (2.21)$$

s = fluxo de saturação em v/s

R = tempo de vermelho em s

G_q = tempo de dissipação de fila em s

A expressão (2.21) não é deduzida pelos autores. A estimativa mais simples e imediata seria $q \times G_q$ por ciclo mas, como o fluxo escoado $s \times G_q$ é igual à fila inicial $q \times R$ mais as chegadas durante a dissipação da fila $q \times G_q$, tem-se que $q \times R + q \times G_q = s \times G_q$ ou $s \times G_q - q \times R$ (a forma usada acima). Note que, somando (2.20) e (2.21), obtém-se $\frac{3600}{T_c} (s.G_q - 1)$,

onde G_q é o tempo de dissipação da fila, calculado pela expressão simplificada $G_q = \frac{q.R}{s - q}$,

que admite fluxo de chegadas uniforme ao longo do ciclo. Um modelo de chegadas mais geral e as expressões correspondentes poderiam ser obtidas no HCM/2000, por exemplo.

Durante o resto do verde

Os veículos que chegam durante este período somente estarão expostos a conflito traseiro se o veículo da frente desacelerar para fazer manobras de conversão (à esquerda ou à direita).

$$CO(traseira)/h = Q \cdot \frac{G_u}{T_c} \cdot (P_{LT} + P_{RT}) \quad (2.22)$$

q = fluxo da faixa em v/s

$$G_u = G - G_q$$

P_{LT} e P_{RT} = porcentagens de conversão à esquerda e à direita, respectivamente.

Note que a expressão não pondera o diferencial de velocidade entre os veículos que seguem direto e os que realizam as conversões (que reduziriam a velocidade e gerariam o risco de colisões traseiras) e a probabilidade da chegada de veículos conflitantes (diretos). Este aspecto será retomado na análise adiante.

O total de oportunidades de conflito traseiras corresponde, naturalmente, à soma dos 3 termos. Note que os dois primeiros termos poderiam ser usados de forma geral em aproximações semaforizadas, pois nenhuma particularidade se refere às conversões à esquerda permitidas. O terceiro termo, inclui conversões à direita e também não se limita às conversões à esquerda permitidas. Com as correções devidas, seria novamente aplicável de forma mais geral.

2.3.2 As Formulações de ZHANG e PREVEDOUROS (2003) para Veículos e Pedestres contra Conversões à Esquerda Permitidas

O estudo de ZHANG e PREVEDOUROS (2003) trata de estimativa de oportunidades de conflito em interseções semaforizadas, aplicadas a conversões à esquerda permitidas (não protegidas) entre os veículos da conversão à esquerda e os veículos do fluxo oposto, bem como daqueles com pedestres, conforme ilustra a Figura 2.17.

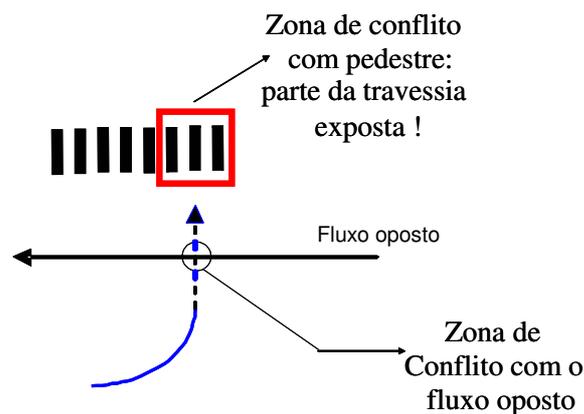


Figura 2.17 – Conversão à esquerda, fluxo oposto e pedestres

O estudo não analisa as oportunidades de conflito traseiras. Esta análise não poderia ser negligenciada, mesmo sem introduzir considerações peculiares, porque a alteração dos tempos de ciclo e a decorrente mudança nas filas e atrasos trazem impactos nas oportunidades de

conflito traseiras. A justificativa eventual seria ponderar que as oportunidades de conflito angulares são mais graves, em termos gerais, tanto na propensão a gerar acidentes quanto na gravidade usual dos acidentes gerados. Não há, no entanto, qualquer consideração a respeito.

2.3.2.1 Oportunidades de Conflito Veiculares (Entre a Conversão à Esquerda e o Fluxo Oposto)

A idéia básica é, novamente, dividir o ciclo semafórico em períodos característicos e estimar as oportunidades de conflito para cada um desses períodos.

Sob o ponto de vista do usuário da conversão à esquerda, o ciclo semafórico foi dividido pelos autores nos seguintes períodos:

- R = tempo de vermelho – não há conflitos neste período pois os veículos estão parados.
- G_f = tempo entre o início do verde e a chegada do primeiro veículo que deseja fazer a conversão à esquerda – também não há conflitos pois não há veículos fazendo a conversão
- G_{qo} = tempo de dissipação da fila do fluxo oposto – também não há conflitos pois não há brechas para a manobra de conversão
- G_{uo} = tempo de verde restante após a dissipação da fila do fluxo oposto – pode haver conflitos

O período G_{uo} é dado pela expressão

$$G_{uo} = \begin{cases} G - G_{qo} & \text{se } G_{qo} \geq G_f \\ G - G_f & \text{se } G_{qo} < G_f \end{cases} \quad (2.23)$$

onde G é o tempo de verde da conversão à esquerda.

Os autores não demonstram o cálculo de G_{qo} , G_f e G_{uo} . Existem fórmulas usuais para estas variáveis em diversas fontes.

O termo G_{qo} é o tempo de dissipação de fila do fluxo oposto. Pode ser calculado, de forma determinística, por meio da Figura 2.18 como

$$G_{qo} = \frac{q_o \cdot R}{S_o - q_o} \quad (2.24)$$

onde:

q_o = volume do fluxo oposto

S_o = fluxo de saturação do fluxo oposto.

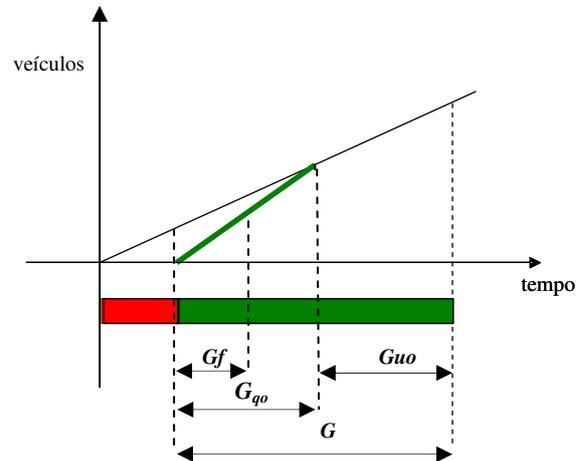


Figura 2.18 – Determinação de G_{qo}

O termo G_f é o tempo até chegar o primeiro veículo da conversão à esquerda. A estimativa usual, na situação esquematizada pela Figura 2.19, pode ser obtida como

$$G_f = \frac{(1-q)}{S_a \cdot q} \cdot (1 - (1-q)^m) \quad (2.25)$$

onde

$$m = S_a \times G$$

sendo

G = tempo de verde de B

G_f = tempo médio medido do início de verde de A até chegar um veículo que quer fazer a conversão à esquerda

S_a = fluxo de saturação do movimento A

q = proporção de fluxo de conversão

$p = 1 - q$ = proporção do fluxo que segue em frente

m = número máximo de veículos que seguem em frente (A)

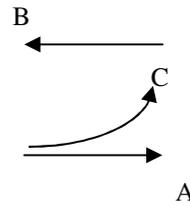


Figura 2.19 – Desenho ilustrativo dos movimentos

Na espera da brecha, o veículo que quer fazer a conversão à esquerda (C) pode bloquear um veículo que quer seguir em frente (A), ao esperar uma brecha no fluxo oposto (B).

As estimativas de G_{qo} (tempo de dissipação de fila do fluxo oposto) e de G_f (tempo até o primeiro veículo de conversão à esquerda) também podem ser obtidas pelas fórmulas do HCM/2000 (entre outras ...).

No período G_{uo} , admite-se que a distribuição de chegada de veículos do fluxo oposto seja uma distribuição de Poisson, com a diferença de que ZHANG e PREVEDOUROS (2003) utilizam o tempo de cruzamento T (em vez de brecha crítica) e intervalos entre $T - 2$ s e $T + 2$ s. A idéia é, novamente, que para intervalos de tempo menores que $T - 2$ s não há conflitos pois as brechas são tão pequenas que as mesmas são rejeitadas pelos condutores. Por outro lado, brechas maiores que $T + 2$ s são suficientemente grandes para que a manobra não ofereça risco. Assim, somente haveria conflito potencial para intervalos $T - 2 \text{ s} < H < T + 2 \text{ s}$ ²² com

$$P[T - 2 \leq H \leq T + 2] = e^{-qo(T-2)} - e^{-qo(T+2)} \quad (2.26)$$

onde:

$$T = t + \delta \quad (2.27)$$

sendo:

t = tempo de travessia

δ = tempo de percepção e reação.

²² Zhang & Prevedouros não especificam o critério de ter adotado a faixa ± 2 . Ha & Berg também adotam a faixa ± 2 s, especificando, entretanto, que 2 s é o desvio padrão da brecha aceita obtida por outros pesquisadores.

O tempo de cruzamento t é expresso por

$$t = \sqrt{\frac{2(d + L)}{a}} \quad (2.28)$$

onde

$$d = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{W_{in}^2 + W_{out}^2}{2}} \quad (2.29)$$

$$W_{in} = W_o + W_m + \frac{W_i}{2.N_i} \quad \text{e} \quad W_{out} = W_{it} + W_{mt} + \frac{W_{ot}}{2.N_{ot}} \quad (2.30)$$

sendo

d = distância a ser percorrida em m

t = tempo gasto para percorrer (tempo de travessia) em s

L = comprimento do veículo em m

a = aceleração (a partir do repouso – posição estacionária) = 1,341 m/s²

A Figura 2.20 mostra os elementos necessários para o cálculo de t , tais como os raios de entrada e de saída W_{in} e W_{out} . Note a diferença em relação a HA e BERG (1995).

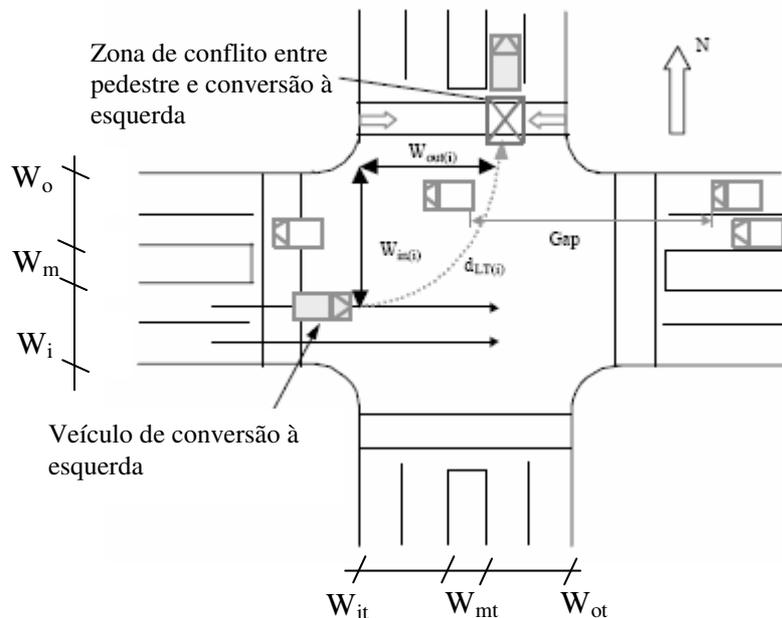


Figura 2.20 – Conflito potencial entre veículos de conversão à esquerda com veículos do fluxo oposto e com pedestres

Como HA e BERG (1995), os autores também consideram o movimento a partir do repouso – posição estacionária – e adotam aceleração $a = 1,341 \text{ m/s}^2$ (ou $4,83 \text{ km/h/seg}$).

As oportunidades de conflito entre veículos da conversão à esquerda (LT) e os veículos do fluxo oposto (OT) (e vice-versa), segundo os autores, são calculadas pela expressão:

$$CO_{LT} = CO_{OT} = \begin{cases} Q_{LT} \times P & \text{se } Q_{LT} \leq Q_{OT_Gu} \\ Q_{OT_Gu} \times P & \text{se } Q_{LT} > Q_{OT_Gu} \end{cases} \quad (2.31)$$

onde:

Q_{LT} = fluxo de conversão à esquerda em v/h

Q_{OT_Gu} = fluxo oposto no período G_u em v/h

P = probabilidade de haver intervalos entre $(T - 2)$ e $(T + 2)$, dada pela expressão (2.26).

Os autores parecem sugerir que esta comparação seja feita em número de veículos (não em fluxo). No entanto, em uma ou outra forma, apenas a primeira fórmula faria sentido (por descrever chegadas conflitantes durante conversões à esquerda).

Os autores podem ter preocupações com estimativas que superem o número de veículos do fluxo oposto no mesmo período, o que poderia parecer um contra-senso (a menos que se admita que um mesmo veículo do fluxo oposto conflite com mais de um veículo da conversão à esquerda), mas a justificativa para esta forma de correção não é exposta (se o fluxo oposto é baixo, a probabilidade P deveria garantir um número de oportunidades de conflito baixo).

O total de oportunidades de conflito veiculares é, na suposição dos autores, dado por:

$$CO_v = CO_{LT} + CO_{OT} \quad (2.32)$$

onde:

CO_v = total esperado de veículos afetados por conflitos potenciais

CO_{LT} = número de veículos da conversão à esquerda afetados por conflitos potenciais

CO_{OT} = número de veículos do fluxo oposto afetado por conflitos potenciais

Uma outra forma de interpretar as expressões (2.31) e (2.32) é que o conceito adotado pelos autores parece ser que cada oportunidade de conflito é um evento envolvendo um par de veículos (um veículo da conversão à esquerda e um veículo do fluxo oposto), sendo que os veículos excedentes não enfrentariam conflitos (por “falta de veículos conflitantes”), entendendo-se como “veículos excedentes” a diferença $|Q_{LT} - Q_{OT_Gu}|$. Não há, no entanto, nenhuma justificativa ou elaboração desta visão alternativa. Outro aspecto polêmico da formulação apresentada, que corresponde a considerar a oportunidade de conflito como recíproca (LT e OT, que são supostas iguais), seria decorrente. Mas, então, a suposição de que a frequência recíproca é igual duplica a estimativa.

A discussão aponta, de qualquer forma, para uma potencial deficiência do método do TRAF-Safe: o enfoque probabilístico não garante que a estimativa seja menor que o total de veículos conflitantes (apesar de ser menor que o total de manobras expostas ao risco, dado que a probabilidade de uma chegada conflitante é sempre menor que 1). Do ponto de vista prático, incorporar esta restrição é provavelmente desnecessário porque será normalmente satisfeita (não foi violada em nenhum dos casos analisados por KAUB, 2005, por exemplo).

2.3.2.2 Oportunidades de Conflito com Pedestres (Veículos da Conversão à Esquerda Contra Pedestres)

A Figura 2.21 mostra um desenho esquemático do conflito entre veículos da conversão à esquerda com pedestres.

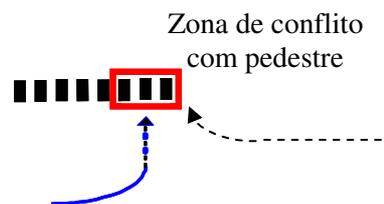


Figura 2.21 – Conflito entre conversão à esquerda e pedestres

É importante observar que o estudo menciona tempo de verde de pedestres (portanto, a travessia de pedestres dispõe de focos de pedestres), embora travessias com fluxos veiculares conflitantes simultâneos possam não receber focos de pedestres.²³

²³ Em São Paulo, as travessias não protegidas não possuem focos de pedestres. Contudo, pode-se pensar num tempo de verde de pedestres equivalente no estágio veicular paralelo à travessia. Esta questão é, no entanto,

Uma outra observação é que o estudo trata exclusivamente do conflito entre os veículos da conversão à esquerda com pedestres, ignorando o conflito da conversão à direita com os mesmos pedestres. Este aspecto provavelmente decorre do interesse específico dos autores na análise do tratamento semafórico das conversões à esquerda, sem eliminar a possibilidade de aplicar formulações similares em outros casos.

O ciclo semafórico é dividido nos seguintes períodos:

- R = vermelho para a conversão à esquerda – não há conflitos entre veículos da conversão à esquerda com pedestres
- G_q = dissipação da fila do fluxo oposto – também não há conflitos entre veículos da conversão à esquerda com pedestres, pois não há brechas para os veículos fazerem a manobra de conversão (o fluxo oposto serve como uma barreira de proteção ao pedestre).
- G_u = restante do verde, após a dissipação da fila do fluxo oposto, pode haver conflitos entre veículos da conversão à esquerda com pedestres

A dificuldade específica da avaliação da exposição dos pedestres decorre do fato de que as travessias de pedestres normalmente ocorrem em grupos e se superpõem (isto é, ocorrem lado a lado). Em função disto, os autores recorrem ao modelo “volume-ocupância” de Milazzo (obtido de dados empíricos e utilizado também no HCM/2000).

Ocupância: Modelo de Milazzo

O modelo de ocupância de MILAZZO (1998) foi elaborado para estimar a interferência que os pedestres causam na capacidade da interseção. Aqui, está sendo usado para estimar as oportunidades de conflito entre veículos e pedestres.

Em interseções semaforizadas, a expressão calibrada empiricamente por Milazzo é

$$OCC_{pedg} = \begin{cases} Q_{pedg} / 2000 & \text{se } Q_{pedg} \leq 1000 \\ Q_{pedg} / 10000 + 0,4 & \text{se } Q_{pedg} > 1000 \end{cases} \quad (2.33)$$

onde

relevante apenas quando os estágios protegidos tem a hipótese de oportunidades de conflito nulas. Caso contrário, a mesma formulação seria aplicada aos demais estágios, com fluxos conflitantes distintos.

OCC_{pedg} = “ocupância de pedestre” média na zona de conflito durante o verde do pedestre
 Q_{pedg} = volume de pedestre (p/h) durante o verde de pedestre

sendo

$$Q_{pedg} = Q_{ped} \cdot \frac{C}{G_p} \quad (2.34)$$

Q_{ped} = fluxo de pedestre conflitante em ped/h ($Q_{pedg} \leq 5000$)

G_p = verde de pedestres

(que converte o fluxo médio de pedestres para o observado no tempo de verde, admitindo que os pedestres que chegam durante o vermelho aguardam para realizar a travessia no verde).

Ocupância após o período de dissipação de fila do fluxo oposto (verde útil)

Como as conversões à esquerda ocorrem no verde útil (e não em todo o verde), a ocupância após o período de dissipação de fila do fluxo oposto, segundo Milazzo, é:

$$OCC_{pedu} = OCC_{pedg} \left(1 - 0,5 \frac{G_q}{G_p} \right) \text{ se } G_q < G_p \quad (2.35)$$

sendo

OCC_{pedu} = ocupância média de pedestre da zona de conflito após a dissipação da fila do fluxo oposto

G_q = porção do tempo de verde de pedestre durante o tempo de dissipação de fila do fluxo oposto

G_p = tempo de verde do pedestre

onde o fator 0,5 da expressão é um fator calibrado empiricamente e a condição $G_q < G_p$ identifica a situação em que há verde útil (caso contrário, todos os pedestres atravessariam protegidos pelo fluxo oposto da conversão, que ocorreria somente no entreverdes).

Ocupância dos Pedestres com Conflito Provável

Esta ocupância da travessia de pedestres no período com conversões permitidas seria a medida de probabilidade da oportunidade de conflito (o Conflito Provável) na condição de ser possível a conversão à esquerda permitida, tendo-se:

$$OCC_r = OCC_{pedu} \times P_r \quad (2.36)$$

onde

OCC_r = ocupância média de pedestre da zona de conflito (na terminologia usada pelos autores), no período sem a proteção do fluxo oposto, e com a conversão permitida possível
 P_r = probabilidade de haver uma brecha para conversão contra o fluxo oposto (maior que $t_0 - 2$ s)

sendo

$$P_r = e^{-q_0 \cdot (t_0 - 2)} \quad (2.37)$$

t_0 = brecha crítica na conversão à esquerda

q_0 = volume do fluxo oposto

Esta expressão, proposta por MILAZZO *et alli* (1998) e adotada por ZHANG e PREVEDOUROS (2003), não representa uma ocupância propriamente dita. A probabilidade da brecha não é suficiente para que haja conversão (deve haver o veículo também).

Conflitos Prováveis para Pedestres

Segundo os autores, a frequência de oportunidades de conflito (Conflitos Prováveis) para pedestres é:

$$CO_{ped} = Q_{ped} \times OCC_r \quad (2.38)$$

onde

CO_{ped} = número de pedestres afetados por conflitos potenciais devido aos veículos da conversão à esquerda

Q_{ped} = fluxo de pedestres conflitantes em v/h.

Nos conflitos de pedestres, os autores consideram apenas os conflitos do ponto de vista do pedestre e são calculadas apenas as COs decorrentes da manobra de conversão à esquerda, que estariam ameaçando transgredir a preferência do pedestre, a menos de existir um semáforo de pedestre e estes estarem atravessando no seu período de vermelho. Como não há menção ao comportamento transgressor de veículos ou de pedestres, admite-se que os autores estejam assumindo o comportamento regular no verde do pedestre com conversão à esquerda permitida.

Mesmo admitindo a lógica apresentada, os autores parecem assumir que as conversões estarão sempre presentes quando houver uma brecha aceitável, ao invés de estimar uma probabilidade de chegada conflitante. Havendo fila de espera para conversão, o que torna imprópria uma hipótese de chegadas aleatórias, a probabilidade poderia ser suposta como igual a 1 mas seria necessário verificar a existência de demanda simultânea de conversões (isto é, de fila).

O tratamento não é totalmente consistente. A fórmula final (2.38) sugere a análise convencional baseada na exposição de cada pedestre. Deixa de distinguir os períodos de travessia e usa o fluxo total e não apenas o que ocorre no verde útil das conversões à esquerda (como decorre da análise baseada no modelo de MILLAZO *et alli*, 1998). A presença do pedestre é medida na zona de conflito pela ocupância e combinada com a probabilidade de também a manobra de conversão ser possível. Entendendo a ocupância como a probabilidade de ter um pedestre na travessia durante o período considerado, esta seria a probabilidade de ter este evento e simultaneamente a brecha para conversões à esquerda, se forem independentes. No entanto, no esquema baseado na exposição do pedestre, a probabilidade relevante seria apenas a de ter uma chegada conflitante de conversão à esquerda (eventualmente no verde útil). A ocupância seria a medida relevante de probabilidade se a CO fosse estimada invertendo a lógica tradicional, estimando a probabilidade de uma interferência de pedestres diante de uma manobra de conversão à esquerda (durante o verde útil ou no entreverdes). Além disso, a expressão (2.38) parece ser contra-intuitiva pois independe do fluxo veicular conflitante ao pedestre, no caso, o fluxo de conversão à esquerda permitida.

Analisando mais detidamente, vê-se que a presença dos pedestres está representada na ocupância e não precisaria ser repetida no número de manobras. A exposição dos autores pode ser mais adequadamente entendida, portanto, como uma análise do ponto de vista da conversão à esquerda e o número de manobras relevante na fórmula (2.38) seria o de conversões permitidas, sendo a probabilidade de interferência dada por OCC_{pedu} (sem incluir o termo relacionado com a existência de uma brecha aceitável). A utilização da probabilidade de não haver veículo no fluxo oposto seria desnecessária porque a realização da manobra pressupõe esta circunstância.

Tem-se, então, um exemplo de análise do ponto de vista do veículo que chega diante de uma interferência (aliás, a análise de MILAZZO (1998) teve exatamente este ponto de vista).

2.3.3 Análise Crítica das Contribuições dos Outros Estudos

Embora aparentemente similares, existem diversos pontos em que os estudos adicionados nestes itens diferem do procedimento adotado no TRAF-Safe. Em alguns pontos, as diferenças representam aprimoramentos importantes.

Em outros pontos, mesmo quando adotam uma opção interessante, existem deficiências que ainda é importante notar e superar. Estes são os pontos a serem registrados na discussão feita a seguir.

Análise Distinguindo os Períodos de Operação no Semáforo

A análise para estimativa de oportunidades de conflito a partir da diferenciação dos períodos de operação semafórica é um ponto importante da análise de HA e BERG (1995). A mesma estratégia foi mantida por ZHANG e PREVEDOUROS (2003).

A única crítica que se pode fazer a esta opção em HA e BERG (1995) é que, pelo método proposto, não há nenhuma relevância em distinguir o período de vermelho do período de dissipação da fila na estimativa das oportunidades de conflito traseiras, podendo se agregar os dois períodos (uma vez que o tratamento é idêntico). O tratamento em separado dos dois períodos pode gerar valores negativos para o número de COs traseiras durante o período de vermelho em situações de baixo fluxo devido à parcela “- 1” da expressão (2.20). Agregando-se os dois períodos, o número de COs traseiras por ciclo nesses dois períodos é simplesmente o número total de veículos que param (exceto o primeiro), isto é: $s \times G_q - 1$. Em geral, a parcela “- 1” pode ser dispensada, considerando que está sendo avaliado o risco do ponto de vista de quem pára.

Da mesma forma, deve-se entender que a análise de ZHANG e PREVEDOUROS (2003) para as oportunidades de conflito com pedestres deveria ser aplicada apenas às travessias realizadas durante o verde útil (que é uma fração do fluxo de pedestres totais). Em relação a esta análise, no entanto, existem outros comentários relevantes, feitos adiante.

Alternativas para Estimar Oportunidades de Conflito Traseiras

Fazendo-se uma comparação entre o método de TRAF-Safe (transposta para a situação com semáforo) e o método de HA e BERG (1995) para a previsão das oportunidades de conflito traseiras, pode-se tecer as seguintes considerações iniciais:

- a) O método de TRAF-Safe não considera que conversões normais possam gerar COs traseiras (apenas as paradas seriam consideradas).
- b) Na transposição para semáforo, o método de TRAF-Safe poderia ser aplicado avaliando a probabilidade de uma chegada conflitante durante o atraso médio no semáforo, ao invés de calcular as chegadas para o período de vermelho e dissipação de fila como sendo diretamente o total de oportunidades de conflito traseiras.
- c) No método de TRAF-Safe, pode-se exprimir o número de COs traseiras como sendo o produto do fluxo q pela probabilidade p de chegar um veículo durante o tempo de espera médio com uma distribuição de Poisson, enquanto que o método de HA e BERG (1995) pode-se estimar o número de COs traseiras como sendo o produto do fluxo q pela probabilidade p de um veículo parar (que é a proporção de veículos que pára, considerando-se apenas os períodos de vermelho e de dissipação de fila).
- d) Para fluxos altos, o valor de ambas as probabilidades p (distintas) é praticamente igual a 1 em ambos os casos, fazendo com que o número de COs traseiras seja igual ao fluxo total de veículos q , o que conduz a valores similares.
- e) Para fluxos médios e baixos, os valores resultantes da estimativa pelos dois métodos vão depender da relação entre o valor das distintas probabilidades p (a probabilidade de uma chegada conflitante durante o atraso médio e a proporção dos veículos que param em relação ao fluxo total).
- f) Alternativamente, o método de HA e BERG (1995) pode ser entendido como aplicado ao período da operação semaforica em que os veículos param (o vermelho mais a dissipação da fila em cada ciclo) e afeta apenas as chegadas que ocorrem nesta parte do ciclo semaforico. A probabilidade de chegada conflitante seria 1, exceto para o último veículo da fila (retirado pela parcela “- 1”), de forma condizente com o uso das expressões determinísticas para estimar o tempo de dissipação da fila.
- g) Aplicando o método do TRAF-Safe neste período em que os veículos param, o tempo de exposição relevante seria o atraso médio dos veículos que param. Se o atraso médio

é d e apenas uma proporção p dos veículos pára, o atraso médio dos veículos que param é $dp=d/p$ (dado que os demais veículos não param e têm atraso nulo).

Por um lado, parece que o método adotado por HA e BERG (1995) não considera o tempo de exposição ao risco. Este julgamento é, entretanto, equivocado. Considerando que o tempo de exposição é o tempo em que o veículo é o último da fila, seu valor médio seria o valor do intervalo médio (*headway*) entre veículos ($1/q$) e a probabilidade de uma chegada conflitante seria 1 (caso contrário, o veículo não deixaria de ser o último da fila). Portanto, basta avaliar a proporção de veículos que pára e considerar a probabilidade de chegada conflitante igual a 1 (qualquer que seja o tempo exposto como último da fila, ao redor do valor médio).

Por outro lado, parece que o TRAF-Safe usa uma probabilidade de parar igual a 1, por avaliar a probabilidade de chegadas conflitantes para todos os veículos (e não apenas para os que param). Este julgamento também não corresponde à realidade (nem na situação com sinal “PARE”, nem na situação com semáforo). O atraso médio é usualmente calculado por veículo e não por veículo que pára. O cálculo poderia ser, portanto, aprimorado considerando apenas os veículos que param mas então utilizando o atraso médio por veículo que pára.

A proporção de veículos que pára pode ser considerada, simplificada, fazendo-se esta correção no fluxo de tráfego usando o fator $(R + G_q)/T_c$ (onde R é o tempo de vermelho, G_q é o tempo de dissipação de fila e T_c é o ciclo). Esta proporção seria a probabilidade de parar, avaliada com um modelo determinístico, na ausência de sobre-demanda. Como as probabilidades de chegadas conflitantes são sempre menores que 1 (mesmo usando o atraso médio por veículo que pára como tempo de exposição), resulta que os valores obtidos pelo método de TRAF-Safe corrigido seriam menores que aqueles obtidos pelo método de HA e BERG (1995). Para situações de alto fluxo, os valores obtidos pelos dois métodos seriam praticamente equivalentes. Esses resultados são explicados pelo fato de que, para situações de baixo fluxo, o número de COs traseiras pelo método de HA e BERG (1995) é o número de veículos que param, enquanto que no método de Traf-Safe, o número de COs traseiras seria o número de veículos que param multiplicados pela probabilidade de chegar um veículo durante o atraso médio por veículo que pára. Para situações de alto fluxo, os resultados são equivalentes pois a probabilidade de chegar um veículo conflitante é praticamente igual a 1.

Considere uma interseção de duas vias de mão única, com uma faixa por aproximação. A simulação foi feita para duas situações, baixo e alto fluxo, com os seguintes dados:

	Baixo fluxo	Alto fluxo
T_c	45	180
q_1	240v/h 0,066667v/s	1200v/h 0,333333v/s
q_2	120v/h 0,033333v/s	500v/h 0,138889v/s
S_1	1800v/h 0,5v/s	1800v/h 0,5v/s
S_2	1800v/h 0,5v/s	1800v/h 0,5v/s

onde:

T_c = ciclo em s

q_1 e q_2 são os fluxos das aproximações 1 e 2

S_1 e S_2 são os fluxos de saturação das duas aproximações

(o atraso médio foi calculado como sendo $(d_1 + d_2)$, atraso uniforme mais incremental, com as expressões 16-11 e 16-12 do HCM/2000). Os resultados obtidos foram:

	Baixo fluxo	Alto fluxo
p	0,290466	1
$3600 * S * G_q / T_c$	79,99966	1023,529
$S * G_q / q$	0,333333	0,852941
HB1	- 0,00034	1003,529
HB2	79,99966	1023,529
TS1	69,71221	1200
TS2	23,23719	1023,529

sendo:

p = probabilidade de chegar veículo de trás no modelo poissoniano

$3600 * S * G_q / T_c$ = número de veículos que param em uma hora

$S * G_q / q$ = proporção dos veículos que param

HB1 = número de COs traseiras calculado pelo método de HA e BERG (1995) em uma hora

HB2 = número de COs traseiras calculado pelo método de HA e BERG (1995), sem a parcela “- 1” em uma hora

TS1 = número de COs traseiras calculado pelo método de TRAF-Safe em uma hora

TS2 = número de COs traseiras calculado pelo método de TRAF-Safe, corrigido pela probabilidade de parar em uma hora

É difícil dizer se o procedimento do TRAF-Safe é incorreto ao sugerir que o atraso médio seja usado como tempo de exposição, embora a idéia de que o tempo de exposição seja o atraso como último da fila seja claramente válida. A hipótese do TRAF-Safe corresponderia ao caso

limite de não haver chegada durante todo o tempo de espera. No entanto, o não reconhecimento de que apenas parte dos veículos pára é uma clara incorreção.

A idéia de que a ponderação de que o tempo de exposição é o tempo em que o veículo é o último da fila está implícita na estimativa adotada por HA e BERG (1995) e vale para uma formulação determinística mas não parece claramente transferível para uma formulação mais geral (que teria de combinar a probabilidade de estar na fila, ser o último e ter uma chegada conflitante antes de realizar a manobra).

No caso de utilizar modelos estocásticos, as expressões necessárias são razoavelmente complexas, isto quando são conhecidas. No entanto, existem expressões pelo menos aproximadas para boa parte dos casos relevantes. Veja-se, por exemplo, os trabalhos de WU (1994) e WU (1998), que serviram de base para os procedimentos de estimativa utilizados no HCM/2000 e em diversos *softwares* de análise de interseções (como o SIDRA).

Oportunidades de Conflito Traseiras nas Manobras de Conversão

Para as oportunidades de conflito traseiras dos movimentos de conversão, durante a condição de fluxo livre, a situação é distinta. Uma chegada conflitante pode ou não ocorrer durante o período em que o veículo em conversão passa pela interseção em velocidade reduzida. Neste caso, seria necessário ponderar o tempo de exposição e a probabilidade de uma chegada conflitante, adotando a formulação básica do TRAF-Safe. O tempo de exposição poderia ser estimado pelo tempo de frenagem e conclusão da conversão e o fluxo conflitante seria correspondente aos movimentos diretos na faixa que abriga o fluxo de conversão.

Oportunidades de Conflito Angulares em Semáforos

Para oportunidades de conflito angulares, HA e BERG (1995) mantém a suposição extrema de que não há risco para movimentos protegidos no semáforo e apenas as manobras permitidas (não protegidas) geram oportunidades de conflito angulares.

Além disso, não há nenhuma análise com relação ao período de entreverdes, bem como não há nenhuma consideração sobre o efeito da visibilidade em relação ao final da fila.

Esta é uma suposição discutível e não é possível saber se a formulação do TRAF-Safe adota esta visão ou alguma alternativa.

Possibilidade de Distorções no Uso da Brecha e Tolerância

Uma outra observação a ser feita é considerar apenas intervalos entre $(T - 2)$ e $(T + 2)$ como passíveis de gerar oportunidades de conflito. O uso dessa abordagem pode levar a distorções, como comentado anteriormente.

De fato, dadas duas interseções A e B, ambas com uma conversão à esquerda permitida diante de um fluxo oposto, sendo:

- T_A e q_A o tempo de manobra da conversão à esquerda e o volume do fluxo oposto, respectivamente, da interseção A
- T_B e q_B o tempo de manobra da conversão à esquerda e o volume do fluxo oposto, respectivamente, da interseção B

Se o fluxo de conversão à esquerda fosse igual nas duas interseções ($Q_{LTA} = Q_{LTB}$) e se:

$T_A > T_B$ e $q_A > q_B$, seria de se esperar que $CO_{LTA} > CO_{LTB}$ ou $CO_{vA} > CO_{vB}$ (segundo as hipóteses de ZHANG e PREVEDOUROS, 2003, $CO_v = CO_{LT} + CO_{OT}$ com $CO_{OT} = CO_{LT}$).

Entretanto, no exemplo seguinte, ocorre o inverso.

Por exemplo, considere-se os intervalos compreendidos entre $[(T_A - \tau), (T_A + \tau)]$ e os intervalos compreendidos entre $[(T_B - \tau), (T_B + \tau)]$:

onde

$Q_{LTA} = Q_{LTB} = 0,1 \text{ v/s (360 v/h)}$ e $\tau = 2 \text{ s}$ para ambas as interseções A e B	
$T_A = 6,24 \text{ s}$	$T_B = 5,31 \text{ s}$
$q_A = 0,3166 \text{ v/s (1140 v/h)}$	$q_B = 0,1319 \text{ v/s (475 v/h)}$
$P_A = e^{-(T_A-2)q_A} - e^{-(T_A+2)q_A} = 0,1876$	$P_B = e^{-(T_B-2)q_B} - e^{-(T_B+2)q_B} = 0,2649$
$CO_{LTA} = CO_{OTa} = 0,1 \times P_A = 0,01876$	$CO_{LTB} = CO_{OTB} = 0,1 \times P_B = 0,02649$
$CO_{vA} = 0,03752 \text{ (135,1 COs/h)}$	$CO_{vB} = 0,05298 \text{ (190,7 COs/h)}$

Portanto, $CO_{vA} < CO_{vB}$, ao contrário do que se poderia esperar.

No primeiro caso, $h_A = 1/0,3166 = 3,1586$ s e no segundo caso $h_B = 1/0,1319 = 7,5815$ s para o fluxo oposto. A curva do primeiro caso tem o intervalo de 6,24 s na cauda baixa (adiante da média) e a do segundo caso tem o intervalo de 5,31 s na cauda alta (antes da média). Os intervalos de 4,24 a 8,24 são pouco frequentes no primeiro caso. Os intervalos de 3,31 a 7,31 s são mais frequentes no segundo caso.

No segundo caso, os intervalos de risco são mais frequentes, mas o veículo da transversal vai estar fazendo a travessia com maior probabilidade nos intervalos maiores (maiores que $T + 2$).

A Tabela 2.5 mostra as porcentagens de intervalos nos dois casos. Se a frequência de COs for calculada com base apenas na frequência de intervalos críticos (entre $T - 2$ e $T + 2$), o caso B seria mais crítico, contrariando o bom senso. De fato, a situação mais perigosa é o caso A pois apresenta poucos intervalos “bons” (maiores que $T + 2$) e muitos intervalos pequenos (menores que $T - 2$), o que representa a maior dificuldade de travessia por parte dos veículos da conversão à esquerda.

Uma alternativa para corrigir essa distorção seria estimar a probabilidade de cruzar em um intervalo na faixa $(T \pm \tau)$, dado que o intervalo é maior que $(T - \tau)$. Com a distribuição exponencial (admitindo $\tau =$ tolerância), isso daria

$$P[T - \tau \leq H \leq T + \tau | H \geq T - \tau] = 1 - e^{-q((T+\tau)-(T-\tau))} = 1 - e^{-q2\tau} \quad (2.39)$$

pois $f[H = t | H \geq T - \tau] = \frac{f[H = t]}{1 - F[H \leq T - \tau]} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda(T-\tau)}} = \lambda e^{-\lambda(t-(T-\tau))}$ é uma exponencial deslocada de $(T - \tau)$. Na Tabela 2.5 pode-se verificar o efeito de correção da probabilidade de usar uma brecha de risco (+/-2seg), com base na forma alternativa.

Tabela 2.5 – Correção da Probabilidade de Brecha de Risco (Exemplo: +/-2seg)

h	Caso A (%)	Caso B (%)
$h < T - 2$	73,88	35,41
$T - 2 < h < T + 2$	18,76	26,50
$h > T + 2$	7,36	38,09
Total	100	100
$T - 2 < h < T + 2 H > 2$	71,82	41,03
$h > T + 2 H > 2$	28,18	58,97
Total	100	100

Agora a expressão volta a ser crescente com q mas passa a ser independente de T , a menos que τ seja uma função de T : Por exemplo, seria razoável supor $\tau = \alpha T$ (α a ser calibrado) e então $p = 1 - e^{-q \cdot 2 \cdot \alpha T}$ (com $\alpha = 25\%$, tem-se $\tau = 0,25 T$ e $p = 1 - e^{-q \cdot 0,5 T}$) e a expressão volta a ser sensível a ambas as variáveis (a frequência estimada de oportunidades de conflito, no entanto, seria menor naturalmente).

Avaliação pela Manobra Inicial ou pela Manobra Final

A análise de ZHANG e PREVEDOUROS (2003) sobre as oportunidades de conflito com pedestres para os fluxos de conversão à esquerda permitidos mostra a possibilidade de utilizar formulações inversas, em relação à forma básica sugerida no TRAF-Safe, mas também demonstra a importância de ter uma visão clara sobre a forma selecionada.

A oportunidade de conflito poderia ser avaliada, para um dado período, pelo número de usuários que realizam uma manobra inicial que os expõe a um risco de conflito, ponderando a probabilidade de ocorrência do conflito (como a probabilidade de chegadas conflitantes, na ausência de veículos em fila). Esta seria a forma básica do TRAF-Safe e, como seu exemplo numérico mostra, pode ponderar o risco de manobras principais ou secundárias (assumindo tempos de exposição representativos de cada tipo de manobra).

A mesma oportunidade de conflito poderia ser avaliada, para o mesmo período, pelo número de usuários que realizam uma manobra final que pode expor outros usuários a um risco de conflito, ponderando a probabilidade da presença destes outros usuários em posição interferente com a manobra final durante a sua realização (como probabilidade de presença dos usuários interferentes na área de conflito percorrida durante a realização da manobra final). Esta seria a forma inversa em relação à proposta pelo TRAF-Safe, que também poderia ser aplicada para manobras principais ou secundárias, de forma correspondentes.

Nas oportunidades de conflito envolvendo pedestres, naturalmente importam apenas as situações em que o pedestre fica em risco (que correspondem aos atropelamentos de pedestres por veículos). A preferência pode ser dos veículos ou dos pedestres, em cada período.

Na análise de ZHANG e PREVEDOUROS (2003), com relação às oportunidades de conflito com pedestres geradas por conversões à esquerda permitidas, a exposição ocorreria somente para os pedestres que atravessam durante o verde útil, tendo a preferência, e deveriam ponderar a probabilidade de ocorrer uma conversão à esquerda no período (ou seja, a probabilidade de haver fila de espera e de surgir uma brecha adequada para conversão) durante seu tempo de travessia. Esta seria a forma básica. A alternativa seria considerar a realização das conversões à esquerda (durante o verde útil ou, eventualmente, durante o entreverdes ou outro período relevante), sendo permitido diante da preferência dos pedestres (ou protegido, se o tratamento semaforico fosse distinto, exibindo vermelho para os pedestres envolvidos) e deveriam ponderar a probabilidade de presença dos pedestres na área de conflito com as conversões na travessia considerada (ou seja, a ocupância da área de conflito durante o verde útil, para conversões permitidas, ou uma estimativa corrigida pela ponderação do comportamento transgressor dos pedestres, para conversões protegidas). Esta seria a forma inversa. Com hipóteses correspondentes, as estimativas deveriam ser iguais.

Note que uma ou outra forma envolve aspectos distintos a modelar. Na forma básica, seria necessário saber a proporção de pedestres que atravessam no verde útil. Na forma alternativa, pode-se utilizar a ocupância de pedestres no verde útil (avaliado pelo estudo de MILLAZO *et alli*, 1998). Na forma básica, deve-se avaliar a probabilidade de ter um veículo em fila e surgir uma brecha aceitável durante o verde útil. Na forma alternativa, deve-se avaliar a proporção de conversões à esquerda que ocorrem no verde útil (que pode ser admitida como sendo correspondente ao fluxo menor entre a demanda de conversões e a capacidade no verde útil, que pode ser avaliada pelas fórmulas usuais de capacidade com aceitação de brechas no fluxo oposto veicular). Para o caso das oportunidades de conflito com pedestres analisadas por ZHANG e PREVEDOUROS (2003), a forma alternativa parece realmente mais viável.

No entanto, com a visão discutida acima, a fórmula obtida seria $Q_{LT} \cdot OCC_{pedu}$ (ou $C_{LTP} \cdot OCC_{pedu}$, se a capacidade de conversões permitidas fosse restritiva, tendo-se $Q_{LT} < C_{LTP}$), avaliada pela perspectiva das conversões permitidas (não dos pedestres).

2.4 ASPECTOS COMPLEMENTARES

Apesar de não usar explicitamente a expressão “oportunidade de conflito”, vários estudos abordaram procedimentos para estimar uma medida de segurança em interseções semaforizadas. Dos diversos trabalhos existentes sobre esse tema geral, foram selecionados alguns estudos considerados mais relevantes para o tema da dissertação, por tratarem de aspectos não totalmente desenvolvidos nos trabalhos anteriormente revisados.

WANG *et alli* (1999), WANG *et alli* (2002) e de WANG e NIHAN (2003) foram selecionados pelo tratamento de estimativas de risco de colisões angulares e traseiras, usando modelos compreensivos (entendidos como modelos que expressam o processo de ocorrência dos acidentes, ao menos parcialmente). Esta é a linha de investigação sobre previsão de acidentes considerada mais próxima da formulação e utilização dos modelos baseados em oportunidades de conflito de tráfego.

MAHALEL e PRASHKER (1987), EASA (1993), ZIMMERMAN e BONNESON (2004) e TARKO *et alli* (2006) foram selecionados pelo tratamento do problema de segurança no entreverdes, um aspecto considerado importante para a segurança em semáforos mas negligenciado nos modelos de oportunidade de conflito revisados. Como aspecto importante, esta linha proporciona métodos aplicáveis para incorporar a aleatoriedade dos diversos fatores contribuintes na análise da segurança viária, como será visto adiante.

SONGCHITRUKSA, TARKO (2006) foi selecionado por usar um parâmetro potencialmente útil para avaliar o risco de colisões angulares: o tempo até a colisão (PET – “*post encroachment time*”), parâmetro este que pode ser pesquisado em campo por meio de recursos tecnológicos modernos. Este fato abre uma perspectiva de, no futuro, permitir extensos trabalhos de pesquisa de campo para validar modelos que se destinam a estimar o nível de segurança em termos de risco de colisão angular.

A seguir, é feita uma breve descrição desses estudos, com o objetivo de coletar dados e métodos para aprimorar os modelos de estimativa da frequência de oportunidades de conflito anteriormente discutidos.

2.4.1 Trabalhos Relacionados com Modelos de Previsão de Colisões

Inicialmente serão discutidos os trabalhos referentes às colisões traseiras, mas boa parte das conclusões aplicam-se às colisões angulares, que são discutidos em seguida.

2.4.1.1 Modelo de Previsão de Colisões em WANG *et alli* (1999)

Em WANG *et alli* (1999), as colisões traseiras são analisadas e o risco de acidente é medido pelo número de acidentes por veículo-ano, risco esse que indica a probabilidade de um condutor envolver-se num acidente numa dada interseção.

Na formulação apresentada, um acidente traseiro é causado por frenagem do veículo da frente e uma resposta “inadequada” do veículo de trás. A probabilidade de ocorrer um acidente traseiro é função da probabilidade de encontrar um veículo à frente (obstáculo móvel), aqui denominada de P_o , e a probabilidade de o veículo de trás falhar na manobra para evitar a colisão, aqui denotada por P_f . Como normalmente P_o e P_f são independentes, o risco de colisão traseira (P_{RE}) pode ser expresso como seu produto:

$$P_{RE} = P_o \times P_f \quad (2.40)$$

Como não se conhece, segundo os autores, a forma exata de P_o e P_f , pode-se adotar funções logarítmicas empíricas, conforme segue:

$$\ln(P_o) = \beta_d \mathbf{X}_d \text{ e } \ln(P_f) = \beta_b \mathbf{X}_b \quad (2.41)$$

onde \mathbf{X}_d e \mathbf{X}_b são vetores das variáveis explicativas para P_o e P_f , respectivamente e β_d e β_b são os vetores dos parâmetros correspondentes que devem ser estimados.

Então, o risco de colisão traseira pode ser expresso como:

$$\ln(P_{RE}) = \beta_d \mathbf{X}_d + \beta_b \mathbf{X}_b \quad (2.42)$$

Os parâmetros são estimados usando-se o método estatístico de máxima verossimilhança.

2.4.1.2 Modelo de Previsão de Colisões em WANG *et alli* (2002)

No artigo seguinte, de WANG *et alli* (2002), a abordagem inicial é semelhante ao artigo acima, onde a probabilidade de uma colisão traseira é dada pelo produto $P_{RE} = P_o \times P_f$ mas, a seguir, o artigo propõe métodos para estimar cada um dos fatores.

Formulação de P_o

Um veículo torna-se um obstáculo para o veículo de trás quando, por algum motivo, reduz a sua velocidade. Esta redução pode ser causada por uma variedade de ocorrência de distúrbios. Para efeitos do modelo, admite-se que a frequência dessas ocorrências segue um processo de Poisson. Isso resulta que os intervalos de tempo entre as ocorrências são exponencialmente distribuídos. Se um distúrbio j tiver uma média de ocorrência no tempo t de η_j , então:

$$f(t) = \eta_j e^{-\eta_j t}, t > 0 \quad (2.43)$$

Na distribuição exponencial, a probabilidade de uma nova ocorrência de um distúrbio é independente do tempo em que ocorreu a última vez (a distribuição exponencial é uma distribuição “sem memória”). Outra propriedade conveniente da formulação poissoniana é a possibilidade de somar diversos tipos de distúrbio e manter o mesmo tipo de distribuição com uma média igual à soma da frequência média dos distúrbios individuais.

Como os acidentes são eventos raros e isolados, a hipótese da exponencial parece ser razoável. Entretanto, em eventos em cadeia, como colisões traseiras múltiplas, esta hipótese pode ser questionada porque a ocorrência de um distúrbio pode estar associado à ocorrência do próximo. Para contornar este problema, o estudo inclui os acidentes onde se envolve apenas um par de veículos.

Então, a probabilidade de um veículo encontrar um distúrbio j no tempo t é:

$$P_j = 1 - e^{-\eta_j t} \quad (2.44)$$

Como qualquer distúrbio pode levar um veículo a desacelerar, a probabilidade de um veículo de trás encontrar um veículo da frente como obstáculo é igual à probabilidade de que pelo

menos ocorra um distúrbio dentro de um tempo especificado. Então, a formulação de P_o pode ser derivada da seguinte forma:

$$P_o = 1 - \prod_j (1 - P_j) \quad (2.45)$$

Combinando as equações (2.44) e (2.45):

$$P_o = 1 - e^{-\sum_j \eta_j t} \quad (2.46)$$

Na expressão (2.46), o termo $\sum_j \eta_j t$ é sempre positivo e é função de fatores externos (características da interseção, fluxos de tráfego e outros fatores que podem influenciar a ocorrência de distúrbios). O problema se resume, então, em selecionar uma função que considere todos esses fatores externos. Para efeitos do modelo, os autores assumem que:

$$\sum_j \eta_j t = e^{\beta \cdot X} \quad (2.47)$$

Então, a expressão (2.46) fica:

$$P_o = 1 - e^{-e^{\beta \cdot X}} \quad (2.48)$$

onde β e X são vetores de coeficientes estimados e variáveis explicativas da frequência de distúrbios, respectivamente. Esta é uma expressão que corresponde às formas usuais para distribuições extremas (no caso, a distribuição de Gumbel, tipo I).

Formulação de P_f

Segundo os autores, dirigir um veículo é um processo de perceber mudanças na situação de tráfego e ajustar o comportamento do veículo adaptando-se às condições de mudança. O tempo necessário para os condutores detectarem a mudança e a qualidade da sua resposta determinam a probabilidade de se evitar uma colisão. Um dos principais fatores que determinam se um acidente pode ser evitado é o tempo de percepção e reação do motorista (PRT – *Perception and Reaction Time*). O PRT varia em função da complexidade do problema, da complexidade da solução e a percepção de perigo pelo motorista.

Para incorporar o PRT no modelo, consideram-se os seguintes parâmetros (i) “tempo de percepção e reação disponível” (APRT – *Available Perception and Reaction Time*) e (ii) “tempo de percepção e reação necessário” (NPRT – *Needed Perception and Reaction Time*). O

APRT é função da condição de tráfego do momento e o NPRT varia de pessoa para pessoa. Ocorrerá uma colisão se, em um evento, $NPRT > APRT$. Assim, a probabilidade de um veículo se envolver num acidente de colisão traseira é a probabilidade de NPRT ser maior que APRT. Se APRT e NPRT forem considerados como variáveis aleatórias, com alguma distribuição suposta conhecida, P_f pode ser determinado.

Em termos de uma distribuição apropriada para NPRT, a distribuição normal é uma escolha óbvia. A distribuição normal é computacionalmente ineficiente, segundo os autores. Assim, foi adotada a distribuição de Weibull por causa da sua flexibilidade empírica e da sua aproximação com a distribuição normal. A função de densidade da distribuição de Weibull é:

$$f[\alpha, \lambda, t] = \alpha \cdot \lambda \cdot t^{\alpha-1} \cdot e^{-\lambda t^\alpha} \quad (2.49)$$

onde α e λ são os parâmetros da forma e escala da distribuição, respectivamente.²⁴ Um valor de 3,25 para α é um valor que dá uma boa aproximação para a distribuição normal (KAO, 1960, e PLAIT, 1962, *apud* WANG *et alli*, 2002). Para visualizar o comportamento da distribuição de Weibull, a Figura 2-22 mostra as diversas curvas para vários valores de λ (com $\alpha = 3,25$ fixo).

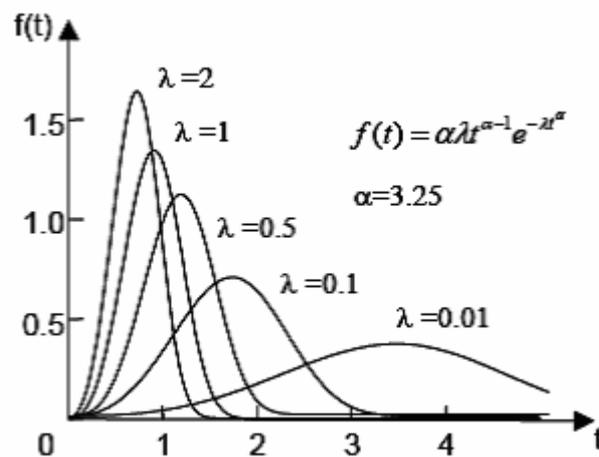


Figura 2.22 – Formatos da Distribuição de Weibull

²⁴ Mais claramente, pode-se expressar esta distribuição usando o parâmetro de escala $\kappa = 1/\lambda$ como

$$f[\alpha, \lambda, t] = \alpha / \kappa \cdot \left(\frac{t}{\kappa} \right)^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\kappa} \right)^\alpha}, \text{ onde aparece a variável } t \text{ explicitamente normalizada pelo parâmetro } \kappa.$$

Segundo os autores, uma das tarefas mais importantes para o engenheiro de tráfego é manter um valor aceitável para APRT por meio de projeto geométrico e regulamentação de tráfego. Infelizmente, variações na habilidade dos motoristas e nas condições de tráfego e/ou de clima podem dificultar a estimativa de APRT, conduzindo os projetos viários a adotarem um valor conservador de APRT (tradicionalmente 2,5 s). Contudo, a variação de APRT é potencialmente um elemento crítico para a ocorrência de acidentes. Levando em conta essa variação, APRT é considerada uma variável aleatória com uma distribuição conhecida. Novamente, é adotada a distribuição de Weibull. Sendo t_a o APRT:

$$f[\alpha, \gamma, t_a] = \alpha \cdot \gamma \cdot t_a^{\alpha-1} \cdot e^{-\gamma \cdot t_a^\alpha} \quad (2.50)$$

Baseado nessas hipóteses, P_f pode ser expresso como (assumindo-se que α é igual para APRT e NPRT):

$$P_f = \int_0^\infty \int_{t_a}^\infty f[\alpha, \lambda, t] f[\alpha, \gamma, t_a] dt dt_a = \int_0^\infty e^{-\lambda t_a^\alpha} \alpha \gamma t_a^{\alpha-1} e^{-\gamma t_a^\alpha} dt_a = \frac{1}{1 + \lambda/\gamma} \quad (2.51)$$

Assim, P_f é determinado apenas pela razão entre λ e γ . Como esses parâmetros são positivos, λ/γ pode ser associado a variáveis explicativas usando a função exponencial:

$$\frac{\lambda}{\gamma} = e^{-\Phi Z} \quad (2.52)$$

Então:

$$P_f = \frac{1}{1 + e^{-\Phi \cdot Z}} \quad (2.53)$$

onde Φ e Z são vetores de coeficientes estimados e de variáveis explicativas que afetam P_f , respectivamente. Esta expressão corresponde à forma usual da distribuição logística.

Combinando ambas as especificações, novamente é possível estimar os parâmetros do modelo de previsão utilizando o método estatístico de máxima verossimilhança.

2.4.1.3 Modelo de Previsão de Colisões em WANG e NIHAN (2003)

Finalmente, o escopo do trabalho de WANG e NIHAN (2003) é a análise do risco de acidentes angulares entre veículos de conversão à esquerda contra um fluxo oposto (identificado pelos autores por AG). O método é muito semelhante ao método proposto no artigo de WANG *et alli* (2002) para colisões traseiras, apresentado com maior detalhe acima.

A linha mestra é novamente estimar a probabilidade de colisão angular como:

$$P_{AG} = P_o \times P_f.$$

onde

P_o = probabilidade de encontrar um veículo como obstáculo

P_f = probabilidade de o condutor falhar para evitar a colisão

A estimativa de P_o e P_f segue a mesma linha, melhor descrita em WANG *et alli* (2002), utilizando-se a distribuição de Weibull. Mais uma vez, os parâmetros do modelo são estimados com o método estatístico de máxima verossimilhança.

2.4.1.4 Análise dos Modelos de Previsão de Colisões Revisados

O ponto relevante é perceber que a abordagem de estimativa de modelos baseados no mecanismo dos acidentes pode ser aplicado para prever a probabilidade de sua ocorrência, para ambos os tipos de colisão. Potencialmente, uma abordagem semelhante poderia ser usada para prever oportunidades de conflito. As similaridades e diferenças são citadas adiante.

Nas formulações apresentadas, ao invés de buscar um modelo físico, os parâmetros são estimados usando-se o método estatístico de máxima verossimilhança. Na especificação proposta, P_o corresponde genericamente à estimativa da probabilidade de uma oportunidade de conflito (teria de ser ponderado por uma frequência de manobras para transformar-se em uma estimativa da frequência de oportunidades de conflito, o que pode ser feito implicitamente na especificação do seu modelo de estimativa) e P_f corresponde genericamente à probabilidade de um evento de risco transformar-se em acidente (que pode ser vista como uma tradução da taxa de acidentes por oportunidade de conflito).

A estimativa de parâmetro pelo método estatístico da máxima verossimilhança não tem sido utilizada nos estudos revisados sobre oportunidades de conflito. Embora sua abordagem prefira modelos analíticos baseados em relações técnicas, o método estatístico poderia obter valores recomendados para variáveis difíceis de estabelecer (como as margens de tolerância nos tempos de travessia), se não para substituírem todos os modelos físicos. A incorporação de variáveis suplementares na taxa de acidentes por oportunidade de conflito (por exemplo, o efeito da visibilidade disponível) seria outro aspecto que poderia ser tratado.

Pelo conhecimento que incorporam, o abandono dos modelos técnicos é considerado inadequado, mas o uso suplementar de métodos estatísticos deve ser avaliado.

Um aspecto onde há grande similaridade está na visão da insegurança como resultante de uma interferência e uma falha na manobra evasiva. No entanto, os modelos de previsão de acidentes revisados mostram que a forma inversa é interessante. Nestas formulações, é o segundo usuário que deve reagir ao risco de acidente em tempo hábil.

Os estudos mostram, portanto, que a perspectiva inversa à usualmente adotada nos modelos de oportunidade de conflito estudados, representando os distúrbios que afetam um veículo em aproximação, pode ser interessante e igualmente viável. No caso de colisões traseiras, estes distúrbios poderiam ser veículos da via transversal, cuja presença forçaria uma frenagem na via principal de um veículo que ficaria em risco. Portanto, os autores consideram que conflitos secundários seriam importantes, neste contexto, um aspecto negligenciado nos modelos de oportunidade de conflito revisados.

2.4.2 Trabalhos Relacionados com a Segurança no Entreverdes

Os estudos de segurança em interseções semaforizadas normalmente destacam o dimensionamento do entreverdes como um aspecto importante. No entanto, a revisão anterior revelou a ausência de trabalhos capazes de incorporar a análise deste aspecto nos modelos de oportunidades de conflito de tráfego.

O entreverde é usualmente composto de um intervalo de amarelo e um intervalo de vermelho de segurança. O sinal amarelo tem a função de alertar os condutores de que o sinal vai mudar

para vermelho. O período de vermelho de segurança tem o objetivo de garantir que o veículo ultrapasse a interseção antes de o sinal mudar para verde para a aproximação conflitante.

Em TARKO *et alli* (2006), os autores mencionam que duas situações de dilema associadas ao término do verde foram identificadas por FHWA, em 1977. A primeira situação, denominada Zona de Dilema Tipo I, foi descrita por GAZIS *et alli*, 1960. Esse tipo de zona de dilema é uma área onde os motoristas não conseguem mais parar na linha de retenção sem frenagens bruscas ou não conseguem mais prosseguir sem violar o sinal vermelho. O segundo dilema, ou o problema de indecisão, denominado Zona de Dilema Tipo II, é uma área onde motoristas podem tomar decisões conflitantes entre parar ou prosseguir. Este segundo critério define uma zona de dilema onde 10 a 90% dos motoristas decidem parar na interseção. Ambos os aspectos são tratados nos trabalhos identificados, analisados a seguir.

2.4.2.1 Segurança no Entreverdes em MAHALEL e PRASHKER (1987)

Em MAHALEL e PRASHKER (1987), as colisões traseiras em interseções semaforizadas ocorrem quando dois veículos que se aproximam da interseção tomam decisões conflitantes **quando o sinal muda para amarelo**. Portanto, os autores identificam o problema de segurança no entreverdes, negligenciado nos modelos de oportunidade de conflito vistos, associado às Zonas de Dilema Tipo II, na nomenclatura descrita acima.

Haverá um alto risco de colisão traseira se o primeiro veículo decide parar enquanto o segundo decide prosseguir na travessia da interseção. Quando a colisão realmente ocorre, segundo os autores, é razoável supor que o segundo veículo não antecipou a decisão de parar e, assim, não conseguiu reagir em tempo para prevenir o acidente. Quanto maior a probabilidade de dois veículos sucessivos tomarem decisões conflitantes com relação a parar ou prosseguir na mudança de sinal, tanto maior a probabilidade de colisão traseira.

Os autores consideram que a probabilidade de decisões conflitantes é uma função da distância ou do tempo que separa os dois veículos da linha de retenção quando o sinal muda para amarelo. Essa probabilidade de decisões conflitantes pode ser estimada da função de probabilidade de parar, que os autores exprimem como função da distância até a linha de retenção. Seja $P[x]$ a probabilidade de parar quando um veículo está a uma distância x da linha de retenção quando o sinal muda para amarelo. A probabilidade de prosseguir será $1 - P[x]$.

Observa-se que essa função (Figura 2.23a) representa a realização de experimentos de Bernoulli com base em várias distâncias da linha de retenção.

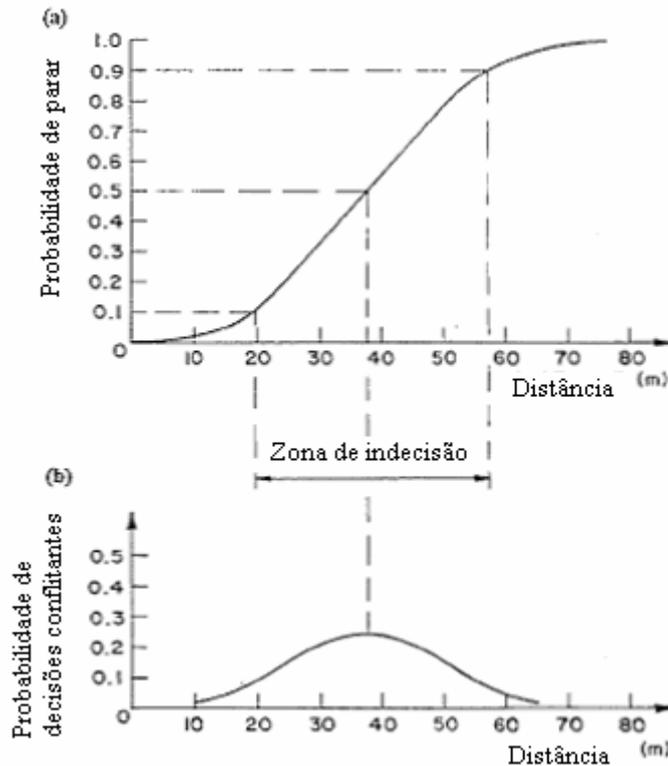


Figura 2.23 a e b – Probabilidade de parar e probabilidade de decisões conflitantes

A probabilidade de dois condutores tomarem decisões conflitantes será máxima quando a expressão $P[x] \times (1 - P[x])$ for máxima. Isso ocorre quando $P[x] = 0,5$. Esta consideração pode ser admitida quando não há informação clara sobre o comportamento descrito (como será feito para incorporar o efeito das Zonas de Dilema Tipo II no próximo capítulo).

Uma condição necessária para a ocorrência de uma colisão traseira é a presença de veículos na aproximação quando o sinal muda para amarelo. A probabilidade de uma colisão traseira aumenta quando aumenta o número de veículos na zona de indecisão.

A Figura 2.24 mostra duas funções de probabilidade de parada que diferem na sua variância. É fácil de ver que, quanto maior a variância, maior será a zona de indecisão.

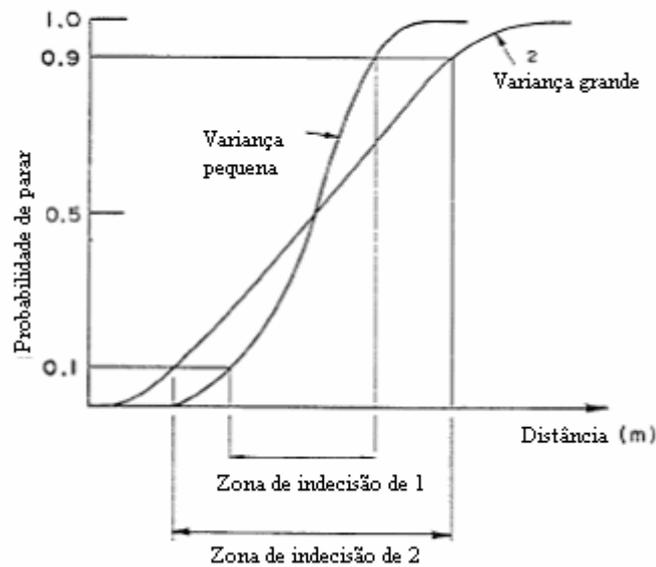


Figura 2.24 – Duas funções de probabilidade de parar com variâncias distintas

Os autores apresentam uma metodologia para estimar a probabilidade de indecisão, baseada na hipótese de que as variáveis chave são o tempo disponível para decidir parar e o tempo crítico que leva a parar (ambos associados a distribuições normais), que poderia ser aplicada para obter a probabilidade de ocorrência de acidentes.

2.4.2.2 Segurança no Entreverdes em EASA (1993)

Em EASA (1993), o conceito de entreverdes adotado não considera explicitamente o intervalo de amarelo e o período de vermelho geral (mas apenas a duração total). O trabalho busca definir a duração dos intervalos com base na eliminação (ou minimização) da Zona de Dilema Tipo I.

Para isso, o autor utiliza um método aproximado para combinar as distribuições de diversas variáveis intervenientes. Os métodos existentes para determinar a duração do entreverdes são basicamente determinísticos. Esses métodos se baseiam em valores fixos da velocidade de aproximação, tempo de percepção e reação, desaceleração e comprimento do veículo. Com o método proposto, o autor busca formular um método probabilístico factível que também será reiteradamente adotado nas formulações do próximo capítulo.

Método determinístico

Um motorista, ao se aproximar de uma interseção e deparar-se com o sinal amarelo, pode tanto decidir parar ou prosseguir. A distância de parada é a distância necessária para os veículos pararem na linha de retenção (ver Figura 2.25-a). A distância de limpeza é a distância na qual o veículo pode decidir prosseguir e passar antes do fim do período de entreverdes (ver Figura 2.25-b).

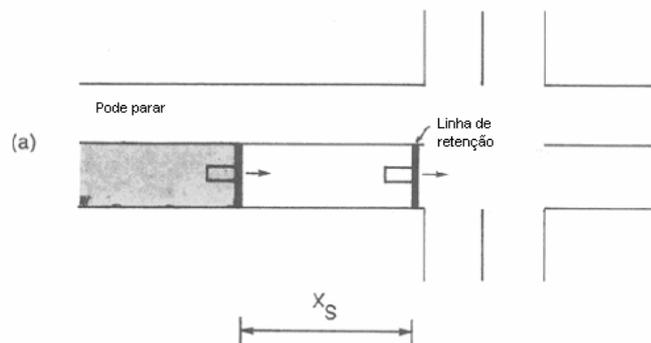


Figura 2.25 a – Distância de parada (X_S)

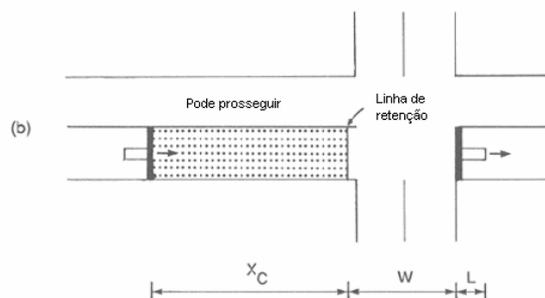


Figura 2.25 b – Distância de limpeza (X_C)

Então:

$$X_s = \delta \cdot v + \frac{v^2}{2 \cdot (b + i \cdot g)} \quad (2.54)$$

onde

X_S = distância de parada em m

δ = tempo de percepção e reação em s

v = velocidade de aproximação em m/s

b = desaceleração em m/s^2

g = aceleração da gravidade em m/s^2

i = greide da aproximação

Durante o período de entreverdes, o veículo percorre uma distância igual à distância de limpeza, mais a largura da interseção e o comprimento do veículo, antes de evitar uma situação de conflito. Assim:

$$X_C = I.v - (W + L) \quad (2.55)$$

onde

X_C = distância de limpeza em m

I = período de entreverdes (amarelo + vermelho geral) em s

W = largura da interseção em m

L = comprimento do veículo em m

Entende-se que a largura da interseção W deve conter a largura da faixa de pedestres (se houver) na esquina posterior (na realidade, W deveria ser a distância desde a linha de retenção, uma vez que também pode haver faixa de pedestres na esquina anterior, junto à linha de retenção, até o ponto de conflito potencial).

Se $X_S > X_C$ haverá uma zona de dilema, na qual, o motorista, quando o sinal muda para amarelo, não conseguirá parar e nem cruzar a interseção com segurança (Figura 2.26 a).

Se $X_S < X_C$, haverá uma zona de opção, na qual o motorista poderá optar tanto em parar como em prosseguir (Figura 2.26 b).

Para $X_S = X_C$, a zona de dilema e a zona de opção são eliminadas.

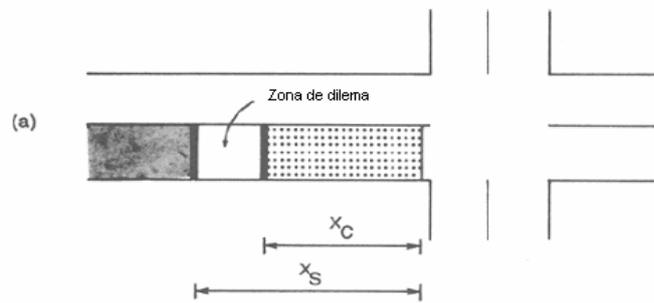


Figura 2.26 a – Zona de dilema ($X_S > X_C$)

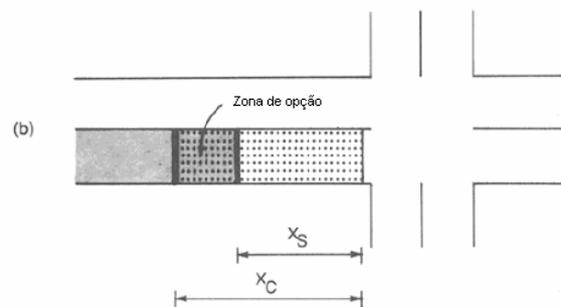


Figura 2.26 b – Zona de opção ($X_S < X_C$)

A prática usual para dimensionar o entreverdes é baseada no desejo de eliminar a zona de dilema. Igualando a distância de parada com a distância de limpeza, o entreverdes pode ser obtido como:

$$I = \delta + \frac{v}{2.(b + i.g)} + \frac{W + L}{v} \quad (2.56)$$

Normalmente, as duas primeiras parcelas corresponderiam ao intervalo de amarelo e a última parcela corresponderia ao intervalo de vermelho de segurança (ou de limpeza).

Método probabilístico

O método probabilístico é a contribuição específica de EASA (1993), que propõe um método baseado em aproximações para estimar os dois primeiros momentos (a média e a variância) de uma variável aleatória que é uma função geral (não linear) de outras variáveis aleatórias.

Seja Y uma função não linear de várias variáveis aleatórias:

$$Y = f[X_1, X_2, \dots, X_n] \quad (2.57)$$

Então Y pode ser expandido numa série de Taylor em torno dos valores médios das variáveis X_n (μ_1 até μ_n). Considerando os termos lineares de primeira ordem:

$$Y = f[\mu_1, \dots, \mu_n] + \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_{xi}) \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right) + \varepsilon \quad (2.58)$$

onde as derivadas parciais são resolvidas em μ_1, \dots, μ_n e ε são os termos de ordem superior.

Este é o método de aproximação de primeira ordem (*First Order Method* – FOM). O valor esperado de Y , $E[Y]$, e a variância de Y , $\text{var}[Y]$, são:

$$E[Y] = f[\mu_1, \dots, \mu_n] \quad (2.59)$$

$$\text{var}[Y] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \sigma_{xi}^2 + \sum_{i \neq j}^n \sum_{i \neq j}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial X_j} \right) \text{cov}(X_i, X_j) \quad (2.60)$$

sendo

$\text{cov}(X_i, X_j)$ = covariância de X_i com X_j , onde $\text{cov}[X_i, X_j] = \rho_{xi,xj} \cdot \sigma_{xi} \cdot \sigma_{xj}$ e $\sigma_{xi}^2 = \text{var}[X_i]$

$\rho_{xi,xj}$ = coeficiente de correlação entre X_i e X_j .

Da mesma forma, uma aproximação da covariância entre duas variáveis Y e Z que são funções de variáveis aleatórias pode ser obtida. Se

$$Y = f[X_1, X_2, \dots, X_n] \text{ e } Z = g[X_1, X_2, \dots, X_n],$$

então:

$$\text{cov}[Y, Z] = \sum_{i \neq j}^n \sum_{i \neq j}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right) \left(\frac{\partial g}{\partial X_j} \right) \text{cov}(X_i, X_j) \quad (2.61)$$

Além disso, a expressão anterior para a média de Y pode ser melhorada incluindo o termo de segunda ordem da expansão de Taylor, gerando o método de aproximação de primeira ordem e segundo momento (*First Order, Second Moment* – FOSM):

$$E[Y] = f[\mu_1, \dots, \mu_n] + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} \sum_{i \neq j} \frac{\partial^2 f}{\partial X_i \partial X_j} \text{cov}(X_i, X_j) \quad (2.62)$$

Nestas expressões, as derivadas são avaliadas no ponto que corresponde às médias ($\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$). Em trabalhos posteriores, Easa empregou métodos mais sofisticados que buscam o melhor ponto para previsão da falha da condição de projeto (o chamado Ponto de Falha Mais Provável – PFMP), que configura os métodos avançados (como o *Advanced First Order, Second Moment* – AFOSM), comumente utilizados para determinar fatores de segurança para projeto em Engenharia de Estruturas (como a distância entre o PFMP e a média).

Qualquer dos conjuntos de expressões comentados anteriormente permite obter a média e a variância da extensão da zona de dilema, variável utilizada por EASA (1993) para dimensionar o período de entreverdes. Para simplificar a exposição, será exemplificada a análise ao redor da média, com velocidade, aceleração, extensão e tempo de reação aleatórios, admitindo que apenas $\rho_{t,v}$ e $\rho_{a,v}$ são coeficientes de correlação (entre t e v e a e v , respectivamente) não nulos.

A extensão da zona de dilema pode ser definida por $D = X_s - X_c$, tendo-se então $E[D] = E[X_s] - E[X_c]$ e $\text{Var}[D] = \text{Var}[X_s] + \text{Var}[X_c] - 2 \cdot \text{Cov}[X_s, X_c]$.

Aplicando o FOM para a distância de parada, o valor esperado e a variância de X_s são:

$$E[X_s] \cong \mu_v \mu_\delta + \frac{\mu_v^2}{2(\mu_b + ig)} \quad (2.63)$$

e

$$\begin{aligned} \text{var}[X_s] = & \left(\frac{\partial X_s}{\partial \delta} \right)^2 \sigma_\delta^2 + \left(\frac{\partial X_s}{\partial v} \right)^2 \sigma_v^2 + \left(\frac{\partial X_s}{\partial b} \right)^2 \sigma_b^2 + \\ & + 2 \left(\frac{\partial X_s}{\partial \delta} \right) \left(\frac{\partial X_s}{\partial v} \right) \text{cov}(\delta, v) + 2 \left(\frac{\partial X_s}{\partial \delta} \right) \left(\frac{\partial X_s}{\partial b} \right) \text{cov}(\delta, b) + \\ & + 2 \left(\frac{\partial X_s}{\partial v} \right) \left(\frac{\partial X_s}{\partial b} \right) \text{cov}(v, b) \end{aligned}$$

tendo-se

$$\begin{aligned} \text{var}[X_S] = & \mu_v^2 \sigma_\delta^2 + \left[\mu_\delta + \frac{\mu_v}{(\mu_b + ig)} \right]^2 \sigma_v^2 + \left[-\frac{\mu_v^2}{2(\mu_b + ig)^2} \right]^2 \sigma_b^2 + \\ & + 2\mu_v \left[\mu_\delta + \frac{\mu_v}{(\mu_b + ig)} \right] \sigma_\delta \sigma_v \rho_{\delta,v} - \frac{\mu_v^2}{(\mu_b + ig)^2} \left(\mu_\delta + \frac{\mu_v}{(\mu_b + ig)} \right) \sigma_b \sigma_v \rho_{b,v} \end{aligned} \quad (2.64)$$

Com o FOSM, a expressão aproximada para a média de X_S seria

$$E[X_S] \cong \mu_v \mu_\delta + \frac{\mu_v^2}{2(\mu_b + ig)} + \frac{\sigma_v^2}{2(\mu_b + ig)} \quad (2.65)$$

Aplicando o FOM para a distância de limpeza, o valor esperado e a variância de X_C são:

$$E[X_C] = I \mu_v - (W + \mu_L) \quad (2.66)$$

e

$$\text{Var}[X_C] = \left(\frac{\partial X_C}{\partial v} \right)^2 \cdot \sigma_v^2 + \left(\frac{\partial X_C}{\partial L} \right)^2 \cdot \sigma_L^2$$

tendo-se

$$\text{Var}[X_C] = I^2 \cdot \sigma_v^2 + \sigma_L^2 \quad (2.67)$$

Com FOSM, a expressão aproximada para a média de X_C seria a mesma (dado que as derivadas de segunda ordem de X_C são todas nulas).

Como as variáveis são correlacionadas (por exemplo, ambas dependem da velocidade), uma aproximação da covariância entre as X_S e X_C pode ser obtida por:

$$\text{cov}[X_S, X_C] = I \cdot \left(\left(\mu_\delta + \frac{\mu_v}{(\mu_b + ig)} \right) \sigma_v^2 + \mu_v \cdot \sigma_\delta \sigma_v \rho_{\delta,v} - \left(\frac{\mu_v^2}{2 \cdot (\mu_b + ig)^2} \right) \cdot \sigma_b \sigma_v \rho_{b,v} \right) \quad (2.68)$$

Estas expressões permitem obter a média e a variância da extensão da zona de dilema, variável utilizada por EASA (1993) para dimensionar o período de entreverdes. Estes são os momentos a avaliar para obter o projeto sujeito a uma restrição de margem de segurança mínima ($\beta = \frac{E[D]}{\sqrt{\text{Var}[D]}}$) ou probabilidade de falha mínima ($p_F = h_D[\beta]$). O método probabilístico pode, então, seleccionar um dimensionamento do entreverdes com base em uma probabilidade limite de ter $X_S > X_C$ (gerando um conflito potencial).

O método determinístico usa valores típicos, que procuram retratar a média das variáveis envolvidas no período de entreverdes, como a velocidade, o tempo de percepção e reação, a desaceleração, comprimento do veículo, etc. Com exceção da velocidade, são normalmente usados os mesmos valores para os diversos parâmetros envolvidos (por exemplo, o mesmo tempo de percepção e reação e a mesma desaceleração e o mesmo comprimento médio do veículo, independentemente do local). Eventualmente, a aceleração e o comprimento do veículo podem variar, em alguns locais onde a composição de tráfego é muito diferenciada.

O método probabilístico permite dimensionar o entreverdes de forma individualizada para cada local, desde que se saiba os valores dos diversos parâmetros estatísticos envolvidos, como médias, variâncias e coeficientes de correlação. Entretanto, novamente com exceção para as velocidades, eventualmente, esses valores são difíceis de se obter em cada local (na prática, seria usada uma distribuição genérica).

Para os objetivos deste trabalho, embora o método seja probabilístico e seja bastante geral, note que o método de EASA (1993) não fornece a probabilidade de um veículo encontrar-se na zona de dilema quando o sinal muda para o amarelo. Também é criticável o fato de não serem analisados os aspectos especificamente relacionados com o intervalo de amarelo e com o intervalo de vermelho de segurança.

2.4.2.3 Segurança no Entreverdes em ZIMMERMAN e BONNESON (2004)

Em ZIMMERMAN e BONNESON (2004), a proteção da zona de dilema é considerada para minimizar o risco de colisões nos semáforos atuados. Segundo os autores, existem dois tipos de proteção: a proteção convencional e a proteção dinâmica.

A proteção convencional é feita usando-se um detector recuado (*advance detector*) colocado a montante da interseção (comum nas vias principais, no contexto norte-americano, mas não usado no Brasil). O estágio somente terminará quando não houver mais detecção de veículos (se o intervalo for maior que um valor pré-determinado), a menos de atingir-se a duração máxima especificada para o estágio.

A proteção dinâmica, a proposta em avaliação no estudo, mede a velocidade de cada veículo a cerca de 800 a 1000 ft (244 a 305 m) a montante da interseção. Baseado na velocidade individual de cada veículo, é calculado o tempo de percurso até o início e o fim da zona de dilema. O final do estágio é determinado de modo a minimizar o número de veículos dentro da zona de dilema, a menos de atingir-se a duração máxima especificada para o estágio.

O interesse no artigo decorre de que os autores propõem como medida de segurança, no sistema de proteção convencional, a utilização do número esperado de veículos na zona de dilema quando termina o verde do estágio, estimado como:

$$E[K] = q \times t \times P[\text{max-out}] \quad (2.69)$$

onde

$E[K]$ = número esperado de veículos na zona de dilema no fim do verde (por ciclo)

q = fluxo em v/s

t = duração da zona de dilema em s

$P[\text{max-out}]$ = probabilidade de terminar o verde (devido a intervalos maiores que o valor pré-determinado).

Um semáforo atuado encerra o estágio ao detectar um intervalo maior que o especificado como intervalo de corte (*gap-out*) ou ao atingir a duração máxima especificada (*max-out*). O número de veículos na zona de dilema é proporcional à probabilidade de terminar o estágio pela condição de tempo máximo (*max-out*), dado que a condição alternativa (*gap-out*) corresponde a identificar a ausência de veículos na aproximação do semáforo.

Em um semáforo a tempos fixos, os autores mencionam que a mesma expressão poderia ser aplicada com $P[\text{max-out}] = 1$ (todos os estágios terminam por tempo fixo, dado que não existe detecção para atuação pelo tráfego).

A Figura 2.27 mostra o número de veículos na zona de dilema para tempos pré-fixados (reta na diagonal) e curvas com diferentes intervalos máximos entre veículos (MAH – *Maximum Allowable Headway*), parâmetro que determina o intervalo de corte. Segundo os autores, quanto menor for o número de veículos na zona de dilema, menor será o risco de colisões, tanto angulares como traseiras.

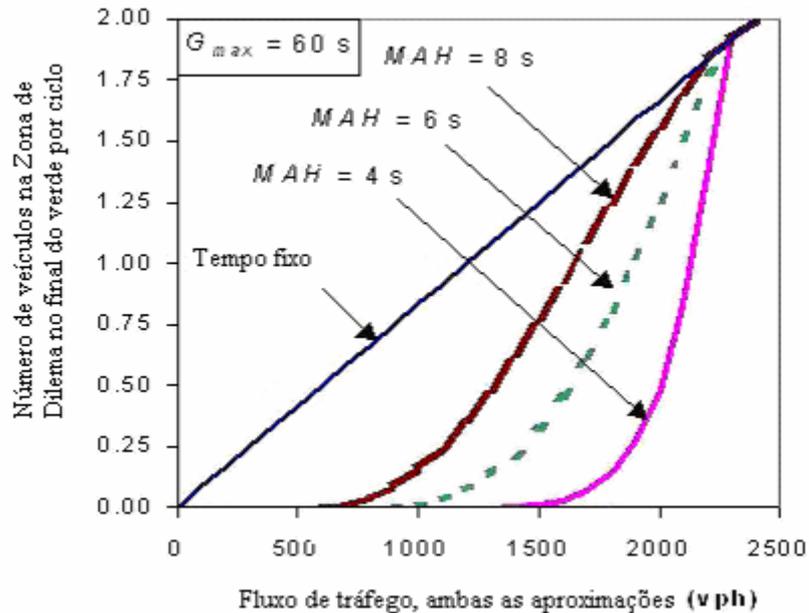


Figura 2.27 – Número de veículos na zona de dilema para semáforos a tempo fixo e atuados

O interesse dos autores é justificar a eficiência da proteção dinâmica. No entanto, para este trabalho, destaca-se a proposição da medida de segurança similar a oportunidades de conflito, que será utilizada no próximo capítulo.

2.4.2.4 Segurança no Entreverdes em TARKO *et alli* (2006)

O objetivo do trabalho de TARKO *et alli* (2006) é propor um método para calcular a probabilidade de um motorista encontrar-se numa Zona de Dilema do Tipo I. Esse método pode ser usado para determinar, em tempo real, a extensão de verde em um semáforo atuado, recurso esse que pode ser implementado nos controladores modernos.

Neste estudo, x é a distância do veículo até a linha de retenção quando o sinal muda para amarelo, Y é a duração do período de amarelo, b é a desaceleração, δ é o tempo de percepção

e reação e a velocidade de aproximação é v . A análise é similar à de EASA (1993), particularizada para considerar apenas o intervalo de amarelo.

Condições de ocorrência de dilema

Se a velocidade v é assumida como constante e considera-se que o veículo não pode prosseguir uma vez iniciado o amarelo, então

$$x > x_0 = Y.v \quad (2.70)$$

onde x_0 é a distância que o veículo percorre durante o período de amarelo.

O motorista não poderá parar na linha de retenção se

$$x < x_C = v.\delta + \frac{v^2}{2.b} \quad (2.71)$$

onde x_C é a distância de parada e δ é o símbolo utilizado para o tempo de reação.

Quando $x_0 < x < x_C$, uma Zona de Dilema do Tipo I ocorre, implicando que

$$Y < \delta + \frac{v}{2b} \quad (2.72)$$

Para eliminar a Zona de Dilema do Tipo I para um veículo com v , b e δ , o período de amarelo mínimo deve ser igual a:

$$Y_{\min} = \delta + \frac{v}{2b} \quad (2.73)$$

Função de probabilidade de dilema

Seja

$$d = \delta + \frac{v}{2b} \quad (2.74)$$

onde d é uma variável aleatória (que é função de outras variáveis aleatórias). Os autores assumem que sua distribuição é Normal:

$$d \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (2.75)$$

onde μ e σ são parâmetros a serem estimados.

Como a função de distribuição Normal não tem uma forma fechada, a função Logit é recomendada como uma aproximação da Normal.

Então, a função de distribuição acumulada $F_D[d]$ é, com a função Logit, aproximada por:

$$F_D[d] \approx \frac{1}{1 + \exp\left[-1,7 \frac{d - \mu}{\sigma}\right]} \quad (2.76)$$

onde o valor $-1,7$ é um parâmetro ajustado.

A Figura 2.28 mostra uma comparação entre a distribuição normal e a Logit.

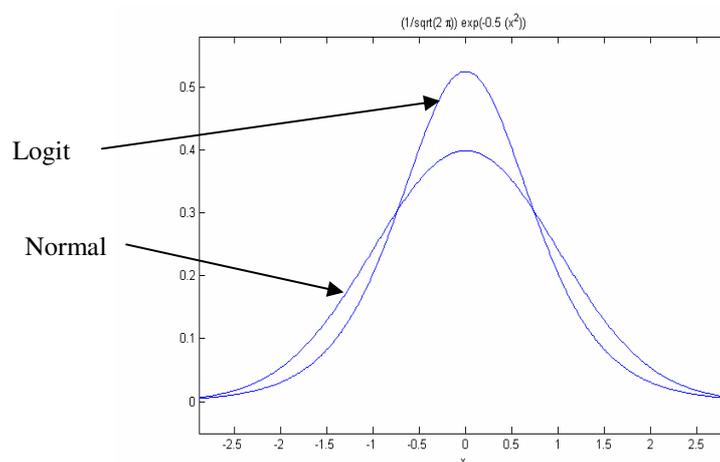


Figura 2.28 – Comparação entre a curva Normal e a Logit

A similaridade e a especificidade com a análise de EASA (1993) deixam claro que o critério da zona de dilema pode ser diferenciado para tratar apenas do intervalo de amarelo e tratado de forma aproximada com a utilização da função de distribuição logística. Da análise usualmente relacionada com o dimensionamento do entreverdes, a análise sobre o intervalo de vermelho de segurança poderia ser adicionada de forma complementar.

2.4.2.5 Análise da Segurança no Entreverdes nos Trabalhos Revisados

O aspecto relevante, para o presente trabalho, é a utilização de uma medida de segurança relativamente simples: o número de veículos que chegam na zona de dilema. Esta seria uma variável potencialmente interessante para modelos de oportunidades de conflito no entreverdes (aplicando formulações determinísticas ou probabilísticas).

Os trabalhos revisados desenvolveram a análise da segurança no entreverdes a partir do conceito de zona de dilema (tipo I e tipo II), permitindo adicionar a avaliação da contribuição do intervalo de amarelo e de vermelho de segurança para as oportunidades de conflito.

Em formulações determinísticas, esta contribuição poderia ser relacionada com o número de veículos que chegam ao cruzamento na situação de dilema, medindo sua duração em tempo (ao invés de medir sua extensão, que é a forma mais usual). Esta proposta de ZIMMERMAN e BONNESON (2004) tem similaridade com o conceito de oportunidade de conflito.

No entanto, os trabalhos revisados também coletaram técnicas relevantes para representar a contribuição dos componentes aleatórios (os métodos utilizados por EASA, 1993) e de obter aproximações simples de seu impacto (os métodos de EASA, 1993, e TARKO *et alli*, 2006).

2.4.3 Trabalho de SONGCHITRUKSA, TARKO (2006)

SONGCHITRUKSA, TARKO (2006) desenvolveram um método que pode ser usado como uma ferramenta de suporte para avaliar o risco de colisões angulares em interseções semaforizadas. Foram consideradas as manobras que podem resultar em um acidente angular. Cada manobra é associada a diferentes graus de risco de colisão angular. Para medir o grau do risco, foram considerados dois parâmetros: tempo até a colisão (TTC – “*time to collision*”) e o tempo após a ameaça (PET – “*post-encroachment time*”). O PET²⁵ foi escolhido como uma medida do grau de risco de colisão angular da interseção.

²⁵ Segundo LORD, D. (1996), PET é a única medida de análise de conflitos de tráfego que não está baseada em manobras evasivas.

PET é a diferença de tempo entre o momento em que um veículo “agressor” (veículo invasor no fim do seu direito de passagem) sai da área de conflito e o momento de chegada na área de conflito pelo segundo veículo (com direito de passagem).

Esse tempo é medido do para-choque traseiro do primeiro veículo ao para-choque traseiro do segundo veículo. Na Figura 2.29, $PET = t_3 - t_2$.

Portanto, para medir PET, é necessário conhecer apenas dois instantes no tempo: (i) quando o primeiro veículo (veículo transgressor) deixa a área de conflito e (ii) quando o segundo veículo entra na área de conflito já no seu direito de passagem.

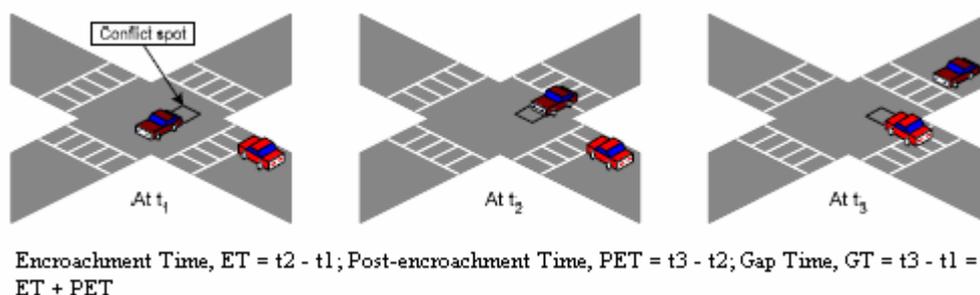


Figura 2.29 – Ilustração de PET

Segundo os autores, o PET foi escolhido como uma medida do grau de risco de colisão angular da interseção. Para medir PET, é necessário conhecer apenas dois instantes no tempo: (i) quando o primeiro veículo (veículo transgressor) deixa a área de conflito e (ii) quando o segundo veículo entra na área de conflito já no seu direito de passagem.

A técnica proposta é mais fácil de se medir em campo do que a tradicional técnica de análise de conflitos. Primeiro, a técnica de análise de conflitos requer a observação de uma área extensa, incluindo as aproximações da interseção, enquanto que a medida do PET se concentra na área de conflito da interseção. Segundo, a técnica de conflitos requer que seja estimado o TTC, o qual é difícil de ser medido e o uso de observadores humanos permite apenas aproximações grosseiras. Medir PETs por observadores humanos é muito mais fácil e mais preciso.

Fluxos e PETs foram coletados por meio de filmagens em vídeo. O laboratório móvel da Universidade de Purdue foi usado para gravar o tráfego em vídeo digital. O laboratório móvel é equipado com mastro pneumático de 42 ft (12,8 m) de altura onde estão fixadas duas câmeras (Figura 2.30).



Figura 2.30 – Laboratório móvel de Purdue University

Foram pesquisadas 16 interseções semaforizadas em Lafayette, Indiana. Cada interseção foi filmada por 8 horas. Os PETs foram coletados analisando-se o filme, quadro a quadro. A área de conflito da interseção foi dividida em 4 zonas de conflito pontuais (*spot conflict zones*), que são o ponto de conflito onde se interceptam as trajetórias de dois veículos conflitantes (todos em movimento em frente). Cada zona de conflito pontual foi marcada na imagem do vídeo por um laço virtual do sistema Autoscope. A observação mostrou-se viável e, com base em dados de acidentes da polícia de Indiana, foram obtidos modelos que estimam o grau de risco de colisões angulares.

O interesse no trabalho decorre de considerar-se que as medidas usuais de oportunidade de conflitos angulares são similares ao TTC (uma chegada conflitante durante a exposição, na ausência de manobra evasiva). O desenvolvimento de modelos alternativos ou a mensuração de oportunidades de conflito em campo podem preferir usar o PET. Além disso, o artigo mostra a viabilidade de pesquisa de campo por meio de filmagens para a obtenção de dados de conflitos, bem como dos demais dados necessários para a validação de modelos de tráfego.

2.5 ANÁLISE E AVALIAÇÃO GERAL

A principal inspiração para o presente trabalho foram as metodologias propostas por KAUB (2005), HA e BERG (1995) e ZHANG e PREVEDOUROS (2003), objetos de análise do presente capítulo, por terem usado e desenvolvido modelos de oportunidade de conflito, entendida como a probabilidade de ocorrência de situações que podem gerar conflitos de tráfego (ou mesmo acidentes). Este conceito é uma ferramenta potencialmente útil como medida de segurança e, com validações adequadas, poderá servir como base para o desenvolvimento de métodos de projeção de acidentes. A grande vantagem de se usar modelos de oportunidade de conflito (em vez do histórico de acidentes e os conflitos de tráfego propriamente ditos) como medida de segurança é que o modelo é construído a partir de relações intrínsecas das interações entre veículos e pedestres, permitindo uma compreensão dos fenômenos ocorridos. Os modelos de oportunidades de conflito também diferem dos modelos tradicionais que se valem de regressões baseadas em dados empíricos de uma amostra de locais, cujos resultados, por não guardarem relação direta com os fenômenos e variáveis particulares de cada local, não são transferíveis para locais com características diferenciadas.

A análise do trabalho desses autores pôde propiciar a comparação dos modelos apresentados, verificar as suas semelhanças e diferenças, além de eventuais deficiências e distorções.

Como exemplos de críticas que podem ser feitas aos modelos propostos, pode-se citar, entre outras:

- O conceito de exposição ao risco durante a manobra da travessia é um conceito fundamental, pois o conflito só poderá ocorrer se, durante esse tempo de exposição, houver um veículo conflitante. Embora esse conceito seja usado pelos autores estudados, verifica-se, em situações específicas, que eles fogem desse conceito, como, por exemplo, com KAUB (2005) para oportunidades de conflito angulares na via principal.
- Foi mostrado que o procedimento de KAUB (2005) de considerar os movimentos conflitantes de forma separada não reflete a realidade dos fatos, uma vez que a possibilidade de manobra não é avaliada pelos condutores por etapas, uma etapa para cada movimento conflitante, concluindo-se que é necessário agregar os movimentos conflitantes.

- Uma outra deficiência, verificada tanto em HA e BERG (1995) como em ZHANG e PREVEDOUROS (2003), é o fato de considerar que brechas muito pequenas ou muito grandes não geram oportunidades de conflito. Foi mostrado, por meio de um exemplo numérico, que podem existir casos em que essa metodologia não reflete a dificuldade de travessia.
- Foi possível fazer uma análise conceitual entre semelhanças e diferenças entre a metodologia de HA e BERG (1995) e a do KAUB (2005) (esta última transposta para a situação com semáforo) para oportunidades de conflito traseiras nos períodos de vermelho e dissipação de fila.
- Foi feita uma análise crítica sobre a aplicação do modelo de volume-ocupância de MILLAZO *et alli* (1998) por ZHANG e PREVEDOUROS (2003) para a estimativa de oportunidades de conflito com pedestres.
- Nenhum dos três estudos analisados leva em consideração a visibilidade como fator potencial de oportunidades de conflito traseiras.

Aspectos não contemplados pelos três trabalhos estudados, tais como oportunidades de conflito de movimentos protegidos e em períodos de entreverdes, foram complementados com o estudo de outros autores, cujos trabalhos, embora não tratassem explicitamente (em termos de terminologia) de “oportunidades de conflito”, trataram da probabilidade de risco, tanto angular como traseiro. Com base nos trabalhos mencionados, pode-se ampliar o escopo dos métodos de previsão revisados e incorporar novos aspectos ou contextos relevantes.

A análise e a crítica de todos esses trabalhos permitiu que se propusesse no Capítulo 3 modelos alternativos de oportunidades de conflito, tendo como objetivo final uma validação empírica dos modelos apresentados. Destaque deve ser dado à revisão do trabalho de EASA (1993), cuja metodologia dos momentos foi aplicada reiteradas vezes na proposição de modelos para estimar a frequência de oportunidades de conflito feita no Capítulo 3.

Finalmente, o trabalho de SONGCHITRUKSA, TARKO (2006) servirá de base, no Capítulo 4, para uma especulação acerca de possibilidades de validação de campo usando meios tecnológicos mais modernos, explorando o parâmetro empírico PET (“*postencroachment time*”) para estimar níveis de risco de colisões angulares.

3. DESCRIÇÃO DE MÉTODOS PARA ESTIMAR OPORTUNIDADES DE CONFLITO ANGULARES E TRASEIRAS EM INTERSEÇÕES

O objetivo deste capítulo é, com base na descrição e análise feita no Capítulo 2, selecionar os métodos mais adequados para a aplicação piloto (ver Capítulo 4) e propor métodos aprimorados, onde possível, dos modelos para estimar as oportunidades de conflito angulares e traseiras. Os desenvolvimentos, quando propostos, são feitos usando-se as metodologias adotadas nos estudos complementares, também revisados no Capítulo 2, quando forem julgadas adequadas e produzirem alterações consideradas potencialmente justificadas.

Neste sentido, o primeiro passo será resumir algumas conclusões e opções gerais decorrentes da revisão bibliográfica realizada e que serão utilizadas em todos os modelos apresentados ou propostos. A seguir, são discutidos dois aspectos específicos previamente comentados (os períodos da operação semafórica e a estimativa de ocupância para pedestres) e seis aspectos principais não tratados de forma adequada (as oportunidades de conflito traseiras secundárias, a operação no entreverdes veicular, as travessias de pedestres em interseções com sinalização de prioridade e com semáforos, o modelo de ocupância sem semáforos e o de entreverdes para pedestres).

Então, os modelos para cada um dos contextos analisados são apresentados:

- a) Movimento veicular em interseções com sinalização de prioridade;
- b) Movimento veicular em interseções semaforizadas, incluindo:
 - i. movimentos veiculares protegidos;
 - ii. movimentos veiculares permitidos;
 - iii. entreverdes.
- c) Movimento de pedestres em interseções com sinalização de prioridade;
- d) Movimento de pedestres em interseções semaforizadas, incluindo:

- i. movimentos de pedestres protegidos;
- ii. movimentos de pedestres permitidos;
- iii. entreverdes.

Para cada um dos contextos acima, são apresentados, para oportunidades de conflito angulares e traseiras, os modelos de previsão selecionados e os desenvolvimentos propostos. Os modelos selecionados com base na literatura estudada consideram modelos de oportunidades de conflito angulares e traseiras em interseções com sinalização de prioridade e oportunidades de conflito traseiras, angulares e com pedestres para conversões à esquerda permitidas em interseções semaforizadas.

Os modelos propostos apresentam algumas novas formas para os casos anteriores e adicionam métodos abrangendo oportunidades de conflito com pedestres em interseções com sinalização de prioridade e em interseções semaforizadas para outros casos (isto é, exceto conversões à esquerda permitidas), além de oportunidades de conflito nos entreverdes.

Espera-se, com isso, chegar a um conjunto relevante de formulações a serem testadas e avaliadas na aplicação prática, descrita no Capítulo 4.

Nas Seções 3.1 e 3.2 são apresentados os aspectos gerais e específicos que serão utilizados para o desenvolvimento das expressões finais dos modelos propostos, os quais serão apresentados na Seção 3.3.

3.1 ASPECTOS GERAIS PARA OS MODELOS DE OPORTUNIDADES DE CONFLITO DE TRÁFEGO

Para apresentação dos modelos a serem estudados, neste capítulo será adotada a nomenclatura padronizada apresentada na Tabela 3.1 para as principais variáveis ou parâmetros que serão utilizados ao longo da exposição. Algumas variáveis específicas serão ainda introduzidas na discussão de contextos particulares (sendo apresentadas posteriormente).

Tabela 3.1 – Nomenclatura Básica Utilizada na Apresentação dos Modelos a Estudar

VARIÁVEL	DESCRIÇÃO	UNIDADE
CO	= oportunidade de conflito	CO
$CO(angular)$	= número de oportunidades de conflito angular	CO
$CO(angular)/h$	= número de oportunidades de conflito angular por hora	CO/h
$CO(traseira)$	= número de oportunidades de conflito traseira	CO
$CO(angular)/h$	= número de oportunidades de conflito traseira por hora	CO/h
h	= intervalo entre veículos	s
W	= largura da pista	m
W_{ped}	= largura da travessia de pedestres	m
R_c	= raio de manobra (entrada) da curva	m
α	= brecha crítica em manobras secundárias	s
β	= intervalo de seguimento em manobras secundárias	s
G	= tempo de verde para um grupo semafórico	s
R	= tempo de vermelho para um grupo semafórico	s
T_c	= tempo de ciclo semafórico	s
I_a	= duração do período de amarelo	s
I_v	= duração do período de vermelho de limpeza	s
I	= duração do entreverdes	s
I_{int}	= período de vermelho intermitente de pedestre	s
Ge	= tempo de verde efetivo para um grupo semafórico	s
Re	= tempo de vermelho efetivo para um grupo semafórico	s
Dv	= distância de visibilidade existente	m
Dp	= distância de visibilidade de parada	m
b	= frenagem segura	m/s^2
δ	= tempo de percepção e reação	s
a	= aceleração a partir do repouso	m/s^2
g	= aceleração da gravidade	m/s^2
i	= greide da aproximação (%i em porcentagem, $i=\%i/100$)	-
μ	= coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento	-
μ_c	= limite em curva do coeficiente de atrito pneu-pavimento	-
μ_f	= limite em frenagem do coeficiente de atrito pneu-pavimento	-
L	= comprimento do veículo	m
v_i	= velocidade da aproximação i	m/s
v_{ci}	= velocidade de conversão na aproximação i	m/s
v_{ped}	= velocidade de pedestres	m/s
Q_i	= fluxo do movimento i em veículos por hora	v/h
q_i	= fluxo do movimento i em veículos por segundo	v/s
t_i	= tempo de manobra do movimento i	s
T_i	= tempo de exposição do movimento i	s
T_{pi}	= tempo de parada do movimento i	s
C_j	= capacidade de tráfego da aproximação j	v/h
S_j	= fluxo de saturação da aproximação j	v/h
Q_{pedk}	= volume de pedestres do movimento k por hora	v/h
q_{pedk}	= volume de pedestres do movimento k por segundo	v/s
td_{Ia}	= deficiência de intervalo de amarelo	s
td_{Iv}	= deficiência de intervalo de vermelho de segurança	s
td_I	= deficiência de intervalo de entreverdes total	s
td_{Ip}	= deficiência de intervalo de entreverdes de pedestres	s
td_{Ic}	= deficiência de entreverdes do estágio anterior para pedestres	m
Z	= distância ao ponto crítico de conflito no entreverdes	m
W_{zc}	= largura de uma zona de conflito com travessia de pedestres	m
Z_{ped}	= distância ao ponto de conflito na travessia de pedestres	m
d	= extensão da trajetória do veículo no movimento de conversão	m

Quando necessário representar a distribuição de uma variável aleatória, deverão ser especificados o modelo de distribuição (normal, exponencial, empírica, ...) e seus parâmetros ou, mais comumente, seus momentos centrais em unidades consistentes (por exemplo, para a velocidade, μ_v = média da velocidade v em m/s e σ_v = desvio padrão da velocidade v em m/s).

Quando considerado necessário, a exposição recorrerá a exemplos numéricos aplicados a casos esquemáticos para ilustrar tópicos específicos.

3.1.1 Área de influência da interseção

A área de influência da interseção (isto é, a área onde a interação entre veículos que pode gerar conflitos é devida à existência da interseção) compreende a área de conflito da interseção e mais uma zona a montante das aproximações onde, devido à existência de fila de veículos (ou um veículo parado) e necessidade de frear ou desviar, os veículos que se aproximam podem sofrer interferência da interseção. Assim, a área de influência não é fixa, variando de interseção para interseção, inclusive, podendo variar, na mesma interseção, de momento a momento, dependendo da existência e do comprimento de fila de veículos nas aproximações e da frequência e tipo de manobras interferentes em um período.

Neste trabalho, seguindo KAUB (2005), a oportunidade de conflito será entendida como a exposição ao risco que um veículo que está fazendo a manobra na área de influência da interseção sofre devido à chegada de um veículo conflitante, mas não será definida uma extensão fixa para a área da influência.

3.1.2 Distribuição de Intervalos e de Chegada de Veículos e de Interferências

Um dos elementos essenciais para a formulação de modelos de oportunidades de conflito é a distribuição de intervalos. No presente trabalho, será admitido que a distribuição de intervalos é uma distribuição exponencial negativa e, por conseguinte, a chegada de veículos segue a distribuição de Poisson. A distribuição exponencial não considera a separação mínima entre veículos e a chegada de veículos em pelotão. Outras hipóteses de distribuições mais realistas (como a M3 de Cowan) poderiam ser utilizadas.

No entanto, a principal deficiência do modelo de chegadas poissonianas e chegadas exponenciais é contornada pela estratégia, que será adotada, de distinguir diferentes períodos de operação. Por exemplo, será explicitamente distinguido o período de tempo com fluxo em pelotão do período de tempo com chegadas livres (poissonianas). Desta forma, os períodos de operação com pelotões compactos são tratados distintamente. Na proposição atual, esta estratégia será aplicada somente para interseções semaforizadas mas poderia ser igualmente aplicada em outros casos (o HCM/2000 recomenda uma análise deste tipo para interseções com sinalização de prioridade).

Estendendo a formulação de WANG *et alli* (2002) para previsão das oportunidades de conflito, a hipótese poissoniana poderia ser também aplicada às interferências que podem gerar conflito com um fluxo passando pela interseção. No caso de uma oportunidade de conflito, a interferência pode ser associada a uma simples passagem de veículo conflitante adiante do veículo considerado e diferentes períodos de operação podem ser distinguidos.

3.1.3 Forma Básica e Forma Inversa para Estimativa de Oportunidades de Conflito

Na forma básica, a estimativa de oportunidades de conflito é dada por:

$$CO_{ijk}(tipo) = ((Q_i \cdot P_{ik}) \cdot P_{RiK}) \cdot P_{jik}^{26} \quad (3.1a)$$

e na forma inversa é dada por

$$CO_{ijk}(tipo) = ((Q_j \cdot P_{jk}) \cdot P_{RjK}) \cdot P_{ijk}^{26} \quad (3.1b)$$

(que correspondem à perspectiva do veículo inicial e do veículo final, conflitante), onde:

- i = manobra inicial²⁷ que fica exposta ao risco
- j = manobra final²⁸ que gera conflito
- k = período de operação (vermelho, dissipação de fila, etc)

²⁶ Os parêntesis foram usados apenas para sugerir a ordem de cálculo: define-se o período, identifica-se o fluxo do período, determina-se a proporção que entra em risco e, então, a probabilidade de chegada ou de interferência.

²⁷ A manobra inicial é a manobra propriamente dita (veículo cruzando a interseção, por exemplo).

²⁸ A “manobra final” não é propriamente uma manobra, mas é a chegada de um veículo conflitante e pode não incluir o destino final do veículo (por exemplo, pode ser a chegada na via principal, sem distinguir qual a manobra o veículo vai fazer depois).

- p_k é a proporção da demanda no período de operação k (para i ou para j)
- p_{Rik} é a parcela da demanda de i que se expõe ao risco no período de operação k
- p_{Rjk} é a parcela da demanda de j que se expõe ao risco no período de operação k
- $p_{jik} = \left(1 - e^{-\gamma_{jk} \cdot q_j \cdot T_i}\right)$ é a probabilidade de uma chegada conflitante de j no tempo de exposição T_i
- $p_{ijk} = \left(1 - e^{-\eta_{ik} \cdot q_i \cdot T_j}\right)$ é a probabilidade de uma interferência gerada por i durante o tempo de exposição²⁹ T_j de uma chegada na manobra j
- os parâmetros γ_{jk}, η_{ik} transformam os fluxos conflitantes ou interferentes para a frequência de eventos relevantes durante o tempo de exposição.

No caso da forma inversa, a transformação requerida (γ_{jk}, η_{ik}) refere-se à frequência de interferências geradas, como em WANG *et alli* (2002). No caso da forma básica³⁰, a transformação requerida refere-se, em geral, apenas ao fluxo de tráfego em j , específico no período k (embora possa também se referir a interferências geradas). A hipótese de distribuição exponencial pode, naturalmente, ser substituída por outra mais adequada.

3.1.4 Tempo de Exposição

Na forma geral sugerida por KAUB (2005), que será seguida aqui, o tempo de exposição ao risco em uma dada manobra inicial é uma variável básica de interesse para a previsão da frequência de oportunidades de conflito. Em princípio, parece possível fazer uma discussão genérica sobre o conceito a ser adotado para o tempo de exposição nas diferentes manobras ou tipos de oportunidade de conflito de tráfego e adotar um entendimento uniforme.

Este entendimento uniforme, distinguindo cada tipo de interseção e/ou aproximação e considerando cada oportunidade de conflito, é proposto a seguir (partindo da estratégia

²⁹ No caso da forma inversa, o tempo de exposição não é o tempo da manobra do veículo que chega, mas o tempo no qual uma manobra interferente traz risco. Por exemplo, o tempo em que um veículo da via transversal fica na área de conflito da interseção na chegada de um veículo na via principal.

³⁰ A forma adotada por Kaub é a forma básica, com $\gamma_{jk} = 1$.

adotada por KAUB (2005), de avaliar a frequência das oportunidades de conflito prováveis gerados por uma manobra inicial que se expõe ao risco diante de chegadas conflitantes).

3.1.4.1 Oportunidades de Conflito Angulares

Para oportunidades de conflito angulares, existem proposições de usar o tempo de cruzamento (da manobra, com ou sem o tempo de reação) e a brecha crítica como medidas de exposição. Entre estas variáveis, é plausível supor que os tempos de manobra e as brechas críticas são relacionados (embora a relação funcional ainda não tenha sido exaustivamente pesquisada). Os tempos de manobra podem ser avaliados por modelos cinemáticos simples e podem ser diretamente relacionados com variáveis de projeto. Já as brechas críticas são comportamentais e dependem de levantamentos de campo específicos.

Por ser mais simples e previsível será considerado o tempo de execução da manobra de cruzamento ou conversão (para veículo) ou de travessia (para pedestre) como tempo de exposição, tanto para aproximações de interseções com sinalização de prioridade (principais ou secundárias) quanto de interseções semaforizadas.

Para os movimentos principais, será adotado o tempo de manobra sem o tempo de reação, enquanto que, para os movimentos secundários, o tempo de manobra será acrescido do tempo de percepção e reação, isto é:

a) para movimentos principais:

$$T_i = t_i \quad (3.2a)$$

b) para movimentos secundários:

$$T_i = \delta + t_i \quad (3.2b)$$

Não será considerada diretamente a brecha crítica, nem incluído o desvio padrão de 2 s das brechas aceitas, conforme adotado por HA e BERG (1995), no tempo de exposição. No entanto, estes conceitos são bastante próximos e relacionados com o tempo de manobra. A opção de incluir ou não o tempo de reação no tempo de exposição parece um tanto arbitrária e

a decisão acima expressa o fato de que o fluxo principal segue um curso normal e é o fluxo secundário que deve decidir se tem condições ou não de realizar a manobra sem preferência.

A opção da utilização do tempo de manobra como base para o tempo de exposição, em vez do uso de brechas críticas como se faz no TRAF-Safe, além da simplicidade, deve-se ao fato de que o tempo de manobra é mais sensível às características geométricas da interseção, ao passo que as brechas críticas são valores médios típicos que, apesar dos ajustes previstos (por exemplo, no HCM/85), podem não representar com fidelidade a realidade de cada local específico. Além disso, o uso de brechas críticas como tempo de exposição não poderia ser aplicado a movimentos prioritários em interseções não semaforizadas.

Nos diversos casos considerados (para os movimentos principais de uma interseção não semaforizada ou para movimentos protegidos em semáforos, e para os movimentos secundários, incluindo os permitidos em semáforos), o tempo de manobra t_i pode ser medido diretamente em campo ou estimado pelas expressões seguintes:

a) Movimento principal em frente:

$$t_i = \frac{W + L}{v_i} \quad (3.3a)$$

b) Movimento principal de conversão

$$t_i = \frac{d + L}{v_c} \quad (3.3b)$$

onde v_c é a velocidade de conversão, que é limitada pela velocidade crítica de conversão (acima da qual o veículo não consegue fazer a curva), dada pela expressão:

$$v_c^{\text{máx}} = \sqrt{\mu \cdot g \cdot R_c} \quad (3.3c)$$

c) Movimento secundário em frente

$$t_i = \sqrt{\frac{2(W + L)}{a}} \quad (3.3d)$$

d) Movimento secundário de conversão

$$t_i = \sqrt{\frac{2(d + L)}{a}} \quad (3.3e)$$

onde os movimentos de conversão assumem um raio de manobra R_c , tendo-se:

$$d = \frac{\pi}{2} \cdot R_c \text{ (conversão próxima, à direita ou à esquerda),} \quad (3.3f)$$

$$\text{com } R_c = R_d \text{ ou } R_e$$

$$\text{ou } d = \frac{\pi}{2} \cdot R_c + x \text{ (conversão afastada, à direita ou à esquerda)} \quad (3.3g)$$

$$\text{com } R_c = \min\{R_{in}, R_{out}\} \quad (3.3h)$$

$$\text{e } x = |R_{in} - R_{out}| \quad (3.3i)$$

$$R_{in} = \frac{W_{in}}{2N_{in}} + W_o + W_{Mo} \quad \text{e} \quad R_{out} = W_i + W_{Mi} + \frac{W_{out}}{2N_{out}} \quad (3.3j)$$

sendo:

R_c = raio de curva em m

R_d = raio geométrico (definido pelo meio-fio) à direita em m

R_e = raio geométrico (definido pelo meio-fio) à esquerda em m

R_{in} = raio de entrada em m

R_{out} = raio de saída em m

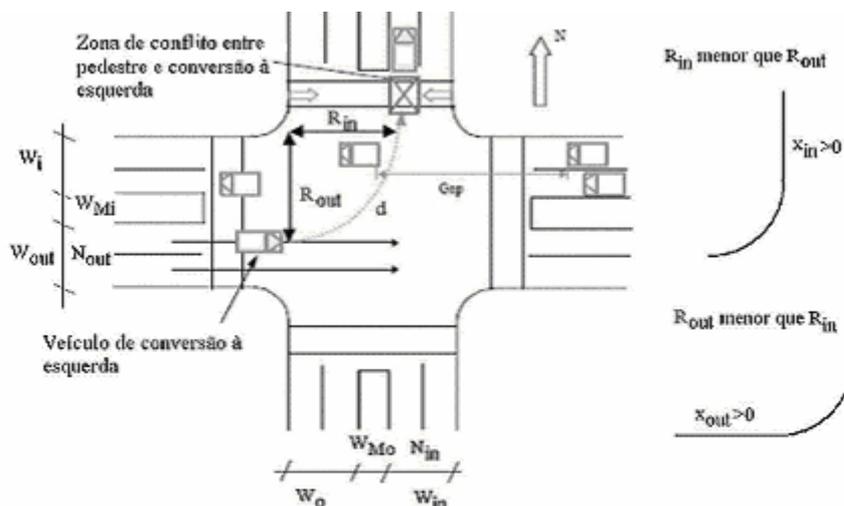
W_{in} = largura da via no sentido de entrada em m

N_{in} = n° de faixas na entrada

W_o = largura da via no sentido oposto à entrada em m

W_{Mo} = largura do canteiro com sentido oposto de entrada em m

W_{out} = largura da via no sentido de saída em m
 N_{out} = nº de faixas na saída
 W_i = largura da via no sentido oposto à saída em m
 W_{Mi} = largura do canteiro com sentido oposto de saída em m
 x = percurso reto complementar na manobra em m



$$R_c = \min\{R_{in}, R_{out}\} \quad x_{in} = R_{out} - R_c \quad x_{out} = R_{in} - R_c$$

$$R_{in} = \frac{W_{in}}{2 \cdot N_{in}} + W_o + W_{Mo} \quad R_{out} = W_i + W_{Mi} + \frac{W_{out}}{2 \cdot N_{out}}$$

Figura 3.1 – Elementos geométricos da interseção

Para os movimentos principais em conversão, um valor crítico típico para μ é 0,60 para pavimento seco e velocidade de 60km/h (WIDMER, 2002). No entanto, tradicionalmente, o projeto geométrico em curvas utiliza valores confortáveis para a aderência lateral solicitada, como os estabelecidos no manual da AASHTO (2004), que ficam entre 0,20 e 0,30 e normalmente proporcionam valores seguros mesmo em pavimento molhado (a super-elevação da curva é também relevante para a segurança das conversões).

Assim, na prática, os motoristas devem fazer a conversão com uma velocidade abaixo da velocidade crítica, fazendo com que o tempo de exposição real seja maior do que o calculado com a velocidade crítica. Em geral, admite-se que é possível avaliar a velocidade de conversão com a mesma fórmula, utilizando os coeficientes de atrito usuais, e que se deve adotar uma velocidade de conversão menor que a velocidade normal de aproximação. Onde a operação aproxima-se do limite de segurança (como pode ser evidenciado pela ocorrência de acidentes decorrentes), pode-se usar a velocidade crítica de conversão. Ao trabalhar com

tempos de exposição menores, estamos sendo mais conservadores na estimativa das COs. Essa é uma razão para que o tempo seja medido diretamente em campo (em vez de ser estimado por cálculos), o que refletiria uma maior precisão na estimativa das COs.

Para os movimentos secundários, supõe-se que os veículos partem do repouso, com uma aceleração a constante. Para uma aproximação em nível, pode-se adotar os valores de aceleração de 5km/h/s ($1,389\text{m/s}^2$) para autos (para veículos pesados, em especial dependendo da situação de carga, pode-se adotar valores menores).

Note que foi admitido que o condutor busca uma dada taxa de aceleração a , compensando pelas condições locais da via ao decidir sua ação de aceleração (mais propulsão em aclive e menos propulsão em declive). Caso contrário, deve-se subtrair ou somar a parcela gravitacional dada por $i.g$ ($g=9,78\text{m/s}^2=35,2\text{km/h/s}$ ao nível do mar ou em altitudes usuais, normalmente inferiores a 1000m), onde $\%i$ é a porcentagem de aclive ou declive na aproximação, respectivamente, e a fração correspondente é calculada como $i=\%i/100$, para aproximações em aclive ou declive. Este caso pode ser mais adequado em rampas íngremes (onde a capacidade de aceleração do veículo é um fator limitante).

3.1.4.2 Oportunidades de Conflito Traseiras

O risco de colisões traseiras é devido à existência de um “veículo interferente”, que pode estar parado (aguardando brecha ou a luz verde do semáforo) como pode estar desacelerando. No primeiro caso, o veículo interferente fica estático e o tempo de exposição ao risco de um veículo que se aproxima pode ser definido como o tempo em que o veículo-interferente fica parado no final da fila. No segundo caso, o veículo interferente é móvel e o tempo de exposição é o tempo que o veículo interferente leva para desacelerar. A rigor, na forma básica, como a exposição está relacionada com a frenagem do veículo interferente móvel, a mesma perduraria somente até ser protegido por outro veículo lento seguidor mas, em vista do efeito cumulativo da exposição de sucessivos veículos lentos e do curto tempo de exposição usualmente envolvido, este aspecto parece irrelevante e será desprezado.

Existem, pelo menos, duas situações em que um veículo pode se tornar um veículo interferente móvel. A primeira situação é aquela em que o veículo interferente desacelera para efetuar uma conversão, de uma velocidade v (velocidade de aproximação) para v_c (velocidade

de conversão). A segunda situação é aquela em que a frenagem efetuada pelo veículo interferente deve-se a outras interferências. Estas outras interferências podem ser outras oportunidades de conflito, como as geradas por cruzamentos ou travessias de movimentos secundários e o evento analisado corresponderia a uma oportunidade de conflito secundária (no sentido de que é uma oportunidade de conflito gerada por outra oportunidade de conflito, que é primária).

Os modelos de previsão de colisões traseiras, como nos estudos de WANG *et alli* (2002) revisados no capítulo anterior, adotam a perspectiva da segunda situação, sem distinguir a natureza das outras interferências (isto é, não se limitam a oportunidades de conflito secundárias). Esse tipo de situação é, normalmente, a que pode causar conflitos traseiros mais sérios pelo fato de a desaceleração do veículo interferente ser brusca, inesperada e repentina. Por este motivo, será também considerada.

As oportunidades de conflito traseiras com veículo interferente móvel podem ocorrer na via principal de uma interseção com controle PARE ou no período de verde de um movimento protegido de uma aproximação semaforizada. No presente trabalho, admite-se que não há oportunidades de conflito traseiras com veículo interferente móvel na via secundária de uma interseção com controle PARE (somente ocorrerão com veículo-interferente parado).

A desaceleração pode variar de valores confortáveis até frenagens emergenciais (quando a aderência seria um fator normalmente limitante, especialmente com pavimento molhado). O valor adotado para frenagens confortáveis seria da ordem de 3km/h/s ($0,833\text{m/s}^2$). O valor limite para coeficientes de aderência em pavimento molhado seria algo ao redor de 3m/s^2 ($10,8\text{km/h/s}$) ou 10km/h/s ($2,778\text{m/s}^2$), ambos correspondentes a uma aderência de 0,30 ou cerca de 30%. No presente trabalho, é admitida uma frenagem normal e segura com o valor limite igual a 10km/h/s ($2,778\text{m/s}^2$).

O tempo de percepção e reação δ varia de forma mais notável. Para situações esperadas, como paradas em semáforos (também poderia ser usado para paradas onde a fila é visível à distância), são adotados tempos de reação da ordem de 1s, enquanto que, para situações inesperadas, como obstáculos na pista (conversões inesperadas, como também poderia ser usado para interferências geradas por cruzamentos e travessias), são adotados valores maiores, entre 2 e 2,5s, em geral. Valores muito superiores são exigidos em situações complexas

(quando a decisão é complexa) mas este poderia ser o caso mais freqüente para o veículo que sofre outra interferência, não um veículo seguidor (o veículo atrás reage à frenagem do primeiro veículo e tem uma situação mais simples diante de si).

As oportunidades de conflito traseiras com veículo da fila em espera podem ocorrer na via secundária de uma interseção com controle PARE ou durante o período de vermelho e de dissipação de fila de uma aproximação semaforizada. No primeiro caso, o veículo em fila de espera está parado aguardando uma brecha adequada para realizar a manobra de travessia da interseção. No segundo caso, o veículo em fila de espera está parado aguardando o escoamento da fila à sua frente. A parada, em ambos os contextos, naturalmente envolve frenagem anterior mas normalmente o tempo em espera é bastante maior e a frenagem anterior será, neste caso, desprezada.

Na via secundária de interseção com controle PARE, a oportunidade conflito traseira é caracterizada pela existência de pelo menos um veículo parado e pela chegada de um veículo de trás na mesma faixa. Como a chance de ocorrer um conflito traseiro na via secundária depende da aproximação do veículo de trás, quando ainda não é caracterizado o seu movimento de manobra (se é movimento em frente ou se é movimento de conversão), o cálculo de oportunidades de conflito traseiras na via secundária não é feito movimento a movimento, mas do conjunto de todos os seus movimentos. Além disso, é considerado o comportamento esperado dos condutores que trafegam numa via secundária, ou seja, presume-se que os condutores sabem que a preferência é da outra via e que, portanto, tem que esperar brechas adequadas no tráfego para passar. Por causa deste fato, em geral, a velocidade de aproximação na via secundária é mais baixa do que na via principal. Dessa forma, a chance de colisão traseira deve ser baixa, em condições de boa visibilidade do final da fila, à distância, sendo este um fator preponderante para a ocorrência de colisões traseiras.

O método proposto, embora adote o mesmo procedimento básico utilizado pelo TRAF-Safe, busca incorporar a agregação dos fluxos conflitantes e o efeito da visibilidade existente.

O tempo de exposição é o tempo em que o veículo da frente (veículo em fila de espera) ficar parado, aguardando brecha no tráfego da via principal para passar. Diversas expressões podem ser utilizadas para estimar esse tempo de espera. Por simplicidade, o cálculo do tempo de espera será feito pela mesma expressão utilizada pelo HCM/2000. Para fins de

comparação, será também utilizada a expressão de Adams³¹, adotada pelo TRAF-Safe, que fornece o atraso no topo da fila (do primeiro da fila apenas) e a expressão de HA e BERG (1995) que usa implicitamente o tempo em que o veículo é o último da fila (ao avaliar as oportunidades de conflito diretamente pelo número de veículos que param).

Portanto, tem-se:

a) Veículo interferente móvel

$$T_i = t_f \quad (3.4a)$$

onde t_f é o tempo necessário de frenagem para reduzir a velocidade.

b) Veículo em fila de espera

$$T_i = t_{ep} \quad (3.4b)$$

onde t_{ep} é o tempo médio parado (em fila de espera) para os veículos que param.

O tempo necessário de frenagem para reduzir a velocidade de Δv é

$$t_f = \frac{\Delta v}{b + i.g} = \frac{v - v_c}{b + i.g} \text{ ou} \quad (3.5a)$$

$$t_f = \delta + \frac{\Delta v}{b + i.g} = \delta + \frac{v - v_r}{b + i.g} \quad (3.5b)$$

onde $\Delta v = v - v_c$ é a redução de velocidade em relação à velocidade de aproximação v para a velocidade de curva v_c , no caso de conversões, ou outro valor considerado v_r , mesmo até a parada $v_r = 0$, conforme o caso específico (decorrente da interferência). Por simplificação, será admitido que, no caso de COs geradas por interferências (COs traseiras consideradas

³¹ Originalmente, a expressão de Adams foi desenvolvida para estimar o atraso de pedestres (que atravessam lado a lado, portanto, sem o efeito da fila). Para veículos que esperam em fila, seria necessário acrescentar o tempo de espera em fila até tornar-se o primeiro veículo da fila para ter a estimativa correspondente do tempo em espera.

como COs secundárias), a desaceleração do veículo interferente será considerada até a parada total ($v_r = 0$).

$$t_f = t_p = \delta + \frac{v}{b + i.g} \quad (3.5c)$$

Neste caso, como o veículo interferente está em movimento, pode-se obter a probabilidade de uma chegada conflitante com o fluxo aparente $\tilde{q} = q \cdot \left(1 - \frac{v_r}{v}\right)$, relativo ao observador em movimento.

Note que é admitido que o condutor decide o esforço de frenagem e que a taxa de desaceleração obtida é ajustada para as condições da via (mais desaceleração em aclave e menos desaceleração em declive). O critério é, portanto, distinto do adotado para a aceleração, por considerar-se que o esforço físico e o desconforto na frenagem são normalmente mais pronunciados que o correspondente aos níveis usuais de aceleração. Neste caso, a taxa de desaceleração b corresponde ao esforço de frenagem e à solicitação de aderência, podendo ser diretamente comparada aos limites de aderência da interação pneu-pavimento, mas não corresponde à taxa de desaceleração efetiva (que é dada por $b + i.g$).

Para o veículo parado em fila de espera, segundo a discussão do capítulo anterior, o tempo de espera deve ser calculado como tempo médio por veículo que pára e aplicado apenas à proporção de veículos que pára. No entanto, as expressões usuais usam o atraso médio por veículo, tendo-se assim

$$t_{ep} = \frac{t_e}{p} \quad (3.6)$$

onde p é a proporção de veículos que pára em uma dada aproximação.

Em uma interseção com sinalização de prioridade, a proporção de veículos que pára pode ser aproximada por:

$$p = 1 - p_{n=0} \cdot P[L \geq \alpha] \quad (3.7a)$$

com $p_{n=0} = (1 - X)$ e $P[L \geq \alpha] = e^{-q_o \cdot \alpha}$ ou

$$p = 1 - (1 - X) \cdot e^{-q_o \cdot \alpha} \quad (3.7b)$$

sendo que $p_{n=0}$ é a probabilidade de não ter fila, com $X = Q / C$, onde Q é a demanda e C é a capacidade da manobra secundária considerada, e $P[L \geq \alpha]$ é a probabilidade de ter uma brecha residual (*lag*) maior que a brecha crítica α ao chegar sem fila, considerando a brecha crítica α e o fluxo oposto q_o da manobra secundária (TROUTBECK, 1993). Note que na ótica de HA e BERG (1995), apenas a proporção de veículos que chega com fila seria necessária (que poderia ser simplesmente estimada com $p_{n>0} = X$).

Seguindo o HCM/2000, a capacidade é estimada pela fórmula poissoniana 17-3 (dados os valores de brecha crítica α e intervalo de seguimento β adotados, tem-se $C = \frac{e^{-q_o \cdot \alpha}}{1 - e^{-q_o \cdot \beta}} \cdot Q_o$, aos quais aplicam-se correções por efeitos de impedância. Quando existem diferentes movimentos compartilhando a via secundária, obtém-se $X_i = Q_i / C_i$, para cada manobra, e então obtém-se X e Q somando as manobras (a capacidade será $C = Q / X$).

A expressão $p_{n=0} = (1 - X)$ é uma aproximação (baseada em processos estocásticos de filas M/M/1) para a proporção do tempo em que há filas de espera (isto é, há pelo menos um veículo em fila)³². Admitindo chegadas uniformes, em situação estacionária, a probabilidade de parar exclui a probabilidade de chegar sem fila (obtida da proporção do tempo com fila) e ter um *lag* adequado para a manobra secundária. A generalização para o contexto dinâmico (com sobre-demanda) poderia usar os procedimentos propostos por WU (1994).

³² Quando parte da fila é abrigada (até n veículos abrigados), então interessa a proporção do tempo com mais de n veículos na fila. Para k veículos na fila, a expressão correspondente é $p_k = X^k \cdot (1 - X)$. É fácil ver que $p_{K \leq n} = 1 - X^{n+1}$ e, portanto, $p_{K > n} = 1 - p_{K \leq n} = X^{n+1}$. Por exemplo, esta seria a probabilidade para o caso da exposição traseira quando há uma baía de conversão para até n veículos.

Com intervalos entre veículos exponenciais, $P[L \geq \alpha] = P[H \geq \alpha] = e^{-q_o \cdot \alpha}$ é a probabilidade de ter um *lag* adequado para a manobra secundária na chegada. A expressão para a distribuição de Cowan pode ser encontrada em TROUTBECK (1993).

Para o atraso médio por veículo, a expressão 17-38 do HCM/2000 é:

$$t_e = \frac{3600}{C} + 900T_p \left((X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{8X}{CT_p}} \right) \quad (3.8a)$$

onde T_p é a duração do pico de demanda, em horas (em geral, recomenda-se usar 0,25h, ou seja, 15 minutos), além de um termo fixo (+5 s) correspondente ao atraso de desaceleração/aceleração e, comparativamente, a expressão de Adams é:

$$t_e = \frac{e^{q_c \alpha} - 1}{q_c} - \alpha \quad (3.8b)$$

onde:

q_c = fluxo conflitante (principal) em v/s

α = brecha crítica do veículo parado em s

Na aplicação do HCM/2000, os valores de brecha crítica e de intervalo de seguimento recomendados serão utilizados. Na aplicação da expressão de Adams, os valores de brecha crítica serão substituídos pelo tempo de cruzamento T_i (tempo de manobra mais o tempo de percepção e reação). Neste caso, como T_i depende do tipo de manobra que o veículo parado pretende executar (movimento em frente, conversão à esquerda ou à direita) e não se aplica a fórmula de composição do HCM/2000, propõe-se usar α como uma média ponderada pela proporção de veículos dos tempos de manobra de cada um dos tipos de manobra:

$$\alpha \cong \frac{\sum_{i=1}^n t_i q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (3.9)$$

sendo:

i = tipo de manobra (movimento em frente, conversão à esquerda ou à direita)

Em uma interseção semaforizada, a proporção de veículos que pára pode ser aproximada pela razão de tempo com filas

$$p = \frac{R + G_q}{T_c} \quad (3.10)$$

onde R é o tempo de vermelho, G_q é o tempo de dissipação de fila e T_c é o tempo de ciclo do semáforo. O tempo de dissipação da fila é obtido em função do modelo de tráfego adotado. Para semáforos de tempos fixos com chegadas determinísticas e uniformes, pode-se usar a fórmula tradicional $G_q = Q.R / (S-Q)$, sendo dado o fluxo de saturação S (a capacidade de dissipação de filas) da aproximação. As expressões alternativas do HCM/2000 para G_q são uma combinação de modelos teóricos e ajustes empíricos (no Apêndice C do seu Capítulo 16). Exceto pela vantagem de usar a representação de chegadas em pelotão, com seu modelo peculiar, seria discutível a conveniência de adotar a formulação do HCM/2000. Por exemplo, não fica claro se as estimativas G_q são consistentes com os modelos de atraso e filas adotados no próprio HCM/2000 (que incluem componentes aleatórios e de sobre-demanda).

Por simplicidade, então, no caso de aproximações semaforizadas, o tempo de espera pode ser calculado apenas com o termo de atraso uniforme, dado pela expressão 16-11, do HCM/2000.

$$d_1 = \frac{0,5.T_c \cdot \left(1 - \frac{G_e}{T_c}\right)^2}{1 - \left[\min(1, X) \frac{G_e}{T_c}\right]} \quad (3.11a)$$

onde:

d_1 = atraso uniforme médio por veículo em s

T_c = ciclo em s

G_e = verde efetivo em s

X = grau de saturação

sendo $X = Q/C$, com $C = G_e/T_c \cdot S$ (dado o fluxo de saturação S da aproximação).

O atraso pode ser também estimado com a fórmula usual (de dois termos), adicionando o sobre-atraso, dado pela expressão 16-12 do HCM/2000, como

$$d_2 = 900T_p \left((X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8kX}{CT_p}} \right) \quad (3.11b)$$

utilizando $\kappa = 0,5$ (que corresponde a semáforo isolado de tempos fixos), onde novamente T_p é a duração do pico de demanda, em horas (em geral, recomenda-se usar 0,25h, ou seja, 15 minutos). O HCM/2000 recomenda um terceiro termo de atraso (inicial ou transiente) que é relevante apenas para situações de sobre-demanda pronunciada ou na análise com múltiplos subperíodos (no Apêndice F do seu Capítulo 16) e que será aqui desprezado.

Poderiam ser utilizadas outras expressões para estimar o tempo de espera como, por exemplo, a fórmula completa do HCM/2000 ou a fórmula de Webster. A escolha da fórmula para o tempo de espera não altera a essência dos argumentos e será deixada como uma questão empírica, a ser analisada e testada em trabalhos de validação. Para níveis usuais de solicitação da capacidade em uma aproximação semaforica, estes são os termos predominantes.

3.1.5 Restrições de Visibilidade e da Distância de Parada: Tratamento Empírico

Nos estudos revisados, o efeito de restrições de visibilidade não foi considerado na distância de parada. As proposições feitas a seguir, relativas à estimativa de oportunidades de conflito, consideram duas estratégias de tratamento para o efeito da visibilidade: um termo de correção empírico/heurístico e um termo de correção teórico/probabilístico.

A estratégia heurística de consideração do efeito da condição de visibilidade pode ser incorporada por um termo de correção empírico como, por exemplo,

$$P_{sv} = \text{máx} \left\{ \frac{D_p - D_v}{D_p}; 0 \right\} \quad (3.12)$$

para avaliar a probabilidade P_{sv} de não ter visibilidade suficiente, onde D_p é a distância de visibilidade de parada requerida (dada pela expressão 3.13a) e D_v é a distância de visibilidade efetivamente existente (a estimativa aumenta quando a deficiência de visibilidade é maior, como aponta a intuição). No entanto, com base nos estudos revisados, é possível formular um modelo probabilístico para o efeito da restrição de visibilidade na frenagem.

3.1.6 Restrições de Visibilidade e da Distância de Parada: Tratamento Teórico

Na estratégia teórica, os métodos de aproximação adotados por EASA (1993) podem ser utilizados para obter a média e a variância de D_p , em função dos momentos das distribuições das variáveis envolvidas. A formulação relevante para oportunidades de conflito traseiras é distinta para aproximações retas ou em curva, assim como são distintas as formulações relevantes para oportunidades de conflito angulares em cruzamentos retos ou oblíquos, em função da condição imposta pela restrição de visibilidade. A seguir, será apresentado o caso usual para oportunidades de conflito traseiras, onde a condição de visibilidade é $D_v \geq D_p$, considerando apenas a velocidade como variável aleatória ou a velocidade e tempos de reação como variáveis aleatórias.

Tomando a fórmula usual para a distância de visibilidade de parada:

$$D_p = \delta.v + \frac{v^2}{2.(b + i.g)} \quad (3.13a)$$

e considerando apenas a velocidade como variável aleatória, tem-se:

a) para a média, com o método de primeira ordem (FOM):

$$E[D_p] = \delta.\mu_v + \frac{\mu_v^2}{2.(b + i.g)} \quad (3.13b)$$

b) para a média, com o método de primeira ordem e segundo momento (FOSM):

$$E[D_p] = \delta \cdot \mu_v + \frac{\mu_v^2}{2 \cdot (b + i \cdot g)} + \frac{\sigma_v^2}{2 \cdot (b + i \cdot g)} \quad (3.13c)$$

c) para a variância, com ambos os métodos (FOM e FOSM):

$$Var[D_p] = \left(\delta + \frac{\mu_v}{b + i \cdot g} \right)^2 \sigma_v^2 \quad (3.13d)$$

EASA (1993) fornece as expressões correspondentes considerando velocidade, tempo de percepção e reação e frenagem como variáveis aleatórias, conforme mostrado no Capítulo 2.

O efeito da restrição de visibilidade na ocorrência de oportunidades de conflito pode ser avaliado através do cálculo de $P[D_p > D_v]$.

$$P_{sv} = P[D_p > D_v] = P \left[v \cdot \delta + \frac{v^2}{2 \cdot (b + i \cdot g)} > D_v \right] \quad (3.14)$$

que pode ser avaliada com uma aproximação normal ou, admitindo uma distribuição logística para D_p , obtendo uma expressão analítica para $P[D_p > D_v]$.³³ Embora a hipótese de distribuição normal tenha sido adotada por EASA (1993), foi observado anteriormente que a distribuição logística é uma aproximação razoável, que possui a vantagem de ter uma distribuição acumulada com expressão analítica.

Novamente, o argumento desenvolvido não se altera, em essência, alterando apenas o método de aproximação adotado para a obtenção dos momentos e a hipótese adotada para a distribuição, preferindo-se a forma mais simples na exposição adiante (FOM com velocidade aleatória e hipótese de distribuição logística). Aliás, os trabalhos subsequentes de Easa usaram métodos mais sofisticados (*Advanced First Order-Second Moments – AFOSM*) que, em princípio, também poderiam ser aplicados.

Neste método há simplificações implícitas. Por exemplo, sempre se supõe que o veículo da frente está parado (a possibilidade de conflito traseiro é gerada pelo tempo em que ele fica

³³ Tem-se: $P[D_p > D_v] = 1 - \frac{1}{1 + e^{-(D_v - m)/a}}$, onde: $m = E[D_p]$ e $a = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{Var[D_p]}$.

parado). No entanto, existem veículos que não param, pois ao chegarem, já encontram um *lag* adequado para atravessar. Assim, a rigor, a expressão que estima as oportunidades de conflito traseiras deveria considerar a chance de haver um veículo parado. A extensão da fila também não está sendo levada em consideração na avaliação de visibilidade (a visibilidade relevante deve ser a do final da fila, o que faria ter de revisar continuamente a distância de visibilidade disponível para cada posição do final da fila).

3.1.7 Formulações Gerais com Efeitos Aleatórios: Visibilidade e Tempo de Reação

A metodologia baseada em EASA (1993) será utilizada diversas vezes ao longo do trabalho. Em alguns casos, especialmente nas formulações sobre o entreverdes, a formulação inspirada em WANG *et alli* (2002), que compara a distribuição dos tempos de reação disponível e necessário pode ser considerada como uma melhor alternativa e mais geral.

De forma semelhante ao proposto por WANG *et alli* (2002), o método probabilístico pode também ser formulado em função do tempo de percepção e reação. O tempo de percepção e reação disponível para parada, dada uma distância de visibilidade disponível D_v , decorrente da fórmula usual para a distância de visibilidade de parada, seria:

$$\delta_A = \frac{D_v}{v} - \frac{v}{2.(b+i.g)} \quad (3.15a)$$

e os momentos da distribuição derivada, considerando apenas a velocidade como variável aleatória, seriam:

a) para a média, com o método de primeira ordem (FOM):

$$E[\delta_A] = \frac{D_v}{\mu_v} - \frac{\mu_v}{2.(b+i.g)} \quad (3.15b)$$

b) para a média, com o método de primeira ordem e segundo momento (FOSM):

$$E[\delta_A] = \frac{D_v}{\mu_v} - \frac{\mu_v}{2.(b+i.g)} + \frac{D_v \cdot \sigma_v^2}{(\mu_v)^3} \quad (3.15c)$$

c) para a variância, com ambos os métodos (FOM e FOSM):

$$Var[\delta_A] = \left[\frac{Dv}{\mu_v^2} + \frac{1}{2.(b+i.g)} \right]^2 \sigma_v^2 \quad (3.15d)$$

permitindo avaliar a probabilidade de tempo de percepção e reação insuficiente, face à restrição de visibilidade, por

$$P_{sv} = P[\delta_R > \delta_A] \quad (3.16)$$

admitindo-se uma aproximação normal ou uma aproximação logística (que permite uma forma analítica conveniente), para a hipótese de tempos de percepção e reação δ_R fixos (determinísticos), adequado a cada ambiente e tipo de decisão.

No entanto, os parâmetros da distribuição de tempos de percepção e reação requeridos (ou valores típicos como média, mediana, percentil 85 ou 95) são resultados usuais dos estudos psicométricos, variando de um contexto a outro, como comentado anteriormente.

O mesmo método pode ser diretamente generalizado após incorporar as características aleatórias do tempo de percepção e reação requerido δ_R (no exemplo discutido, seriam sua média e variância e sua correlação com a velocidade praticada). Neste caso, para a diferença entre o tempo de reação necessário e disponível, tem-se:

a) para a média, com o método de primeira ordem (FOM):

$$E[\delta_A - \delta_R] = \frac{Dv}{\mu_v} - \frac{\mu_v}{2.(b+i.g)} - \mu_\delta \quad (3.17a)$$

b) para a média, com o método de primeira ordem e segundo momento (FOSM):

$$E[\delta_A - \delta_R] = \frac{Dv}{\mu_v} - \frac{\mu_v}{2.(b+i.g)} + \frac{Dv \cdot \sigma_v^2}{(\mu_v)^3} - \mu_\delta \quad (3.17b)$$

c) para a variância, com ambos os métodos (FOM e FOSM):

$$Var[\delta_A - \delta_R] = \left[\frac{Dv}{\mu_v^2} + \frac{1}{2.(b+i.g)} \right]^2 \sigma_v^2 + \sigma_\delta^2 - 2.\rho_{v,\delta}.\sigma_v.\sigma_\delta \quad (3.17c)$$

permitindo avaliar

$$P_{sv} = P[\delta_R > \delta_A] = P[\delta_A - \delta_R < 0] \quad (3.17d)$$

que pode ser obtida com uma aproximação normal ou logística, que permite obter uma forma analítica conveniente.³⁴

Note-se que outras formas também são possíveis, como exprimir a condição de segurança em função das taxas de frenagem requerida e praticada. No entanto, o trabalho estará utilizando a forma baseada na distribuição de distância de parada e/ou na distribuição de tempo de percepção e reação, mas poderia ser usada qualquer reformulação alternativa.

Neste trabalho, para efeitos de aplicação prática, admite-se sempre que a velocidade é considerada a única variável aleatória (permanecendo os demais parâmetros constantes). Mas a incorporação da aleatoriedade em mais variáveis, desde que haja informação adequada sobre a distribuição ou seus momentos (incluindo a correlação entre as variáveis aleatórias), é também imediata no procedimento adotado.

3.1.8 Formulações Gerais com Efeitos Aleatórios: Frenagem e Interferências

Um aspecto de especial interesse é o menos adequadamente tratado nas discussões sobre as características aleatórias do tráfego: a interdependência entre intervalos e velocidades. Não foi identificada nenhuma formulação operacional para esta interdependência. Uma alternativa seria aplicar ao espaçamento entre veículos as hipóteses usualmente utilizadas para intervalos e assumir uma distribuição de velocidades qualquer, independente ou dicotômica (o que não foi investigado). A seguir, propõe-se um procedimento mais simples.

³⁴ Tem-se $P[\delta_A - \delta_R < 0] = \frac{1}{1 + e^{m/a}}$, onde: $m = E[\delta_A - \delta_R]$ e $a = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{Var[\delta_A - \delta_R]}$.

Em diversas situações, seria conveniente compor ambos os aspectos. O caso mais claro é o referente às oportunidades de conflito durante frenagens para conversões ou outras interferências.

Embora esta lacuna não tenha sido eliminada, um passo intermediário em estabelecer as relações envolvidas pode ser dado com base nas formulações inspiradas em EASA (1993).

Se T_f é o tempo de frenagem necessário para reduzir a velocidade de v para v_c e H é o intervalo entre os veículos, então pode-se dizer que haverá oportunidades de conflito se $T_f > H$. Fazendo $X = T_f - H$, tem-se:

$$X = \delta + \frac{v - v_c}{b + i.g} - H \quad (3.18a)$$

e, pelo método utilizado em EASA (1993), tem-se:

- a) para a média, com o método de primeira ordem e segundo momento (FOSM):

$$E[X] = \delta + \frac{(\mu_v - v_c)}{b + i.g} - \mu_h = \delta + \frac{(\mu_v - v_c)}{b + i.g} - \frac{l}{q} \quad (3.18b)$$

- b) para a variância, com ambos os métodos (FOM e FOSM)

$$Var[X] = \left(\frac{l}{b + i.g} \right)^2 \cdot \sigma_v^2 + \sigma_h^2 - 2 \cdot \left(\frac{l}{b + i.g} \right) \sigma_v \cdot \sigma_h \cdot \rho_{vh} \quad (3.18c)$$

onde ρ_{vh} é o coeficiente de correlação entre v e h (que será admitido nulo).

Considerando o intervalo como variável aleatória, a probabilidade de T_f ser maior que H é:

$$P_{cf} = P[T_f > H] = P[T_f - H > 0] = P[X > 0] \quad (3.18d)$$

que pode ser avaliada admitindo-se que X também tenha uma distribuição normal ou possa ser aproximada por uma distribuição logística, para ter uma forma analítica conveniente.³⁵

Alternativamente, pode-se novamente associar a oportunidade de conflito ao tempo de reação

disponível insuficiente $P_{cf} = P[\delta_R > \delta_A]$, onde $\delta_A = h - \frac{v - v_r}{b + i.g}$ permitindo avaliar

$$P_{cf} = P[\delta_R > \delta_A] = P[\delta_A - \delta_R < 0]$$

reproduzindo a mesma formulação apresentada acima, mas permitindo incorporar a variabilidade do tempo de reação requerido (isto é, considerando $E[\delta_R] = \delta$ e $Var[\delta_R] = \sigma_\delta^2$) e sua eventual correlação com outras variáveis (por exemplo, $cov[v, \delta] = \sigma_v^2 \cdot \sigma_\delta^2 \cdot \rho_{v\delta}$ e/ou $cov[h, \delta] = \sigma_h^2 \cdot \sigma_\delta^2 \cdot \rho_{h\delta}$), quando possível obter estas informações de estudos empíricos ou considerações teóricas quaisquer.

3.2 ASPECTOS ESPECÍFICOS PARA MODELOS DE OPORTUNIDADES DE CONFLITO DE DIFERENTES TIPOS OU EM DIFERENTES CONTEXTOS

A seguir, são discutidos aspectos referentes a cada contexto e tipo de oportunidade de conflito específico, com o objetivo de obter modelos de previsão capazes de incorporá-los.

O primeiro aspecto importante desta seção descreve um dos aspectos relacionados a movimentos veiculares em semáforos: os seus períodos de operação. Como resultou da revisão bibliográfica, esta caracterização foi considerada o elemento chave para estender as formulações de KAUB (2005) para analisar a operação com semáforos.

O segundo aspecto importante refere-se, por sua vez, à análise dos entreverdes. Considerando o julgamento técnico predominante sobre a relevância deste aspecto para a segurança da operação semaforica, busca-se preencher uma lacuna percebida. Os entreverdes são

³⁵ Tem-se $P[X > 0] = 1 - \frac{1}{1 + e^{m/a}}$ onde $m = E[X]$ e $a = \frac{\sqrt{3Var[X]}}{\pi}$

analisados, a seguir, como um dos períodos da operação semafórica, nos itens correspondentes aos movimentos veiculares (Seção 3.2.1) e de pedestres (Seção 3.2.2).

O terceiro aspecto importante trata dos movimentos de pedestres, tanto em interseções não semaforizadas como em semáforos (considerando movimentos protegidos ou permitidos e seus períodos de operação). Esta análise amplia o tratamento sumário identificado na literatura revisada (basicamente a formulação de ZHANG e PREVEDOUROS, 2003).

A discussão desenvolve, desta forma, os elementos a serem utilizados na especificação dos diferentes modelos de estimativa de oportunidades de conflito a serem estudados neste trabalho, detalhados em seqüência (na Seção 3.3).

3.2.1 Análise da Operação Semafórica para Movimentos Veiculares

Os movimentos veiculares e de pedestres em semáforos são classificados em dois tipos:

- a) movimentos protegidos
- b) movimentos permitidos

Os movimentos protegidos são aqueles em que, durante o período do seu direito de passagem, não encontram nenhum movimento conflitante ou são prioritários em relação aos movimentos que lhe são conflitantes e que são autorizadas no mesmo período.

Os movimentos permitidos são aqueles que, mesmo durante o período do seu direito de passagem, precisam dar preferência a movimentos que lhe são conflitantes e que possuem o direito de passagem preferencial no mesmo período.

O principal exemplo de movimento veicular permitido numa via de dupla mão de direção de tráfego é o movimento de conversão à esquerda com um fluxo oposto simultâneo. Outro exemplo usual é o movimento de conversão à direita simultâneo às travessias paralelas de pedestres (que, legalmente, são preferenciais).

Os exemplos sugerem que a regra legal de preferência deve ser conhecida mas o comportamento real deve ser também ponderado para ter uma análise adequada (aspecto que será desenvolvido adiante).

Neste item, importa diferenciar os períodos e a duração correspondente, para os movimentos veiculares. Para um dado movimento, podem suceder-se períodos com características distintas (incluindo o período de vermelho), que devem ser tratados de forma condizente. A análise correspondente para pedestres é realizada no item seguinte.

A Figura 3.2 mostra uma interseção onde a conversão à esquerda conflita com o seu movimento veicular oposto.

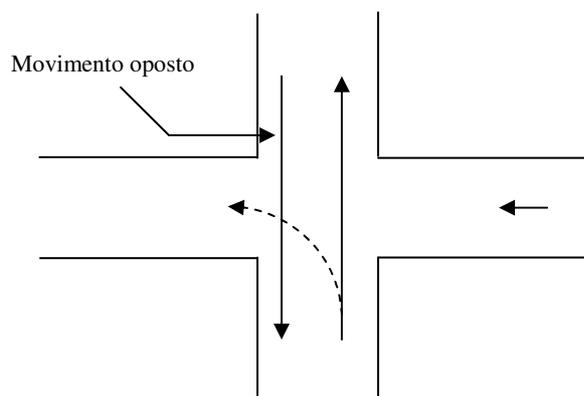


Figura 3.2 – Interseção com conversão à esquerda e com fluxo oposto

O movimento permitido (no caso, a conversão à esquerda) tem características semelhantes aos movimentos de via secundária numa interseção não semaforizada. O movimento de conversão à esquerda recebe o verde simultaneamente com o movimento oposto. O veículo que deseja fazer a conversão à esquerda, durante o seu tempo de verde, precisa posicionar-se de forma adequada e aguardar uma brecha no tráfego do movimento oposto para executar a manobra de conversão à esquerda, uma vez que o movimento oposto tem preferência de passagem.

Em casos de volumes de conversão muito fortes ou onde a manobra de conversão for muito perigosa, pode ser configurado um estágio específico para esse movimento. Neste último caso, o movimento de conversão torna-se um movimento protegido, não havendo conflito com o movimento oposto, pois os dois movimentos vão ter o direito de passagem em estágios distintos. Pode também haver operação em estágios protegidos e permitidos, no mesmo ciclo.

3.2.1.1 Períodos de Operação para Movimentos Veiculares em Semáforos

A divisão do ciclo semafórico em períodos característicos permite identificar situações em que as condições de operação variam, mesmo nos dados médios, sendo especialmente relevante para analisar a operação de movimentos permitidos (que operam nas brechas de fluxos opostos).

O ciclo semafórico é dividido nos seguintes períodos:

- a) período R – período de vermelho (incluindo o entreverdes anterior I_c);
- b) período G_q – período de tempo em que há dissipação de fila do movimento no fluxo considerado ou no fluxo oposto;
- c) período G_u – período do restante de verde do estágio (após o período de dissipação de fila);
- d) período I – período de entreverdes do final do estágio.

Quando existem faixas com movimentos que tem tratamentos semafóricos distintos em faixas compartilhadas (isto é, movimentos que andam em estágios semafóricos distintos, incluindo proteção ou permissão) em faixas compartilhadas, existe também a possibilidade de bloqueio dos movimentos autorizados por parte dos veículos dos movimentos parados, em espera por uma brecha (caso dos movimentos permitidos) ou pelo seu verde (caso de movimentos autorizados em outros estágios).

Neste caso, o período de verde é também dividido em duas partes a partir da identificação do período anterior ao bloqueio (em que o movimento autorizado opera normalmente). O tempo de verde é então dividido nos seguintes períodos:

- a) período G_f – período de tempo em que o movimento autorizado é livre (não bloqueado) do movimento no fluxo considerado como bloqueador;
- b) período G_u – período do restante de verde do estágio (após o período de movimento livre) em que há bloqueio na faixa compartilhada (contínuo, até o final do verde, ou intermitente, entre brechas adequadas para um movimento bloqueador permitido).

As fórmulas usuais mencionadas no capítulo anterior são adotadas a seguir mas podem ser utilizadas outras fórmulas (como as propostas pelo HCM/2000, supostamente a opção implícita no trabalho de ZHANG e PREVEDOUROS, 2003). Portanto, tem-se:

$$G_q = \frac{Q.R_e}{S-Q} \quad (3.19)$$

$$G_f = \frac{N_c \cdot P_{ac}}{s_{ac} \cdot (1 - P_{ac})} \cdot (1 - P_{ac}^{m_{ac}}) = \frac{N_c \cdot (1 - P_{bc})}{s_{ac} \cdot P_{bc}} \cdot (1 - (1 - P_{bc})^{m_{ac}}) \quad (3.20a)$$

$$m_{ac} = s_{ac} \cdot G_e \quad (3.20b)$$

onde G_e e R_e são os tempos de verde e vermelho efetivo (em primeira aproximação, pode-se admitir $G_e = G$ e $R_e = R = T_c - G$); s_{ac} e m_{ac} são o fluxo de saturação (em v/s) e o número máximo de veículos escoados durante o verde para o movimento autorizado, usando apenas as faixas compartilhadas; P_{ac} e P_{bc} é a proporção de movimentos autorizados e não autorizados, usando apenas as faixas compartilhadas, sendo que N_c é o número de faixas compartilhadas.

As expressões do HCM/2000 estão discutidas no Apêndice C do seu Capítulo 16 (C16-5 e C16-6 para aproximações de múltiplas faixas, ou C16-10 e C16-11, para aproximações com uma única faixa). São expressões empíricas, sem qualquer estudo de validação no Brasil, razão pela qual são preferidas as expressões teóricas usuais.

3.2.1.2 Período de Entreverdes Veicular

O período de entreverdes, que é o único período do ciclo semaforico veicular não tratado pelos estudos de HA e BERG (1995) e de ZHANG e PREVEDOUROS (2003), será especificamente analisado a seguir.

Apesar de nenhum dos estudos mencionados acima (cujas metodologias estão detalhadas no capítulo anterior) considerarem o período de entreverdes como um período que pode gerar oportunidades de conflito (tanto angulares como traseiras), vários autores analisaram o problema do risco de colisão nesse período, entre os quais estão os estudos de EASA (1993), MAHALEL e PRASHKER (1987), ZIMMERMAN e BONNESON (2004) e TARKO *et alli* (2006), também analisados no capítulo anterior.

O período de entreverdes, por ser um período de transição de direitos de passagem, é, pela sua natureza, bastante crítico em termos de possibilidades de ocorrências de conflitos, tanto angulares como traseiros. No final do estágio, há motoristas que querem passar para evitar aguardar o próximo ciclo. Ora, o final de um estágio corresponde, necessariamente, ao início de outro estágio. No início do estágio, há aqueles que podem querer antecipar-se ao verde e que podem expor-se aos transgressores do estágio que termina. Daí, o período de entreverdes ser caracterizado como um período crítico em interseções semaforizadas.

O Anexo II do CTB dá a seguinte definição para as cores do semáforo para os veículos:

“Vermelha: indica obrigatoriedade de parar.”

“Amarela: indica “atenção”, devendo o condutor parar o veículo, salvo se isto resultar em situação de perigo.”

“Verde: indica permissão de prosseguir na marcha, podendo o condutor realizar as operações indicadas pelo sinal luminoso, respeitadas as normas gerais de circulação e conduta.”

Em relação ao sinal amarelo, isto significa que o condutor tanto pode parar o veículo (se ele julgar que pode parar de uma forma segura), como pode prosseguir e realizar a travessia da interseção (se ele julgar que a ação de parar pode criar uma situação de perigo). A “situação de perigo” significa frenagens bruscas, que podem propiciar a ocorrência de colisões traseiras.

Por outro lado, para o condutor que decidiu prosseguir (principalmente no final do amarelo), deve-se garantir que ele saia da área de conflito da interseção antes que o estágio concorrente ganhe o direito de passagem por meio da luz verde do semáforo. Do caso contrário, pode ocorrer uma colisão angular. Essa garantia pode ser dada por um período de “vermelho de segurança” (também conhecido como vermelho de limpeza), fazendo com que o estágio concorrente permaneça em vermelho enquanto os veículos que passaram no final do amarelo não tenham saído da interseção.

Assim, o período de entreverdes pode ser composto por dois períodos:

$$I = I_a + I_v \quad (3.21)$$

onde

I_a = período de amarelo

I_v = período de vermelho de segurança (também conhecido como vermelho de limpeza ou vermelho total)

Em todas as outras situações, exceto no período de entreverdes, o intervalo entre veículos é considerado como uma variável relevante pois a chegada de veículos conflitantes durante as brechas aceitas (conflitos angulares) ou durante o tempo em que o veículo fica parado ou desacelerando (conflitos traseiros) está intimamente ligada à dinâmica do conflito.

No período de entreverdes, as variáveis com aleatoriedade relevante seriam pelo menos a velocidade e o tempo de percepção e reação. Com relação à frenagem, embora a mesma varie de veículo para veículo, considerou-se tal variável como uma constante com o valor b , entendendo-se tal valor como o valor de uma frenagem segura, acima da qual será considerada como uma frenagem de risco.

No entanto, na metodologia proposta a seguir para o período de entreverdes, por simplificação, apenas a velocidade será considerada como variável aleatória. A generalização, se considerado necessária, pode seguir os mesmos passos da metodologia utilizada por EASA (1993).

3.2.1.2.1 Zona de Dilema

Conforme reportado por Tarko *et alli* (2006), cujo trabalho está sumarizado no Capítulo 2, existem dois tipos de zona de dilema: Tipo I e o Tipo II. A Zona de Dilema Tipo I é aquela em que o condutor não consegue mais parar de forma segura e nem prosseguir sem invadir o sinal vermelho. A Zona de Dilema Tipo II é uma zona onde tanto as ações de prosseguir como as de parar podem ser executadas de forma segura.

No presente trabalho, será tratada apenas a Zona de Dilema do Tipo I, dividindo os veículos que ficam na zona de dilema em veículos que param e que seguem e incorporando o efeito da aleatoriedade na obtenção da proporção de usuários em dilema.³⁶

Conforme visto no Capítulo 2, a distância crítica para parar D_p é dada por $D_p = v.\delta + \frac{v^2}{2.(b+i.g)}$, enquanto que a distância crítica para prosseguir D_s é dada pela expressão $D_s = v.I_a$.

A zona em que $D_p > x > D_s$ denomina-se zona de dilema. Veículos que se encontram na zona de dilema terão comportamentos divergentes: alguns irão parar e outros irão prosseguir.

O critério usual de dimensionamento do tempo de amarelo objetiva “eliminar” a zona de dilema fazendo $D_p = D_s$, usando valores típicos de v , δ e b . Se todos os veículos estiverem trafegando na velocidade v e se todos os condutores tiverem tempo de percepção e reação δ e adotarem uma frenagem igual a b , então não existiria a zona de dilema. O critério usual tem de assumir uma situação de projeto, que incorpora um grau de segurança aceitável. São assumidos valores conservativos para o tempo de reação e para a frenagem praticada e admitida uma velocidade operacional correspondente ao percentil 85 ou ao limite de velocidade regulamentado.

Contudo, esses parâmetros são variáveis de veículo para veículo, de condutor para condutor, de forma que não existe um tempo de amarelo que possa eliminar por completo a zona de dilema. Uma ação para melhorar a segurança seria, por meio de programação de controladores atuados, reduzir ao mínimo possível, o número de veículos que ficam na zona de dilema através de esquemas denominados de “proteção da zona de dilema”.

Fazendo $D_p = D_s$, tem-se $v.\delta + \frac{v^2}{2.(b+i.g)} = v.I_a$ ou $I_a = \delta + \frac{v}{2.(b+i.g)}$.

Portanto, pode-se definir a deficiência de amarelo td_{I_a} como sendo:

³⁶ A partir deste ponto, a Zona de Dilema Tipo I será simplesmente denominada “zona de dilema”.

$$t_{d_{ia}} = \delta + \frac{v}{2.(b+i.g)} - I_a \quad (3.22)$$

A existência de uma deficiência de amarelo positiva faria com que fossem geradas oportunidades de conflito no entreverdes, sendo que o número de veículos que ficam na zona de dilema é usado como uma medida de segurança (ver a descrição do trabalho de ZIMMERMAN e BONNESON, 2004, no capítulo anterior).

Numa formulação determinística, a deficiência é considerada igual para todos os veículos. Numa formulação estocástica, a deficiência será variável de veículo para veículo, podendo haver deficiência positiva mesmo quando ela for negativa em termos médios.

De forma semelhante à deficiência de amarelo, pode-se chegar a uma medida relativa ao vermelho de segurança. O critério usual de dimensionamento do vermelho de segurança visa garantir que os veículos que deixam de operar no estágio anterior possam “limpar” a interseção antes da entrada dos veículos que iniciam a operação no estágio seguinte.

O veículo que deixa de operar deve percorrer toda a interseção (uma distância $Z = W + z$) e passar totalmente (um comprimento L) antes de o veículo que entra em operação chegue à região de conflito. O tempo para percorrer a distância $Z+L$ com velocidade v é $\frac{Z+L}{v}$.

O valor de z depende do recuo da linha de retenção, conforme ilustrado na Figura 3.3a.

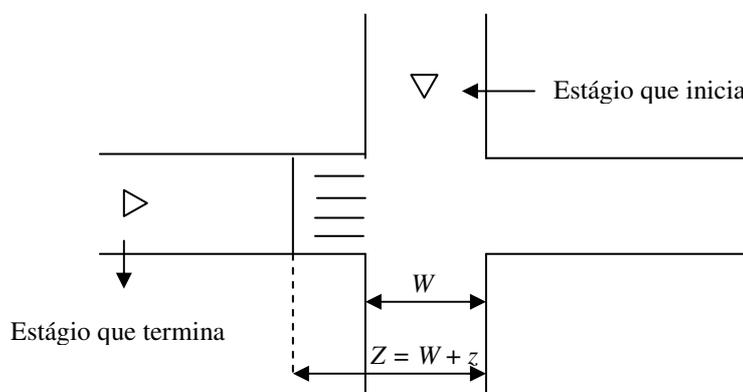


Figura 3.3a – Saída da interseção no entreverdes: $Z \geq W$

Em um caso intermediário, o veículo que sai de operação percorre uma distância Z menor que a extensão de toda a interseção W antes que o veículo que entra em operação chegue à região de conflito, conforme ilustrado na Figura 3.3b.

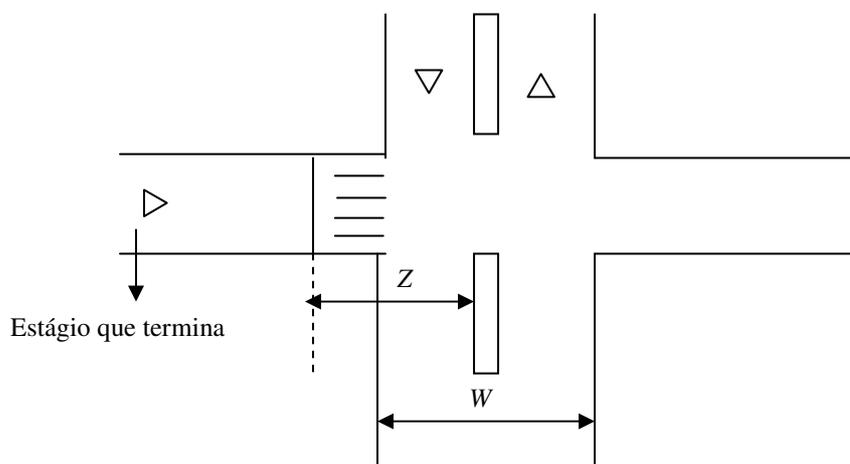


Figura 3.3b – Saída da interseção no entreverdes: $Z < W$

Com o critério usual de dimensionamento do intervalo de vermelho de segurança:

$$I_v = \frac{Z + L}{v}$$

Portanto, pode-se definir a deficiência de vermelho de segurança td_{Iv} como:

$$t_{dIv} = \frac{Z + L}{v} - I_v \quad (3.23)$$

Os veículos que decidem frear com deficiência de amarelo podem gerar oportunidades de conflito traseiras. Os veículos que decidem passar com deficiência de vermelho de segurança podem gerar oportunidades de conflito angulares. Conforme o trabalho de MAHALEL e PRASHKER (1987), descrito no capítulo anterior, na pior situação cerca de 50% dos veículos que estão na zona de dilema prosseguem e os outros 50% param. Estas ações divergentes propiciam conflitos, principalmente conflitos traseiros mas também conflitos angulares. Para os veículos que decidem passar, as deficiências de amarelo e vermelho de segurança somam-se (como deficiência de entreverdes total) na determinação dos conflitos angulares.

O entreverdes total é:

$$I = I_a + I_v = \delta + \frac{v}{2.(b + i.g)} + \frac{Z + L}{v}$$

O critério formulado, considerando o intervalo de entreverdes total (amarelo mais vermelho de segurança), define a deficiência de entreverdes t_{dI} como:

$$t_{dI} = \delta + \frac{v}{2.(b + i.g)} - I_a + \frac{Z + L}{v} - I_v. \quad (3.24)$$

(que será a formulação preferida para as oportunidades de conflito angulares).

A escolha entre as expressões (3.23) e (3.24) não é simples. Na verdade, uma discussão mais detalhada pode revelar que ambas (e também a expressão 3.22) não representam adequadamente a progressão dos veículos no entreverdes, isto é, o instante t^{37} em que o veículo decide passar ou parar. Este instante é o que define o risco de conflitos, considerando a chegada dos veículos conflitantes. Portanto, a análise própria teria de considerar as decisões de ambos os veículos em conjunto e as expressões recomendadas devem ser tomadas como uma formulação preliminar, ainda a ser aprimorada.

Um último aspecto considerado diz respeito à suposição de que os veículos do estágio que se inicia chegam em fluxo livre (o que está representado pela hipótese de que ele pode chegar à região de conflito imediatamente). Nos períodos de pico, pelo menos, esta suposição pode ser inadequada e a necessidade de acelerar de uma posição estacionária pode ser traduzida em um tempo Δ a ser deduzido da necessidade de vermelho de segurança (decorrente do tempo a ser vencido acelerando até a região de conflito). Este termo pode também representar o mesmo efeito em casos em que o ponto de conflito está distante da linha de retenção dos veículos do estágio que inicia o movimento no entreverdes considerado (como uma travessia de pedestres afastada da linha de retenção).

³⁷ Esse instante t pode ser o instante em que o condutor recebe o sinal de amarelo (ou algum instante posterior). Todos os condutores recebem o amarelo ao mesmo tempo mas, em função da posição na via nesse instante, cada um vai estar numa posição diferente em relação à linha de retenção: os que estiverem na zona de indecisão (zona de dilema) podem decidir parar ou prosseguir.

3.2.1.2.2 Oportunidades de Conflito e Zona de Dilema

O estudo de ZIMMERMAN e BONNESON (2004) considera o número de veículos na zona de dilema como uma medida para estimar a segurança da interseção. Entretanto, os autores não analisam uma possível relação entre a extensão da zona de dilema e o comprimento do período de amarelo. Como se supõe que deve haver uma relação direta entre o período de amarelo e do entreverdes e a possibilidade de conflitos, a análise das oportunidades de conflito seguirá uma abordagem diferente.

Um veículo que está na zona de dilema que decidiu parar na linha de retenção poderá provocar colisões traseiras.

Os condutores que prosseguiram durante o período de entreverdes poderão estar expostos a conflitos angulares, relacionados com a deficiência de entreverdes ou vermelho de segurança.

Na forma determinística, a visão de ZIMMERMAN e BONNESON (2004) pode ser traduzida em oportunidades de conflito traseiras e angulares como:

$$CO(traseira)_i / h = \frac{Q_i}{T_c} \cdot \max\{td_{lai}, 0\} \quad (3.25)$$

$$CO(angular)_i / h = \frac{Q_i}{T_c} \cdot \max\{td_{lvi}, 0\} \quad (3.26)$$

(que não serão nulas somente se houver deficiência na temporização dos entreverdes).

Alternativamente, uma estimativa com base na hipótese conservativa mencionada por

MAHALEL e PRASHKER (1987) pode ser considerada como $CO(traseira)_i / h = Q_i \frac{0,5.I_{ai}}{T_c}$

e $CO(angular)_i / h = Q_i \frac{0,5.I_{ai}}{T_c}$ ou $CO(angular)_i / h = Q_i \frac{(0,5.I_{ai} + I_{vi})}{T_c}$.

No entanto, as propriedades obtidas com estas formulações são contra-intuitivas (por exemplo, o número de COs aumenta com o aumento dos intervalos de amarelo ou de vermelho de segurança) e justificam a necessidade de formas estocásticas.

Na forma estocástica, considera-se que a deficiência de amarelo e de entreverdes ou vermelho de segurança é função da velocidade do veículo (supondo os outros parâmetros envolvidos constantes).³⁸ O aumento do entreverdes coloca mais veículos diante da indecisão mas reduz a probabilidade de oportunidade de conflito.

Para o cálculo de $P[t_{dIa} > 0]$ tem-se:

- a) Para a média, com o método de primeira ordem (FOM) e método de primeira ordem e segundo momento (FOSM):

$$E[t_{dIa}] = \delta + \frac{\mu_v}{2.(b+i.g)} - I_a \quad (3.27a)$$

- b) para a variância, com ambos os métodos (FOM e FOSM):

$$Var[t_{dIa}] = \left(\frac{1}{2.(b+i.g)} \right)^2 \sigma_v^2 \quad (3.27b)$$

permitindo avaliar

$$P_{sla} = P[t_{dIa} > 0] \quad (3.27c)$$

que pode ser obtida com uma aproximação normal ou, admitindo a distribuição logística, como uma forma analítica conveniente^{39,40}, sendo as oportunidades de conflito estimadas por

³⁸ A rigor, o tempo de percepção e reação também poderia ser considerado como uma variável aleatória. Entretanto, devido a dificuldades de levantar em campo possíveis correlações entre a velocidade e o tempo de percepção e reação, preferiu-se a simplificação, considerando apenas a velocidade como única variável aleatória.

³⁹ Tem-se: $P[t_{dIa} > 0] = 1 - \frac{1}{1 + e^{m/a}}$ onde $m = E[t_{dIa}]$ e $a = \frac{\sqrt{3.Var[t_{dIa}]}}{\pi}$.

$$CO(traseira)_{ii} / h = Q_i \cdot \frac{0,5 \cdot I_{ai}}{T_c} \cdot P[t_{dIa} > 0] \quad (3.28)$$

(com base em EASA (1993) e na hipótese de MAHALEL e PRASHKER, 1987).

Para o cálculo de $P[t_{dI} > \Delta]$, onde Δ é o tempo que o veículo que vai entrar em operação leva para chegar à região de conflito, tem-se:

a) para a média, com o método de primeira ordem (FOM):

$$E[t_{dI}] = \delta + \frac{\mu_v}{2 \cdot (b + i \cdot g)} + \frac{Z + L}{\mu_v} - I_a - I_v \quad (3.29a)$$

b) Para a média, com o método de primeira ordem e segundo momento (FOSM):

$$E[t_{dI}] = \delta + \frac{\mu_v}{2 \cdot (b + i \cdot g)} + \frac{Z + L}{\mu_v} - I_a - I_v + \frac{Z + L}{\mu_v^3} \sigma_v^2 \quad (3.29b)$$

c) para a variância, com ambos os métodos (FOM e FOSM):

$$Var[t_{dI}] = \left(\frac{1}{2 \cdot (b + i \cdot g)} - \frac{2 \cdot (Z + L)}{\mu_v^2} \right)^2 \sigma_v^2 \quad (3.29c)$$

permitindo avaliar

$$P_{st} = P[t_{dI} > \Delta] \quad (3.29d)$$

⁴⁰ Em vez do uso da distribuição logística, a expressão poderia também ser formulada com a distribuição normal para velocidade $P[t_{dIa} > 0] = P[v > 2 \cdot (I_a - \delta) \cdot (b + i \cdot g)] = P\left[Z > \frac{2 \cdot (I_a - \delta) \cdot (b + i \cdot g) - \mu_v}{\sigma_v}\right]$. Portanto, a hipótese de distribuição logística, como em todos os demais casos, é apenas uma conveniência analítica.

que pode ser obtida com uma aproximação normal ou, admitindo a distribuição logística, como uma forma analítica conveniente⁴¹.

As oportunidades de conflito angulares seriam então estimadas por:

$$CO(\text{angular})_{ii} / h = Q_i \cdot \frac{0,5 \cdot I_{ai}}{T_c} \cdot P[t_{dI} > \Delta] \quad (3.30a)$$

ou

$$CO(\text{angular})_{ii} / h = Q_i \cdot \frac{(0,5 \cdot I_{ai} + I_{vi})}{T_c} \cdot P[t_{dI} > \Delta] \quad (3.30b)$$

(com base na hipótese de MAHALEL e PRASHKER, 1987). Uma opção que representa de forma grosseira o instante em que os veículos cruzam a linha de retenção seria obtida fazendo

$$CO(\text{angular})_{ii} / h = Q_i \cdot \frac{0,5 \cdot I_{ai}}{T_c} \cdot P[t_{dI} > \Delta] + Q_i \cdot \frac{0,25 \cdot I_{vi}}{T_c} \cdot P[t_{dIv} > \Delta] \quad (\text{que representa a}$$

progressão do veículo na aproximação, sem considerar o efeito sobre a decisão de prosseguir ou não) e estaria admitindo que parte dos veículos (25%) transgride o vermelho de segurança.

O tempo Δ que o veículo que vai iniciar a operação leva para chegar à região de conflito pode ser igual a Δ_1 ou Δ_2 , conforme se o veículo chega em fluxo livre ou se chega a partir do repouso:

$$\Delta_1 = \frac{Z_e}{v_e} \quad (3.31a)$$

e

$$\Delta_2 = \delta + \sqrt{\frac{2Z_e}{a}} \quad (3.31b)$$

Z_e é a distância que o veículo que inicia a operação deve percorrer até chegar à região de conflito e v_e a sua velocidade de aproximação (no caso de chegada em fluxo livre), conforme ilustrado na Figura 3.4.

⁴¹ Se Δ for constante, tem-se: $P[t_{dI} > \Delta] = 1 - \frac{1}{1 + e^{-(\Delta - m)/a}}$ onde $m = E[t_{dI}]$ e $a = \frac{\sqrt{3 \cdot \text{Var}[td_I]}}{\pi}$

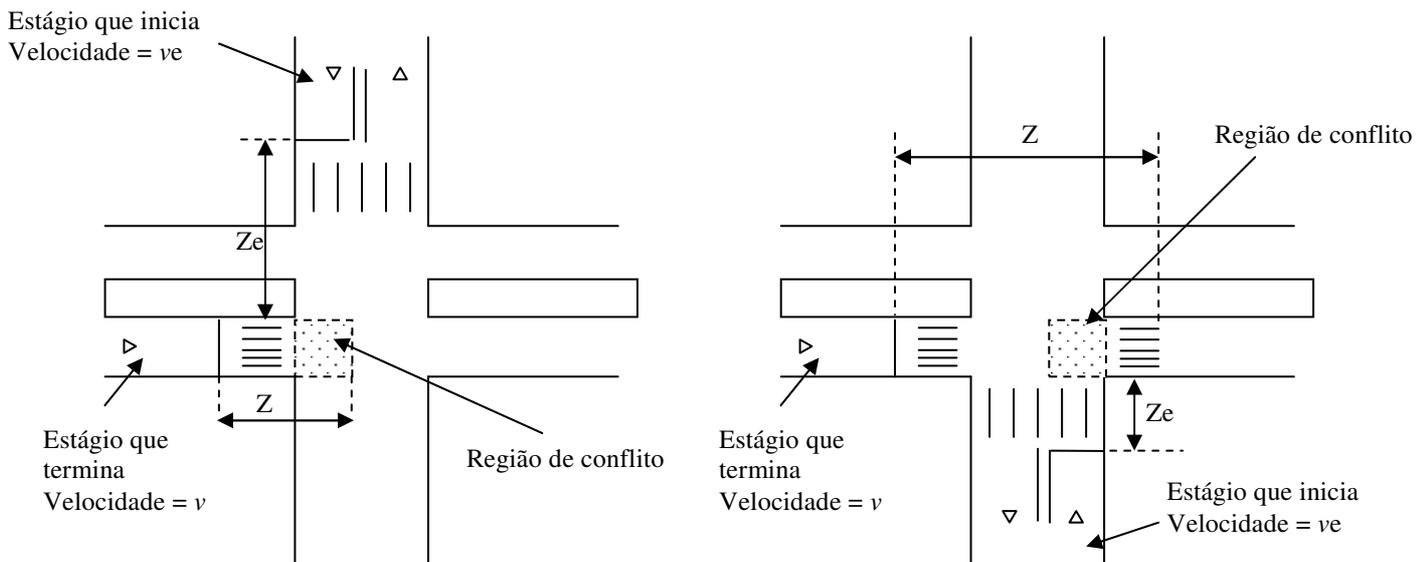


Figura 3.4 – Desenho ilustrativo mostrando a distância Z_e que o veículo que inicia a operação deve percorrer até chegar à região de conflito

No caso de chegada em fluxo livre, $\Delta = \Delta_1$ é uma função da velocidade v_e . No caso de chegada a partir de uma posição estacionária, $\Delta = \Delta_2$ é uma constante.

Para chegada em fluxo livre:

Seja $X = t_{d1} - \Delta_1$

sendo:

$$E[X] = E[t_{d1}] - E[\Delta_1]$$

e

$$Var[X] = Var[t_{d1}] + Var[\Delta_1] - 2Cov[t_{d1}, \Delta_1]$$

Supondo que t_{d1} e Δ_1 não sejam correlacionados: $Cov[t_{d1}, \Delta_1] = 0$, então:

$$Var[X] = Var[t_{d1}] + Var[\Delta_1]$$

Sendo $E[\Delta_1] = \frac{Z_e}{\mu_{ve}}$ ou $E[\Delta_1] = \frac{Z_e}{\mu_{ve}} + \frac{Z_e \sigma_{ve}^2}{\mu_{ve}^2}$ e $Var[\Delta_1] = \left(\frac{Z_e}{\mu_{ve}^2}\right)^2 \sigma_{ve}^2$, tem-se que:

$$E[X] = \delta + \frac{\mu_v}{2.(b+i.g)} + \frac{Z+L}{\mu_v} - I_a - I_v + \frac{Z+L}{\mu_v^3} \sigma_v^2 - \frac{Z_e}{\mu_{ve}} - \frac{Z_e \sigma_{ve}^2}{\mu_{ve}^2} \quad (3.32a)$$

$$Var[X] = \left(\frac{1}{2.(b+i.g)} - \frac{2.(Z+L)}{\mu_v^2} \right)^2 \sigma_v^2 + \left(\frac{Z_e}{\mu_{ve}^2} \right)^2 \sigma_{ve}^2 \quad (3.32b)$$

permitindo avaliar $P[t_{dl} > \Delta_1] = P[X > 0]$.

Para a chegada a partir de uma posição estacionária: $P[t_{dl} > \Delta_2]$

A probabilidade de ter chegadas em fluxo livre pode ser relacionada com a demanda de tráfego existente.

Supondo o ponto de conflito entre os fluxos A (pára) e B (inicia), admitindo chegada de veículos com distribuição de Poisson e desprezando a fila no início do vermelho, a probabilidade de haver faixas vazias na aproximação B é a probabilidade de haver menos chegadas de veículos que o número de faixas de tráfego durante o vermelho precedente:

$$P[F] = e^{-q_B R_B} \left(1 + q_B R_B + \frac{(q_B R_B)^2}{2} + \dots + \frac{(q_B R_B)^{N-1}}{(N-1)!} \right) \quad (3.33)$$

em que:

q_B = fluxo da aproximação B em v/s
 R_B = tempo de vermelho da aproximação B
 N = número de faixas da aproximação B.

Com esta distinção, o início do verde pode-se dar em duas situações:

- a) veículo em movimento aproveitando-se da existência de faixa vazia;
- b) veículo parado em todas as faixas (não há faixa vazia).

O primeiro caso corresponde à situação em que $\Delta = \Delta_1$, a ser ponderada pela probabilidade calculada acima ($P[F]$), dando-se ao segundo caso ($\Delta = \Delta_2$) a ponderação complementar ($1 - P[F]$) ou desprezando-se esta parcela complementar por considerá-la de risco reduzido.

O mesmo tratamento poderia ser aplicado a outros contextos como, por exemplo, os conflitos gerados pela passagem de veículos na via principal de uma interseção com sinalização de prioridade.

Assim, mais genericamente, tem-se:

$$CO(angular)_{li} / h = Q_i \cdot \frac{0,5 \cdot I_{ai}}{T_c} \cdot (P[F] \cdot P[t_{dI} > \Delta_1] + (1 - P[F]) \cdot P[t_{dI} > \Delta_2]) \quad (3.34a)$$

ou

$$CO(angular)_{li} / h = Q_i \cdot \frac{(0,5 \cdot I_{ai} + I_{vi})}{T_c} \cdot (P[F] \cdot P[t_{dI} > \Delta_1] + (1 - P[F]) \cdot P[t_{dI} > \Delta_2]) \quad (3.34b)$$

(distinguindo a probabilidade de chegada livre $P[F]$). Pode-se considerar que a situação sem chegadas livres seria menos grave e, eventualmente, poderia ser desprezada.

O veículo que está na zona de dilema tem situação que equivale a sofrer uma deficiência de amarelo. A deficiência de amarelo e de entreverdes é função da velocidade de cada veículo (sempre supondo os demais parâmetros constantes). Assim, com o tempo de amarelo e entreverdes fixos, alguns veículos sofrerão deficiência de amarelo e/ou de entreverdes e outros não, dependendo da velocidade individual de cada um. Por este motivo, escolheu-se a formulação com a deficiência de entreverdes total (sem deixar de notar o comentário anterior sobre a falta de representação da progressão do veículo dentro do entreverdes).

Por fim, vale comentar que existe também a possibilidade do veículo que termina a operação na mudança de estágio vir a ameaçar um veículo do estágio que se inicia, especialmente em uma situação em que o tempo para que este último atinja o ponto de conflito seja pequeno e o tempo para o primeiro veículo limpar a interseção seja grande. Para um certo movimento, esta oportunidade de conflito ocorreria no início de seu estágio (não ao final). Para veículos, esta situação complementar, que pode ser analisada e formulada com procedimentos similares aos apresentados acima, será desprezada (será comentada adiante no tratamento dos pedestres).

3.2.2 Análise de Interferências dos Movimentos de Conversão em Fluxo

Admite-se, de forma geral, que os movimentos de conversão devem ser realizados em velocidade reduzida e acarretam a necessidade de uma frenagem antes da manobra. Estas frenagens são interferências que podem acarretar oportunidades de conflito traseiras.

Duas formulações foram identificadas para a estimativa das oportunidades de conflito geradas: a determinação de chegadas conflitantes durante a frenagem ou a verificação de intervalos entre veículos menores que o tempo de frenagem.

No primeiro caso, o total de oportunidades de conflito, considerando que as frenagens são ocasionadas por manobras de conversão, seria dado por

$$CO_{cf} = Q_c \cdot P_{cf} = Q_c \cdot \left(1 - e^{-\tilde{q}_{Tc} \cdot T_f} \right)$$

onde o tempo de exposição é o tempo requerido para frenagem $t_f = \delta + \frac{v - v_c}{(b + i.g)}$ e o fluxo conflitante, correspondente ao fluxo da faixa com conversão que não reduz a velocidade, é relativo, como observado pelo veículo em movimento para conversão.

$$\tilde{q}_{Tc} = q_{Tc} \cdot \left(1 - \frac{v_c}{v} \right) \quad (3.35)$$

No segundo caso, o total de oportunidades de conflito, considerando que as frenagens são ocasionadas por manobras de conversão, seria dado por

$$CO_{cf} = Q_c \cdot P_{cf} = Q_c \cdot P[T_f > H] \quad (3.36)$$

onde $P[T_f > H] = P[X = T_f - H > 0]$ é a probabilidade de um tempo de frenagem maior que o intervalo em relação ao veículo de trás, obtida seguindo o método de EASA (1993) com

$$E[X] = \delta + \frac{(\mu_v - v_c)}{b + i.g} - \mu_h = \delta + \frac{(\mu_v - v_c)}{b + i.g} - \frac{1}{q} \quad (3.37a)$$

e

$$Var[X] = \left(\frac{1}{b + i.g} \right)^2 \cdot \sigma_v^2 + \sigma_h^2 - 2 \cdot \left(\frac{1}{b + i.g} \right) \sigma_v \cdot \sigma_h \cdot \rho_{vh} \quad (3.37b)$$

avaliada admitindo uma distribuição normal para X ou usando uma fórmula analítica derivada da hipótese de distribuição logística para X (eventualmente como aproximação da normal).

Em ambos os casos, a velocidade de conversão pode ser obtida em campo ou avaliada, aproximadamente, como $v_c = \sqrt{\mu.g.R}$, assumindo um coeficiente de atrito lateral confortável ($\mu \cong 0,30 \leq \mu_L$) e o tempo de reação pode ser adotado como sendo da ordem de 1 segundo.

Note que a distância percorrida durante a frenagem é $x_f = \delta.v + \frac{v^2 - v_c^2}{2(b + i.g)}$, menor que a

distância percorrida com velocidade constante durante o tempo de frenagem de um valor

$\Delta x_f = v.t_f - x_f$ ou $\Delta x_f = \frac{(v - v_c)^2}{2(b + i.g)}$. Portanto, a oportunidade de conflito seria mais

propriamente decorrente de ter um veículo seguidor aproximando-se de uma distância correspondente. Admitindo que o veículo seguidor tem a mesma velocidade, o intervalo

crítico seria $h_{\Delta x_f} = \frac{\Delta x_f}{v}$ ou $h_{\Delta x_f} = \frac{(v - v_c)^2}{2(b + i.g).v}$ (não $t_f = \delta + \frac{v - v_c}{b + i.g}$). No entanto, a alteração

do valor limite não modifica o argumento de forma essencial.

No segundo caso, como a análise relativa dos intervalos entre veículos e dos tempos requeridos de frenagem envolve a distribuição de diversas variáveis aleatórias, incluindo a correlação entre elas, sua estimativa foi deixada de lado nas aplicações práticas do presente trabalho.

3.2.3 Formulações Gerais para Oportunidades de Conflito Secundárias

Por fim, existe um caso especial a ser discutido: as oportunidades de conflito traseiras na via principal na operação sem semáforos. Como discutido no capítulo anterior, os trabalhos

revisados desprezam estas oportunidades de conflito (supostas nulas) apesar da evidência que os conflitos gerados nesta situação são relevantes e muitas vezes acarretam acidentes. Como regra, existirá um conflito primário envolvido (no cruzamento ou travessia da via principal por um movimento transversal ou em outras manobras interferentes, como estacionamento) que motivará a oportunidade de conflito traseira e o risco de colisão decorrente.

Pode-se admitir que outras oportunidades de conflito gerem colisões traseiras ou deve-se incorporar estas oportunidades de conflito traseiras secundárias para representar o risco considerado. A segunda opção é, a seguir, discutida.

Trata-se novamente de um caso que corresponde a oportunidades de conflito geradas por interferências, discutido acima, e as mesmas duas formas alternativas são aplicáveis.

A primeira expressão que estimaria as COs traseiras dos movimentos da via principal é:

$$CO_s(\text{traseira})/h = \left(\sum_j CO_j \right) \times (1 - e^{-q_c \cdot T_s}) \quad (3.38)$$

O primeiro fator corresponde à probabilidade de um veículo (da frente) sofrer um conflito com os veículos ou pedestres da via secundária (ou outras interferências), obrigando-o a realizar uma frenagem. O segundo fator refere-se à probabilidade de chegar outro veículo principal (de trás) no tempo de exposição $T_s = t_f$ (tempo de frenagem). Como simplificação, pode-se admitir, conservativamente, que a frenagem é feita até a parada total do veículo, caso em que o tempo de exposição é $T_s = t_p$ (o tempo necessário para parada) e $\tilde{q} = q$ (pois $v_f = 0$ no final da frenagem até parar).

A segunda expressão que estimaria as COs traseiras dos movimentos principais é:

$$CO_s(\text{traseira})/h = \left(\sum_j CO_j \right) \cdot P[T_i > H] \quad (3.39)$$

onde T_i é a duração da interferência acarretada pela oportunidade de conflito primária. Se, novamente, é admitido que, por simplicidade, o tempo de interferência pode ser caracterizado pelo tempo de parada total ($T_i = t_p$), tem-se $X = H - T_i = H - \left(\delta + \frac{v}{b + i.g} \right)$ e pode-se aplicar o mesmo procedimento descrito anteriormente (novamente com $v_f = 0$).

Note que as expressões apresentadas podem ser facilmente generalizadas para o caso em que as distintas oportunidades de conflito primárias geram interferências diferentes (por exemplo, com durações diferentes). Neste caso, tem-se $CO_s(\text{traseira})/h = \left(\sum_j CO_j \times (1 - e^{-\tilde{q}_j T_{sj}}) \right)$ ou $CO_s(\text{traseira})/h = \left(\sum_j CO_j \cdot Pr[T_{ij} > H] \right)$, conforme a formulação utilizada.

3.2.4 Análise dos Movimentos de Pedestres, com ou sem Semáforos

O presente trabalho incorpora dois conceitos para a expressão “travessia de pedestre”, que deverá ser entendido, conforme o contexto, em uma das seguintes definições⁴²:

- a) travessia de pedestre é a ação ou efeito de atravessar uma via ou pista;
- b) travessia de pedestre é o caminho percorrido pelo pedestre para atravessar uma via ou pista.

Quando o caminho percorrido pelo pedestre é demarcado e regulamentado, a travessia de pedestre passa a ser denominada de “faixa de travessia de pedestre”⁴³.

⁴² O dicionário Houaiss apresenta, entre outros, os seguintes significados para o vocábulo “travessia”:

- a) ação ou efeito de atravessar uma região, um continente, um mar, etc;
- b) caminho percorrido pela embarcação em seu deslocamento entre dois pontos da superfície da terra.

⁴³ O Anexo II do CTB diz: “As faixas de travessia de pedestres regulamentam o local de travessia de pedestres.” A NBR 9050/2004 dá a seguinte definição para “faixa de travessia de pedestre”: “Sinalização transversal às pistas de rolamento de veículos, destinada a ordenar e indicar os deslocamentos dos pedestres para travessia da via.”

As travessias de pedestres podem ser:

- a) travessias em interseções não semaforizadas
- b) travessias em interseções semaforizadas

Estas classes de travessias serão caracterizadas a seguir, do ponto de vista de coletar aspectos relevantes para formular modelos de oportunidades de conflito envolvendo pedestres.

Quanto à preferência do uso da via, a aplicação das regras de trânsito é menos clara na relação entre pedestres e veículos. Pelo CTB, na ausência de semáforo com focos de pedestres, o pedestre teria preferência sobre movimentos veiculares de conversão. Com sinalização de prioridade, pode-se entender que os movimentos de pedestres tem preferência diante de todos os fluxos veiculares da via secundária, incluindo os fluxos diretos (embora isto não esteja posto no CTB). Com sinalização semafórica mas sem focos específicos de pedestres, pode-se entender que os pedestres devem seguir as indicações dos focos correspondentes aos movimentos veiculares paralelos à sua travessia, sendo preferenciais em relações às conversões (embora, novamente, isto não esteja claramente posto no CTB). Com focos específicos de pedestres, as travessias no vermelho seriam irregulares mas não existe clareza sobre a possibilidade de ter verde para movimentos de pedestres permitidos (não protegidos) que seriam autorizados mas secundários diante de fluxos veiculares conflitantes (como ocorre para conversões à esquerda permitidas). Sem focos específicos de pedestres, a travessia diante dos fluxos diretos pode ser considerada permitida (sendo secundária) ou proibida (sendo irregular), sem contrariar o que está posto no CTB. O significado preciso da existência de faixa de pedestre, salvo na existência de semáforo com foco específico de pedestre ou na limitação dos locais de travessia, é também ambíguo no CTB no efeito sobre a preferência dos pedestres.

Como hipótese de trabalho, a interpretação adotada é a seguinte:

- regra geral de circulação: pedestre preferencial diante de conversões e secundário diante de fluxos diretos (preferência relativa);
- com sinalização de prioridade, os fluxos diretos da via secundária passam a também ser secundários diante de fluxos de pedestres paralelos à via principal; não se altera a situação da travessia da via principal;

- com sinalização semafórica mas sem focos de pedestres, não se altera a regra de preferência para pedestres: as travessias de pedestres são protegidas diante das conversões e apenas permitidas diante de fluxos diretos; a recomendação seria realizar as travessias diante das conversões;
- com sinalização semafórica e focos de pedestres, as travessias de pedestres são irregulares no período de vermelho de pedestres e o início da travessia é irregular no período de indicação intermitente; a travessia de pedestres é sempre protegida no verde de pedestres (se houver movimento veicular secundário, ele deve ser secundário em relação aos pedestres).

O comportamento efetivo dos usuários da via é também menos conforme com a regulamentação, quando se trata da relação entre pedestres e veículos, mesmo onde seu significado é claro. No exemplo da preferência dos pedestres diante de veículos em conversão, sem semáforos ou em semáforos sem focos de pedestres, teoricamente, as oportunidades de conflito com pedestre deveriam ser tratadas distintamente (considerando a sua preferência legal) de situações em que o pedestre não tem preferência (no caso a travessia diante dos fluxos diretos). Porém, sabe-se que, na prática (pelo menos na cidade de São Paulo), não existe obediência a essa regra de preferência. Devido a este fato, pode também ser considerada a opção de tratar da mesma forma todos os movimentos veiculares conflitantes, independentemente da preferência de passagem legal a que o pedestre teria direito, sem distinguir se são prioritários ou secundários. Esta opção evita a interpretação do CTB onde ele é dúbio. Evita também admitir uma regra não correspondente ao comportamento efetivo. No entanto, sua aplicação depende do nível local de fiscalização da regulamentação (e de alterações de comportamento decorrente da fiscalização e educação dos usuários da via), que podem alterar a atenção às regras legais de preferência e devem, então, ser monitoradas.

3.2.4.1 Análise de Travessias de Pedestres em Interseções não Semaforizadas

Nenhum dos autores estudados no capítulo anterior trata de oportunidades de conflito com pedestres em interseções não semaforizadas. Por este motivo, a seguir, propõe-se uma análise que possa permitir a obtenção de um procedimento para estimar as oportunidades de conflito com pedestres em interseções não semaforizadas, com baixo volume de pedestres, isto é, onde pode-se admitir que não há acumulação de pedestres (os pedestres não atravessam em grupo).

Define-se “Zona de Conflito de Pedestre” ou simplesmente “Zona de Conflito – ZC” como sendo a área de travessia de pedestres para onde convergem as trajetórias dos movimentos veiculares conflitantes. Normalmente, uma travessia de pedestres pode ser dividida em uma ou mais zonas de conflito contíguas, dependendo do número de faixas. Em geral, existe uma zona de conflito para cada faixa de tráfego, mas a análise simplificada pode distinguir apenas as zonas de conflito dos sentidos ou pistas distintas.

Seja a interseção não semaforizada, de mão dupla com mão dupla, com uma faixa por sentido, mostrada na Figura 3.5a, com a indicação da travessia de pedestres em estudo, com as suas duas zonas de conflito. Na ZC1, há apenas o movimento veicular M1 cuja trajetória intercepta a área da respectiva zona de conflito. Na ZC2, três trajetórias (movimentos veiculares, M2, M3 e M4) interceptam a referida zona de conflito.

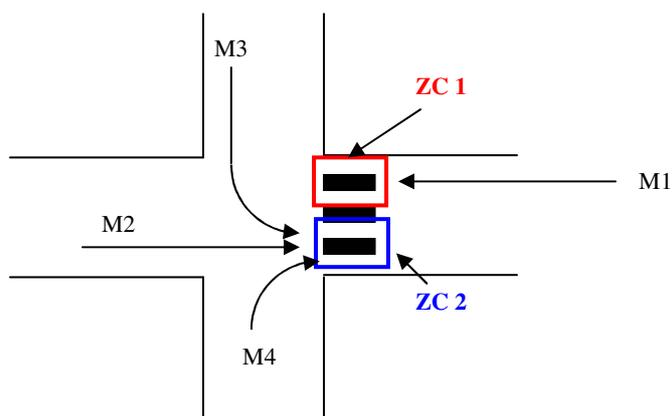


Figura 3.5a – Zonas de Conflito de Pedestre

Na ausência de semáforo com focos específicos, o pedestre tem preferência sobre movimentos veiculares de conversão (no caso, os movimentos M3 e M4). Assim, teoricamente, não haveria oportunidades de conflito com pedestres devido aos movimentos M3 e M4 ou estes deveriam ser tratados distintamente (considerando a sua preferência legal).

Em princípio, os cálculos poderiam ser realizados considerando a exposição do pedestre por faixa de tráfego. Considere o exemplo de travessias em uma via de mão única com mão única, com 3 faixas de tráfego, com três zonas de conflito em cada travessia, como na Figura 3.5b.

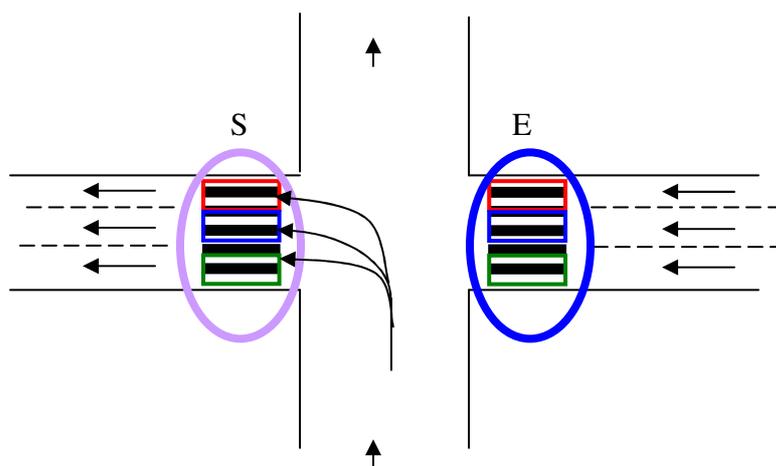


Figura 3.5b – Zonas de Conflito de Pedestre por faixa de tráfego

O procedimento para estimar as oportunidades de conflito nas duas travessias é igual ao que foi apresentado para interseção da Figura 3.5a, de dupla mão com dupla mão e uma faixa de tráfego por sentido, bastando, novamente, considerar a nova configuração dos movimentos conflitantes de cada zona de conflito. Logo, no caso de a interseção da Figura 3.5a apresentar mais de uma faixa, o procedimento discutido a seguir é análogo ao da Figura 3.5b.

Entretanto, para avaliar as oportunidades de conflito faixa a faixa, seria necessário ter a distribuição dos fluxos veiculares nas faixas. No caso da conversão à esquerda na Figura 3.5b, este requisito aplica-se aos fluxos da aproximação na travessia E e aos fluxos de saída e de conversão na travessia S. Deve-se aplicar um modelo ou levantar em campo a proporção do fluxo que converge para cada uma das 3 faixas das travessias, a fim de determinar os fluxos conflitantes de cada zona de conflito (além dos fluxos do movimento em frente).

Para a aplicação do modelo, a eventual dificuldade de estimar os fluxos de conversão por faixa pode levar a adotar hipóteses simplificadoras. Por exemplo, pode-se utilizar o fluxo médio por faixa em todas as faixas, fazer o cálculo para toda a aproximação, com a ocupância média por faixa, adotar a suposição de que todas as conversões usam a faixa adjacente.

Estimadas as oportunidades de conflito em cada faixa, obtém-se o total somando as faixas da aproximação. Se a probabilidade de uma oportunidade de conflito para os veículos é igual em todas as faixas, o resultado seria equivalente a utilizá-la com o fluxo total veicular da aproximação mas, ainda assim, seria diferente da estimativa com o tempo de exposição total (ao invés da exposição por faixa). Se a probabilidade de uma chegada conflitante em cada

faixa for igual, durante a travessia dos pedestres, a mesma diferença ocorre e também surge a diferença entre considerar ou não a chegada de cada faixa como uma oportunidade de conflito distinta (o cálculo com o fluxo total, evita a dupla contagem de eventos múltiplos).

A hipótese adotada para o desenvolvimento do modelo é que não há acúmulo de pedestres (os pedestres chegam e atravessam um a um). Sem distinguir as faixas, o tempo de exposição de cada pedestre é seu tempo de travessia na zona de conflito e a probabilidade de uma chegada conflitante define uma oportunidade de conflito com pedestres correspondente. Como previamente discutido, pode-se agregar os diferentes fluxos que convergem para uma zona de conflito (o que considera a ocorrência de chegadas simultâneas).

Tem-se, portanto, que

$$CO(\text{pedestre})_c / h = Q_{pedc} \cdot \left(1 - e^{-q_c \cdot T_{pedc}} \right) \quad (3.40a)$$

onde

$$T_{pedc} = t_{zc} \quad (3.40b)$$

sendo

$$t_{zc} = \frac{W_{zc}}{v_{ped}} = \text{tempo de travessia da zona de conflito}$$

q_c = fluxo conflitante veicular na travessia da zona de conflito

(a estimativa é feita, portanto, por zona de conflito).

Um aspecto importante a ser notado é que, na discussão acima, não foi considerada a regra de preferência entre veículos e pedestres, definida pelas regras gerais de circulação. No entanto, mesmo sem semáforos, em princípio, esta regra poderia ser alterada pela sinalização de prioridade (embora isso não esteja claro no CTB, estaria sendo admitido que os veículos que recebem sinal de PARE ou DÊ PREFERÊNCIA devem também ceder preferência aos pedestres na travessia paralela à via principal, pelo menos). Esta seria uma interpretação

compatível com a legislação de trânsito de certos países (ver, por exemplo, a discussão em BRILON e WU, 2001, referente à Alemanha) e tornaria a questão mais relevante.

Uma opção para travessias secundárias (eventualmente irregulares) seria considerar limites inferiores e superiores para os intervalos que configurariam as oportunidades de conflito, como citado por KAUB (2005), incorporando-se a correção discutida no capítulo anterior.

Tem-se, então, para movimentos de pedestres preferenciais

$$CO(\text{pedestre})_c / h = Q_{pedc} \cdot \sum_c \left(1 - e^{-q_c \cdot T_{pedc}} \right) \quad (3.40c)$$

onde

$$T_{pedc} = t_{zc} \quad (3.40d)$$

e para movimentos de pedestres secundários

$$CO(\text{pedestre})_c / h = Q_{pedc} \cdot \sum_c \left(1 - e^{-q_c \cdot (\tau_l + \tau_u)} \right) \quad (3.40e)$$

ou

$$CO(\text{pedestre})_c / h = Q_{pedc} \cdot \left(1 - e^{-\sum_c q_c \cdot (a+au)} \right) \quad (3.40f)$$

onde

$$\tau_l = 0,25 \cdot T_{pedi} \text{ (margem inferior)}, \tau_u = 0,25 \cdot T_{pedi} \text{ (margem superior)} \text{ e } T_{pedi} = t_i \quad (3.40g)$$

sendo

$t_{zc} = \frac{W_{zc}}{v_{ped}}$ é o tempo de travessia da zona de conflito e q_c é o fluxo conflitante veicular

na travessia da zona de conflito (a estimativa é feita, portanto, por zona de conflito) e

$t_i = \frac{W_z}{v_{ped}}$ é o tempo de travessia integral (como aproximação da brecha requerida).

No caso de preferência dos pedestres, pode-se também considerar apenas as chegadas livres no fluxo veicular (incluindo $P[F]$, a probabilidade de chegadas sem fila, nas expressões apresentadas acima (admitindo-se $P[F] = (1 - X)$, onde $X = \frac{Q}{C}$, com a capacidade calculada para a manobra secundária também considerando fluxos de pedestres preferenciais como parte do fluxo oposto dos movimentos veiculares conflitantes).

A visão implícita nesta hipótese seria que os movimentos de pedestres secundários tem menos oportunidades de conflito, embora tivessem também maior atraso. Naturalmente, o grau de risco pode ser distinto em cada tipo de oportunidade de conflito, especialmente quando os atrasos majorados ensejam comportamentos de risco indesejados. No entanto, a visão implícita é oposta à subjacente nas formulações adotadas para veículos, onde a diferença reside no menor tempo de exposição dos veículos prioritários em relação aos secundários (o que faz os movimentos prioritários terem menos oportunidades de conflito primárias; apenas as oportunidades de conflito secundárias poderiam pesar no sentido de majorá-las).

As hipóteses do Capítulo 17 (e 18) do HCM/2000 seriam outra fonte alternativa não investigada. O HCM/2000 adota o critério de considerar a exposição faixa a faixa na zona de conflito e considera que os pedestres atravessam em grupo.

Note-se também que, nas expressões anteriores, adotou-se a perspectiva da forma básica de KAUB (2005), ao invés da forma inversa associada à formulação de ZHANG e PREVEDOUROS, que seria uma alternativa.

A expressão simples baseada na forma inversa seria

$$CO(\text{pedestre})_c / h = Q_c \cdot OCC_{pedc} \quad (3.41)$$

onde Q_c é o fluxo veicular conflitante com a travessia de pedestres e OCC_{pedc} seria a ocupância da travessia de pedestres na zona de conflito. Embora a ocupância OCC_{pedc} pudesse ser relacionada aos valores investigados no estudo de MILLAZO *et alli* (1998), não existe um estudo correspondente para travessias sem semáforo.

A suposição natural, neste contexto, seria usar $OCC_{pedc} = OCC_{pedg}$ com $Q_{pedg} = Q_{ped}$ (que corresponderia a admitir $G_{ped} = T_c$ no modelo para travessias semaforizadas). Revisando o trabalho de MILLAZO *et alli* (1998), pode-se ver que seu conceito de ocupância foi medido no caminho do veículo que realiza a conversão à esquerda e corresponderia, portanto, a um conceito de ocupância da faixa onde o veículo em conversão está trafegando. Trata-se de uma formulação que admite, portanto, pontos de vista similares do HCM/2000. No entanto, as variáveis fundamentais de comportamento dos pedestres (as brechas críticas, a velocidade do pedestre, o tempo de reação e/ou de travessia), não são explicitamente consideradas.

Como a formulação de MILLAZO *et alli* (1998) aplica-se a um caso em que os pedestres têm preferência na travessia (diante das conversões à esquerda permitidas, nos EUA), não faria sentido aplicá-la em outro contexto. A formulação discutida acima poderia, neste caso, ser associada apenas ao contexto em que a travessia de pedestres é preferencial e considerar a parcela dos fluxos veiculares secundários em relação a ela.

A diferenciação da situação complementar, em que a travessia de pedestres é secundária, teria de considerar o comportamento dos pedestres na seleção de brechas.

Face à ambigüidade existente na legislação e à inobservância da preferência dos pedestres em São Paulo, este aspecto é difícil de analisar⁴⁴. As opções mais diretas seriam:

- desconsiderar a regra de preferência legal;
- considerar os pedestres preferenciais diante de conversões e secundários diante dos fluxos diretos;

⁴⁴ Aliás, a combinação dos dois últimos aspectos levanta uma questão interessante: se a seleção da perspectiva adequada (básica ou inversa) não deveria ponderar a regra de preferência.

- considerar o pedestre preferencial também diante dos fluxos diretos da via secundária.

A análise dos resultados empíricos pode, eventualmente, distinguir se uma ou outra forma é mais adequada.

3.2.4.2 Análise de Travessias de Pedestres em Interseções Semaforizadas

Analogamente ao problema de pedestres em interseções não semaforizadas, nenhum dos autores analisados no capítulo anterior trata do problema de oportunidades de conflito de travessias em interseções semaforizadas detidamente. Apenas ZHANG e PREVEDOUROS (2003) trataram dos pedestres em sua discussão sobre o efeito do tratamento semafórico das conversões à esquerda quando há um fluxo veicular oposto (permitida).

Por este motivo, nas propostas a seguir, busca-se ampliar os contextos analisados para os pedestres em interseção semaforizadas.

Considerando a sua obediência ou não à preferência legal de movimentos de pedestres prioritários, as travessias de pedestres são classificadas em:

- a) travessias protegidas: são aquelas realizadas na ausência de conflito veicular ou correspondem a movimentos de pedestres preferenciais (prioritários) em relação aos movimentos veiculares conflitantes que tem direito de passagem simultâneo;
- b) travessias efetivamente protegidas: são aquelas realizadas na ausência de conflito veicular ou correspondem a movimentos de pedestres preferenciais (protegidos) em relação aos movimentos veiculares conflitantes que tem direito de passagem simultâneo, quando essa preferência legal do pedestre é efetivamente respeitada;
- c) travessias permitidas: são aquelas realizadas diante de movimentos veiculares prioritários (o movimento de pedestre é secundário);
- d) travessias concorrentes: são as travessias permitidas e aquelas realizadas diante de movimentos veiculares secundários que não respeitam a preferência legal do pedestre, além das travessias de pedestres irregulares (realizadas em períodos em que a travessia é legalmente proibida); em decorrência, o movimento de pedestre se comporta como movimento secundário e se realiza nas brechas dos movimentos veiculares.

Para as travessias protegidas em interseções semaforizadas, será também adotada a classificação complementar usualmente admitida em São Paulo:

- a) Travessia protegida “em carona”: existe pelo menos um estágio em que todos os movimentos veiculares autorizados (com direito de passagem) não são conflitantes com a travessia em questão. Este tipo de travessia ocorre apenas em vias de mão única ou em alguma etapa da travessia com pista dividida, onde a travessia “em carona” pode estar junto à linha de retenção ou não (após ilha de canalização de conversão à direita).
- b) Travessia protegida “não em carona”: não existe um estágio em que todos os movimentos veiculares autorizados (com direito de passagem) não sejam conflitantes com a travessia em questão.

A Figura 3.6a mostra uma interseção semaforizada de mão única com mão única, operada com dois estágios.

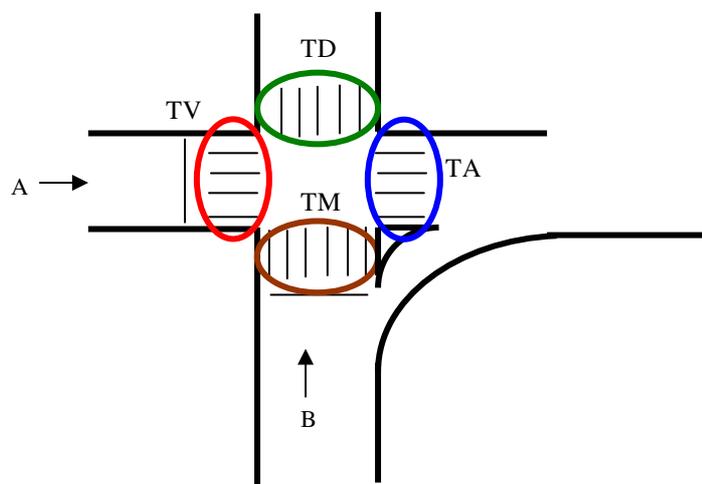


Figura 3.6a – Interseção sem estágio de pedestres

Na Figura 3.6a, as travessias indicadas por TV e TM são travessias “em carona” junto à linha de retenção. A travessia indicada por TA é uma travessia “em carona” afastada da linha de retenção. As travessias “em carona” podem ou não estar sinalizadas com focos de pedestres. Na cidade de São Paulo, normalmente, recomenda-se sinalizar com focos de pedestres a travessia “em carona” afastada da linha de retenção (indicada por TA) e a travessia “em carona” junto à linha de retenção (travessias indicadas por TV e TM) apenas quando a mesma for muito larga.

Observa-se que o direito de passagem (luz verde) das travessias “em carona” indicadas por TV e TA, quando sinalizadas com focos de pedestres, é obtido por meio do vermelho do movimento veicular da aproximação A, enquanto que o direito de passagem da travessia indicada por TM é obtido durante o período de vermelho do movimento veicular da aproximação B. Daí a origem da denominação “em carona” (“em carona” do tempo de vermelho veicular). O movimento veicular cujo tempo de vermelho corresponde ao direito de passagem da travessia é denominado aqui de “movimento veicular paralelo”.

A travessia indicada por TD é uma travessia “não em carona”. Em termos legais, na ausência de grupos focais de pedestres que regulassem uma forma alternativa, os pedestres teriam preferência diante dos movimentos de conversão e a travessia seria legalmente protegida. Esta não é considerada, entretanto, uma visão prática. Por este motivo, a referida travessia pode ser considerada como travessia concorrente, onde os pedestres devem atravessar usando-se de brechas dos movimentos veiculares conflitantes (normalmente de movimentos veiculares de conversão, sobre os quais teria preferência legal). Em geral, enquanto estiver andando o movimento veicular da aproximação B, os pedestres de TD terão poucas oportunidades de realizar a travessia. As maiores chances de travessia ocorrem no estágio da aproximação A, aproveitando-se de brechas do movimento de conversão à esquerda da aproximação A.

As travessias diante do fluxo de B podem também ocorrer. Dependendo da interpretação dada ao CTB, esta travessia poderia ser considerada irregular mesmo sem foco de pedestres. Em termos práticos, secundária ou irregular, com ou sem foco de pedestres, as travessias em TD teriam de utilizar brechas entre veículos. Seriam então consideradas travessias concorrentes.

Na cidade de São Paulo, as travessias permitidas e concorrentes não recebem sinalização de focos de pedestres. Existem países que sinalizam a travessia TD com focos de pedestres, dando a indicação verde para o pedestre durante o estágio da aproximação A, isto porque o pedestre tem a preferência de passagem respeitada em relação ao movimento veicular de conversão (isto é, a regra legal de preferência é respeitada pelos condutores). Nestes países, estas travessias seriam consideradas travessias efetivamente protegidas nos estágios com conversões e o movimento veicular correspondente seria tratado como permitido. Esta é a regra implícita no HCM/2000, por exemplo.

A Figura 3.6b mostra uma interseção semaforizada, de duas vias de mão única, mas na hipótese alternativa de estar sendo operada com estágio de pedestres.

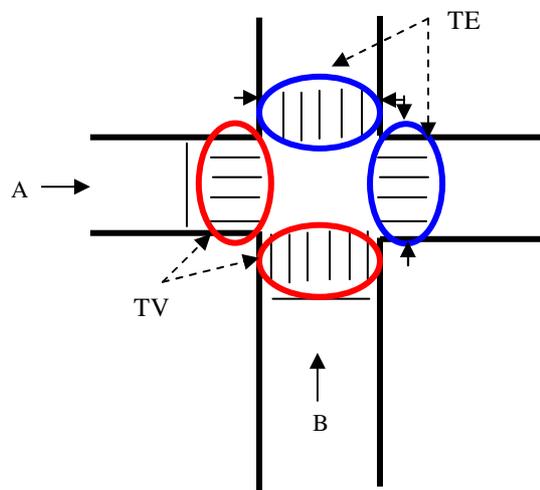


Figura 3.6b – Interseção com estágio de pedestres

Na Figura 3.6b, as travessias indicadas por TV são travessias protegidas “em carona” junto à linha de retenção. Essas travessias podem ou não ser sinalizadas com focos de pedestres (na cidade de São Paulo, normalmente recebem sinalização de foco de pedestres apenas se a travessia for muito larga). Essas travessias vão receber dois períodos de direito de passagem: um período referente ao vermelho do movimento veicular transversal e um segundo período relativo ao estágio de pedestres.

As travessias indicadas por TE na Figura 3.6b são travessias protegidas “não em carona”, por estágio de pedestres, durante o qual os movimentos veiculares das aproximações A e B recebem, ambos, de forma simultânea, a indicação vermelha do semáforo. Na cidade de São Paulo, essas travessias geralmente recebem a sinalização de focos de pedestres (com exceção de travessias muito curtas). O estágio de pedestres é configurado na interseção nos casos em que os movimentos veiculares de conversão são muito fortes (assim como o volume de pedestres), não oferecendo brechas suficientes para a travessia de pedestres. Havendo foco específico, o movimento de pedestres não é autorizado nos demais estágios. Caso contrário, pelo menos no estágio com conversões simultâneas com as travessias em TE, poder-se-ia considerar como uma travessia concorrente. O mesmo se aplica às travessias irregulares.

Este último comentário é interessante porque oferece uma alternativa para analisar situações onde o comportamento transgressor do pedestre é uma regra (infelizmente uma situação

bastante usual no Brasil), assumindo a forma associada às travessias permitidas. Este modelo de análise pode ser utilizado para o vermelho de pedestres adiante. Além disso, na ausência de focos de pedestres, pode-se entender que a travessia dos pedestres nas brechas dos fluxos veiculares deve ser usada como modelo de análise, independentemente da regra de preferência legal, aspecto que será discutido e considerado nas formulações selecionadas.

Com essa nomenclatura, uma mesma travessia pode ser protegida/efetivamente protegida num período do ciclo e permitida/concorrente em outro, dependendo se há obediência à preferência legal a que o pedestre teria direito.

Nas travessias concorrentes, os pedestres são autorizados com fluxo veicular conflitante simultâneo. Se há fluxo veicular conflitante simultâneo, a travessia será efetivamente protegida somente se o movimento de pedestres for legalmente preferencial e houver observância à regra legal. Note que a classificação em travessia efetivamente protegida e concorrente, ao final ignorou a regra legal de preferência, em função dos aspectos discutidos anteriormente (dado que importa apenas o comportamento efetivo em termos de preferência). Em um futuro próximo, espera-se que todas as travessias legalmente protegidas possam ser consideradas efetivamente protegidas e as classes serão equivalentes. No momento atual, as classes serão distinguidas e a distinção pode mesmo variar de uma a outra localidade, considerando o comportamento efetivo dos usuários da via.

Em conclusão, a análise das oportunidades de conflito com pedestres em interseções semaforizadas parte da classificação de cada travessia como protegida/efetivamente protegida e permitida/concorrente. Um mesmo movimento de pedestres pode ter diversas formas de operação durante o ciclo semafórico. Se os pedestres podem atravessar em mais de um período, deve-se prever a proporção da demanda de pedestres chegando e, em função do acúmulo de pedestres e das oportunidades de travessia, atravessando em cada período.

Períodos de Operação para Movimentos de Pedestres em Semáforos

A análise de períodos de operação de movimentos de pedestres pode-se dar em dois casos:

- a) travessias sinalizadas com focos de pedestres;
- b) travessias não sinalizadas com focos de pedestres.

Na cidade de São Paulo, como já discutido, as travessias protegidas por estágio de pedestres normalmente são dotadas de focos de pedestres e as travessias protegidas “em carona” podem ou não ser sinalizadas com focos de pedestres.

O ciclo semafórico, para as travessias de pedestres protegidas, dotadas de sinalização com focos de pedestres, é dividido nos seguintes períodos:

- a) Período de verde de pedestres – G_{ped}
- b) Período de vermelho intermitente de pedestres – I_{int}
- c) Período de vermelho de pedestres – R_{ped}

O período de vermelho de pedestres R_{ped} corresponde ao período de verde e de entreverdes dos movimentos veiculares conflitantes. Os demais períodos são diretamente temporizados pelo controle semafórico. Pode-se dividir o período R_{ped} nos seguintes subperíodos:

- a) Período de dissipação de fila do movimento veicular autorizado – G_q
- b) Restante do período de verde do movimento veicular autorizado – G_u
- c) Período de entreverdes do movimento veicular autorizado – I_c

A estimativa de G_q e G_u foi anteriormente discutida. Os períodos I_{int} e I_c correspondem ao final e início do verde de pedestres, respectivamente, e correspondem a períodos também diretamente temporizados pelo controle semafórico.

Para travessias de pedestres não dotadas de sinalização de focos de pedestres, pode-se pensar nos seguintes períodos equivalentes:

- a) Período correspondente ao verde de pedestres – $G_{pedinicial}$
- b) Período de final do direito de passagem do pedestre – $G_{pedfinal}$
- c) Período de vermelho de pedestres – R_{ped}

fazendo

$$G_{pedfinal} = \frac{W_{ped}}{v_{ped}} \quad (3.42)$$

e

$$G_{pedinicial} = G + I_a - G_{pedfinal} \quad (3.43)$$

Neste caso, não existe o período I_{int} , mas o período de verde final tem papel similar ao do entreverdes de pedestres (o intermitente) e o período de verde inicial tem papel similar ao verde de pedestres. No entanto, existe uma diferença importante: falta a informação de que se trata do período final do tempo para a travessia, exceto o caso de se conseguir visualizar o foco veicular amarelo pelo pedestre.

Note que o período I_c corresponde ao estágio anterior (veicular) e deve ocorrer normalmente, não havendo diferenciação entre seu aspecto para estágios protegidos ou permitidos (novamente, apenas a visualização do foco veicular amarelo, agora para o fluxo transversal e não paralelo à travessia, proporcionaria a informação sobre sua ocorrência).

A eventual possibilidade de ter tempos semafóricos inadequadamente dimensionados chama atenção para o fato de que o tempo efetivamente requerido pode ser mais importante que o intervalo temporizado, a menos do conteúdo de informação da indicação luminosa.

Portanto, para travessias permitidas/concorrentes, os períodos de operação não seriam diretamente caracterizados pelo controlador semafórico mas podem ser caracterizados de forma similar, como nas travessias protegidas sem focos de pedestres. Se houver focos de pedestres nas travessias permitidas/concorrentes, então os tempos fixados pelo controlador semafórico seriam adotados, novamente como nas travessias efetivamente protegidas.

Admite-se que as travessias permitidas/concorrentes não são dotadas de sinalização de focos de pedestres, como é prática na cidade de São Paulo. Portanto, se a travessia é dotada de focos de pedestres admite-se, então, que a travessia é efetivamente protegida⁴⁵.

A caracterização dos períodos de operação para movimentos de pedestres em semáforos não depende, portanto, de serem travessias efetivamente protegidas ou permitidas/concorrentes. A existência ou não de foco de pedestre é o aspecto relevante, pelo menos em função do conteúdo de informação correspondente à sua indicação luminosa.

⁴⁵ Em São Paulo, as travessias de pedestres com fluxos veiculares autorizados simultaneamente não recebem sinalização de focos de pedestres.

Ocupância de Pedestres em Semáforos

Nas travessias de pedestres permitidas/concorrentes em interseções semaforizadas, a travessia é realizada em brechas nos fluxos veiculares conflitantes⁴⁶ que, à primeira vista, teria características semelhantes àsquelas de interseções não semaforizadas. Contudo, existe uma diferença fundamental entre as duas situações.

Nas interseções não semaforizadas, foi admitida a hipótese de baixo volume de pedestres e de veículos, de forma que não há acúmulo de pedestres e, portanto, os pedestres não atravessam em grupo. Assim, a hipótese é a travessia pedestre a pedestre e, para cada pedestre, é estimada a chance de exposição devido à chegada de um veículo conflitante no tempo da travessia.

Já nas interseções semaforizadas, este tipo de hipótese não é adequado mesmo que o volume de pedestres e veículos seja baixo, pois há um tempo em que os pedestres se acumulam (o vermelho dos pedestres ou, pelo menos, o escoamento do fluxo veicular prioritário em pelotão). Após esse período de acumulação, os pedestres atravessam em grupo (aproveitando brechas) e a travessia não pode ser mais considerada pedestre a pedestre. Numa mesma brecha, podem atravessar vários pedestres.

Por causa deste fato, será utilizado aqui o conceito de “ocupância” empregado por ZHANG e PREVEDOUROS (2003), que adota o modelo de “volume-ocupância” desenvolvido por MILAZZO *et alli* (1998), por meio de modelos empíricos.

O tempo de exposição do pedestre é uma função da ocupância da zona de conflito pelo pedestre. A ocupância de pedestre é definida como a fração do tempo que os pedestres ocupam a zona de conflito, propondo-se também usar o modelo de MILLAZZO *et alli* (1998):

$$OCC_{pedg} = \begin{cases} Q_{pedg} / 2000 & \text{se } Q_{pedg} \leq 1000 \\ Q_{pedg} / 10000 + 0,4 & \text{se } Q_{pedg} > 1000 \end{cases} \quad (3.44a)$$

com

⁴⁶ No caso das travessias protegidas com fluxos veiculares secundários simultâneos, a preferência dos pedestres poderia levar a considerar que eles não têm de esperar por brechas para atravessar. Existiria conflito potencial de forma distinta das travessias efetivamente protegidas (na terminologia adotada anteriormente), mas sua natureza seria eventualmente diferente. Inicialmente, a discussão feita a seguir não distinguirá esta situação. No entanto, adiante serão feitas algumas ponderações sobre como considerar os pedestres preferenciais.

$$Q_{pedG} = Q_{ped} \cdot \frac{T_c}{G_{ped}} \quad (3.44b)$$

e

$$OCC_{pedu} = OCC_{pedg} \cdot \left(1 - 0,5 \frac{G_q}{G_{ped}} \right) \quad (3.45)$$

(as expressões originalmente propostas por MILLAZO *et alli*, 1998, são também adotadas no HCM/2000).

Naturalmente, é necessário confirmar a validade da expressão de MILAZZO *et alli* (1998) para as interseções de São Paulo, uma vez que se trata de uma expressão empírica obtida com base em cidades de outro país. No entanto, pelo menos atualmente não parece existir uma alternativa de formulação disponível para aplicação.

Também seria necessário verificar a validade da aplicação das expressões empregadas por ZHANG e PREVEDOUROS (2003) em contextos distintos do originalmente estudado, uma vez que as mesmas foram desenvolvidas para conversões à esquerda com movimento oposto e não para movimentos de conversão normais ou movimentos diretos, em frente.

Além disso, como na cidade de São Paulo as travessias permitidas/concorrentes não são sinalizadas com focos de pedestres, o verde de pedestres G_p deve ser entendido como o tempo de verde do movimento veicular de conversão que conflita com a travessia.

No caso dos estágios efetivamente protegidos, por serem ignoradas as transgressões veiculares durante o seu período de verde, a ocupância não é relevante (dado que será adotada a hipótese de que não haverá fluxo veicular, por serem ignoradas as transgressões veiculares durante o seu período de verde). No entanto, a proporção dos pedestres que atravessa nos estágios efetivamente protegidos (eventualmente todos) é um dado importante.

Travessias de Pedestres nos Períodos de Operação dos Semáforos

A determinação da duração dos períodos de operação semaforicos pode ser utilizada para obter a proporção dos pedestres que chegam em cada período, com alguma hipótese

suplementar sobre as chegadas de pedestres. A hipótese natural seria de uma taxa média de chegadas de pedestres uniforme (com distribuição poissoniana, por exemplo) e a frequência esperada de chegadas em cada período semafórico seria $N_{pedk} = p_{Ck} \cdot N_{ped}$ com $p_{Ck} = \frac{T_k}{T_c}$ (obtida com base na duração prevista do período T_k , na hipótese de $Q_{pedk} = Q_{ped}$).

No entanto, em diversas situações, com a informação sobre as chegadas de pedestres, deve-se determinar a proporção dos pedestres p_{Ak} que atravessam em cada período. Esta é claramente a situação na forma básica (implicitamente deve aparecer também na forma inversa).

Um exemplo previamente discutido é o da determinação do fluxo de pedestres no período de verde. Admitindo que os pedestres que chegam no vermelho esperam para atravessar no verde, o fluxo no período de verde seria $Q_{pedG} = \frac{T_c \cdot Q_{ped}}{G_{ped}}$ e o fluxo no vermelho seria

$Q_{pedR} = 0$ (incluindo o período de entreverdes). Esta expressão foi previamente utilizada no modelo de ocupância proposto por MILLAZO *et alli* (1998) e pode ser deduzida calculando o total de pedestres que chega em um ciclo ($N_{pedC} = Q_{ped} \cdot T_c$) e obtendo o fluxo médio correspondente à sua travessia no verde de pedestres ($Q_{pedG} = \frac{N_{pedC}}{G_{ped}}$).

Naturalmente, este caso representa uma situação particular e diferentes hipóteses de comportamento ou de distinção de períodos acarretam expressões distintas. Eventualmente, o período de verde dos pedestres pode ser dividido em subperíodos e as travessias correspondentes podem ser calculadas com base em alguma hipótese suplementar. Além disso, pode-se admitir que parte dos pedestres não espera para atravessar no verde.

Por exemplo, se for admitido que parte dos pedestres atravessam nas brechas existentes no período de vermelho (N_{pedR}) ou se forem distinguidos os pedestres que atravessam no entreverdes (N_{pedI}), a expressão correspondente ao fluxo de pedestres no verde (ou cada subperíodo componente do verde) deve ser revisada de forma consistente e o fluxo médio no

período de verde seria dado por $Q_{pedG} = \frac{T_c \cdot Q_{ped} - N_{pedR} - N_{pedI}}{G_{ped}}$. Se um pelotão de pedestres

atravessa imediatamente no início e os demais pedestres atravessam ao chegar, após escoar o

pelotão, então $Q_{pedGp} = \frac{R_{ped} \cdot Q_{ped} - N_{pedR}}{G_p}$ no pelotão (duração $G_p = N_u \cdot t_u$) e $Q_{pedGn} = Q_{ped}$

fora do pelotão (no entreverdes haveria um fluxo residual $Q_{pedI} = \frac{N_{pedI}}{I}$).⁴⁷

Em certa medida, a diferença entre OCC_{pedG} e OCC_{pedu} do modelo de MILLAZO *et alli* (1998) é remanescente da diferença das travessias geradas pelos fluxos de pedestres distintos em G_p e $G_n = G - G_p$, mas as formulações mais detalhadas podem ter uma caracterização mais pormenorizada para buscar melhores resultados, merecendo investigação empírica.

Um conjunto de hipóteses preliminares para avaliar o comportamento dos pedestres na travessia em interseções semaforizadas seria:

- nos períodos de verde dos estágios efetivamente protegidos os pedestres em espera atravessam imediatamente e os demais pedestres atravessam ao chegar;
- nos períodos de verde dos estágios concorrentes, a probabilidade dos pedestres atravessarem depende da probabilidade de ter uma brecha adequada até final do período; caso contrário, os pedestres aguardam até o entreverdes;
- no período de entreverdes, pelo menos quando há focos de pedestres com indicação intermitente ou quando pode ser visto o foco veicular, parte dos pedestres não atravessa diante da iminência da mudança de estágio;
- no período de vermelho para os pedestres ou qualquer outro período em que há travessias irregulares, as travessias também ocorrem nas brechas.

⁴⁷ Cada conjunto de hipóteses comportamentais é traduzido numa expressão correspondente. Por exemplo, se as travessias ocorrem nas brechas entre veículos, apenas após a dissipação das filas (como ocorreria diante dos fluxos veiculares principais diretos) poderia ser utilizado e então $Q_{pedGu} = \frac{T_c \cdot Q_{ped} - N_{pedR} - N_{pedI}}{G - G_q}$ (onde

G_q é o tempo de dissipação de fila relevante). De forma geral, a análise deveria prosseguir estágio a estágio, acumulando pedestres que chegam e liberando os que atravessam em cada subperíodo do estágio analisado.

Portanto, admitindo-se que a condição para os estágios efetivamente protegidos é simples e imediata (todos atravessam sem riscos na travessia), deve-se analisar dois casos: a travessia dos pedestres nas brechas de estágios concorrentes (ou com travessias irregulares) e a travessia de pedestres no entreverdes com indicação intermitente ou visão do foco veicular.

Para as travessias nas brechas, as hipóteses adotadas são inspiradas no trabalho de GUO *et alli* (2004), que analisa o efeito dos períodos de operação semaforica no atraso dos pedestres (com atenção especial aos períodos com fluxo em pelotão). A hipótese básica adotada é a de que a proporção dos pedestres que atravessam nas brechas entre veículos durante um período com duração T_k é igual à probabilidade do atraso dos pedestres nas travessias em brechas ser maior que T_k (admitem também que todos os pedestres residuais atravessam no entreverdes seguinte, hipótese adicional que não será adotada a seguir).

Em GUO *et alli* (2004), a distribuição dos atrasos é tomada do trabalho de HAIGHT (1963), que propõe uma expressão alternativa para a distribuição obtida em TANNER (1951). Como estas expressões são muito complexas, como simplificação, propõe-se considerar que a proporção de pedestres que atravessam nas brechas pode ser estimada pela probabilidade de ter pelo menos uma brecha adequada no período disponível para travessia, avaliada por

$$p_{Ak} = 1 - (1 - p_{ot})^{m_{ok}} \quad (3.46)$$

onde $m_{ok} = q_{cp} \cdot T_k$ é o número esperado de brechas no fluxo oposto à travessia de pedestres no período disponível para a travessia nas brechas T_k (em geral o verde útil após a dissipação das filas no fluxo oposto à travessia de pedestres) e p_{ot} é a probabilidade de um intervalo entre veículos oferecer uma oportunidade adequada de travessia (correspondente a uma brecha igual ou maior que o tempo de travessia T_{zc} , e estimada por $p_{ot} = P[H \geq T_{zc}] = e^{-q_{cp} \cdot T_{zc}}$ no caso de chegadas poissonianas no fluxo oposto à travessia de pedestres).

Com esta hipótese, se N_{pedi} pedestres estão em espera no início do período T_k e $q_{ped} \cdot T_k$ pedestres chegam durante o período T_k , a estimativa seria de que $N_{pedk} = p_{Ak} \cdot (N_{pedi} + q_{ped} \cdot T_k)$ pedestres atravessam nas brechas entre veículos e

$N_{pedr} = (1 - p_{Ak}) \cdot (N_{pedi} + q_{ped} \cdot T_k)$ ficarão em espera até o final do período (e considerarão a travessia no entreverdes seguinte). Na verdade, ter-se-ia uma proporção p_{Ak} ciclos com travessia de todos os pedestres (com $N_{pedr} = 0$) e a proporção complementar dos ciclos sem travessia (com $N_{pedr} = N_{pedi} + q_{ped} \cdot T_k$), com ausência de brechas.

Dependendo do estágio semaforico considerado e da travessia de pedestres em análise, o fluxo oposto à travessia de pedestres pode constituir-se de um movimento direto ou de conversão. Considerando que o início do movimento veicular em pelotão G_q pode ser considerado inadequado para travessia, o período disponível para travessia seria o verde útil posterior $T_k = G_u$ (e o fluxo conflitante oposto à travessia seria o fluxo normal dos movimentos concorrentes com o fluxo de pedestres). Quando algum dos estágios tem condição de fluxo mais vantajosa para os pedestres (por exemplo, quando há um fluxo de conversões reduzido), pode-se admitir que os pedestres esperam e atravessam apenas neste estágio favorável. Pode-se também considerar que todos os períodos com brechas são considerados pelos pedestres, ponderando o fluxo oposto à sua travessia.

Por fim, note que a formulação pode ser aplicada também às travessias irregulares no vermelho de pedestres (quando há foco específico), se este comportamento for considerado.

Pedestres no Entreverdes com e sem Focos Específicos

Os focos de pedestres transmitem a informação de que o tempo residual, correspondente à indicação intermitente, não é suficiente para iniciar e concluir a travessia.

De forma correspondente com a hipótese adotada por MAHALEL e PRASHKER (1987) para o entreverdes veicular, pode-se admitir que 50% dos pedestres atravessam (os demais param) para os que esperam ou chegam durante o período correspondente. Os pedestres que não atravessam seriam, então, acumulados para atravessar nos estágios seguintes.

Na ausência de focos de pedestres, a informação não existe no período correspondente à indicação intermitente e pode-se então admitir que todos os pedestres atravessam ou, quando o foco veicular for visível aos pedestres, admitir, alternativamente, que o intervalo de amarelo

transmite informação similar e uma proporção dos pedestres que chegam ou esperam neste período atravessam (50% ou uma proporção específica).

Uma hipótese mais consistente poderia admitir que o risco afeta os pedestres que chegam no final do estágio (o tempo de verde final $G_{pedfinal}$) e a indecisão afeta os pedestres avisados da mudança de estágio (de I_{int} ou do I_a do foco veicular visível).

De forma correspondente, com foco de pedestres, pode-se admitir que atravessam 50% dos pedestres do intervalo intermitente, além dos pedestres de $G_{pedfinal} - I_{int}$ (resultando em uma situação equivalente se I_{int} e I_a são iguais a $G_{pedfinal}$).

Sem foco de pedestres, pode-se admitir que todos atravessam ou que 50% dos pedestres do intervalo de amarelo visível e todos os pedestres do período final $G_{pedfinal} - I_a$ atravessam. Estes pedestres de $G_{pedfinal}$ que atravessam ficam expostos no entreverdes (resultando em uma situação intermediária).

Portanto, neste caso, o período relevante para a análise do entreverdes seria $G_{pedfinal}$, havendo ou não foco de pedestres. A existência de foco de pedestres daria uma informação adicional e permitiria reduzir a parcela dos pedestres deste período que decidem não atravessar (passaria de 50% de I_a para 50% de I_{int} ou um valor correspondente quando a porcentagem de observância for diferente em cada intervalo).

Por simplificação, será considerado o tempo de entreverdes como referência, incorporando-se apenas a exposição em $G_{pedfinal}$ quando não há foco para pedestres e o foco veicular correspondente não é visível (a situação assumida como básica, sem foco para pedestres).

Note que ambas as formulações acarretam a existência de pedestres residuais na mudança de um período a outro (a serem somados aos pedestres que chegam no período seguinte), pelo efeito de indecisão diante da informação provida sobre a mudança de estágio.

Travessias Efetivamente Protegidas em Semáforos

Pode-se considerar dois casos: sem fluxo veicular concorrente ou com fluxo veicular concorrente.

O primeiro caso, naturalmente, não gera oportunidades de conflito com pedestres. Existem aqui duas situações: os fluxos conflitantes não operam na interseção (estão proibidos) ou não operam no estágio (recebem vermelho quando os pedestres atravessam; mas podem ter conflitos no entreverdes). Em ambas as situações, as oportunidades de conflito são desprezadas pois as transgressões veiculares estão sendo ignoradas.

O segundo caso corresponde ao analisado por ZHANG e PREVEDOUROS (2003), no contexto das conversões à esquerda com fluxo oposto, existindo outros casos não tratados. Existe conflito entre pedestres e veículos no período de verde mas a preferência efetiva é dos pedestres. As travessias protegidas sem observância da preferência dos pedestres e as travessias permitidas, onde os pedestres atravessarem usando-se de brechas no fluxo veicular, serão tratadas adiante como concorrentes.

Seguindo a estratégia de ZHANG e PREVEDOUROS (2003) mas introduzindo as alterações discutidas no capítulo anterior, o modelo recomendado para oportunidades de conflito com pedestres contra conversões com fluxo oposto é:

$$CO(\text{pedestre})_{co} / h = Q_{co} \cdot OCC_{pedu} \quad (3.47)$$

e para oportunidades de conflito com pedestres contra movimentos não opostos.

Para oportunidades de conflito contra conversões sem fluxo oposto, o tratamento a ser adotado, no caso de respeito à preferência do pedestre na travessia, depende de hipóteses sobre o comportamento de pedestres e condutores. No caso de travessias efetivamente protegidas, quando há preferência dos pedestres e ela é observada, consideradas neste item, há travessias em todo o período de verde e a estimativa é

$$CO(\text{pedestre})_c / h = Q_c \cdot OCC_{pedG} \quad (3.48)$$

(que seria normalmente o caso diante de conversões à direita secundárias, pelo menos quando há baixo fluxo de conversões e/ou grande fluxo de pedestres).

A proposição para movimentos não opostos é preliminar por não distinguir os diferentes períodos de sua operação (dissipação da fila e fluxo normal), como nos outros contextos, assumindo que a distinção entre as ocupâncias no verde e no verde útil traduz uma situação na outra adequadamente. O fluxo de conversão pode distinguir o período de dissipação de filas ($Q_c = p_c \cdot S$, contra o pelotão inicial de pedestres) e de operação normal ($Q_c = p_c \cdot Q$, contra o pelotão de pedestres residual), com uma formulação mais detalhada.. O período de entreverdes será distinguido e discutido adiante.

Vale assinalar que os modelos simplificados adotam a forma inversa e diferem de ZHANG e PREVEDOUROS (2003), como justificada anteriormente, que adotam $CO(\text{pedestre})_{co} = Q_{ped} \cdot OCC_{pedu} \cdot P_{co}$, com base no fluxo de pedestre e distinguindo a probabilidade de chegada veicular conflitante P_{co} (por eles representada como $P_{co} = e^{-q_{co} \cdot \alpha_{ped}}$, dado o fluxo de conversões permitidas com fluxo oposto Q_{co} e a brecha necessária para travessia dos pedestres α_{ped}). Nos casos sem fluxo oposto, o fator correspondente seria equivalente à probabilidade de uma chegada no fluxo conflitante ($1 - e^{-q \cdot t}$, com a hipótese poissoniana).

No caso de preferência dos pedestres, também pode-se, novamente, considerar apenas as chegadas livres no fluxo veicular (incluindo $P[F]$, a probabilidade de chegadas sem fila), que podem ser associadas às chegadas no verde útil G_u dos veículos na operação semafórica ou considerar uma formulação capaz de avaliar as filas de espera veiculares.

Travessias Permitidas/Concorrentes em Semáforo

Nesta situação, admite-se que os pedestres atravessam nas brechas entre veículos concorrentes. Pode-se, novamente, considerar dois casos: diante de fluxos (de conversão) reduzidos ou de fluxos (diretos) predominantes.

No primeiro caso, ao contrário do segundo caso, não é estritamente necessário distinguir as condições de fluxo dos períodos de dissipação da fila (no qual normalmente não há brechas para travessia) e dos períodos de operação normal (onde as brechas ocorrem).

Como não há uma formulação específica para a travessia de pedestres nas brechas do fluxo veicular em semáforos, deve-se decidir entre aplicar uma formulação baseada nas hipóteses adotadas para a interseção com sinalização de prioridade ou admitir a aplicação também neste contexto do modelo volume-ocupância desenvolvido por MILLAZO *et alli* (1998) para avaliar a interação entre o fluxo de pedestres (prioritário) e conversões permitidas (com fluxo oposto veicular). A seguir, pode-se optar pela primeira ou pela segunda abordagem.

No caso de travessias diante de fluxos (diretos) principais, admite-se que não ocorrem travessias durante o período de dissipação de filas, dado que o fluxo escoar em pelotão.

Esta suposição parece adequada para travessias junto às linhas de retenção (isto é, na entrada de pistas com mão única de direção de tráfego) e aceitável para as demais travessias (isto é, em pistas com mão dupla ou nas saídas das vias de mão única), quando os fluxos envolvidos são preponderantes (ou predominantes). A situação é normalmente associada aos fluxos diretos (em geral, os fluxos preponderantes) mas pode ser associada aos fluxos de conversão quando sua participação é preponderante no tráfego de uma aproximação (em uma situação em que nenhum fluxo é preponderante, a situação não ocorre para a aproximação considerada).

Admite-se, então, que não ocorrem travessias no período de dissipação de fila da aproximação e que as brechas relevantes ocorrem somente no período de fluxo normal (associado ao verde útil). Embora a situação seja similar ao da travessia protegida com fluxo concorrente, agora os

pedestres não são preferenciais e esperam por brechas no fluxo oposto e seria criticável utilizar as expressões anteriores para a ocupância no verde útil (OCC_u).

Com as hipóteses anteriormente admitidas para interseções com sinalização de prioridade mas considerando apenas os pedestres de um dado estágio, tem-se

$$CO(pedestre)_p / h = \frac{3600}{T_c} P_{AT} \cdot (N_{pedl} + q_{ped} \cdot T_E) (1 - e^{-q_p T_{ped}}) \quad (3.49a)$$

ou

$$CO(pedestre)_p / h = \frac{3600}{T_c} P_{AT} \cdot (N_{pedl} + q_{ped} \cdot T_E) (1 - e^{-q_o(\tau_L + \tau_U)}) \quad (3.49b)$$

com $p_{AT} = 1 - (1 - p_{ot})^{m_{ok}}$ onde $m_{ck} = q_{cp} \cdot G_u$ é o número esperado de brechas no fluxo oposto à travessia de pedestres no período disponível para a travessia nas brechas $T_k = G_u$ e $p_{ot} = P[H \geq T_{zc}] = e^{-q_{cp} \cdot T_{zc}}$ é a probabilidade de um intervalo entre veículos igual ou maior que o tempo de travessia T_{zc} onde T_E é a duração do período de acumulação de pedestres do estágio considerado (seria o verde G se os demais pedestres atravessam no estágio anterior, ou o ciclo T_c se o estágio considerado é o único que admite travessia).

Neste caso, o número de pedestres em espera no início do verde útil é $N_{ped1} = N_{ped0} + q_{ped} \cdot G_q$ (onde N_{ped0} , o número de pedestres em espera no início do verde, é obtido da análise do entreverdes anterior). Portanto, admite-se, implicitamente, que todos os pedestres acumulados nos períodos anteriores (G_q no caso de acúmulo em G , $R + G_q$ no caso de acúmulo em T_c , incluindo o entreverdes anterior) também atravessam durante o período de fluxo normal (isto é, apesar da duração reduzida G_u , contam-se não apenas os pedestres que chegam no período, mas todos os pedestres do ciclo que atravessam no período). A duração do período de dissipação de fila G_q e do período complementar de verde G_u (com brechas) pode ser calculado com as expressões anteriormente discutidas.

Se as travessias irregulares são consideradas, estaria neste caso a travessia contra fluxos diretos (movimentos veiculares em frente) mesmo no período de vermelho.

No caso de travessias diante de fluxos (de conversão) reduzidos, admite-se que ocorrem travessias durante todo o período referente ao estágio considerado.

Considerando que a probabilidade de atravessar diante do fluxo reduzido é maior, é admitido que a situação com fluxo normal é representativa, tendo-se

$$CO(\text{pedestre})_p / h = \frac{3600}{T_c} p_{AT} \cdot (N_{ped0} + q_{ped} \cdot T_E) (1 - e^{-p_c q_{ped} T_{ped}}) \quad (3.50)$$

onde p_c é a proporção do fluxo (de conversão) reduzido e agora p_{AT} é avaliado com $m_{ck} = q_{cp} \cdot G$ (isto é, com $T_k = G$). Eventualmente, existe mais de um fluxo veicular concorrente com a travessia de pedestres (conversões à direita de um sentido da via e conversões à esquerda do sentido oposto da via). Nestes casos, a expressão deve somar os fluxos (ou a probabilidade de chegadas conflitantes) de ambos os fluxos (aplicando-se, então, a discussão feita anteriormente sobre oportunidades de conflito com ambos os fluxos).

Note que novamente seria possível tentar distinguir os dois períodos de fluxo (referentes à dissipação de filas na aproximação, com $Q_o = p_c \cdot S$, e ao fluxo normal, com $Q_o = p_c \cdot Q$, sendo p_c a porcentagem de conversões) mas, neste caso, torna-se necessário determinar a proporção dos pedestres que atravessam em cada período.

Vale reiterar que, embora normalmente os fluxos de conversão sejam reduzidos e os fluxos diretos sejam predominantes, pode existir locais onde esta característica é invertida (os fluxos diretos devem ser tratados como reduzidos e os fluxos de conversão como predominantes) ou mesmo locais em que ambos os fluxos são reduzidos (por exemplo, na travessia do sentido não dominante da via).

Em ambos os casos, valem considerações análogas às discutidas na travessia de pedestres sem semáforo. Por exemplo, o tempo de exposição dos pedestres na travessia pode ser calculado

considerando a travessia integral ($T_{pedi} = t_i = \delta_{ped} + \frac{W_z}{v_{ped}}$), por zona de conflito ($T_{ped} = t_{zc} = \frac{W_{zc}}{v_{ped}}$) ou faixa ($T_{ped} = t_{xl} = \frac{W_l}{v_{ped}}$), além dos demais aspectos relevantes.

Comparativamente, pode-se também formular as expressões correspondentes com base no conceito de ocupância. Empregando novamente o modelo de MILLAZO *et alli* (1998), na ausência de opções aplicáveis, a expressão para fluxos predominantes seria

$$CO(\text{pedestre})_d / h = Q_d \cdot OCC_{pedu} \quad (3.51)$$

e para fluxos reduzidos seria

$$CO(\text{pedestre})_c / h = Q_c \cdot OCC_{pedg} \quad (3.52)$$

(mas a importância de validar estes modelos seria ainda maior neste contexto distinto).

Note-se que nestes casos de travessias em brechas, o enfoque adotado implica em ter uma parcela dos pedestres que não atravessa ao final do período considerado e que deverá avaliar a possibilidade de travessia no entreverdes, em conjunto com os pedestres que chegam no entreverdes. Este número de pedestres residual é $N_{pedr} = (1 - p_{AT})(N_{ped0} + Q_{ped} \cdot T_E)$. Da mesma forma, ao final do entreverdes, haverá um número de pedestres que não atravessa e este será o novo valor inicial de N_{ped0} para os estágios seguintes. Portanto, o processo de cálculo deve considerar os diversos estágios seqüencialmente e pode ensejar um processo iterativo. Se há um estágio efetivamente protegido para os pedestres, este é um bom ponto de início porque não existirão os pedestres residuais no final do seu verde, com as hipóteses admitidas.

A formulação apresentada acima prevê o comportamento do pedestre ao longo ciclo e fornece expressões sensíveis a diversas variáveis operacionais e de projeto. No entanto, não existe validação adequada dos modelos apresentados e, por este motivo, estas formulação não serão aplicadas nos estudos de campo.

Final de Verde de Pedestres em Travessias com Focos de Pedestres

No período de entreverdes para pedestres, o vermelho intermitente de pedestres I_{int} , as oportunidades de conflito podem ocorrer quando há deficiência de vermelho intermitente, de forma similar ao tratamento dado para o entreverdes veicular.

Essa deficiência é caracterizada quando o pedestre inicia a sua travessia ainda com a indicação verde, mas não consegue concluir a travessia de forma normal (sem correr) antes do início dos movimentos veiculares conflitantes. A deficiência do vermelho intermitente td_{int} é:

$$td_{int} = \frac{w_{ped}}{v_{ped}} - I_{int} - \frac{z_{ped}}{v} - \Delta - I_v \quad (3.53)$$

onde w_{ped} é a extensão da travessia de pedestres até o ponto de conflito crítico (na pior situação, tem-se $w_{ped} = W_{ped}$, incluindo toda a largura da via atravessada pelos pedestres) e

$\frac{z_{ped}}{v}$ é a defasagem de tempo entre o início do verde e a passagem pelo ponto de conflito para

o fluxo veicular que inicia a operação (ao percorrer a distância z_{ped} até o ponto de conflito com a travessia de pedestres, na pior hipótese igual ao afastamento da faixa de pedestres em relação à linha de retenção veicular $z_{ped} = Z_{ped}$), sendo Δ o retardo adicional para o caso de fluxos veiculares que partem da posição parada (e não chegam em fluxo).

Para uma formulação estocástica, pelo método de de aproximação dos momentos, $P[td_{int} > 0]$ pode ser calculado:

a) para a média, com o método de primeira ordem (FOM):

$$E[td_{int}] = \frac{w_{ped}}{v_{ped}} - I_{int} - \frac{z_{ped}}{\mu_v} - \Delta - I_v \quad (3.54a)$$

b) para a média, com o método de primeira ordem e segundo momento (FOSM):

$$E[td_{int}] = \frac{w_{ped}}{v_{ped}} - I_{int} - \frac{z_{ped}}{\mu_v} - \Delta - I_v + \frac{z_{ped} \cdot \sigma_v^2}{\mu_v^2} \quad (3.54b)$$

c) para a variância, com ambos os métodos (FOM e FOSM):

$$Var[td_{int}] = \left(\frac{z_{ped}}{\mu_v} \right)^2 \sigma_v^2 \quad (3.54c)$$

permitindo avaliar

$$P_{sInt} = P[td_{int} > 0] \quad (3.54d)$$

que pode ser obtida com a aproximação normal ou, admitindo como aproximação uma distribuição logística, com uma forma analítica conveniente.

Com a hipótese, anteriormente discutida, de que 50% dos pedestres esperando travessia no entreverdes atravessam, o total de oportunidades de conflito com pedestres é

$$CO(\text{pedestre})_{ii} / h = \frac{0,5 \cdot Q_{ped} I_{int}}{T_c} \cdot P[td_{int} > 0] \quad (3.55a)$$

ou

$$CO(\text{pedestre})_{ii} / h = \frac{3600}{T_c} \cdot 0,5 \cdot (N_{pedr} + q_{ped} I_{int}) \cdot P[td_{int} > 0] \quad (3.55b)$$

Note que não é ponderada a probabilidade de que o pedestre atravesse ao chegar. Novamente, faltaria representar a progressão do pedestre no entreverde, isto é, o instante t de chegada dentro do entreverde, para determinar uma expressão melhorada para a oportunidade de conflitos com pedestres no entreverde. No caso particular dos pedestres, o aspecto comportamental é especialmente relevante e deveria ser considerada inclusive no que se refere a transgressões realizadas durante o vermelho (além das realizadas no piscante).

Final de Verde de Pedestres em Travessias sem Focos de Pedestres

Para travessias sem focos de pedestres, pode-se pensar numa deficiência análoga ao caso de travessia com foco de pedestres, fazendo-se apenas $I_{int} = 0$ (na ausência de informação, admite-se que o pedestre atravessa até o final do verde veicular paralelo).

No período final do direito de passagem de pedestres, o pedestre, ao chegar e encontrar os veículos ainda parados na linha de retenção, pode querer iniciar a travessia, sem haver tempo hábil para concluí-la de uma forma normal (sem a necessidade de correr), antes do início do movimento veicular concorrente, estando, portanto, o pedestre exposto a risco de conflito.

Para avaliar o número de pedestres em condição de conflito, no entanto, é necessário fazer considerações específicas. Admite-se que o período $G_{pedfinal} = \frac{W_{ped}}{v_{ped}}$ pode ser utilizado para este fim e a formulação estocástica deve ser modificada com esta nova suposição. De resto, a análise é similar à apresentada anteriormente, incluindo as observações sobre a deficiência td_{lc} do tempo de travessia no início do estágio (final do estágio anterior), que serão feitas adiante.

A discussão se aplica tanto às travessias efetivamente protegidas quanto às travessias concorrentes. No entanto, do ponto de vista de segurança, a situação é distinta porque o total de pedestres acumulado no entreverdes é provavelmente distinto em cada situação.

Nas travessias concorrentes, seria necessário prever porcentagem dos pedestres que atravessam nas brechas para obter o resíduo acumulado no início de entreverdes, tendo-se:

$$CO(\text{pedestre})_{ii} / h = \frac{Q_{ped} \cdot G_{pedfinal}}{T_c} \cdot P[td_{I=0} > 0] \quad (3.56a)$$

ou

$$CO(\text{pedestre})_{ii} / h = \frac{3600}{T_c} \cdot (N_{pedr} + q_{ped} \cdot G_{pedfinal}) P[td_{I=0} > 0] \quad (3.56b)$$

onde N_{pedr} é o número de pedestres (após as travessias nas brechas) no início do entreverdes e $P[td_{I=0} > 0]$ é obtido como anteriormente, mas fazendo $I_{int} = 0$.

Algumas considerações adicionais podem ser feitas ponderando a eventual visualização dos grupos focais veiculares (a indicação de amarelo poderia ser tomada pelo pedestre em lugar da indicação intermitente inexistente na ausência do foco de pedestre). Estas considerações levam a uma fórmula generalizada que pode ser usada com ou sem foco de pedestres, como

$$CO(pedestre)_{i/h} = Q_{ped} \cdot \frac{(G_{pedfinal} - 0,5.I)}{T_c} P[td_{I=a} > 0] \quad (3.57)$$

onde $I = I_{int}$ corresponderia à duração da indicação piscante quando há foco específico de pedestres, $I = I_a$ corresponderia à indicação de amarelo veicular quando este é visível para o pedestre e não há focos de pedestres (ao invés de $I = 0$, assumido quando falta a informação sobre o entreverdes).

Nesta formulação generalizada, ficam potencialmente expostos os pedestres que chegam em $G_{pedfinal}$ e a indicação do entreverdes faz com que parte destes decidam não atravessar e evitem ficar efetivamente expostos. Há um aumento da segurança mas parte dos pedestres sofrerá aumento de atraso (gerando o número de pedestres residuais já comentado anteriormente).

Início de Verde de Pedestres

De forma similar ao comentário feito sobre o entreverdes veicular, existe a possibilidade de exposição dos pedestres no início do estágio, que corresponderia ao entreverdes veicular do estágio anterior. No caso dos pedestres, usualmente este é um risco mais grave que no caso veicular porque as transgressões veiculares aumentam quando o movimento conflitante do estágio seguinte é apenas um fluxo de pedestres (ou um estágio exclusivo de pedestres).

O período I_c , do final do estágio anterior às travessias, pode ser considerado pelos condutores como um “prolongamento” do seu verde (e, em particular, do verde útil G_u , quando o

movimento tem fluxo oposto), onde falta punição às ofensas contra a preferência dos pedestres.

No caso de travessias junto à linha de retenção, a exposição do pedestre decorreria apenas de uma transgressão veicular (aspecto que não tem sido considerado nas formulações discutidas até aqui).

No entanto, no caso de travessias afastadas da linha de retenção, pode haver uma deficiência de I_c no sentido determinístico ou estocástico (de que o mesmo não é suficiente para garantir a saída de todos os veículos da área da travessia de pedestres antes que o sinal de pedestre mude para verde). Essa deficiência td_{Ic} pode ser estimada como:

$$td_{Ic} = \frac{Z_{ped}}{v} - I_c - I_v - \Delta_{ped} \quad (3.58)$$

onde:

Z_{ped} = distância da linha de retenção do movimento veicular concorrente ao final da travessia

Δ_{ped} = tempo de percurso do pedestres até o ponto de conflito veicular

I_v = intervalo de vermelho de segurança para o estágio de pedestres (isto é tempo entre o final de I_c e o início de verde pedestre)

v = velocidade de aproximação do veículo conflitante

Pelo método de aproximação dos momentos, $P[d_{Ic} > 0]$ pode ser calculado:

a) para a média, com o método de primeira ordem (FOM):

$$E[td_{Ic}] = \frac{Z_{ped}}{\mu_v} - I_c - \Delta_{ped} - I_v \quad (3.59a)$$

b) para a média, com o método de primeira ordem e segundo momento (FOSM):

$$E[td_{lc}] = \frac{Z_{ped}}{\mu_v} - I_c - \Delta_{ped} - I_v + \frac{Z_{ped} \cdot \sigma_v^2}{\mu_v^3} \quad (3.59b)$$

c) para a variância, com ambos os métodos (FOM e FOSM):

$$Var[td_{lc}] = \left(\frac{Z_{ped}}{\mu_v^2} \right)^2 \sigma_v^2 \quad (3.59c)$$

permitindo avaliar

$$P[td_{lc} > 0] = P \left[v < \frac{Z_{ped}}{I_c - \Delta_{ped} - I_v} \right] \quad (3.59d)$$

que pode ser obtida com a aproximação normal ou, admitindo como aproximação uma distribuição logística, com uma forma analítica conveniente.

Note, entretanto, que as expressões anteriores não podem ser diretamente aplicadas para este período porque a travessia estaria normalmente sendo usada pelos pedestres que chegaram no estágio anterior (vermelho para os pedestres), a menos dos transgressores que tenham feito a travessia antes do início do estágio de pedestres. A duração de td_{lc} não pode ser tomada como duração do período relevante para a chegada dos pedestres em risco. Por este motivo, a análise deveria ser melhorada até atingir uma fórmula mais adequada para aplicação.

Dentro do que foi discutido até aqui, o número de pedestres expostos às oportunidades de conflito no início do verde seria a parcela do número de pedestres iniciais N_{ped0} que decide atravessar. Exceto quando o pelotão de pedestres em espera fosse muito grande, normalmente poder-se-ia assumir que todos iniciam a travessia imediatamente e, então, ficam expostos. Se o pelotão em espera é muito grande, eventualmente apenas a primeira fila de pedestres ficaria exposta (o que corresponderia a considerar expostos apenas os veículos do topo da fila em

cada faixa de tráfego, na análise similar do início do verde veicular, eventualmente ponderando a probabilidade da faixa estar vazia, que foi anteriormente estimada por $P[F]$).

3.3 Proposição de Modelos de Oportunidades de Conflito

A seguir, as diferentes formulações a serem estudadas para os modelos de oportunidades de conflito traseiras e angulares serão apresentadas e resumidas de forma conveniente.

Na seleção dos modelos a estudar, procurou-se sempre manter uma formulação tão próxima quanto possível (dadas as opções gerais discutidas anteriormente) da proposta por KAUB (2005) para permitir obter uma comparação entre as diversas alternativas propostas.

As formulações serão apresentadas para cada diferente contexto, incluindo:

- movimentos veiculares em interseções com sinalização de prioridade;
- movimentos de pedestres em interseções com sinalização de prioridade;
- movimentos veiculares em interseções com semáforos;
- movimentos de pedestres em interseções com semáforos.

A Tabela 3.2 adiante, resume as relações básicas extraídas da discussão precedente. Estas relações também serão reiteradamente utilizadas na discussão a seguir, além de fórmulas específicas que serão apresentadas em conjunto com os modelos propostos.

Tabela 3.2 – Resumo das expressões da Seção 3.1

Expressões gerais para os tempos de exposição	
Tempo de manobra – CO angular – Movimento principal em frente	
$T_i = t_i$ (3.2a) $t_i = \frac{W+L}{v_i}$ (3.3a)	
Tempo de manobra – CO angular – Movimento principal de conversão	
$T_i = t_i$ (3.2a) $t_i = \frac{d+L}{v_c}$ (3.3b)	$v_c = \sqrt{\mu.G.R}$ (3.3c)
Tempo de manobra – CO angular – Movimento secundário em frente	
$T_i = \delta + t_i$ (3.2b) $t_i = \sqrt{\frac{2(W+L)}{a}}$ (3.3d)	
Tempo de manobra – CO angular – Movimento secundário de conversão	
$T_i = \delta + t_i$ (3.2b) $t_i = \sqrt{\frac{2(d+L)}{a}}$ (3.3e)	<p>Conversão próxima $d = \frac{\pi}{2}.R_c$ $R_c = R_d$ ou R_e (3.3f)</p> <p>Conversão afastada $d = \frac{\pi}{2}.R_c + x$ (3.3g)</p> <p>$R_c = \min\{R_{in}, R_{out}\}$ (3.3h) $x = R_{in} - R_{out}$ (3.3i)</p> <p>$R_{in} = \frac{W_{in}}{2N_{in}} + W_o + W_{Mo}$, $R_{out} = W_i + W_{Mi} + \frac{W_{out}}{2N_{out}}$ (3.3j)</p>
Tempo de manobra – CO traseira – Veículo interferente móvel	
$T_i = t_f$ (3.4a)	
$t_f = \frac{v-v_c}{b+i.g}$ Conversão (3.5a)	
$t_f = t_p = \delta + \frac{v}{b+i.g}$ Interferência (3.5c)	
Tempo de manobra – CO traseira – Veículo em fila de espera – Interseção PARE	
$T_i = t_{ep}$ (3.4b) $t_{ep} = \frac{t_e}{p}$ (3.6)	<p>$p = 1 - (1-X).e^{-q_o.\alpha}$ (3.7b)</p> <p>$t_e = \frac{3600}{C} + 900T_p \left((X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{8X}{CT_p}} \right) + 5$ (3.8a)</p> <p>$t_e = \frac{e^{q\alpha} - 1}{q} - \alpha$ Adams (3.8b) $\alpha \cong \frac{\sum_{i=1}^n t_i q_i}{\sum_{i=1}^n q_i}$ (3.9)</p>
Tempo de manobra – CO traseira – Veículo em fila de espera – Interseção semaforizada	
$T_i = t_{ep}$ (3.4b) $t_{ep} = \frac{t_e}{p}$ (3.6)	<p>$p = \frac{R+G_q}{T_c}$ (3.10) $d_1 = \frac{0,5T_c \left(1 - \frac{G_e}{T_c} \right)^2}{1 - \left[\min(1, X) \frac{G_e}{T_c} \right]}$ (3.11a)</p> <p>$d_2 = 900T_p \left((X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{8kX}{CT_p}} \right)$ (3.11b)</p>

Expressões auxiliares gerais	
Visibilidade: correção empírica	
$P_{sv} = \frac{D_p - D_v}{D_p} \quad (3.12)$	$D_p = v\delta + \frac{v^2}{2(b+ig)} \quad (3.13a)$
Visibilidade: distância de parada necessária	
$P_{sv} = P[D_p > D_v]$	
$E[D_p] = \delta\mu_v + \frac{\mu_v^2}{2(b+ig)} + \frac{\sigma_v^2}{2(b+ig)} \quad (3.13c)$	$Var[D_p] = \left(\delta + \frac{\mu_v}{b+ig}\right)^2 \sigma_v^2 \quad (3.13d)$
Visibilidade: tempo de reação necessário δ_R fixo	
$P_{sv} = P[\delta_A > \delta_R]$	$\delta_A = \frac{D_v}{v} - \frac{v}{2(b+ig)} \quad (3.15a)$
$E[\delta_A] = \frac{D_v}{\mu_v} - \frac{\mu_v}{2(b+ig)} + \frac{D_v \cdot \sigma_v^2}{(\mu_v)^3} \quad (3.15c)$	$Var[\delta_A] = \left[\frac{Dv}{\mu_v^2} + \frac{1}{2(b+ig)}\right]^2 \sigma_v^2 \quad (3.15d)$
Visibilidade: tempo de reação necessário δ_R variável	
$P_{sv} = P[\delta_A > \delta_R]$	
$E[\delta_A - \delta_R] = \frac{D_v}{\mu_v} - \frac{\mu_v}{2(b+ig)} + \frac{D_v \cdot \sigma_v^2}{(\mu_v)^3} - \mu_\delta \quad (3.17b)$	$Var[\delta_A - \delta_R] = \left[\frac{Dv}{\mu_v^2} + \frac{1}{2(b+ig)}\right]^2 \sigma_v^2 + \sigma_\delta^2 - 2 \cdot \rho_{v,\delta} \cdot \sigma_v \cdot \sigma_\delta \quad (3.17c)$
Tempo de reação necessário para frenagem	
$P[X > 0]$	$X = \delta + \frac{v - v_r}{b+ig} - h \quad (3.18a)$
$E[X] = \delta + \frac{(\mu_v - v_r)}{b+ig} - \mu_h = \delta + \frac{(\mu_v - v_r)}{b+ig} - \frac{1}{q} \quad (3.18b)$	$Var[X] = \left(\frac{1}{b+ig}\right)^2 \cdot \sigma_v^2 + \sigma_h^2 - 2 \cdot \left(\frac{1}{b+ig}\right) \sigma_v \cdot \sigma_h \cdot \rho_{vh} \quad (3.18c)$
Distribuição normal	
$P[X > x] = 1 - \Phi[z]$	$z = \frac{x - E[X]}{\sqrt{Var[X]}}$
Distribuição logística	
$P[X > x] = 1 - \frac{1}{1 + e^{-(x-m)/a}}$	$a = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{Var[X]} \quad m = E[X]$

3.3.1 Movimento Veicular em Interseções com Sinalização de Prioridade

A seguir, são considerados dois contextos de operação veicular em interseções não semaforizadas: movimentos principais (ou prioritários) e movimentos secundários. Em cada caso, são fornecidas as expressões para oportunidades de conflito angulares e traseiras. O resumo das diferentes formulações a serem estudadas está antecipado na Tabela 3.3 e serão apresentadas a seguir.

Tabela 3.3 – Oportunidades de Conflito em Interseções com Sinalização de Prioridade

Modelos de Previsão

Movimento prioritário em interseções não semaforizadas	
CO angular (0)	$CO(angular)_i / h = Q_i \cdot (1 - e^{-T_i \cdot q}), T_i = t_{pi}, \text{ por manobra (3.60a)}$
CO angular (1)	$CO(angular)_i / h = Q_i \cdot (1 - e^{-T_i \cdot q}), T_i = t_{ci}, \text{ (a) por posição; (b) agregado (3.60b)}$
CO angular (2)	$CO(angular)_i / h = Q_i \cdot (1 - e^{-T_i \cdot q}) \cdot P[F], T_i = t_{li}, P[F] = (1 - X), \text{ por posição (3.60c)}$
CO traseira (0)	0
CO traseira (1)	$CO(traseira)_j / h = CO(primária) \cdot (1 - e^{-T_{pj} \cdot q_j}), T_{pj} = \frac{1}{Q_j} \cdot \sum_i Q_{ij} \cdot T_{pij} \text{ (3.61)}$ $CO(primária) / h = \sum_i Q_{ij} \left(1 - e^{-T_{ij} \sum_k q_{ik}}\right), T_{ij} = \frac{W + L}{v} \text{ ou } \sqrt{\frac{2(W + L)}{a}}$
CO traseira (2)	$CO(traseira) / h = Q_i \cdot \left[(1 - e^{-q_{ctc} T_{jLT}}) P_{LT} + (1 - e^{-q_{ctc} T_{jRT}}) P_{RT} \right] \text{ (3.62)}$
Movimento secundário em interseções não semaforizadas	
CO angular (0)	$CO(angular)_i / h = Q_i \cdot (1 - e^{-T_i \cdot qc}), T_i = t_{ci}, \text{ por manobra (3.63)}$
CO angular (1)	$CO(angular)_i / h = Q_i \cdot (1 - e^{-T_i \cdot qc}), T_i = t_{ci}, \text{ por posição (3.63)}$
CO angular (2)	$CO(angular)_i / h = Q_i \cdot (1 - e^{-0,5 \cdot qc T_i}), T_i = t_{ci}, \text{ por posição (3.64)}$
CO traseira (0)	$CO(traseira) / h = Q_s \cdot (1 - e^{-T_e \cdot q}), T_e = t_{eAi} \text{ (Adams), por manobra (3.65)}$
CO traseira (1)	$CO(traseira) / h = Q_s \cdot (1 - e^{-T_e \cdot q}), T_i = t_{ei}, \text{ por posição (3.67a)}$
CO traseira (2)	$CO(traseira) / h = Q_s \cdot p \cdot (1 - e^{-T_e \cdot qc}), T_i = t_{epi} = t_{ei} / p, \text{ por posição (3.67b)}$
CO traseira (3)	$CO(traseira) / h = Q_s \cdot p \cdot (1 - e^{-T_e \cdot q}), P_{sv}, T_i = t_{epi} = t_{ei} / p, \text{ por posição (3.68a)}$ $(a) P_{sv} = \max \left[\frac{D_p - D_v}{D_p}, 0 \right], (b) P_{sv} = P[D_p > D_v], (c) P_{sv} = P[\delta_R > \delta_A] \text{ (3.68b)}$

3.3.1.1 Movimentos Principais em Interseções com Sinalização de Prioridade

A discussão a seguir refere-se aos movimentos preferenciais de uma interseção com sinalização de prioridade. Quando a via principal for de mão dupla, os movimentos veiculares de conversão à esquerda da via principal para a via secundária serão considerados movimentos secundários em relação ao fluxo da via principal de sentido oposto. Por outro lado, esses movimentos serão considerados movimentos principais em relação aos movimentos da via secundária. Serão, portanto, considerados nas duas situações.

Oportunidades de Conflito Angulares

Os métodos propostos para estimar oportunidades de conflito angulares na via principal são, basicamente, similares àquele adotado pelo TRAF-Safe para oportunidades de conflito angulares na via principal mas com a adoção de um tempo de exposição igual ao tempo de passagem na interseção (a diferença básica em relação ao método proposto pelo TRAF-Safe, que propõe o tempo para parar de forma segura como tempo de exposição).

Definem-se os pontos de conflito de cada movimento da via principal com os movimentos da via secundária. Para cada movimento i da via principal, a medida de CO angular é dada por:

$$CO(\text{angular})_i / h = Q_i \cdot (1 - e^{-q_c \cdot T_i}), T_i = t_{pi} \quad (3.60a)$$

$$CO(\text{angular})_i / h = Q_i \cdot (1 - e^{-q_c \cdot T_i}), T_i = t_{ci} \quad (3.60b)$$

onde:

q_c = fluxo do(s) movimento(s) conflitantes em v/s

T_i = tempo de exposição, igual ao tempo seguro de parada $t_{pi} = \delta + \frac{v_i}{(b + i \cdot g)}$ ou ao tempo de

passagem pela interseção $t_{ci} = \frac{W + L}{v_i}$, segundo cada formulação.

A expressão (3.60a) representa a formulação do TRAF-Safe (aqui denominado como Método 0). O Método 0 é subdividido em duas variantes: Método 0a, calculado por conflito e por faixa e o Método 0b, calculado por conflito e por movimento, sendo que, para ambas as variantes, o tempo de exposição é igual ao tempo para parar de forma segura.

Mesmo nos Métodos 0a e 0b, o tempo de exposição dos movimentos de conversão à esquerda da via principal (de mão dupla) para a via secundária é o tempo de manobra e não o tempo de parada, por serem movimentos que param devido a conflitos com os fluxos da via principal de sentido oposto (embora sejam preferenciais em relação aos movimentos da via secundária).

A expressão (3.60b) representa a formulação básica proposta (aqui denominado de Método 1), onde o tempo de exposição é o tempo da manobra. O Método 1 é apresentado em 3 variantes: Método 1a, calculado por conflito e por faixa; Método 1b, calculado por faixa, com agregação dos movimentos conflitantes e Método 1c, calculado por faixa e agregado por posição na via secundária.

O Método 1c é aplicável quando a via principal possuir canteiro central de forma que a manobra de cruzamento dos movimentos da via secundária possa ser feita em duas etapas (servindo o canteiro central como refúgio seguro para aguardar brecha para a travessia da segunda etapa). Obviamente, quando a manobra for feita em uma única etapa (uma única posição ou região de conflito), os Métodos 1b e 1c são equivalentes.

No caso de travessia em duas etapas, os Métodos 1b e 1c diferem apenas no modo de agregação. Enquanto o Método 1b agrega todos os movimentos conflitantes, fazendo com que a chegada simultânea de veículos conflitantes, cujos movimentos foram agregados no cálculo, seja computada como uma única CO, o Método 1c agrega os movimentos conflitantes pela sua posição na via secundária.

A estimativa dada pelos métodos apresentados contempla as oportunidades de conflito angulares sofridas pelos veículos da via principal, o que poderia ser associado à invasão da interseção por parte dos veículos da via secundária. A falta de conspicuidade da interseção ou a deficiência de percepção de prioridade podem explicar tal fenômeno, especialmente para os veículos que chegam em fluxo livre, isto é, sem fila (os demais teriam de incorporar-se à fila).

Portanto, adicionalmente, pode-se propor outro método, aqui denominado de Método 2, considerando-se que há CO angular na via principal apenas quando a chegada do veículo conflitante da via secundária for livre (ausência de filas de espera).

$$Co(\text{angular})_i / h = Q_i \cdot (1 - e^{-q_c \cdot T_i}) \cdot P[F] \quad (3.60c)$$

onde:

q_c = movimentos conflitantes em v/s

T_i = tempo de exposição, igual ao tempo de passagem pela interseção $t_{ci} = \frac{W + L}{v_i}$.

A probabilidade de chegadas livres pode ser obtida da probabilidade de não ter filas na via secundária, como $P[F] = (1 - X_s)$. Neste caso, a estimativa deveria considerar os fluxos de cada aproximação secundária separadamente (para ter X_s), com todos os movimentos. Uma

expressão alternativa seria dada por $P[F] = e^{-q_c \cdot T} \left(1 + q_c \cdot T + \frac{(q_c \cdot T)^2}{2} + \dots + \frac{(q_c \cdot T)^{N-1}}{(N-1)!} \right)$, com

$T = T_i$ ou $T = t_i$ (o tempo de exposição ou o tempo de manobra, se forem distintos).

O Método 2 considera que apenas a chegada livre, sem fila, de um veículo conflitante propicia a ocorrência de CO. Os demais métodos não consideram a questão de fila: há CO quando há chegada de veículo conflitante, independentemente de haver filas. Por isso, o Método 2 fornece um valor numérico menor do que os outros métodos, pois pondera a probabilidade de chegada livre (estimada por $P[F] = 1 - X$).

No caso de travessia em etapa única na via secundária, o Método 2 pode ser aplicado aos métodos 1b ou 1c. No caso de travessia em duas etapas, o Método 2 só é aplicável para o caso do Método 1c, agregado pela posição na via secundária.

A seguir, são relacionados os diversos métodos propostos.

Tabela 3.4 – Relação de métodos propostos para COs angulares de movimentos prioritários em inteseções com sinalização de prioridade

Método 0a – TRAF-Safe, calculado por conflito e por faixa, com tempo de exposição igual ao tempo de parar de forma segura.
Método 0b – TRAF-Safe, calculado por faixa e por ponto de conflito e com tempo de exposição igual ao tempo de parar de forma segura.
Método 1a – calculado por conflito e por faixa, com tempo de exposição igual ao tempo de manobra.
Método 1b – calculado por faixa e com agregação dos movimentos conflitantes, independentemente da posição de conflito, com tempo de exposição igual ao tempo de manobra.
Método 1c – calculado por faixa e com agregação dos movimentos conflitantes, pela sua posição na via secundária, com tempo de exposição igual ao tempo de manobra.
Método 2 – calculado por faixa e com agregação dos movimentos conflitantes, pela sua posição na via secundária, com tempo de exposição igual ao tempo de manobra, com um termo adicional que pondera a probabilidade de chegada livre.

Oportunidades de Conflito Traseiras

A primeira abordagem corresponde à suposição, discutida anteriormente, de oportunidades de conflito nulas no TRAF-Safe (aqui denominado de Método 0).

A alternativa é considerar oportunidades de conflito secundárias e, nesta concepção, a expressão que estimaria as COs traseiras dos movimentos para a faixa j da via principal é:

$$CO(\text{traseira, secundária})_j / h = CO(\text{primária}) \cdot (1 - e^{-T_{pj} \cdot q_j}), T_{pj} = \frac{1}{Q_j} \cdot \sum_i Q_{ij} \cdot T_{pij} \quad (3.61)$$

$$CO(\text{primária}) / h = \sum_i Q_{ij} \left(1 - e^{-T_{ij} \sum_k q_{ik}} \right), T_{ij} = \frac{W + L}{v} \text{ ou } \sqrt{\frac{2 \cdot (W + L)}{a}}$$

O primeiro termo (CO primária) corresponde à probabilidade de o veículo da frente sofrer um conflito com os veículos da via secundária (obrigando-o a realizar uma frenagem). O segundo termo é a probabilidade de uma chegada conflitante na mesma faixa, durante o tempo de frenagem no fluxo q_j , considerando a soma dos fluxos conflitantes ao movimento i na faixa j .

O segundo termo utiliza o tempo de exposição médio T_{pj} dos movimentos i na faixa j , admitindo que a frenagem é feita até a parada total do veículo, para simplificar a formulação (o termo T_{pij} pode ser o tempo necessário para a frenagem de v para zero ou de v_c para zero,

conforme se o veículo de trás for do movimento em frente ou do movimento de conversão, respectivamente). Q_{ij} é o fluxo do movimento i na faixa j em v/h , q_j é a soma dos fluxos da faixa j em v/s enquanto que o termo Q_j é a soma dos fluxos dos movimentos da faixa j em v/h .

As oportunidades de conflito primárias são avaliadas com a forma inversa (avaliando interferências contra as chegadas do movimento i na faixa j), durante um tempo de exposição T_{ij} correspondente ao tempo de passagem de i , considerando todos os fluxos conflitantes k capazes de gerar uma oportunidade de conflito primária (esta mesma estimativa poderia ser obtida com a forma básica, para cada fluxo conflitante k).

A expressão (3.61) é aqui denominado de Método 1.

Um terceiro método (denominado de Método 2) é considerar que as COs traseiras são decorrentes da redução de velocidade dos veículos que fazem conversões. A expressão seria:

$$CO(traseira)/h = Q \left[\left(1 - e^{-\tilde{q}_{Tc} T_{fLR}} \right) \cdot P_{LT} + \left(1 - e^{-\tilde{q}_{Tc} T_{fRT}} \right) \cdot P_{RT} \right] \quad (3.62)$$

onde $\tilde{q}_{Tc} = q_{Tc} \cdot \left(1 - \frac{v_c}{v} \right)$. O fluxo q_{Tc} é o fluxo direto (que não reduz velocidade).

Nesse método, considerou-se que o fluxo conflitante Q_{Tc} é apenas o fluxo do movimento direto, admitindo-se que os veículos que fazem conversões não representam risco de colisão traseira com o veículo da frente, uma vez que eles próprios devem reduzir a sua velocidade para efetuar a manobra de conversão, sendo a sua velocidade menor ou igual à velocidade do veículo da frente.

Finalmente, tendo em vista que as COs traseiras podem ser geradas tanto por meio de interferências como por causa das conversões (sendo os dois fenômenos eventos de natureza distinta, que ocorrem de forma independente), pode-se constituir um quarto método (Método 3) como sendo a soma do Método 1 com o Método 2.

A seguir, são relacionados todos os métodos propostos.

Tabela 3.5 – Relação de métodos propostos para COs traseiras de movimentos prioritários em interseções com sinalização de prioridade

Método 0 – TRAF-Safe: Conforme visto anteriormente, o TRAF-Safe considera que não há COs traseiras para os movimentos que não param.
Método 1 – considerando que a CO traseira de movimentos prioritários são decorrentes de conflitos angulares (eventos primários), sendo a CO traseira um evento secundário, no sentido de que é decorrente de evento primário.
Método 2 – considerando que as COs traseiras são decorrentes de redução de velocidade de veículos que fazem conversões.
Método 3 – considerando que as COs traseiras são a soma dos Métodos 1 e 2.

3.3.1.2 Movimentos Secundários em Interseções com Sinalização de Prioridade

A discussão a seguir refere-se aos movimentos secundários de uma interseção com sinalização de prioridade. Conforme comentado anteriormente, quando a via principal for de mão dupla, os movimentos veiculares de conversão à esquerda da via principal para a via secundária serão também considerados como movimentos secundários (em relação ao fluxo da via principal de sentido oposto).

Oportunidade de Conflito Angular

A expressão utilizada pelo Método 0 (TRAF-Safe) é:

$$CO(\text{angular})_i / h = Q_i \cdot (1 - e^{-T_i \cdot q_c}), T_i = t_{ci} \quad (3.63)$$

calculada, conflito a conflito, com tempo de exposição igual ao tempo da manobra (na proposta original do TRAF-Safe, o tempo de exposição é a brecha aceita).

Ainda utilizando-se da expressão (3.63) e agregando todos os movimentos conflitantes, tem-se o Método 1a.

O Método 1b consiste em usar a mesma expressão (3.63), agregando os movimentos conflitantes de acordo com a sua posição física.

Uma idéia alternativa para os conflitos angulares da via secundária (Método 2) é considerar um limite inferior e superior para as brechas. Neste caso, a CO seria associada com a probabilidade de cruzar em um intervalo na faixa $(T \pm \tau)$, e não com a probabilidade de ocorrer um intervalo na faixa $(T \pm \tau)$, onde τ é uma tolerância para o limite inferior e superior.

Com a tolerância, a expressão (3.63) ficaria:

$$1 - e^{-qc[(T+\tau)-(T-\tau)]} = 1 - e^{-2qc\tau}$$

Entretanto, esse procedimento deixa a expressão independente de T .

Assumindo que τ seja uma função de T , por exemplo $\tau = 0,25 T$

$$CO(\text{angular})_i / h = Q_i (1 - e^{-0,5qcTi}) \quad (3.64)$$

A seguir, são relacionados todos os métodos propostos.

Tabela 3.6 – Relação de métodos propostos para COs angulares de movimentos secundários em interseções com sinalização de prioridade

Método 0 (TRAF-Safe) , por ponto de conflito, sem agregar fluxos conflitantes e com tempo de exposição igual ao tempo de manobra.
Método 1a , igual ao Método 0, agregando todos os movimentos conflitantes.
Método 1b , igual ao Método 0, agregando os fluxos conflitantes por posição.
Método 2 , agregando os fluxos conflitantes por posição e considerando que há COs angulares apenas para intervalos $T_i + \tau_i$ e $T_i - \tau_i$, $\tau_u = \tau_l = 0,25T_i$.

Oportunidades de Conflito Traseiras

A expressão utilizada pelo TRAF-Safe é:

$$CO(\text{traseira}) / h = Q_S (1 - e^{-T_e \cdot q}), T_e = t_{eAi} \quad (3.65)$$

$$t_{eAi} = \frac{e^{qc\alpha} - 1}{q} - \alpha$$

onde t_{eAi} é a expressão de Adams. A brecha aceita α utilizada na proposta original do TRAF-Safe para o cálculo do tempo de espera na expressão de Adams foi substituída pelo tempo de manobra para sair da interseção. Q_S é o fluxo (em v/h) do movimento exposto e q (em v/s) é o fluxo na faixa considerada. O cálculo é feito por ponto de conflito. Esse método será aqui denominado de Método 0a.

Uma variante do método de TRAF-Safe, Método 0b será proposta utilizando-se a mesma expressão (3.65), fazendo-se o cálculo por aproximação (agregando-se os fluxos dos três movimentos da via secundária). Com essa agregação, o tempo de manobra α foi tomado como uma média ponderada dos tempos de manobra dos 3 movimentos da via secundária:

$$\alpha \cong \frac{\sum_{i=1}^n t_i q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (3.66)$$

Na realidade, não se conhece qual seria exatamente a proposta original do TRAF-Safe quando se tem mais de um movimento na via secundária, uma vez que no exemplo numérico utilizado na sua documentação só há um movimento na via secundária.

O Método 1 utiliza a mesma expressão (3.66), substituindo o tempo de espera da expressão de Adams (tempo de espera no topo da fila) pelo tempo médio de espera na fila.

$$CO(traseira) / h = Q_S \cdot (1 - e^{-T_e \cdot q}), T_e = t_e \quad (3.67a)$$

O Método 2 considera apenas os veículos que param e o tempo de espera é o tempo médio por veículo que pára. A expressão proposta é:

$$CO(traseira) / h = Q_S \cdot p \cdot (1 - e^{-T_e \cdot qc}), T_i = t_{epi} = t_{ei} / p \quad (3.67b)$$

onde

$$p = 1 - (1 - X) \cdot e^{-q\alpha}$$

O Método 3 é equivalente ao Método 2, agregando um fator que leva em conta a restrição de visibilidade. O Método 3a considera um fator empírico, o Método 3b considera um fator probabilístico relacionando a distância de parada necessária D_p com a distância de visibilidade disponível D_v (probabilidade de a distância de visibilidade necessária D_p ser maior do que a distância de visibilidade disponível D_v), enquanto que o Método 3c considera um fator probabilístico relacionando o tempo de percepção necessário δ_R e o tempo de reação disponível δ_A (probabilidade de o tempo de reação requerida δ_R ser maior do que o tempo de reação disponível δ_A).

A expressão é:

$$CO(\text{traseira}) / h = Q_S \cdot p \cdot (1 - e^{-T_e \cdot q}) \cdot P_{sv}, T_i = t_{epi} = t_{ei} / p \quad (3.68a)$$

$$(a)P_{sv} = \max\left[\frac{D_p - D_v}{D_p}, 0\right], (b)P_{sv} = P[D_p > D_v], (c)P_{sv} = P[\delta_R > \delta_A] \quad (3.68b)$$

A seguir, são relacionados todos os métodos propostos.

Tabela 3.7 – Relação de métodos propostos para COs traseiras de movimentos secundários em interseções com sinalização de prioridade

Método 0a , (TRAF-Safe), por ponto de conflito, com tempo de exposição igual ao tempo médio de espera no topo da fila, dado pela expressão de Adams.
Método 0b , (TRAF-Safe), por faixa, com tempo de exposição igual ao tempo médio de espera no topo da fila, dado pela expressão de Adams.
Método 1 , com agregação dos fluxos dos movimentos da via secundária e tempo de exposição igual ao tempo médio de espera.
Método 2 , com agregação de fluxos conflitantes e tempo médio de espera por veículo parado.
Método 3a , considerando a restrição de visibilidade por meio de um termo de correção empírico.
Método 3b , considerando a restrição de visibilidade com um termo probabilístico $P[D_p > D_v]$.
Método 3c , considerando a restrição de visibilidade com um termo probabilístico $P[\delta_R > \delta_A]$.

3.3.2 Movimento Veicular em Interseções SemafORIZADAS

A apresentação referente às interseções semaforizadas será feita admitindo as hipóteses de que se trata de controle semafórico de tempo fixo, de interseção isolada (isto é, sem a influência de outras interseções semaforizadas). Com exceção do período de dissipação dos pelotões, admite-se distribuição de intervalos exponencial (e chegada de veículos com distribuição de Poisson). O resumo das diferentes formulações a serem estudadas está antecipado na Tabela 3.8 (a e b).

Tabela 3.8 – Oportunidades de Conflito em Interseções com Semáforos

a. Modelos de Previsão

Movimentos veiculares protegidos em Interseções Semaforizadas	
CO angular:	
Vermelho	0
Dissipação de fila	0
Restante do verde	0
CO traseira:	
Vermelho e Dissipação de Fila (1)	$CO(traseira) / h = Q \cdot p$ (3.69)
Vermelho e Dissipação de Fila (2)	$CO(traseira) / h = Q \cdot p \cdot P_{sv}, p = \frac{(R + G_q)}{T_c}$ (3.70) $(a)P_{sv} = \max\left\{\frac{D_p - D_v}{D_p}; 0\right\}, (b)P_{sv} = P[D_p > D_v], (c)P_{sv} = P[\delta_A < \delta_R]$
Vermelho e Dissipação de Fila (3)	$CO(traseira) / h = Q_s \cdot p \cdot (1 - e^{-q \cdot T_e}), p = \frac{(R + G_q)}{T_c}$ (3.71) $(a)T_e = t_e = d_1 + d_2; (b)T_e = t_{ep} = \frac{t_e}{p}$
Vermelho e Dissipação de Fila (4)	$CO(traseira) / h = Q_s \cdot p \cdot (1 - e^{-q \cdot T_e}) P_{sv}, p = \frac{(R + G_q)}{T_c}$ (3.72) $(a)P_{sv} = \max\left\{\frac{D_p - D_v}{D_p}; 0\right\}, (b)P_{sv} = P[D_p > D_v], (c)P_{sv} = P[\delta_A < \delta_R]$
Restante do verde	$CO(traseira) / h = Q \cdot \frac{G_u}{T_c} \cdot \left[\left(1 - e^{-\tilde{q}_{LT} T_{LT}}\right) P_{LT} + \left(1 - e^{-\tilde{q}_{RT} T_{RT}}\right) P_{RT} \right]$ (3.73)
Movimentos veiculares permitidos em Interseções Semaforizadas	
CO angular:	
Movimento de conversão à esquerda	$CO(angular) / h = Q_{LT} \cdot (1 - e^{-q_o T})$ (3.75)
Movimento de fluxo oposto	$CO(angular) / h = \frac{Q}{T_c} \cdot G_u \cdot (1 - e^{-q_{LT} T})$ (3.76)
CO traseira:	
Movimento de conversão à esquerda	$CO(traseira) / h = Q_{LT} \cdot (1 - e^{-t_e q}) \times P[D_p > D_v]$ (3.77)
Movimento de fluxo oposto	$CO(traseira)_i / h = Q \cdot \frac{G_u}{T_c} \cdot (1 - e^{-T q_{LT}}) (1 - e^{-T p q})$ (3.78)
Movimentos veiculares no Entreverdes (protegidos ou permitidos) em Interseções Semaforizadas	
CO angular:	
	$CO(angular)_i / h = Q_i \cdot \frac{0,5 \cdot I_{ai}}{T_c} \cdot (P[F] \cdot P[td_l > \Delta_1] + (1 - P[F]) \cdot P[td_l > \Delta_2])$ (3.79b)
CO traseira:	
	$CO(traseira)_i / h = Q_i \cdot \frac{0,5 \cdot I_{ai}}{T_c} \cdot P[td_{la} > 0]$ (3.79)

b. Expressões Auxiliares

Interseção semaforizada	
Tempo de exposição – CO traseira	
$d_1 = \frac{0,5C \left(1 - \frac{G}{T_c}\right)^2}{1 - \left[\min(1, X) \frac{G}{T_c}\right]}, \quad X = \frac{qC}{sG}$	$d_2 = \frac{C.T}{4} \left(A + \sqrt{A^2 + B}\right),$ $A = (X - 1), \quad B = \frac{4.X}{C.T}$
Períodos de verde	
$G_u = G - G_q \text{ ou } G_u = G - \max\{G_f; G_q\}$	$G_q = \frac{Q.R_e}{S - Q} \quad (3.19)$ $G_f = \frac{N_c(1 - P_{qc})}{s_{dc} \cdot P_{qc}} \left(1 - (1 - P_{qc})^{m_{dc}}\right), \quad (3.20a)$ $m = s_{dc} \times G_e \quad (3.20b)$
Deficiência de amarelo – CO traseira	
$td_{ia} = \delta + \frac{v}{2.(b + i.g)} - I_a \quad (3.22)$	
$E[td_{ia}] = \delta + \frac{\mu_v}{2.(b + i.g)} - I_a \quad (3.27a)$	$Var[td_{ia}] = \left(\frac{1}{2.(b + i.g)}\right)^2 \sigma_v^2 \quad (3.27b)$
Deficiência de entreverdes – CO angular	
$td_l = \delta + \frac{v}{2.(b + i.g)} - I_a + \frac{Z + L}{v} - I_v \quad (3.24)$	$P[F] = e^{-q_B R_B} \left(1 + q_B R_B + \frac{(q_B R_B)^2}{2} + \dots + \frac{(q_B R_B)^{n-1}}{(n-1)!}\right)$ (3.33)
$E[td_l] = \delta + \frac{\mu_v}{2.(b + i.g)} + \frac{Z + L}{\mu_v} - I_a - I_v + \frac{Z + L}{\mu_v^3} \sigma_v^2$ (3.29b)	$Var[td_l] = \left(\frac{1}{2.(b + i.g)} - \frac{2.(Z + L)}{\mu_v^2}\right)^2 \sigma_v^2 \quad (3.29c)$

3.3.2.1 Movimentos Veiculares Protegidos

Os métodos propostos considerarão os seguintes períodos do ciclo:

- período de vermelho
- período de dissipação de fila
- período de restante de verde
- período de entreverdes

A análise do período de entreverdes é similar para movimentos protegidos e permitidos e será apresentada adiante, na Seção 3.3.2.3.

A seguir são tratados os demais períodos, para movimentos veiculares protegidos. Para oportunidades de conflito traseiras, são agregados os períodos de vermelho e de dissipação de fila e diferenciado o período restante de verde após a dissipação das filas.

Oportunidades de Conflito Angulares

Tendo em vista que os métodos não levam em consideração comportamentos transgressores, considerar-se-á que, para movimentos protegidos, não há oportunidades de conflito angulares nos períodos de vermelho, dissipação de fila e restante do verde G_u .

Aqui, deve-se observar que, eventuais COs angulares de movimentos protegidos contra movimentos secundários (por exemplo, movimento de fluxo oposto a movimento de conversão à esquerda) serão analisados no item correspondente a movimentos permitidos.

Oportunidades de Conflito Traseiras

a) Período de vermelho e de Dissipação da Fila

Durante o período de vermelho e dissipação de fila, o procedimento é semelhante ao caso de conflito traseiro em via secundária. Serão apresentadas 4 abordagens distintas para estimar as COs traseiras.

A primeira abordagem (Método 1) corresponde à proposta de HA e BERG (1995), considerando que todos os veículos que param expõem-se às oportunidades de conflito traseiras, tendo-se

$$CO(traseira) / h = Q.p \quad (3.69)$$

(em HA e BERG, 1995, considera-se que todos menos um, entre os veículos que param em cada ciclo, expõem-se às oportunidades de conflito traseiras, correção que está sendo desprezada).

A segunda abordagem (Método 2) é baseada no método anterior, corrigido por um fator de visibilidade P_{sv} , tendo-se:

$$CO(traseira)/h = Q \cdot p \cdot P_{sv} \quad (3.70)$$

Esse método é apresentado em 3 variantes, de acordo com o termo P_{sv} :

$$(a)P_{sv} = \max\left\{\frac{D_p - D_v}{D_p}; 0\right\}, (b)P_{sv} = P[D_p > D_v], (c)P_{sv} = P[\delta_R > \delta_A]$$

A terceira abordagem é apresentada em duas vertentes, Método 3a e Método 3b, e corresponde mais proximamente ao conceito sugerido por Kaub para a interseção semaforizada (embora não tenha sido claramente explicitado), adotando o tempo médio de espera no semáforo como tempo de exposição e o número de veículos que param no semáforo como os veículos expostos e a probabilidade de exposição à oportunidade de conflito traseira é a chegada de veículo conflitante. O Método 3a adota como tempo de exposição o tempo médio de espera, tendo-se:

$$CO(traseira)/h = Q_s \cdot p \cdot (1 - e^{-q \cdot T_e}), p = \frac{(R + G_q)}{T_c} \quad (3.71)$$

onde T_e é o tempo de exposição durante a espera. Na formulação original de KAUB (2005), o autor observa que se pode adotar qualquer expressão para o tempo de espera, como as fórmulas atuais do U.S.HCM (2000). A fórmula usual com dois termos $T_e = t_e = d_1 + d_2$ (atraso regular e sobre-atraso) será utilizada. Q_s é o fluxo do movimento exposto (em v/h) e q é o fluxo que chega na faixa considerada (em v/s).

O Método 3b adota como tempo de exposição o tempo médio de espera por veículo que pára:

$$T_e = t_{ep} = \frac{t_e}{p}$$

A quarta abordagem incorpora o efeito da visibilidade existente na fórmula baseada em KAUB (2005), também com três variantes para a incorporação do efeito de visibilidade.

$$CO(traseira) / h = Q_s \cdot p \cdot (1 - e^{-qTe}) \cdot P_{sv} \quad (3.72)$$

$$(a)P_{sv} = \max\left\{\frac{D_p - D_v}{D_p}; 0\right\}, (b)P_{sv} = P[D_p > D_v], (c)P_{sv} = P[\delta_R > \delta_A]$$

Considerando o fator de visibilidade, como o final de fila é móvel, deveria considerar-se D_v como a distância de visibilidade até o ponto de fila máxima em condições normais de tráfego, dado este que pode ser levantado em campo. No entanto, será considerada a visibilidade da interseção.

A seguir, são relacionados todos os métodos propostos.

Tabela 3.9 – Relação de métodos propostos para COs traseiras de movimentos protegidos em interseções com semáforo nos períodos de vermelho e dissipação de fila

Método 1 – Todos os veículos que chegam no período de vermelho e dissipação de fila
Método 2 (a) – Fator de visibilidade empírico
Método 2 (b) – Fator de visibilidade $P[D_p > D_v]$
Método 2 (c) – Fator de visibilidade $P[\delta_R > \delta_A]$
Método 3 (a) – Tempo médio de espera
Método 3 (b) – Tempo médio de espera por veículo que pára
Método 4 (a) – Fator de visibilidade empírico
Método 4 (b) – Fator de visibilidade $P[D_p > D_v]$
Método 4 (c) – Fator de visibilidade $P[\delta_R > \delta_A]$

b) Período do restante de verde G_u

Nesse período, G_u , a possibilidade de ocorrer conflitos traseiros é causada pela desaceleração de veículos que querem fazer conversões.

O método proposto, Método 1, inspirado em Kaub, consideram-se as chegadas conflitantes no tempo T_f de desaceleração do veículo da frente para fazer a conversão, de v para v_c , onde v_c é a velocidade crítica de conversão, sendo:

$$G_u = G - G_q, v_c = \sqrt{\mu g R} \text{ e } T_f = \delta + \frac{v - v_c}{b + ig}$$

Como v_c e T_f são diferentes para conversão à esquerda e para a conversão à direita, tem-se:

$$CO(\text{traseira}) / h = Q \cdot \frac{G_u}{T_c} \cdot \left[\left(1 - e^{-\tilde{q}_{Tc} T_{fLT}} \right) P_{LT} + \left(1 - e^{-\tilde{q}_{Tc} T_{fRT}} \right) P_{RT} \right] \quad (3.73)$$

em que

P_{LT} e P_{RT} são as proporções de conversão à esquerda e à direita, respectivamente
 T_{fLT} e T_{fRT} são o tempo necessário para reduzir a velocidade v para a velocidade de conversão à esquerda e à direita, respectivamente e

$$\tilde{q}_{Tc} = q_{Tc} \left(1 - \frac{v_c}{v} \right).$$

Tabela 3.10 – Método proposto para COs traseiras de movimentos protegidos em interseções com semáforo no período de restante de verde G_u

Método 1 – Método inspirado em Kaub, considerando como tempo de exposição T_f e as proporções de conversão

3.3.2.2 Movimentos Veiculares Permitidos

Com exceção do período de verde útil, a situação é bastante similar à dos movimentos veiculares protegidos, em todos os demais períodos. A seguir, apenas os aspectos peculiares dos movimentos veiculares permitidos são apresentados.

Oportunidades de Conflito Angulares

A situação típica de movimentos veiculares permitidos em semáforos é aquela em que há a conversão à esquerda com um fluxo oposto numa via de mão dupla. A conversão à esquerda e o fluxo oposto recebem a luz verde do semáforo simultaneamente, sendo que o movimento preferencial é o fluxo oposto.

Nos métodos a serem propostos, também não será considerado o comportamento transgressor.

a) Movimento de Conversão à Esquerda Permitida

Admite-se que as oportunidades de conflito angulares ocorrem somente no verde útil do fluxo oposto. As oportunidades de conflito angulares do movimento de conversão à esquerda seriam estimadas por:

$$CO(angular) / h = Q_{LT} \cdot (1 - e^{-q_o T}) \quad (3.75a)$$

ou

$$CO(angular) / h = Q_{LT} \cdot (1 - e^{-q_o \cdot 0,5 T}) \quad (3.75b)$$

onde q_o é o fluxo do movimento oposto em v/s. Estes métodos supõem que todos os veículos do movimento permitido de conversão à esquerda passam no ciclo, considerando chegadas em brechas menores que o tempo de manobra ou somente as brechas maiores que as brechas de risco são aceitas.

Tabela 3.11 – Métodos propostos para COs angulares de movimentos de conversão à esquerda permitida

Método 1a – Método considerando chegadas em brechas menores que o tempo de manobra
Método 1b – Método considerando que somente são aceitas brechas maiores que as brechas de risco

b) Movimento do Fluxo Oposto

Falta considerar os conflitos que ocorrem quando os veículos do movimento oposto executam a manobra de cruzamento da interseção. A expressão é semelhante àquela para a via principal de uma interseção não semaforizada, considerando apenas o período G_u onde o movimento conflitante é o movimento de conversão à esquerda, isto é:

$$CO(angular) / h = Q \cdot \frac{G_u}{T_c} \cdot (1 - e^{-q_{LT} T_o}) \quad (3.76a)$$

ou

$$CO(angular) / h = Q \cdot \frac{G_u}{T_c} \cdot (1 - e^{-q_{LT} T_o}) \cdot P[F] \quad (3.76b)$$

onde $P[F] = (1 - X_{LT})$ é a probabilidade de chegadas livres na conversão permitida. A expressão (3.76b) é simplificada porque não distingue os diferentes períodos de operação da conversão permitida (a rigor, as chegadas livres deveriam ser consideradas somente durante o verde útil, tratando-se o entreverdes separadamente)⁴⁸.

Tabela 3.12 – Métodos propostos para COs angulares do movimento de fluxo oposto diante do movimento de conversão à esquerda permitida

Método 1a – Método não considerando o fator P[F]
Método 1b – Método considerando o fator P[F]

Oportunidades de Conflito Traseiras

O conflito entre o movimento de conversão à esquerda com o seu movimento oposto é, pela sua natureza, um conflito do tipo angular. Entretanto, um conflito angular pode ser um fator gerador de um conflito traseiro. Nenhum dos dois estudos citados, HA e BERG (1995) e ZHANG e PREVEDOUROS (2003), trata de conflitos traseiros gerados entre o movimento de conversão à esquerda e o seu movimento oposto.

a) Movimento de Conversão à Esquerda Permitida

Durante o período de vermelho, os veículos da conversão à esquerda tem que ficar parados aguardando a abertura do sinal.

Durante o período de dissipação de fila do movimento oposto, os veículos da conversão continuam parados em fila (como se o sinal continuasse em vermelho), pois não há brechas no tráfego do movimento oposto que permitam a realização da manobra de conversão.

Assim, estes dois períodos podem ser considerados como um período único e a estimativa de oportunidades de conflito traseiras é feita da mesma forma que o período de vermelho de movimentos protegidos.

⁴⁸ Na aplicação prática tratada no Capítulo 4, a expressão (3.76b) não será utilizada devido a não obtenção do valor de X_{LT} pelo programa HCS+.

Durante o período de restante de verde do fluxo oposto, os veículos do movimento de conversão devem se aproveitar de brechas no fluxo do movimento oposto para poder realizar a travessia. Desse modo, o comportamento é igual ao encontrado em movimentos de uma via secundária numa interseção não semaforizada, com controle “PARE”, onde o movimento principal é o movimento do fluxo oposto. O método para estimar oportunidades de conflito traseiras de movimentos de uma via secundária pode ser estendido e aplicado para a presente situação.

$$CO(traseira)/h = Q_{LT} (1 - e^{-t_e \cdot q_T}) \cdot P[D_p > D_v] \quad (3.77a)$$

No caso de faixa compartilhada, há ainda o risco de colisão traseira devido à desaceleração (até a parada) do veículo que quer fazer a conversão à esquerda com o veículo de trás que quer seguir em frente. Neste caso, o tempo de desaceleração é o tempo de parada t_p e a expressão de CO traseira fica:

$$CO(traseira)/h = Q_{LT} (1 - e^{-t_e \cdot q_T}) \cdot P[D_p > D_v] + Q_{LT} \cdot (1 - e^{-t_p \cdot (q_T - q_{LT})}) \quad (3.77b)$$

onde q_T é o fluxo total da faixa em v/s.

Tabela 3.13 – Métodos propostos para COs traseiras do movimento de conversão à esquerda permitida

Método 1a – Método não considerando a parcela referente à desaceleração do veículo de conversão
Método 1b – Método considerando a parcela referente à desaceleração do veículo de conversão

b) Movimento do Fluxo Oposto

O ciclo semafórico é dividido nos seguintes períodos:

- a) Período de vermelho
- b) Período de dissipação de fila do movimento oposto
- c) Período do restante do verde do movimento oposto

Durante o período de vermelho, os veículos que chegam ficam em fila e o comportamento é exatamente igual ao período de vermelho de movimentos protegidos, podendo estender o método proposto para o presente caso.

Durante o período de dissipação de fila, o comportamento é igual ao período de dissipação de fila de movimentos protegidos, podendo, também ser estendido o método para a presente situação.

Há, no entanto, uma parcela adicional específica, durante o período de restante de verde G_u , o comportamento é igual ao de um movimento numa via principal numa interseção não semaforizada, com controle “PARE”, onde pode ser aplicado o correspondente método.

$$CO(\textit{traseira})/h = Q \cdot \frac{G_u}{T_c} \cdot CO_j \cdot (1 - e^{-T_{pq}}) \quad (3.78a)$$

ou

$$CO(\textit{traseira})/h = Q \cdot \frac{G_u}{T_c} \cdot (1 - e^{-T_{q_{LR}}}) (1 - e^{-T_{pq}}) \quad (3.78b)$$

(que são formas alternativas para representar as oportunidades de conflito secundárias geradas).

Tabela 3.14 – Método proposto para COs traseiras do movimento do fluxo oposto diante do movimento de conversão à esquerda permitida

Método 1 – Método que considera a CO traseira como um evento secundário decorrente de uma CO primária
--

3.3.2.3 Entreverdes

A análise referente às oportunidades de conflito no entreverdes aplica-se de forma geral, tanto aos movimentos protegidos quanto permitidos.

Oportunidades de Conflito Angulares

A expressão que estima as COs angulares no entreverdes é:

$$CO(\text{angular})_{ii} / h = Q_i \cdot \frac{0,5 \cdot I_{ai}}{T_c} \cdot (P[F] \cdot P[td_I > \Delta_1] + (1 - P[F]) \cdot P[td_I > \Delta_2]) \quad (3.79)$$

onde $\Delta_1 = \frac{Z_e}{v_e}$ e $\Delta_2 = \delta + \sqrt{\frac{2Z_e}{a}}$.

Eventualmente, $P[td_I > \Delta_2]$ pode ser desprezado, reduzindo as expressões para

$$CO(\text{angular})_{ii} / h = Q_i \cdot \frac{0,5 \cdot I_{ai} + I_{vi}}{T_c} \cdot (P[F] \cdot P[td_I > \Delta_1]) \quad (3.79c)$$

ou

$$CO(\text{angular})_{ii} / h = Q_i \cdot \frac{0,5 \cdot I_{ai}}{T_c} \cdot (P[F] \cdot P[td_I > \Delta_1]) \quad (3.79d)$$

Tabela 3.15 – Método proposto para COs angulares no entreverdes

Método 1 – Método que considera que 50% dos veículos que chegaram durante o amarelo prosseguiram, sofrendo risco de conflito angular

Oportunidades de Conflito Traseiras

Admite-se que a metade dos veículos que se encontram na zona de dilema e que decidiram prosseguir sofre exposição de risco de colisão traseira com a outra metade dos veículos que decidiram parar. Assim, as oportunidades de conflito traseiras numa hora podem ser estimadas pelo número de veículos que decidiram prosseguir.

A expressão para estimar as COs traseiras no entreverdes é:

$$CO(traseira)_{i_i} / h = Q_i \cdot \frac{0,5 \cdot I_{ai}}{T_c} \cdot P[td_{ia} > 0] \quad (3.80)$$

Tabela 3.16 – Método proposto para COs traseiras no entreverdes

Método 1 – Método que considera que 50% dos veículos que chegaram durante o amarelo pararam, sofrendo risco de conflito traseiro

3.3.3 Movimento de Pedestres em Interseções com Sinalização de Prioridade

A seguir são considerados os movimentos de pedestres em interseções com sinalização de prioridade (PARE ou DÊ PREFERÊNCIA). O resumo das diferentes formulações a serem estudadas estão antecipadas na Tabela 3.17 (a e b) e serão apresentadas a seguir.

Tabela 3.17 – Oportunidades de Conflito com Pedestres em Interseções com Sinalização de Prioridade

a. Modelos de Previsão

Movimentos de pedestres em interseções não semaforizadas (preferenciais ou secundários)	
CO com pedestre (1a)	$CO(pedestre) / h = Q_{ped} \cdot \left(1 - e^{-T_i \sum_l q_l} \right)$ (3.81)
CO com pedestre (1b)	$CO(pedestre) / h = Q_{ped} \cdot \left[\sum_c \left(1 - e^{-T_{ci} \cdot \sum_l q_{cl}} \right) \right]$ (3.82a)
CO com pedestre (1c)	$CO(pedestre) / h = Q_{ped} \cdot \left[\sum_{cl} \left(1 - e^{-T_{ci} \cdot q_{cl}} \right) \right]$ (3.82b)
Movimentos de pedestres preferenciais em interseções não semaforizadas	
CO com pedestre (2)	$CO(pedestre) / h = Q_c \cdot OCC_{ped}$ (3.83)
CO com pedestre (3a)	$CO(pedestre) / h = Q_{ped} \cdot \left(1 - e^{-T_i \sum_l q_l} \right) P[F]$, $P[F] = (1 - X)$ (3.84a)
CO com pedestre (3b)	$CO(pedestre) / h = Q_c \cdot OCC_{ped} \cdot P[F]$ (3.84b)
Movimentos de pedestres secundários em interseções não semaforizadas	
CO com pedestre (4)	$CO(pedestre) / h = Q_{ped} \cdot \left(1 - e^{-(\tau_u + \tau_l) \sum_l q_l} \right)$, $\tau_u = \tau_l = 0,25 T_i$, $T_i = t_{ci}$ (3.85)

b. Expressões Auxiliares

Interseções não semaforizadas	
$T_i = t_{ci}$	$t_{ci} = \frac{W_c}{v_{ped}}$
$OCC_{ped} = OCC_{pedg}$	$OCC_{pedg} = \begin{cases} Q_{pedg} / 2000 & \text{se } Q_{pedg} \leq 1000 \\ Q_{pedg} / 10000 + 0,4 & \text{se } Q_{pedg} > 1000 \end{cases}, Q_{pedg} = Q_{ped}$

No caso geral, se t_i é o tempo integral de travessia de pedestre e q_l é o fluxo do movimento l (por fluxo e/ou faixa), considerando total a travessia do fluxo de pedestres Q_{ped} tem-se:

$$CO(\text{pedestre})/h = Q_{ped} \left(1 - e^{-T_i \sum_l q_l} \right) \quad (3.81)$$

considerando o tempo de exposição como o tempo total da travessia $T_i = t_i = \delta_{ped} + \frac{W}{v_{ped}}$.

Se t_c é o tempo de travessia do pedestre na zona de conflito c (que pode ser levantado em campo) e q_l é o fluxo do movimento l (por fluxo e/ou faixa), conflitante com a zona de conflito c , considerando a ocupação da travessia do fluxo de pedestres Q_{ped} tem-se:

$$CO(\text{pedestre})/h = Q_{ped} \cdot \left[\sum_c \left(1 - e^{-T_{ci} \cdot \sum_l q_{cl}} \right) \right] \quad (3.82a)$$

ou

$$CO(\text{pedestre})/h = Q_{ped} \cdot \left[\sum_{cl} \left(1 - e^{-T_{ci} \cdot q_{cl}} \right) \right] \quad (3.82b)$$

considerando o tempo de ocupação de cada zona de conflito $T_{zc} = \frac{W_c}{v_{ped}}$ ou de cada faixa de

tráfego $T_{cl} = \frac{W_l}{v_{ped}}$ (com $v_{ped} = 1,2m/s$ e $\delta_{ped} = 1s$).

No caso de fluxos de pedestres preferenciais, outra alternativa pode adotar a forma inversa correspondente, usando $OCC_{ped} = OCC_{pedg}$ calculado com $Q_{pedg} = Q_{ped}$, tendo-se

$$CO(\text{pedestre})/h = Q_c \cdot OCC_{ped} \quad (3.83)$$

com

$$OCC_{pedg} = \begin{cases} Q_{pedg} / 2000 & \text{se } Q_{pedg} \leq 1000 \\ Q_{pedg} / 10000 + 0,4 & \text{se } Q_{pedg} > 1000 \end{cases}$$

(aplicado à interseção com sinalização de prioridade).

Mantendo a forma básica, uma outra expressão para fluxos de pedestres preferenciais pode considerar que somente veículos com chegadas em movimento geram oportunidades de conflito, tendo-se então

$$CO(\text{pedestre})/h = Q_{ped} \cdot \left(1 - e^{-T_i \sum_l q_l} \right) \cdot P[F] \quad (3.84a)$$

sendo a probabilidade de não ter fila ao chegar $P[F]$ aproximada por $(1 - X)$.

Note que a forma inversa seria

$$CO(\text{pedestre})/h = Q_c \cdot OCC_{ped} \cdot P[F]. \quad (3.84b)$$

Considerandos fluxos secundários, ou alternativamente assumindo que a preferência dos pedestres nos movimentos de travessias não é respeitada (devendo ocorrer em brechas dos fluxos veiculares), pode-se propor também que:

$$CO(\text{pedestre})/h = Q_{ped} \cdot \left(1 - e^{-(\tau_u + \tau_l) \sum_l q_l} \right) \quad (3.85)$$

onde τ_u, τ_l são os limites de tolerância para os intervalos entre veículos nas brechas que delimitam oportunidades de conflito relevantes, admitindo-se $\tau_u = \tau_l = 0,25.T_i$, com base no

tempo integral de travessia $T_i = \delta_{ped} + \frac{W}{v_{ped}}$ (por etapa de travessia).

Tabela 3.18 – Métodos propostos para COs de pedestres em interseções com sinalização de prioridade

Método 1a – Método que considera travessia integral
Método 1b – Método que considera exposição por zona de conflito
Método 1c – Método que considera exposição por faixa
Método 2 – Método que considera ocupância de travessia
Método 3a – Método que considera travessia integral com chegadas livres
Método 3b – Método que considera ocupância de travessia com chegadas livres
Método 4 – Travessia integral em travessias e brechas de risco

3.3.4 Movimento de Pedestres em Interseções SemafORIZADAS

A seguir são considerados os movimentos de pedestres em interseções semaforizadas, em travessias efetivamente protegidas e em travessias permitidas/concorrentes, incluindo o entreverdes (em travessias com ou sem focos de pedestres).

O resumo das diferentes formulações a serem estudadas está antecipado na Tabela 3.19 (a e b) e serão apresentadas a seguir.

Tabela 3.19 – Oportunidades de Conflito com Pedestre em Interseções com Semáforos

a. Modelos de Previsão

Movimentos de pedestres protegidos – CO de pedestres	
No verde do pedestre	0
No vermelho do pedestre	Travessia concorrente
Movimentos de pedestres concorrentes – CO de pedestres	
Movimento de conversão com fluxo oposto (1a)	$CO(\text{pedestre})/h = Q_{ped} \cdot OCC_{pedu} \cdot e^{-Tq_0}$ (3.86a)
Movimento de conversão com fluxo oposto (1b)	$CO(\text{pedestre})/h = Q_o \times OCC_{pedu}$ (3.86b)
Movimentos de conversão sem fluxo oposto (1a)	$CO(\text{pedestre})/h = Q_{ped} \cdot OCC_{pedg} \cdot (1 - e^{-tq})$ (3.88a)
Movimento de conversão sem fluxo oposto (1b)	$CO(\text{pedestre})/h = Q_c \cdot OCC_{pedg}$ (3.88b)
Entreverdes de pedestres – CO de pedestres	
Final de verde, com Foco de Pedestres (Vermelho intermitente)	$CO(\text{pedestres})/h = Q_{ped} \cdot \frac{0,5 \cdot I_{int}}{T_c} \cdot P[td_{int} > 0]$ (3.92)
Final de verde, sem Foco de Pedestres	$CO(\text{pedestres})/h = Q_{ped} \cdot \frac{G_{pedfinal}}{T_c} \cdot P[td_{l=0} > 0]$ (3.94)

b. Expressões Auxiliares

Interseção semaforizada	
Pedestres	
Deficiência de vermelho intermitente – CO de pedestres	
$td_{int} = \frac{Z_{ped}}{v_{ped}} - I_{int} - \frac{Z_v}{v} - \Delta - I_v$ (3.53)	
$E[td_{int}] = \frac{Z_{ped}}{\mu_{vped}} - I_{int} - \frac{Z_v}{v} - \Delta - I_v - \frac{W_{ped} \cdot \sigma_v^2}{\mu_{vped}^2}$ (3.54b)	$Var[td_{int}] = \left(\frac{Z_v}{\mu_v^2} \right)^2 \sigma_v^2$ (3.54c)
Deficiência de Ic – CO de pedestres	
$td_{lc} = \frac{Z_{ped}}{v} - I_c - \Delta_{ped} - I_v$ (3.58)	
$E[td_{lc}] = \frac{Z_{ped}}{\mu_v} - I_c - \Delta_{ped} - I_v + \frac{Z_{ped} \sigma_v^2}{\mu_v^2}$ (3.59b)	$Var[td_{lc}] = \left(\frac{Z_{ped}}{\mu_v^2} \right)^2 \sigma_v^2$ (3.59c)
Ocupância de pedestres	
$OCC_{pedg} = \begin{cases} Q_{pedg} / 2000 & \text{se } Q_{pedg} \leq 1000 \\ Q_{pedg} / 10000 + 0,4 & \text{se } Q_{pedg} > 1000 \end{cases}$ (3.44a)	$OCC_{pedu} = OCC_{pedg} \left(1 - 0,5 \frac{G_q}{G_{ped}} \right)$ (3.45)
	$Q_{pedG} = Q_{ped} \frac{T_c}{G_{ped}}$ (3.44b)

Novamente, os métodos apresentados para cada caso não consideram o comportamento transgressor de condutores (invasão deliberada de vermelho).

Entretanto, o comportamento transgressor de pedestre em relação à indicação do foco de pedestre pode ser considerado de duas formas:

- durante o período de vermelho de pedestre – tendo em vista o comportamento real do pedestre, verificado na cidade de São Paulo, de aproveitar eventuais brechas existentes no movimento veicular conflitante durante o período de vermelho; neste caso, a travessia será concorrente nesse período (e estimadas as oportunidades de conflito);
- durante o período de vermelho intermitente do pedestre – tendo em vista que a indicação de vermelho intermitente significa o aviso de que o direito de passagem do pedestre está por terminar e está por iniciar os movimentos veiculares conflitantes, os conflitos devidos a travessias iniciadas durante o período de vermelho intermitente serão considerados na metodologia proposta; de forma preliminar, admite-se que uma proporção fixa dos pedestres atravessa, uma vez que essas travessias não são realizadas em brechas do movimento veicular e configuram um comportamento de alto risco, bastante imprevisível, sendo portanto, de difícil modelagem.

O comentário sobre as transgressões do vermelho intermitente é aplicado também na ausência de foco de pedestres, para o amarelo quando o foco veicular é visível.

3.3.4.1 Movimento de Pedestres Protegido, sem Fluxo Conflitante Simultâneo

Existem três casos em que as travessias de pedestres são protegidas sem fluxo veicular conflitante e como regra, em São Paulo, são todas dotadas de sinalização de focos de pedestres:

- Travessias em carona junto à linha de retenção
- Travessias em carona afastadas da linha de retenção
- Travessias protegidas exclusivamente por estágio de pedestres

Os três casos podem ser tratados da mesma forma. O ciclo é dividido nos seguintes períodos:

- Período de verde de pedestres
- Período de dissipação de fila do movimento veicular em frente
- Período de restante de verde do movimento veicular em frente
- Período de conversão nos demais estágios

No período de verde protegido de pedestres, ignorando-se as transgressões veiculares, não há COs de pedestres. Os pedestres que atravessam no final do verde, e que potencialmente se expõe a COs, serão tratados no período de entreverdes adiante.

No período de dissipação de fila do movimento veicular em frente não há COs de pedestres pois não há brechas no tráfego. No período de restante de verde do movimento veicular em frente e no período de conversão nos demais estágios, o comportamento é semelhante a travessias não protegidas. O período de conversão nos demais estágios só existe nas travessias protegidas exclusivamente por estágios de pedestres.

No entanto, os últimos três períodos fazem parte do tempo de vermelho de pedestres. Nestes períodos ocorreriam apenas travessias irregulares em brechas entre veículos, que serão tratadas como travessias concorrentes adiante.

3.3.4.2 Movimento de Pedestres com Fluxos Veiculares Concorrentes

Na situação, distinguem-se três casos de conflitos em travessias não protegidas ou com fluxo conflitante simultâneo em interseções semaforizadas.

- COs com movimentos de conversão à esquerda que tem um movimento veicular oposto (conversão à esquerda em uma via de mão dupla);
- COs gerados por movimentos de conversão que não tem um movimento veicular oposto (por exemplo, conversões à direita ou conversões à esquerda em vias de mão única);
- COs gerados por movimentos veiculares diretos (travessias irregulares ou não).

A seguir serão apresentadas, além das expressões a serem testadas, as formas derivadas da formulação preliminar com travessias em brechas, a título de comparação teórica apenas.

a) Conflitos com movimentos de conversão à esquerda que tem um movimento veicular oposto (conversão à esquerda em uma via de mão dupla)

Usa-se a formulação baseada em ZHANG e PREVEDOUROS (2003). O ciclo semafórico é dividido nos seguintes períodos:

- R = vermelho para a conversão à esquerda – não há conflitos entre veículos da conversão à esquerda com pedestres
- G_q = dissipação da fila do fluxo oposto – também não há conflitos entre veículos da conversão à esquerda com pedestres, pois não há brechas para os veículos fazerem a manobra de conversão (o fluxo oposto serve como uma barreira de proteção ao pedestre).
- G_u = restante do verde, após a dissipação da fila do fluxo oposto, pode haver conflitos entre veículos da conversão à esquerda com pedestres

Com a forma originalmente proposta por ZHANG e PREVEDOUROS (2003), como todas as conversões ocorrem no verde útil, tem-se:

$$CO(\text{pedestre})/h = Q_{ped} \cdot OCC_{pedu} \cdot P_{co} \cdot P_{co} = e^{-Tq_0} \quad (3.86a)$$

onde

T = tempo de manobra da conversão à esquerda

q_0 = fluxo do movimento oposto em v/s

Com a forma revisada proposta, tem-se

$$CO(\text{pedestre})/h = Q_c \cdot OCC_{pedu} \quad (3.86b)$$

Em ambos os casos, a ocupância é obtida com o modelo de MILAZZO *et alli* (1998).

A expressão baseada na travessia em brechas não será aplicada. A expressão deveria também ponderar que parte dos pedestres é protegida pelo fluxo oposto (os que atravessam em G_q).

Desta forma, a expressão não será aplicada mas seria adaptada como:

$$CO(\text{pedestre})/h = \frac{3600}{T_c} \cdot p_{Au} (N_{ped0} + q_{ped} \cdot G) (1 - e^{-q \cdot T_i}) \quad (3.87)$$

onde $p_{Au} = p_{Ag} - p_{Aq} = (1 - p_\alpha)^{m_s} - (1 - p_\alpha)^{m_q}$, com $p_\alpha = e^{-q \cdot T_i}$, sendo $m_s = q \cdot G$ o número esperado de intervalos no verde (estima $p_{Ag} = 1 - (1 - p_\alpha)^{m_s}$) e $m_q = q \cdot G_q$ o número esperado de intervalos com proteção do pedestre em G_q (estima $p_{Aq} = 1 - (1 - p_\alpha)^{m_q}$, com $p_\alpha = e^{-q \cdot \alpha}$ e $\alpha \cong T_i$, o tempo da travessia integral por etapa).

Tabela 3.20 – Métodos propostos para COs de pedestres em interseções com sinalização semafórica – movimentos concorrentes, conversões com fluxo oposto

Método 1a – Método de Zhang e Prevedouros
Método 1b – Método que avalia risco do pedestre pela conversão

b) Conflitos gerados por movimentos de conversão que não tem um movimento veicular oposto (por exemplo, conversões à direita ou conversões à esquerda em vias de mão única)

Nesta situação, os pedestres não contam com a proteção de uma “barreira” representada por um movimento oposto contra os veículos de conversão.

O ciclo semaforico é dividido nos seguintes períodos:

- R = vermelho para a conversão (à esquerda ou à direita) – não há conflitos entre veículos da conversão com pedestres (embora haja conflitos com o movimento veicular em frente)
- G_q = dissipação da fila do fluxo de conversão – também não há conflitos entre veículos da conversão com pedestres, supondo que não há brechas nesse período.
- G_u = restante do verde do movimento de conversão – após a dissipação da fila do fluxo de conversão, pode haver conflitos entre veículos da conversão com pedestres

Sendo o fluxo de conversão normalmente reduzido, agregam-se os períodos de verde. De forma similar à expressão de ZHANG e PREVEDOUROS (2003), tem-se

$$CO(\text{pedestre})/h = Q_{ped} \cdot OCC_{pedg} \cdot (1 - e^{-T_z \cdot q}) \quad (3.88a)$$

onde a oportunidade de conflito caracteriza-se quando, durante a travessia do pedestre na zona de conflito, chegar um veículo de conversão, sendo:

T_z = tempo de travessia da zona de conflito pelo pedestre em s
 q = fluxo do movimento de conversão em v/s

Com a forma revisada proposta, tem-se

$$CO(\text{pedestre})/h = Q_c \cdot OCC_{pedg} \quad (3.88b)$$

A expressão baseada na travessia em brechas também não será aplicada mas seria, neste caso, imediata, tendo-se:

$$CO(\text{pedestre})/h = \frac{3600}{T_c} P_{Ag} \cdot (N_{ped0} + q_{ped} \cdot G) \cdot (1 - e^{-q \cdot T_i}) \quad (3.89)$$

onde $p_{Ag} = 1 - (1 - p_\alpha)^{m_g}$ sendo $m_g = q \cdot G$ o número esperado de intervalos no verde (novamente com $p_\alpha = e^{-q \cdot \alpha}$ e $\alpha \cong T_i$, o tempo da travessia integral por etapa).

Tabela 3.21 – Métodos propostos para COs de pedestres em interseções com sinalização semafórica – movimentos concorrentes, conversões sem fluxo oposto

Método 1a – Método baseado em Zhang e Prevedouros, avaliado risco por pedestre
Método 1b – Método que avalia risco do pedestre pela conversão

c) Conflitos gerados por movimentos veiculares em frente

O ciclo semafórico é dividido nos seguintes períodos:

- R = vermelho do movimento em frente – não há conflitos entre veículos do movimento em frente com pedestres (embora haja conflitos com o movimento de conversão, já visto anteriormente)
- G_q = dissipação da fila do movimento em frente – também não há conflitos entre veículos e pedestres, supondo que não há brechas nesse período.
- G_u = restante do verde do movimento em frente – após a dissipação da fila do fluxo do movimento em frente, pode haver conflitos entre veículos e pedestres

Como as travessias ocorreriam durante o período G_u apenas, tem-se:

$$CO(\text{pedestre})/h = Q_{ped} \cdot OCC_{pedu} \cdot (1 - e^{-tq}) \quad (3.90a)$$

ou

$$CO(\text{pedestre})/h = Q_c \cdot OCC_{pedu} \quad (3.90b)$$

onde, na forma derivada da original, o conflito se caracteriza quando durante a travessia do pedestre na zona de conflito chegar um veículo do movimento em frente, sendo:

t = tempo de travessia da zona de conflito pelo pedestre em s
 q = fluxo do movimento em frente em v/s

Tabela 3.22 – Métodos propostos para COs de pedestres em interseções com sinalização semafórica – movimentos veiculares em frente

Método 1a – Método baseado em Zhang e Prevedouros, avaliado risco por pedestre
Método 1b – Método que avalia risco do pedestre pela conversão

A expressão baseada na travessia em brechas não será, novamente, aplicada mas seria também imediata, tendo-se:

$$CO(\text{pedestre})/h = \frac{3600}{T_c} p_{Au} \cdot (N_{ped1} + q_{ped} \cdot G_u) (1 - e^{-q \cdot T_i}) \quad (3.91)$$

onde $p_{Au} = 1 - (1 - p_a)^{m_u}$ sendo $m_u = q \cdot G_u$ o número esperado de intervalos no verde útil (também com $p_a = e^{-q \cdot \alpha}$ e $\alpha \cong T_i$, o tempo da travessia integral por etapa).

As expressões baseadas na travessia em brechas exigem a obtenção do número de pedestres existentes em cada subperíodo ao longo nos sucessivos estágios ao longo do ciclo semafórico. Embora a formulação preliminar anteriormente discutida proponha um modelo para sua previsão, considera-se necessário uma maior validação antes de propor sua aplicação nos modelos de estimativas de oportunidades de conflito.

3.3.4.3 Entreverdes

A análise para o entreverdes de pedestres só se aplica propriamente para travessias com foco de pedestres mas admite-se uma forma simplificada similar para as travessias sem foco de pedestres, existindo ou não visibilidade dos focos veiculares correspondentes.

a) Final do Verde – Travessias com Focos de Pedestres

Há duas situações em que pode haver oportunidades de conflito com pedestres: no final do verde de pedestres e no início do verde de pedestres. A forma a seguir considera apenas o potencial de oportunidades de conflito no final do verde (como para veículos).

Para as oportunidades de conflito, associadas à deficiência de vermelho intermitente, tem-se:

$$CO(\text{pedestres})/h = Q_{ped} \cdot \frac{0,5 \cdot I_{int}}{T_c} P[td_{int} > 0] \quad (3.92)$$

A expressão (3.92) considera que no início do período de vermelho intermitente não há pedestres acumulados e os pedestres expostos seriam apenas os que chegam durante esse período e que decidem atravessar (estimados com a proporção fixa de 50%, como foi admitido para veículos no amarelo).

Tabela 3.23 – Métodos propostos para COs de pedestres em interseções com sinalização semafórica – período de entreverdes, final de verde, com foco de pedestre

Método 1 – Método que considera deficiência de vermelho intermitente

Uma abordagem alternativa seria obtida com a formulação de travessias em brechas, considerando que há acúmulo de pedestres no início do período de vermelho intermitente (N_{pedr}), o total de pedestres que chegam no período é $q_{ped} \times I_{int}$ e que atravessam apenas 50% desse total atravessam no período considerado.

Com essas considerações, a expressão que estima as COs com pedestres nesse período seria:

$$CO(\text{pedestres})/h = \frac{3600}{T_c} \cdot 0,5 \cdot (N_{pedr} + q_{ped} \cdot I_{int}) \cdot P[td_{int} > 0] \quad (3.93)$$

As expressões baseadas em travessias em brechas não serão aplicadas mas pode-se ver como suas hipóteses alterariam a estimativa de oportunidades de conflito com pedestres.

b) Final do Verde – Travessias sem Focos de Pedestres

Admite-se o mesmo tipo de formulação para este caso. Como não existe sinalização de focos de pedestres, então adota-se $I_{int} = 0$ e, considerando-se que os pedestres expostos são os que chegam no período de $G_{pedfinal}$, estima-se as oportunidades de conflito como

$$CO(\text{pedestres})/h = Q_{ped} \cdot \frac{G_{ped\text{final}}}{T_c} P[td_{I=0} > 0] \quad (3.94a)$$

ou

$$CO(\text{pedestres})/h = Q_{ped} \cdot \frac{G_{ped\text{final}} - 0,5 \cdot I_a}{T_c} P[td_{I=0} > 0] \quad (3.94b)$$

na hipótese de visualização dos focos veiculares paralelos à travessia de pedestres.

Tabela 3.24 – Métodos propostos para COs de pedestres em interseções com sinalização semafórica – período de entreverdes, final de verde, sem foco de pedestre

Método 1 – Método que considera que não há visualização do foco amarelo veicular
Método 2 – Método que há visualização do foco amarelo veicular

Na abordagem de travessia em brechas, teria de ser avaliada a situação na mudança de estágio, sem informação aos pedestres (fazendo-se $I_{int} = 0$) ou com a informação da indicação amarela dos focos veiculares paralelos, eventualmente supondo que somente 50% dos pedestres envolvidos admitem atravessar no período de mudança de estágio.

Reitere-se também que o potencial de conflitos no início do verde não está sendo avaliado.

4. APLICAÇÃO DE CAMPO – METODOLOGIA E RESULTADOS

O objetivo deste capítulo é tentar, por meio de uma aplicação de campo, avaliar a operacionalidade e fazer uma comparação dos diversos modelos propostos, verificando as vantagens e desvantagens de cada um e, principalmente, a sua eficiência como medida de segurança.

O Capítulo 2 apresentou a revisão de alguns modelos de oportunidades de conflito, encontrados na literatura, considerados mais relevantes. Baseado na análise crítica dos modelos revisados, bem como inspirado em conceitos e metodologias relativas a contextos complementares, também vistos no Capítulo 2, foi feita a proposição de modelos alternativos no Capítulo 3. Assim, vem a questão: dos diversos modelos, entre os revisados e os propostos, qual é o mais recomendado para aplicações práticas? Parte-se da hipótese de que um modelo é bom se consegue ser sensível às variáveis de operação específicas de cada local e refletir com fidelidade o grau de segurança. Qual deles atende melhor a esses requisitos?

Para obter estas respostas, deve-se discutir, primeiramente, as formas alternativas possíveis para a validação. Dessa forma, o capítulo inicia-se com a discussão sobre os métodos de validação possíveis e sobre as vantagens e dificuldades envolvidas em cada opção, considerando especificamente os objetivos deste estudo e o contexto da Cidade de São Paulo, feita após uma breve descrição dos métodos de validação encontrados no estudo dos trabalhos revisados.

Em virtude da impossibilidade de incluir no escopo do presente trabalho uma validação propriamente dita devido a restrições de tempo, recursos materiais e humanos, preferiu-se fazer uma aplicação piloto em duas interseções reais, descrevendo-se o método e o escopo da aplicação, a seleção das interseções objeto do estudo, os meios empregados para a obtenção dos dados de campo, tabulação e análise dos resultados. A análise baseou-se na comparação qualitativa dos diagnósticos sobre segurança preparados por especialistas da CET/Sp com os

resultados das estimativas de oportunidades de conflito obtidos, procurando-se concordâncias e discordâncias com cada modelo alternativo proposto.

Em função do esforço do trabalho de campo que foi possível realizar, considera-se que seus resultados são bastante preliminares. Portanto, os resultados obtidos dos estudos de caso realizados são meramente indicativos e serviram melhor para demonstrar a operacionalidade dos métodos propostos.

Ao final, resumem-se as conclusões possíveis sobre os modelos mais adequados e a validade geral da análise de segurança viária com base em estimativas de conflitos de tráfego, na forma estudada, e analisam-se eventuais limitações na interpretação dos resultados em virtude de restrições e da amplitude do trabalho de campo realizado.

4.1 MÉTODOS DE VALIDAÇÃO EM TRABALHOS ANTERIORES

A partir dos trabalhos previamente discutidos no Capítulo 2, buscou-se analisar a questão especificamente relacionada com a metodologia de validação empregada. Além dos estudos sobre o TRAF-Safe, motivação original deste trabalho, foram analisados os procedimentos de validação realizados nos demais trabalhos anteriormente revistos e, face à necessidade de incluir novos métodos, foram pesquisados os procedimentos adotados em PLASS e BERG (1987) e em VASCONCELOS (2004).

Embora não seja um aspecto exaustivamente analisado, foi possível examinar algumas opções metodológicas e fazer uma breve avaliação das suas potencialidades.

4.1.1 A Validação do TRAF-Safe

Como mencionado no Capítulo 1, os estudos sobre o TRAF-Safe mencionam que os resultados obtidos com a aplicação do seu procedimento permitem obter uma precisão bastante maior na previsão da frequência de acidentes em interseções com sinalização de prioridade e com sinalização semafórica, em comparação com os obtidos com a aplicação dos

modelos estatísticos de regressão associados às recomendações do U.S.FHWA. Os estudos envolveram 100 interseções semaforizadas e 65 interseções com sinalização de prioridade.

Não há uma descrição detalhada do estudo de validação, apresentando-se apenas as ilustrações reproduzidas no Capítulo 1, além de alguns resultados gerais da comparação entre os procedimentos de previsão. A aplicação dos modelos estatísticos de regressão é, em princípio, imediata e o método de expansão usado pelo TRAF-Safe para ir das COs em períodos de pico para COs anuais e, então, para acidentes anuais, foi descrito no Capítulo 2.

O procedimento do TRAF-Safe baseia-se, principalmente, na existência de uma boa base de dados sobre acidentes, particularmente em interseções. Exige ainda a determinação da razão entre a frequência de acidentes e oportunidades de conflitos. Por exemplo, 1 acidente angular por ano para 1.193.756 COs angulares por ano. A relação entre COs anuais e acidentes é também ajustada por uma família de regressões para cada tipo de interseção, obtendo taxas de CO/Acidente. A descrição do procedimento é um tanto ambígua em diversos pontos e a necessidade de calibração das razões para cada local é mencionada. Exige também a determinação de fatores de expansão das estimativas horárias de oportunidades de conflito em totais anuais.

4.1.2 Outros Estudos

Como mencionado no Capítulo 2, PLASS e BERG (1987) fizeram uma validação preliminar dos modelos originalmente propostos em COUNCIL *et alli* (1983), que não apresentaram uma validação das suas proposições.

O procedimento de PLASS e BERG (1987) é bastante simples e consiste na comparação da hierarquização de locais com critérios baseados em acidentes ou em oportunidades de conflitos (calculadas com diferentes níveis de agregação nos dados de fluxo de tráfego). No caso de PLASS e BERG (1987), os dados de acidentes foram utilizados para calcular índices por veículo e por oportunidade de conflito e a ordenação da periculosidade dos locais foi comparada (mostrando resultados distintos).

Pode-se criticar o estudo de PLASS e BERG (1987) pela forma de comparação mas a simplicidade do procedimento é clara. Além dos dados de oportunidades de conflito, seriam

necessários apenas totais de acidentes (a classificação por gravidade e por tipo, se disponível, também seria interessante). Outros critérios de hierarquização poderiam, naturalmente, ser adotados e o melhor critério teria de ser estabelecido. No entanto, não seria necessário prever a frequência de acidentes (ou ter um modelo para a razão entre acidentes e COs). O estudo também analisou a eventual variação nos resultados decorrente de utilizar dados de tráfego com diferentes níveis de agregação e concluiu que os resultados podem ser alterados.

Os outros estudos sobre oportunidades de conflitos não fizeram validações mas apenas mostraram a aplicação dos resultados.

HA e BERG (1995) não apresentam um trabalho de validação dos modelos de oportunidades de conflito, mostrando apenas uma análise da sensibilidade do modelo usando dados hipotéticos, além do desenvolvimento de um critério de nível de serviço (LOS – *Level of Service*) para segurança viária (ou de tráfego).

ZHANG e PREVEDOUROS (2003) também não apresentam uma validação do modelo, mas apresentam um estudo de duas interseções hipotéticas (como estudos de caso).

Algumas alternativas adicionais de validação decorrem da extensão do método originalmente utilizado no estudo de VASCONCELOS (2004). Embora não trate de modelos de previsão da frequência de oportunidades de conflito, o trabalho mencionado examinou medidas empíricas de oportunidades de conflito envolvendo pedestres, segundo diferentes conceitos, e comparou as medidas alternativas com uma medida de segurança de travessia, que pode ser considerada como uma frequência de conflitos de tráfego, identificados através de uma filmagem do local estudado. Além de chamar atenção para a possibilidade de uma validação contra dados de conflito de tráfego, a utilização de medidas empíricas de oportunidades de conflito pode também servir para validação do modelo de previsão. Como destaca a autora, este tipo de validação pode ser mais detalhada (ciclo a ciclo, período a período), embora seja trabalhosa.

Uma possibilidade bastante interessante é a perspectiva de se usar meios tecnológicos modernos para a obtenção de dados empíricos relevantes. O PET (“*postencroachment time*”), investigado no trabalho de SONGCHITRUKSA, TARKO (2006), revisado no Capítulo 2, mostra-se potencialmente promissor para investigações em pesquisas de campo, pois é um parâmetro empírico de fácil obtenção se houver a disponibilidade de recursos tecnológicos

adequados. No trabalho revisado, foi utilizado um laboratório móvel equipado com mastro pneumático de quase 13 m de altura onde ficam fixadas duas câmeras. As interseções podem ser filmadas de ângulos adequados por longos períodos de tempo. A área de conflito da interseção é dividida em “*spot conflict zones*” e o vídeo pode ser analisado quadro a quadro.

Com base nesse trabalho, vislumbra-se a perspectiva de, com o uso de modernos recursos tecnológicos de detecção por vídeo e com *software* adequados, fazer-se a medição automática dos PETs por longos períodos de tempo e em um número significativo de interseções. Usando o mesmo princípio do PET, talvez seja possível, além de medir o tempo, usando recursos de vídeo detecção para dividir a zona de conflito em várias “mini-zonas virtuais”, medir a distância relativa entre os veículos que se encontram na mesma “mini-zona”. Ou então, veículos que se encontram dentro da mesma “mini-zona” num determinado instante poderia ser considerado como um risco. Isso permitiria estender a idéia para estimar riscos de colisão traseira, uma vez que a câmera está numa altura suficiente para alcançar além da fila de veículos e toda a aproximação poderia ser dividida em pequenas áreas virtuais. Se essas medidas de tempo ou de espaço representarem com fidelidade o risco de acidentes, então os modelos de oportunidades de conflito de tráfego poderiam ser validados contra esses dados empíricos, a serem obtidos numa escala que o resultado da validação seja estatisticamente significativo. Por meio desse processo de validação, pode-se selecionar modelos, não de previsão de acidentes, mas que fornecem estimativas que representam com maior fidelidade o grau de risco de uma interseção.

4.1.3 Comparação de Opções para Validação

A validação de um modelo de oportunidades de conflito pode ser realizada, pelo menos, de 5 modos possíveis:

- a) validação com histórico de acidentes de trânsito, através da comparação das previsões ou da hierarquização de locais críticos decorrente;
- b) validação por meio de medição direta em campo das próprias oportunidades de conflito segundo o conceito usado no modelo;
- c) validação com conflitos de tráfego observados em campo, através da comparação dos diagnósticos decorrentes;
- d) validação contra medidas de PETs (“*postencroachment time*”);
- e) validação das hipóteses assumidas pelos modelos de previsão das oportunidades de conflito;

- f) validação por meio da comparação dos diagnósticos qualitativos sobre a segurança viária.

A validação do modelo com dados de acidentes seria o meio mais natural. Mas essa validação, no caso de São Paulo, é difícil devido à falta ou pouca confiabilidade dos dados de acidentes.

Além disso, em um meio urbano que se modifica diariamente, como é o caso de São Paulo, as condições que propiciaram a ocorrência dos acidentes podem não estar mais presentes ou, vice-versa, podem surgir outras condições que favorecem a ocorrência de conflitos e acidentes que não tem nenhuma relação com o histórico de acidentes registrado.

Também o ideal é que a validação fosse por tipo de acidente (com a mesma correspondência com o tipo de oportunidade de conflito: angular, traseiro, etc.). Nas condições de São Paulo (falta de dados confiáveis e da tipologia de acidentes e do ritmo de mudanças que a cidade sofre), uma ampla validação com acidentes é bastante difícil.

Por outro lado, validar o modelo de oportunidade de conflito com a própria oportunidade de conflito a ser observada em campo, além das dificuldades de levantamento de dados, não constitui um bom parâmetro de comparação entre os diferentes modelos, uma vez que existem modelos que simplesmente estimam os fluxos conflitantes ou a chegada deles. Para esses casos, a comparação entre o dado teórico e o levantado em campo vai ser bastante próxima, não significando, obrigatoriamente, que um modelo é efetivamente mais eficiente que outro como medida do nível de segurança. Contudo, a dificuldade maior reside na complexidade operacional na pesquisa de medidas empíricas de oportunidades de conflito. Existe a necessidade de interpretação dos eventos para considerá-los ou não como uma oportunidade de conflito. Para tanto, é necessário definir de forma objetiva a ocorrência ou evento que define a oportunidade de conflito.

VASCONCELOS (2004) realizou um estudo envolvendo medidas empíricas de oportunidades de conflito com pedestres, testando diversos conceitos de oportunidade de conflito, onde cada conceito reflete uma situação específica (por exemplo, a situação de pedestre esperando para atravessar a via e existência de veículo se deslocando; ou pedestre

atravessando em curso normal na frente de um veículo ou ainda, pedestre e veículo se interagindo ou reagindo um ao outro).

Um grau intermediário em relação ao uso dos dados de acidentes e das medidas empíricas de oportunidades de conflito é a opção de validação com dados de conflitos de tráfego efetivamente observados em campo. Isto traz a necessidade de coletar mais dados (as frequências de conflitos de tráfego) mas pode adicionar informações importantes sobre a validade dos dados sobre oportunidades de conflitos, dado que o diagnóstico com base em conflitos de tráfego é mais aceito. Além de permitir a análise agregada, seria possível fazer uma validação mais detalhada (ciclo a ciclo ou período a período). Neste caso, o uso de medidas mais facilmente obtidas de filmagem, como o PET (*“postencroachment time”*), permitiria automatizar o procedimento mas exigiria o desenvolvimento de recursos para processamento automático de dados não disponíveis atualmente.

Uma outra forma de validação dos modelos de previsão de oportunidades de conflito de tráfego seria a validação das hipóteses implícitas nos modelos deduzidos. Dada a estrutura matemática dos modelos, elaborados com base em relações físicas entre as diversas variáveis envolvidas nos eventos, se as hipóteses do modelo são demonstradas como válidas, deve-se concluir que a plausibilidade dos resultados é maior, pelo menos no que se refere à estimativa da frequência de oportunidades de conflito (para chegar a conflitos de tráfego ou acidentes de trânsito, novos modelos deveriam ser explicitados em termos de hipóteses e validados correspondentemente). Entretanto, esse método de validação não seria eficiente para comparar modelos diferentes, que adotam hipóteses diferentes. Modelos distintos podem ter as suas hipóteses igualmente satisfeitas, mas, mesmo assim, um modelo pode ser mais preciso que outro, dependendo da qualidade das suas hipóteses e da relação entre as variáveis.

Finalmente, é possível realizar uma validação do modelo por meio da comparação com diagnósticos qualitativos de segurança. Por exemplo, se o diagnóstico de uma interseção aponta para um problema de conflito traseiro e, em uma outra interseção para conflito angular, é de se esperar que o modelo indique o mesmo resultado.

Este método foi considerado em vista da insatisfação sobre as opções previamente comentadas e é semelhante ao método previamente aplicado por BORNSTEIN (2001) no estudo sobre Auditorias de Segurança Viária. Como o objetivo final da análise de segurança

viária é diagnosticar aspectos deficientes na operação viária e selecionar formas de intervenção para corrigí-los, estudos desta natureza têm de ser executados, rotineiramente, pelos especialistas dos órgãos de trânsito e podem ser vistos como uma base de comparação com a utilização de estimativas de oportunidades de conflito. Considerando o estágio inicial dos estudos sobre oportunidades de conflito, admite-se ter uma indicação positiva sobre sua validade se for possível obter conclusões comparáveis sobre a segurança viária com sua utilização.

Para o presente trabalho, foi feita uma aplicação prática dos modelos propostos em duas interseções reais, comparando-se os resultados obtidos com diagnósticos qualitativos.

4.2 DESCRIÇÃO DA APLICAÇÃO PRÁTICA

Considerando os prazos e recursos disponíveis para este trabalho, não foi feita uma validação propriamente dita, mas apenas uma aplicação prática. A aplicação iniciou-se pela pesquisa sobre casos e dados disponíveis em estudos sobre segurança viária na cidade de São Paulo. Foram feitos contatos com diversas áreas da CET/SP, solicitando-se a identificação de interseções com estudos sobre segurança viária e o fornecimentos dos dados coletados e resultados obtidos em tais estudos. Foram também analisadas, com maior detalhe, as informações sobre pedidos de implantação de semáforos e a base de dados sobre acidentes de trânsito atualmente existente.

Além disso, antes da aplicação prática, foram realizados estudos pilotos preliminares, levantamentos em campo e tarefas de processamento, para testar a viabilidade e dificuldade dos procedimentos necessários para obtenção de dados operacionais para aplicação dos modelos propostos e de dados auxiliares para identificar oportunidades de conflito e/ou conflitos de tráfego.

Além da menor necessidade de dados de campo (seriam necessários apenas os dados relativos às variáveis utilizadas nos modelos), a opção adotada se justifica pela disponibilidade dos dados das interseções e dos diagnósticos de segurança, os quais são apenas passíveis de serem obtidos por pessoal técnico altamente qualificado, com extensa experiência profissional em

análise de segurança de tráfego, além do conhecimento específico das particularidades de cada local.

No caso, o diagnóstico é fornecido por engenheiros de tráfego da CET-SP que trabalham na área em que estão localizadas as interseções. A área de atuação da DEC2-GET2-CET/SP¹ (Lapa) foi selecionada para o estudo de campo em função da existência de informações organizadas sobre estudos de diagnóstico dos problemas de segurança viária, especialmente relacionados com implantação de semáforos. Entre os estudos de diagnóstico de segurança obtidos, foram selecionadas 5 interseções com melhor informação.

Complementando o diagnóstico qualitativo, há a descrição dos acidentes com vítima ocorridos em 2005 e 2006, com a transcrição dos respectivos Boletins de Ocorrência (BO) da Polícia Civil. Para todas as interseções com estudos de diagnóstico de segurança selecionadas, foram solicitadas informações sobre os acidentes registrados. Os dados de acidentes foram também obtidos através da GST-CET/SP², das fontes de registro da Polícia Civil apenas, e notou-se uma frequência reduzida de registros, em geral limitados a acidentes com vítima, e uma carência notável de dados sobre cada acidente registrado, como era esperado.

Os estudos pilotos preliminares mostraram a viabilidade de obter os dados necessários para aplicar os modelos de estimativa de oportunidades de conflito propostos (que limitam-se a dados sobre volumes e velocidades de tráfego, existência de restrições à visibilidade nas aproximações, além de informações sobre os planos semaforicos existentes no caso de interseções com sinalização semaforica) mas indicaram que o processamento dos dados é trabalhoso.

A possibilidade de obter medidas empíricas de oportunidades de conflito ou de conflitos de tráfego empregando filmagens foi verificada mas implica numa atividade de processamento dos dados bastante mais trabalhosa e demorada, incompatível com os prazos e recursos deste trabalho, considerando o número de modelos propostos.

¹ A CET/SP – Companhia de Engenharia de Tráfego divide sua atuação operacional em 6 GETs-Gerências de Engenharia de Tráfego, por sua vez, sub-divididas em DECs-Departamentos de Engenharia de Campo, todas subordinadas à sua Superintendência de Engenharia de Tráfego da Diretoria de Operações.

² A GST-Gerência de Segurança de Trânsito é a área responsável pelos processamento dos dados de acidentes na CET/SP-Companhia de Engenharia de Tráfego, subordinada diretamente à Diretoria de Operações.

Desta forma, concluiu-se pelo método baseado na comparação das estimativas de oportunidades de conflito com os diagnósticos qualitativos de segurança viária, suplementados pelos dados obtidos sobre os acidentes de trânsito nos locais.

4.2.1 Interseções Selecionadas para Aplicação Prática

Das 5 interseções previamente selecionadas, foram selecionadas duas interseções, uma com sinalização de prioridade (sem semáforo) e outra com sinalização semafórica. As interseções selecionadas são:

- R. Ministro Ferreira Alves x R. Raul Pompéia (interseção com sinalização de prioridade)
- R. Cerro Corá x R. Pio XI (interseção com sinalização semafórica).

Essas interseções foram selecionadas devido à disponibilidade de diagnósticos qualitativos de segurança, assim como de levantamento do histórico de acidentes obtidos diretamente dos Boletins de Ocorrências (BO) da Polícia Civil e por estarem localizadas na mesma região da cidade (para facilitar os trabalhos de campo, evitando deslocamentos muito grandes).

A interseção R. Ministro Ferreira Alves x R. Raul Pompéia foi selecionada tendo em vista o número de acidentes (5 acidentes com vítima em 2 anos), bem como pelo fato de haver projeto da CET/SP para a implantação do semáforo no local, fato que pode possibilitar, no futuro, fazer um estudo do tipo “antes” e “depois”, aplicando-se os modelos de oportunidades de conflito nas duas situações. No entanto, o semáforo não havia sido instalado até o final do período de coleta dos dados e esta comparação não pode ser realizada.

A interseção R. Cerro Corá x R. Pio XI foi selecionada tendo em vista haver o caso de conversão à esquerda permitida contra o fluxo oposto, bem como permitir o estudo de uma situação com estágio exclusivo de pedestres.

4.2.1.1 Interseção com Sinalização de Prioridade: R. Ministro Ferreira Alves x R. Raul Pompéia

a) Descrição da Interseção

A R. Ministro Ferreira Alves é a via principal, tem mão única de direção, estacionamento liberado dos dois lados da via, duas faixas de rolamento livres. A R. Raul Pompéia é a via secundária, tem mão única de direção, estacionamento liberado dos dois lados da via, duas faixas de rolamento livres. A via é sinalizada com placa tipo “R-1”, parada obrigatória, focos em braço projetado com amarelo piscante, placa educativa do tipo “Pare e cruze com cuidado” e legenda “PARE”, pintada no solo. A interseção está ainda sinalizada com faixas de travessia de pedestres, pintadas em todas as aproximações.

A R. Ministro Ferreira Alves é antecedida por um cruzamento semaforizado e sucedida por um cruzamento sem semáforo. A R. Raul Pompéia não apresenta cruzamento semaforizado nem antes nem depois da interseção.

As Figuras 4.1a e 4.1b mostram o croquis (sem escala) e uma foto da interseção.

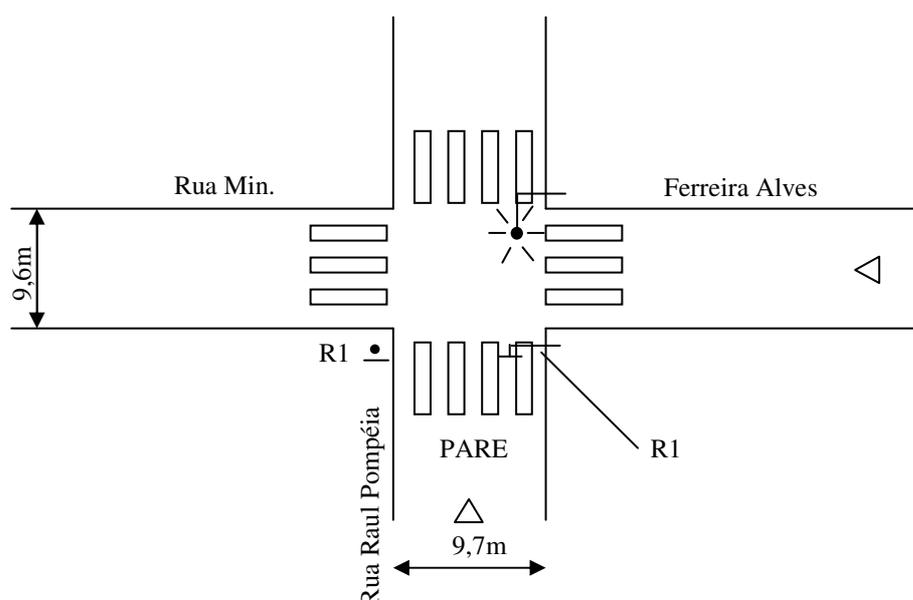


Figura 4.1a – Croquis da interseção R. Ministro Ferreira Alves x R. Raul Pompéia (sem escala)



Figura 4.1b – Foto da interseção R. Ministro Ferreira Alves x R. Raul Pompéia

b) Acidentes com vítima registrados em 2005 e 2006

Os dados obtidos junto à CET/SP foram os seguintes:

- 12/03/2005: 08:45 h (sábado) – BO 2459

Colisão entre 2 veículos

Vítima: passageiro de um dos veículos

Tipo: BO sem maiores informações

- 16/05/2005: 15:57 h (segunda-feira) – BO 5138

Colisão entre automóvel e moto

Automóvel na Raul Pompéia e a moto na Ferreira Alves

Vítima: ciclista

Tipo: colisão angular

- 05/06/2005: 13:22 h (domingo) – BO 5939

Colisão entre 2 automóveis

Vítima: condutor de um dos veículos

Tipo: BO sem maiores informações

- 08/05/2006: 18:00 h (domingo) – BO 4516

Colisão entre 2 automóveis

Veículo na Ferreira Alves em alta velocidade e outro veículo na Raul Pompéia

Vítima: condutor do veículo da Ferreira Alves
 Tipo: colisão angular

- 08/05/2006: 19:00 h (domingo) – BO 4301

Colisão entre 2 veículos
 Vítima: passageiro de um dos veículos
 Tipo: colisão angular

Resumo:

3 acidentes em 2005
 2 acidentes em 2006
 Total de 5 acidentes em 2 anos
 1 acidente envolvendo moto

Angular	3
Traseira	0
Mudança de faixa	0
Atropelamento	0
Sem informações	2
Total	5

c) Diagnóstico da CET/SP

As conclusões do estudo sobre a segurança viária feita pela equipe de especialistas da DEC2-GET2 apontaram os seguintes aspectos:

Diagnóstico da CET/SP: desrespeito à placa PARE, dificuldade em avaliar brechas pelos motoristas da Rua Raul Pompéia, deficiência de visibilidade (no cruzamento). A sugestão da CET/SP para o local é a implantação de semáforo (já há projeto elaborado aguardando implantação) uma vez que há dificuldade, por parte dos motoristas provenientes da R. Raul Pompéia, em avaliar as brechas para cruzar a R. Ministro Ferreira Alves, face à má visibilidade e ao alto volume de veículos nos horário de pico. A maior parte dos acidentes ocorrem no pico da tarde.

De fato, corroborando com o diagnóstico da CET/SP, pode-se observar pela foto da Figura 4.1b, que os veículos da R. Raul Pompéia aguardam brechas já dentro da área de conflito da interseção. Os acidentes também mostram que o risco de colisão angular é significativo: dos 5 acidentes observados, 3 são do tipo angular (sendo que não se conhece a natureza da colisão dos outros 2 acidentes). Vale observar, ainda, o esforço de a CET/SP de resolver o problema por meio de sinalização: placa PARE no lado esquerdo e placa PARE em braço projetado no

lado direito da via, além da legenda PARE pintada no solo e sinalização de amarelo piscante com placa “Cruze com cuidado”.

4.2.1.2 Interseção com Sinalização Semafórica: R. Cerro Corá x R. Pio XI

a) Descrição da Interseção

A R. Cerro Corá tem mão dupla de direção, duas faixas de rolamento por sentido e proibição de estacionamento dos dois lados da via. A R. Pio XI tem mão única de direção, três faixas de rolamento, com proibição de estacionamento na aproximação.

O cruzamento está sinalizado com faixa para a travessia de pedestres em todas as aproximações, pintura de canalização do tipo linha contínua, com zebrado no interior, e tachões, placas que regulamentam mão única de direção na R. Pio XI, sinalização semafórica, incluindo focos de pedestres em todas as faixas de travessia. A interseção opera com dois estágios veiculares e um estágio exclusivo de pedestres.

As Figuras 4.2a e 4.2b mostram o croquis (sem escala) e uma foto da interseção.

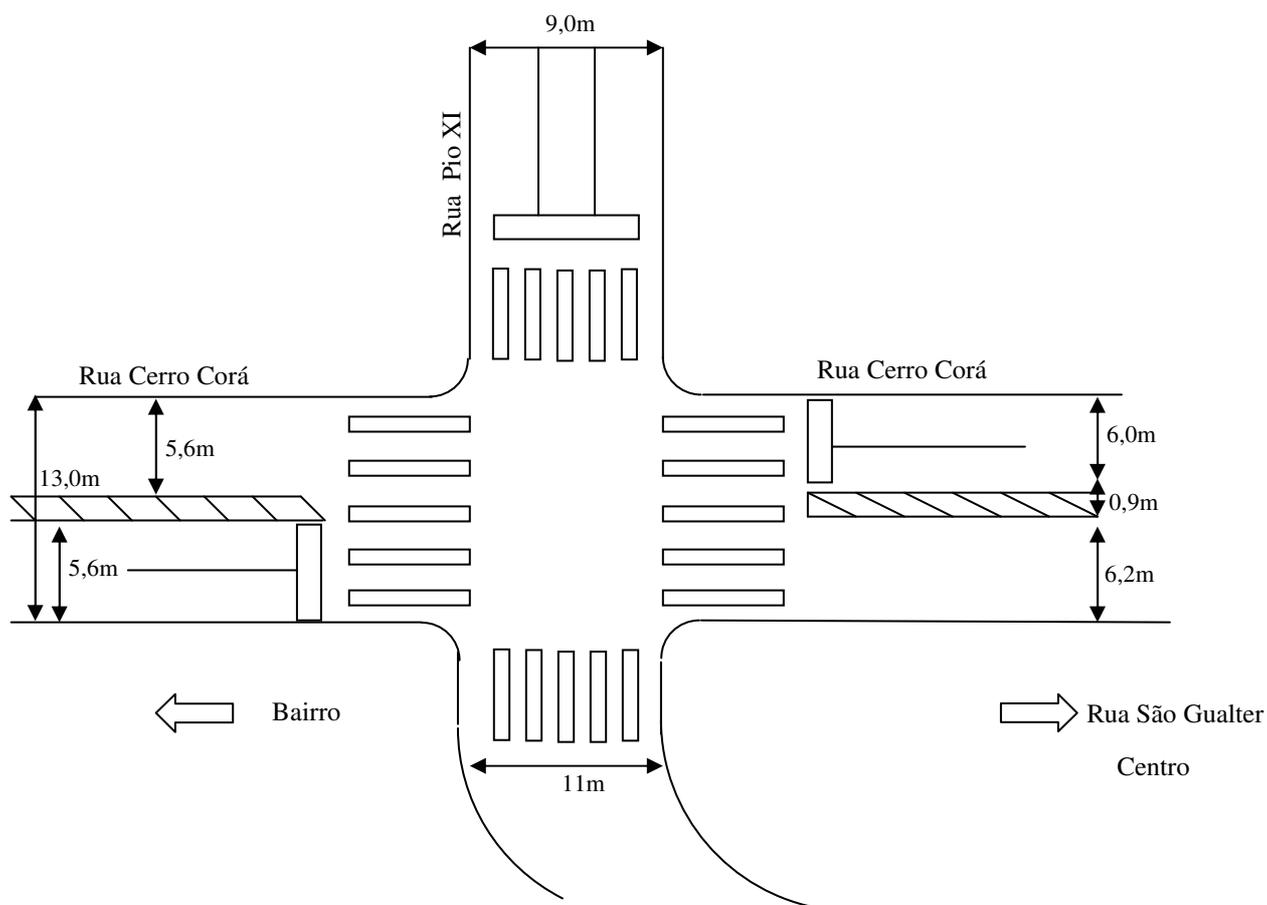


Figura 4.2a – Croquis da interseção R. Cerro Corá x R. Pio XI (sem escala)

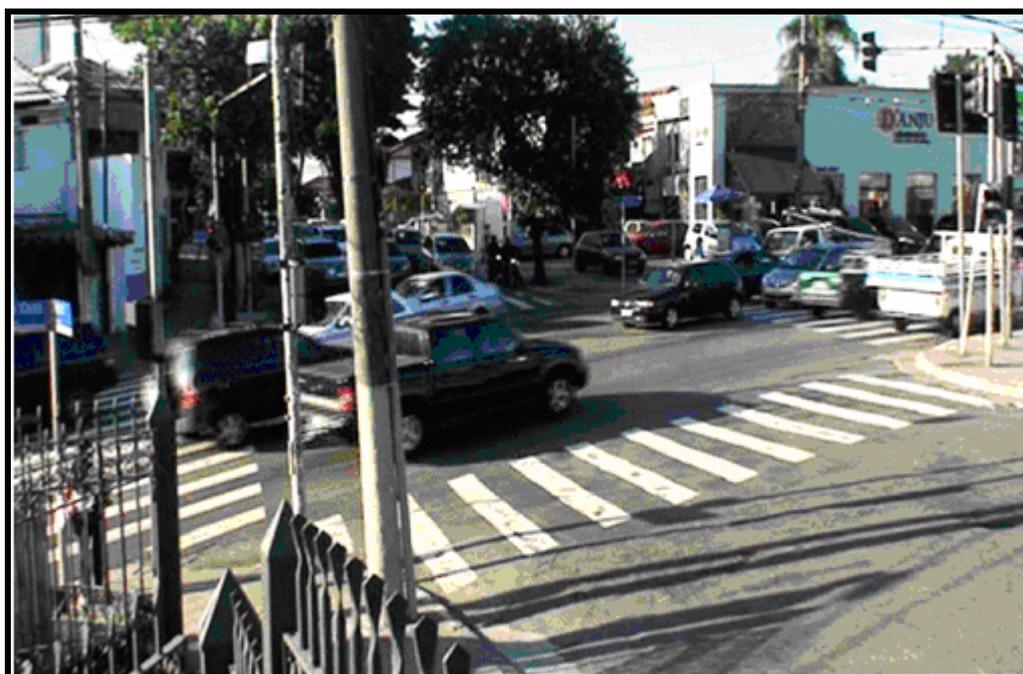
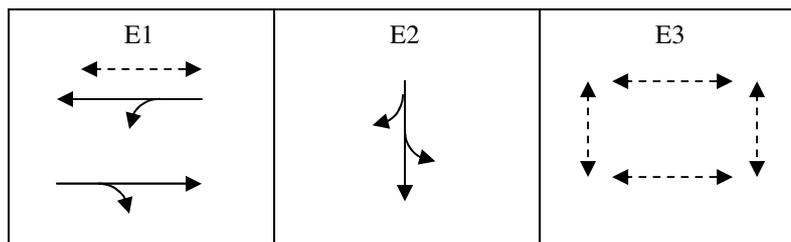


Figura 4.2b – Foto da interseção R. Cerro Corá x R. Pio XI

Existe um leve acrive na aproximação B-C da R. Cerro Corá que, para efeito de aplicação dos modelos, foi estimado como sendo de 2%.

O plano semaforico tem 3 estágios: E1 permite a operação da R. Cerro Corá, incluindo conversão à esquerda permitida com fluxo oposto; E2 permite a operação da R. Pio XI; E3 é um estágio exclusivo para pedestres demandado por botoeira.



b) Acidentes com vítima registrados em 2005 e 2006

Os dados obtidos junto à CET/SP foram os seguintes:

- 20/03/2006: 18:00 h (segunda-feira) – BO 1096

Atropelamento

Veículo estava saindo de um estacionamento, pedestre fora de faixa

Apesar do registro de apenas um acidente, existem dados informais sobre diversos acidentes sem vítima no local. No próprio período de filmagem, registrou-se um acidente sem vítima (uma colisão lateral entre um ônibus e um táxi que realizavam, ambos, a conversão à esquerda permitida, da R. Cerro Corá para a R. Pio XI).

c) Diagnóstico da CET/SP

Diagnóstico da CET/SP: Os movimentos de conversão à esquerda não são proibidos e até mesmo os ônibus realizam a conversão à esquerda da R. Cerro Corá para a R. Pio XI, provocando problemas de lentidão. Os conflitos mais graves ocorrem em sua maioria na conversão à esquerda. A proposta para o local é a criação de um estágio específico no semáforo para a conversão à esquerda da R. Cerro Corá para a R. Pio XI, o quarto estágio da interseção, pintura no solo de setas de conversão à esquerda, rebalçamento com pintura de linha dupla amarela. A proibição da

conversão em questão não é possível, pois não há vias que sirvam de alternativa para o citado movimento.

Observando a interseção, é surpreendente verificar que tenha ocorrido apenas um acidente em 2 anos, pois trata-se de uma interseção com altos fluxos de tráfego e que apresenta a conversão à esquerda permitida da R. Cerro Corá para a R. Pio XI como o movimento que mais gera conflitos (por ser um movimento permitido, realizado nas brechas do fluxo oposto), inclusive envolvendo ônibus de linhas urbanas, sendo que o espaço disponível não é adequado para o raio de giro de veículos desse porte (que corresponde ao acidente observado no período da pesquisa). Para agravar a situação, existem várias interferências representadas pela demanda de estacionamento em locais desfavoráveis. As entradas (e saídas) desses estacionamentos são bastante inadequadas: o estacionamento da Igreja Dom Bosco tem a sua entrada exatamente após a esquina da R. Pio XI e na esquina oposta há uma farmácia e uma confeitaria com alta demanda de manobras de estacionamento. As interferências causadas pelas manobras de estacionamento não estão representadas nos modelos de oportunidades de conflito propostos.

4.2.2 Obtenção de Dados de Campo

A obtenção dos dados de campo necessários foi feita por meio de filmagens. Como a experiência do estudo piloto preliminar já havia demonstrado, a dificuldade foi locar a câmera num plano elevado o suficiente para que os veículos não obstruíssem a visão da interseção. Outro problema encontrado foi a obtenção de alimentação elétrica para a câmera, uma vez que as baterias não tinham a autonomia suficiente para a duração da filmagem (dois períodos de 6 horas contínuas). Para contornar esses problemas e por falta de recursos adequados, precisou-se usar de improvisação e, fundamentalmente, contar com a colaboração de algumas pessoas nos locais da filmagem. No caso da R. Ministro Ferreira Alves x R. Raul Pompéia, contou-se com a cooperação da dona da banca de jornal ali existente que permitiu que a câmera fosse colocada no teto da banca, além de ter fornecido a energia elétrica necessária. Na R. Cerro Corá x R. Pio XI, a Igreja Dom Bosco permitiu que a câmera fosse colocada no lado interno do seu muro e a energia elétrica foi obtida da guarita do estacionamento da Igreja.

As Figuras 4.3a e 4.3b mostram a locação da câmera na R. Ministro Ferreira Alves x R. Raul Pompéia e na R. Cerro Corá x R. Pio XI, respectivamente.



Figura 4.3a – Locação da câmera na interseção R. Ministro Ferreira Alves x R. Raul Pompéia

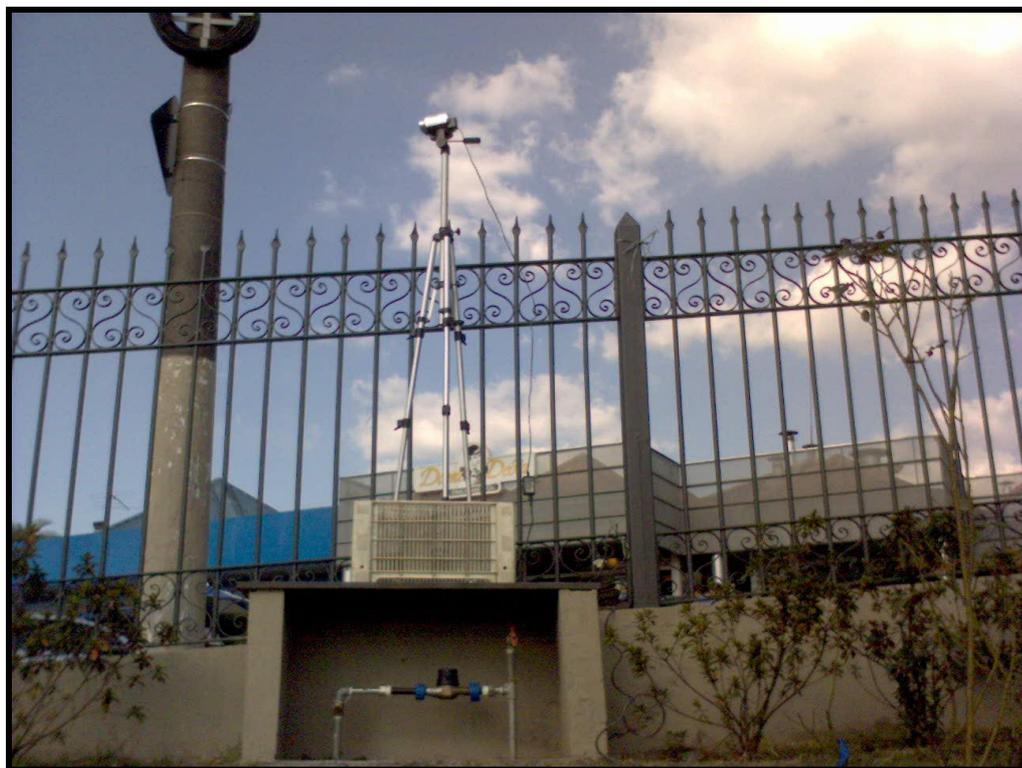


Figura 4.3b – Locação da câmera na interseção R. Cerro Corá x R. Pio XI

A filmagem foi realizada no dia 20/05/2008 (terça-feira), no período das 06:30 às 12:30 na R. Ministro Ferreira Alves x R. Raul Pompéia e das 13:30 às 19:30 na R. Cerro Corá x R. Pio XI. A câmera utilizada foi uma câmera de mão Sony Handycam DCR-SR 200 que grava direto em um HD de 40Gb. O resultado da filmagem foi convertido para 5 DVDs.

A pesquisa de velocidade foi realizada com a cessão, pela CET/SP, de um período de operação de uma equipe de fiscalização de velocidade com radar estático da empresa Data Traffic (contratada da CET/SP). O modelo de equipamento utilizado foi Laser Tec–Marksman Ultra e a pesquisa foi realizada no dia 26/04/2008, sábado, no período da manhã. Sempre que possível, foi pesquisada a velocidade por faixa de rolamento.

A Figura 4.4 mostra uma imagem do equipamento utilizado³



Figura 4.4 – Imagem do equipamento (radar) utilizado na pesquisa de velocidade.

Houve também dificuldades na pesquisa de velocidade de fluxo livre. Existe um cruzamento semaforizado, adjacente ao do cruzamento Cerro Corá x Pio XI, que é o do cruzamento R. Cerro Corá x R. São Gualter. Na R. Cerro Corá, sentido C-B, a caixa entre a R. Pio XI e a R. São Gualter é pequena. A idéia era capturar a velocidade de veículos em fluxo livre, isto é, sem fila adiante do veículo. Contudo, devido à defasagem dos semáforos, quando terminava de escoar a fila na R. Cerro Corá x R. Pio XI, fechava o semáforo atrás, na R. São Gualter, de forma que houve dificuldades de colher uma amostra mais significativa. Na R. Pio XI, não foi possível coletar dados de velocidade na faixa da esquerda devido à existência de

³ Imagem cedida pela empresa Data Traffic.

estacionamento. Na R. Ministro Ferreira Alves e na R. Raul Pompéia, a pesquisa foi feita nas duas faixas de rolamento sem distingui-las devido a estacionamentos, ora de um lado, ora de outro lado da via.

4.2.3 Aplicação dos Modelos Propostos

Apesar de a filmagem ter sido feita por 6 horas em cada interseção, foram colhidos dados apenas de uma hora, considerada hora de pico: das 07:00 às 08:00 na R. Ministro Ferreira Alves x R. Raul Pompéia e das 18:30 às 19:30 na R. Cerro Corá x R. Pio XI.

Dessa forma, a aplicação dos modelos foi feita apenas para esses períodos.

Outros dados necessários como a capacidade nas aproximações das vias, o grau de uso da capacidade ($X = q/C$) e o tempo de espera foram obtidos do programa HCS+ da EPUSP, usando a programação semafórica da R. Cerro Corá x R. Pio XI foi fornecida pela CET/SP.

Para complementar os resultados do HCS+ para a aplicação dos modelos, onde necessário, foi admitido que as faixas da mesma aproximação tem fluxos iguais.

Para a aplicação dos modelos, foram adotados os seguintes valores para os parâmetros discriminados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores adotados na aplicação dos modelos

a	1,39	μ	0,6	δ_p	2
b	2,78	g	10	δ_s	1

onde:

a = taxa de aceleração a partir do repouso em m/s^2

b = taxa de desaceleração segura em m/s^2

μ = coeficiente de atrito

g = taxa de aceleração da gravidade em m/s^2

δ_p = tempo de percepção e reação para parar devido a interferências em s

δ_s = tempo de percepção e reação para parar em semáforos

4.2.3.1 Interseção com Sinalização de Prioridade: R. Ministro Ferreira Alves x R. Raul Pompéia

De acordo com a disposição geométrica mostrada na Figura 4.1a, a Figura 4.5a a seguir mostra a nomenclatura adotada para os movimentos veiculares e de pedestres. A Figura 4.5b mostra um diagrama com a indicação dos pontos de conflito (interseção de movimentos conflitantes).

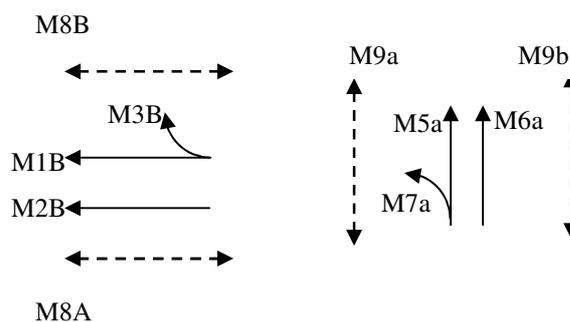


Figura 4.5a – Nomenclatura dos movimentos veiculares e de pedestres da interseção com sinalização de prioridade: R. Ministro Ferreira Alves x R. Raul Pompéia.

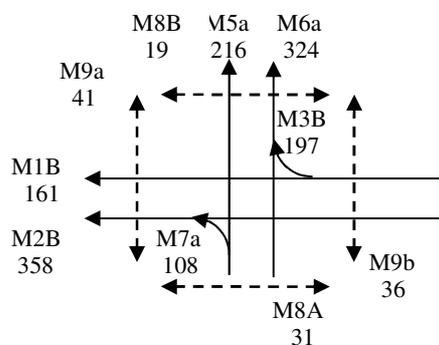


Figura 4.5b – Diagrama com a indicação dos pontos de conflito da interseção com sinalização de prioridade: R. Ministro Ferreira Alves x R. Raul Pompéia.

Os dados de fluxos foram contados, em v/h, a partir da filmagem. Os resultados estão mostrados na Tabela 4.1 a seguir e representados na Figura 4.5b.

*Tabela 4.2 – Dados de fluxos da interseção
com sinalização de prioridade: R. Ministro Ferreira Alves x R. Raul Pompéia
no período das 07:00 às 08:00 h*

	Ferreira Alves			Raul Pompéia		
	Frente (M1B&M2B))	Direita (M3B)	Total	Frente (M5a&M6a)	Esquerda (M7a)	Total
Auto	487	185	672	530	104	634
Caminhão	5	5	10	1	2	3
Ônibus	8	2	10	1	0	1
Moto	18	5	23	7	2	9
Total	518	197	715	539	108	647

	M8A	M8B	Total	M9a	M9b	Total
Pedestres	31	19	50	41	36	77

A velocidade média e o desvio padrão das velocidades, em km/h, estão mostrados na Tabela 4.2 a seguir.

*Tabela 4.3 – Dados de velocidade (em fluxo livre) da interseção
com sinalização de prioridade: R. Ministro Ferreira Alves x R. Raul Pompéia*

Ferreira Alves		Raul Pompéia	
μv	σv	μv	σv
31,54	4,24	32,95	7,18

Os dados físicos da interseção estão mostrados na Tabela 4.4a e os dados obtidos do programa HCS+ estão indicados na Tabela 4.4b.

Tabela 4.4a – Dados físicos da interseção

	Rua Ferreira Alves			Rua Raul Pompéia			
	W	R	d		W	R	d
M1B	9,7			M5a	9,6		
M2B	9,7			M6a	9,6		
M3B		2,43	3,81	M7a		2,4	3,77

Tabela 4.4b – Dados do programa HCS+

	Rua Raul Pompéia			
	Q (*)	C	X	te
M5a	266	383	0,97	72,4
M6a	266	331	0,80	48,4
M7a	106		0,97	

(*) O fluxo fornecido para o programa HCS+ não contempla as motos.

A seguir, são apresentadas as tabelas de resultados das estimativas de oportunidades de conflito, onde Q é o fluxo do movimento exposto, Q_c é o fluxo conflitante, T_i é o tempo de exposição, $P[\text{conflito}]$ é a probabilidade de chegada de veículo conflitante durante o tempo de exposição e a coluna “Risco” é o número de COs por veículo em porcentagem.

Quando não há nenhum termo de correção (como termos que ponderam o fator visibilidade ou probabilidade de chegadas livres), o valor da coluna “Risco” é igual ao valor da coluna “ $P[\text{conflito}]$ ”. As tabelas mostram como o cálculo foi processado, permitindo identificar os conflitos e o modo de agregação dos movimentos.

CO Angular para Movimentos Prioritários

- a) Método 0a (TRAF-Safe), por conflito e por faixa, tempo de exposição igual ao tempo parar de forma segura.

$$\text{Expressão utilizada: } CO(\text{angular})_i / h = Q_i (1 - e^{-T_i q_c}), T_i = t_{pi}$$

Tabela 4.5a – Método 0a para CO Angular – Movimentos Prioritários

Manobra	Conflito	Qi (v/h)	Qc (v/h)	Ti (s)	P[conflito]	CO angular	Risco
M1B	x M6a	161	324	5,15	37,10%	59,73	37,10%
M1B	x M5a	161	216	5,15	26,59%	42,81	26,59%
M2B	x M6a	358	324	5,15	37,10%	132,82	37,10%
M2B	x M5a	358	216	5,15	26,59%	95,19	26,59%
M2B	x M7a	358	108	5,15	14,32%	51,26	14,32%
M3B	x M6a	197	324	3,37	26,18%	51,57	26,18%
Total		716				433,38	60,53%

- b) Método 0b (TRAF-Safe), por conflito e por movimento, com tempo de exposição igual ao tempo para parar de forma segura.

$$\text{Expressão utilizada: } CO(\text{angular})_i / h = Q_i (1 - e^{-T_i q_c}), T_i = t_{pi}$$

Tabela 4.5b – Método 0b para CO Angular – Movimentos Prioritários

Manobra	Conflito	Qi (v/h)	Qc (v/h)	Ti (s)	P[conflito]	CO angular	Risco
(M1B+M2B)	x (M5a+M6a)	519	540	5,15	53,82%	279,35	53,82%
M2B	x M7a	358	108	5,15	14,32%	51,26	14,32%
M3B	x M6a	197	324	3,37	26,18%	51,57	26,18%
Total		716				382,18	53,38%

- c) Método 1a, por conflito e por faixa, com tempo de exposição igual ao tempo de manobra.

$$\text{Expressão utilizada: } CO(\text{angular})_i / h = Q_i (1 - e^{-T_{iqc}}), T_i = t_{ci}$$

Tabela 4.5c – Método 1a para CO Angular – Movimentos Prioritários

Manobra	Conflito	Qi (v/h)	Qc (v/h)	Ti (s)	P[conflito]	CO angular	Risco
M1B	x M6a	161	324	1,79	14,89%	23,98	14,89%
M1B	x M5a	161	216	1,79	10,19%	16,41	10,19%
M2B	x M6a	358	324	1,79	14,89%	53,32	14,89%
M2B	x M5a	358	216	1,79	10,19%	36,50	10,19%
M2B	x M7a	358	108	1,79	5,23%	18,74	5,23%
M3B	x M6a	197	324	2,57	20,66%	40,70	20,66%
Total		716				189,65	26,49%

- d) Método 1b, por faixa, com agregação dos fluxos conflitantes e tempo de exposição igual ao tempo de manobra.

$$\text{Expressão utilizada: } CO(\text{angular})_i / h = Q_i (1 - e^{-T_{iqc}}), T_i = t_{ci}$$

Tabela 4.5d – Método 1b para CO Angular – Movimentos Prioritários

Manobra	Conflito	Qi (v/h)	Qc (v/h)	Ti (s)	P[conflito]	CO angular	Risco
M1B	x (M5a+M6a)	161	540	1,79	23,57%	37,95	23,57%
M2B	x (M5a+M6a+M7a)	358	648	1,79	27,57%	98,70	27,57%
M3B	x M6a	197	324	2,57	20,66%	40,70	20,66%
Total		716				177,35	24,77%

- e) Método 1c, agregado por posição na via secundária

Como a manobra ocorre em uma só etapa, o Método 1c é equivalente ao Método 1b, produzindo o mesmo resultado.

f) Método 2, com probabilidade de chegada livre P[F] (aplicado ao Método 1a⁴).

$$\text{Expressão utilizada: } CO(\text{angular})_i / h = Q_i (1 - e^{-T_{iqc}}) \cdot P[F], T_i = t_{ci}$$

Tabela 4.5e – Método 2 para CO Angular – Movimentos Prioritários

Manobra	Conflito	Q (v/h)	Qc (v/h)	Ti (s)	P[conflito]	P[F]	CO angular	Risco
M1B	x M6a	161	324	1,79	14,89%	20,00%	4,80	2,98%
M1B	x M5a	161	216	1,79	10,19%	3,00%	0,49	0,31%
M2B	x M6a	358	324	1,79	14,89%	20,00%	10,66	2,98%
M2B	x M5a	358	216	1,79	10,19%	3,00%	1,09	0,31%
M2B	x M7a	358	108	1,79	5,23%	3,00%	0,56	0,16%
M3B	x M6a	197	324	2,57	20,66%	20,00%	8,14	4,13%
Total		716					25,75	3,60%

CO Traseira para Movimentos Prioritários

a) Método 0, TRAF-Safe

Por esse método, os movimentos prioritários (que não param) não sofrem risco de colisão traseira: $CO(\text{traseira}) = 0$.

b) Método 1, CO traseira como evento secundário (decorrente de uma CO primária).

Expressão utilizada:

$$CO(\text{traseira}, \text{secundária})_j / h = CO(\text{primária}) \cdot (1 - e^{-T_{pj} \cdot q_j}) \cdot T_{pj} = \frac{1}{Q_j} \cdot \sum_i Q_{ij} \cdot T_{pij}$$

$$CO(\text{primária}) / h = \sum_i Q_{ij} \left(1 - e^{-T_{ij} \sum_k q_{ik}} \right) \cdot T_{ij} = \frac{W + L}{v} \text{ ou } \sqrt{\frac{2 \cdot (W + L)}{a}}$$

Tabela 4.6a – Método 1 – (CO primária) para CO Traseira – Movimentos Prioritários

	Conflito	Qij (v/h)	Tij (s)	Qik (v/h)	P[conflito]1	CO primaria
M1B	x (M5a+M6a)	161	1,79	540	23,57%	37,95
M3B	x M5a	197	2,57	216	14,30%	28,17
M1B+M3B		358				66,12
M2B	x M7a	358	1,79	108	5,23%	18,74
Total		716				84,85

⁴ Como a travessia na via secundária é feita em uma única etapa, o Método 2 poderia ser aplicado a qualquer um dos métodos anteriores.

Tabela 4.6b – Método 1 – CO Traseira – Movimentos Prioritários

	CO primária	T _{pj} (s)	T _{pj} (s)	P[conflito]2	CO traseira	Risco
M1B	37,95	5,15				
M3B	28,17	3,37				
M1B+M3B	66,12		4,17	33,96%	22,45	6,27%
M2B	18,74	5,15	5,15	40,09%	7,51	2,10%
Total	84,85				29,96	4,19%

- c) Método 2, risco de colisão traseira devido a manobras de conversão do veículo da frente.

$$\text{Expressões utilizadas: } CO(\text{traseira})/h = Q \left[\left(1 - e^{-\tilde{q}_{TC} T_{fLT}} \right) \cdot P_{LT} + \left(1 - e^{-\tilde{q}_{TC} T_{fRT}} \right) \cdot P_{RT} \right]$$

$$\tilde{q}_{TC} = q_{TC} \cdot \left(1 - \frac{v_c}{v} \right)$$

Tabela 4.6c – Método 2 para CO Traseira – Movimentos Prioritários

	Q (v/h)	PRT	T _{fRT}	QTC (v/h)	\bar{Q}_{TC}	P[conflito]	CO traseira	Risco
M1B+M3B	358	55,03%	1,78	161	91	4,39%	8,66	2,42%
Total	358						8,66	2,42%

- d) Método 3, soma dos métodos 1 e 2.

Tabela 4.6d – Método 3 para CO Traseira – Movimentos Prioritários

	Q (v/h)	Método 1	Método 2	CO traseira	Risco
M1B+M3B	358	22,45	8,66	31,11	8,69%
M2B	358	7,51		7,51	2,10%
Total	716			38,62	5,39%

CO Angular para Movimentos Secundários

- a) Método 0, TRAF-Safe, calculado por conflito e com tempo de exposição igual ao tempo de manobra.

$$\text{Expressão utilizada: } CO(\text{angular})_i / h = Q_i \cdot (1 - e^{-T_i \cdot q_c}) \cdot T_i = t_{ci}$$

Tabela 4.7a – Método 0 para CO Angular – Movimentos Secundários

Manobra	Conflito	Q (v/h)	Qc (v/h)	Ti (s)	P[conflito]	CO angular	Risco
M5a	x M1B	216	161	6,74	26,02%	56,20	26,02%
M5a	x M2B	216	358	6,74	48,83%	105,47	48,83%
M6a	x M1B	324	161	6,74	26,02%	84,29	26,02%
M6a	x M2B	324	358	6,74	48,83%	158,21	48,83%
M6a	x M3B	324	197	6,74	30,84%	99,91	30,84%
M7a	x M2B	108	358	5,75	43,55%	47,03	43,55%
Total		648				551,11	85,05%

b) Método 1a, agregando os fluxos conflitantes.

$$\text{Expressão utilizada: } CO(\text{angular})_i / h = Q_i \cdot (1 - e^{-T_i \cdot q_c}), T_i = t_{ci}$$

Tabela 4.7b – Método 1a para CO Angular – Movimentos Secundários

Manobra	Conflito	Q (v/h)	Qc (v/h)	Ti (s)	P[conflito]	CO angular	Risco
M5a	x (M1B+M2B)	216	519	6,74	62,14%	134,23	62,14%
M6a	x (M2B+M1B+M3B)	324	716	6,74	73,82%	239,17	73,82%
M7a	x M2B	108	358	5,75	43,55%	47,03	43,55%
Total		648				420,43	64,88%

c) Método 1b, agregando os fluxos conflitantes de acordo com a sua posição.

Como é uma interseção sem canteiro central, esse método é equivalente ao Método 1a e produz o mesmo resultado.

d) Método 2, com $(T_i \pm \tau)$ onde $\tau = 0,25 T_i$

$$\text{Expressão utilizada: } CO(\text{angular})_i / h = Q_i \left(1 - e^{-0,5q_c T_i}\right)$$

Tabela 4.7c – Método 2 para CO Angular – Movimentos Secundários

Manobra	Conflito	Q (v/h)	Qc (v/h)	Ti (s)	P[conflito]	CO angular	Risco
M5a	x (M1B+M2B)	216	519	1,68	21,56%	46,57	21,56%
M6a	x (M2B+M1B+M3B)	324	716	1,68	28,47%	92,23	28,47%
M7a	x M2B	108	358	1,44	13,32%	14,38	13,32%
Total		648				153,19	23,64%

CO Traseira para Movimentos Secundários

- a) Método 0a, TRAF-Safe, por ponto de conflito, com tempo de exposição igual ao tempo médio de espera no topo da fila, dado pela expressão de Adams.

$$\text{Expressões utilizadas: } CO(\text{traseira})/h = Q_s \cdot (1 - e^{-T_e \cdot q}), T_e = t_{eAi} \text{ e } t_{eAi} = \frac{e^{qc\alpha} - 1}{q_c} - \alpha.$$

Tabela 4.8a – Método 0a para CO Traseira – Movimentos Secundários

Manobra	Conflito	Qs (v/h)	Q (v/h)	Qc (v/h)	$\frac{Q}{Q_c}$	Te (s)	P[conflito]	CO traseira	Risco
M5a	x M1B	216	324	161	6,74	1,13	9,63%	20,80	9,63%
M5a	x M2B	216	324	358	6,74	2,86	22,68%	49,00	22,68%
M6a	x M1B	324	324	161	6,74	1,13	9,63%	31,21	9,63%
M6a	x M2B	324	324	358	6,74	2,86	22,68%	73,50	22,68%
M6a	x M3B	324	324	197	6,74	1,41	11,92%	38,61	11,92%
M7a	x M2B	108	324	358	5,75	2,01	16,53%	17,85	16,53%
Total		648						230,96	35,64%

- b) Método 0b, (TRAF-Safe), por faixa, com tempo de exposição igual ao tempo médio de espera no topo da fila, dado pela expressão de Adams (usa as mesmas expressões do Método 0a).

$$\text{Expressões utilizadas: } CO(\text{traseira})/h = Q_s \cdot (1 - e^{-T_e \cdot q}), T_e = t_{eAi} \text{ e } t_{eAi} = \frac{e^{qc\alpha} - 1}{q_c} - \alpha$$

Tabela 4.8b – Método 0b para CO Traseira – Movimentos Secundários

Manobra	Conflito	Qs (v/h)	Q (v/h)	Qc (v/h)	$\frac{Q}{Q_c}$	Te (s)	P[conflito]	CO traseira	Risco
(M5a+M7a)	x M1B	324	324	161	6,41	1,01	8,71%	28,22	8,71%
(M5a+M7a)	x M2B	324	324	358	6,41	2,55	20,54%	66,55	20,54%
M6a	x M1B	324	324	161	6,74	1,13	9,63%	31,21	9,63%
M6a	x M2B	324	324	358	6,74	2,86	22,68%	73,50	22,68%
M6a	x M3B	324	324	197	6,74	1,41	11,92%	38,61	11,92%
Total		648						238,09	36,74%

- c) Método 1, com agregação dos fluxos dos movimentos da via secundária e tempo de exposição igual ao tempo médio de espera.

$$\text{Expressão utilizada: } CO(\text{traseira})/h = Q_s \cdot (1 - e^{-T_e \cdot q}), T_e = t_e$$

Tabela 4.8c – Método 1 para CO Traseira – Movimentos Secundários

Manobra	Qs=Q (v/h)	Te (s)	P[conflito]	CO traseira	Risco
(M5a+M7a)	324	72,4	99,85%	323,52	99,85%
M6a	324	48,4	98,72%	319,84	98,72%
Total	648			643,36	99,28%

- d) Método 2, com agregação de fluxos conflitantes e tempo médio de espera por veículo parado fornecido pelo programa HCS+.

Expressões utilizadas: $CO(traseira)/h = Q_s \cdot p \cdot (1 - e^{-T_e \cdot q})$, $T_e = t_{epi} = t_{ei}/p$

$$p = 1 - (1 - X) \cdot e^{-q_c \cdot \alpha}$$

Tabela 4.8d – Método 2 para CO Traseira – Movimentos Secundários

Manobra	Conflito	Qs (v/h)	Q (v/h)	X	α_s	Qc (v/h)	p	Te(s)	P[conflito]	CO traseira	Risco
M5a	x (M1B+M2B)	216	324	0,97	6,74	519	98,86%	73,23	99,86%	213,25	99,86%
M7a	x M2B	108	324	0,97	5,75	358	98,31%	49,23	98,81%	104,91	98,81%
M6a	x (M1B+M2B+M3B)	324	324	0,80	6,74	716	94,76%	51,07	98,99%	303,94	98,99%
Total		648					96,72%			622,10	99,26%

- e) Método 3a, considerando a restrição de visibilidade por meio de um termo de correção empírico.

Expressões utilizadas: $CO(traseira)/h = Q_s \cdot p \cdot (1 - e^{-T_e \cdot q}) \cdot P_{sv}$, $T_e = t_{epi} = t_{ei}/p$ e

$$(a)P_{sv} = \max \left[\frac{D_p - D_v}{D_p}, 0 \right]$$

Tabela 4.8e – Método 3a para CO Traseira – Movimentos Secundários

Manobra	Conflito	Qs (v/h)	A	Dp (m)	Dv (m)	Psv	CO traseira	Risco
M5a	x (M1B+M2B)	216	213,25	33,37	100	0,00%	0,00	0,00%
M7a	x M2B	108	104,91	33,37	100	0,00%	0,00	0,00%
M6a	x (M1B+M2B+M3B)	324	303,94	33,37	100	0,00%	0,00	0,00%
Total		648					0,00	0,00%

A coluna “A” apresenta os valores calculados para COs traseiras pelo Método 2.

- f) Método 3b, considerando a restrição de visibilidade com um termo probabilístico $P[D_p > D_v]$.

Expressões utilizadas: $CO(traseira)/h = Q_s \cdot p \cdot (1 - e^{-T_e \cdot q}) P_{sv} \cdot T_i = t_{epi} = t_{ei}/p$ e

$$(b) P_{sv} = P[D_p > D_v]$$

Tabela 4.8f – Método 3b para CO Traseira – Movimentos Secundários

Manobra	Conflito	Qs (v/h)	A	Dv (m)	E[Dp]	Var[Dp]	Psv	CO traseira	Risco
M5a	x (M1B+M2B)	216	213,25	100	34,09	111,41	0,00%	0,00	0,00%
M7a	x M2B	108	104,91	100	34,09	111,41	0,00%	0,00	0,00%
M6a	x (M1B+M2B+M3B)	324	303,94	100	34,09	111,41	0,00%	0,00	0,00%
Total		648						0,01	0,00%

A coluna “A” apresenta os valores calculados para COs traseiras pelo Método 2.

g) Método 3c, considerando a restrição de visibilidade com um termo probabilístico $P[\delta_R > \delta_A]$.

Expressões utilizadas: $CO(traseira)/h = Q_s \cdot p \cdot (1 - e^{-T_e \cdot q}) P_{sv} \cdot T_i = t_{epi} = t_{ei}/p$ e

$$(c) P_{sv} = P[\delta_R > \delta_A]$$

Tabela 4.8g – Método 3c para CO Traseira – Movimentos Secundários

Manobra	Conflito	Qs (v/h)	A	δ_R (s)	Dv (m)	E[δ_A]	Var[δ_A]	Psv	CO traseira	Risco
M5a	x (M1B+M2B)	216	213,25	2	100	9,80	7,50	0,57%	1,21	0,56%
M7a	x M2B	108	104,91	2	100	9,80	7,50	0,57%	0,60	0,55%
M6a	x (M1B+M2B+M3B)	324	303,94	2	100	9,80	7,50	0,57%	1,73	0,53%
Total		648							3,54	0,55%

A coluna “A” apresenta os valores calculados para COs traseiras pelo Método 2.

CO com Pedestres

a) Método 1a, travessia integral.

$$\text{Expressão utilizada: } CO(pedestre)/h = Q_{ped} \cdot \left(1 - e^{-T_i \sum q_l} \right)$$

Tabela 4.9a – Método 1a para CO com Pedestres – Travessia integral

	Qped	ΣQl	W	Ti	P[conflito]	COped	Risco
M8A	31	648	9,7	9,08	80,50%	24,96	80,50%
M8B	19	737	9,7	9,08	84,43%	16,04	84,43%
M9a	41	627	9,6	9,00	79,14%	32,45	79,14%
M9b	36	716	9,6	9,00	83,30%	29,99	83,30%
Total	127					103,44	81,45%

b) Método 1b, exposição por zona de conflito.

$$\text{Expressão utilizada: } CO(\text{pedestre})/h = Q_{ped} \cdot \sum_c \left(1 - e^{-T_{ci} \sum_l q_{cl}} \right)$$

Tabela 4.9b – Método 1b para CO com Pedestres – Exposição por zona de conflito

	ZC	Qped	ΣQcl	Wc	Tci	P[conflito]	COped	Risco
M8A	1	31	324	4,85	4,04	30,49%		
M8A	2	31	324	4,85	4,04	30,49%		
Subtotal		31				60,98%	18,91	60,99%
M8B	1	19	521	4,85	4,04	44,28%		
M8B	2	19	216	4,85	4,04	21,53%		
Subtotal		19				65,81%	12,51	65,82%
M9a	1	41	161	4,8	4,00	16,38%		
M9a	2	41	466	4,8	4,00	40,42%		
Subtotal		41				56,80%	23,29	56,80%
M9b	1	36	358	4,8	4,00	32,82%		
M9b	2	36	358	4,8	4,00	32,82%		
Subtotal		36				65,64%	23,63	65,64%
Total		127					78,33	61,68%

c) Método 1c, exposição por zona de conflito e por movimento veicular conflitante.

$$\text{Expressão utilizada: } CO(\text{pedestre})/h = Q_{ped} \cdot \left[\sum_{cl} \left(1 - e^{-T_{ci} \cdot q_{cl}} \right) \right]$$

Tabela 4.9c – Método 1c para CO com Pedestres – Exposição por zona de conflito e por movimento veicular conflitante

	ZC	Qped	Qcl	Wc	Tei	P[conflito]	COped	Risco
M8A	1	31	324	4,85	4,04	30,49%		
M8A	2	31	216	4,85	4,04	21,53%		
M8A	2	31	108	4,85	4,04	11,42%		
Subtotal		31				63,44%	19,67	63,45%
M8B	1	19	324	4,85	4,04	30,49%		
M8B	1	19	197	4,85	4,04	19,84%		
M8B	2	19	216	4,85	4,04	21,53%		
Subtotal		19				71,86%	13,66	71,87%
M9a	1	41	161	4,8	4,00	16,38%		
M9a	2	41	358	4,8	4,00	32,82%		
M9a	2	41	108	4,8	4,00	11,31%		
Subtotal		41				60,51%	24,81	60,51%
M9b	1	36	161	4,8	4,00	16,38%		
M9b	1	36	197	4,8	4,00	19,66%		
M9b	2	36	358	4,8	4,00	32,82%		
Subtotal		36				68,86%	24,79	68,86%
Total		127					82,92	65,29%

d) Método 2, com ocupância da travessia.

Expressão utilizada: $CO(\text{pedestre})/h = Q_c \cdot OCC_{ped}$

Tabela 4.9d – Método 2 para CO com Pedestres – Ocupância da travessia

	Qped	Qc	OCCped (%)	COped	Risco
M8A	31	648	1,55%	10,04	32,40%
M8B	19	737	0,95%	7,00	36,85%
M9a	41	627	2,05%	12,85	31,35%
M9b	36	716	1,80%	12,89	35,80%
Total	127			42,79	33,69%

e) Método 3a, travessias integral com chegadas livres para pedestres preferenciais (para os demais casos, manteve-se $P[F] = 100\%$).

Expressão utilizada: $CO(\text{pedestre})/h = Q_{ped} \cdot \left(1 - e^{-T_i \sum_i q_i}\right) \cdot P[F]$

Tabela 4.9e – Método 3a para CO com Pedestres – Travessia integral e chegadas livres

	Qped	ΣQl	W	Ti	P[F]	P[conflito]	COped	Risco
M8A	31	648	9,7	9,08	3,00%	1,68%	0,52	0,08%
M8B	19	737	9,7	9,08	100,00%	60,54%	11,50	1,56%
M9a	41	627	9,6	9,00	100,00%	54,33%	22,28	3,55%
M9b	36	716	9,6	9,00	100,00%	59,14%	21,29	2,97%
Total	127						55,59	43,77%

- f) Método 3b, ocupância da travessia com chegadas livres para pedestres preferenciais (para os demais casos, manteve-se $P[F] = 100\%$).

Expressão utilizada: $CO(\text{pedestre})/h = Q_c \cdot OCC_{ped} \cdot P[F]$

Tabela 4.9f – Método 3b para CO com Pedestres – Ocupância da travessia com chegadas livres

	Qped	Qc	OCCped (%)	P[F]	COped	Risco
M8A	31	648	1,55%	3,00%	0,30	0,97%
M8B	19	737	0,95%	100,00%	7,00	36,85%
M9a	41	627	2,05%	100,00%	12,85	31,35%
M9b	36	716	1,80%	100,00%	12,89	35,80%
Total	127				33,04	26,02%

- g) Método 4, travessia integral em brechas de risco.

Expressão utilizada: $CO(\text{pedestre})/h = Q_{ped} \cdot \left(1 - e^{-(\tau_u + \tau_l) \sum_t q_l} \right)$

Tabela 4.9g – Método 4 para CO com Pedestres – Travessia integral e brechas de risco ($t_u = t_l = 0,25 Ti$)

	Qped	ΣQl	W	Ti	P[conflito]	COped	Risco
M8A	31	648	9,7	9,08	55,85%	17,31	55,85%
M8B	19	737	9,7	9,08	60,54%	11,50	60,54%
M9a	41	627	9,6	9,00	54,33%	22,28	54,33%
M9b	36	716	9,6	9,00	59,14%	21,29	59,14%
Total	127					72,38	56,99%

Resumo dos Resultados para a Interseção com Sinalização de Prioridade: Ministro Ferreira Alves x Raul Pompéia

A seguir é apresentado, por meio da Figura 4.6, um resumo dos resultados obtidos com a aplicação dos modelos propostos, sendo que os resultados estão indicados da seguinte forma: $nnn^{(x)}$ onde “nnn” é o resultado obtido e (x) é o método.

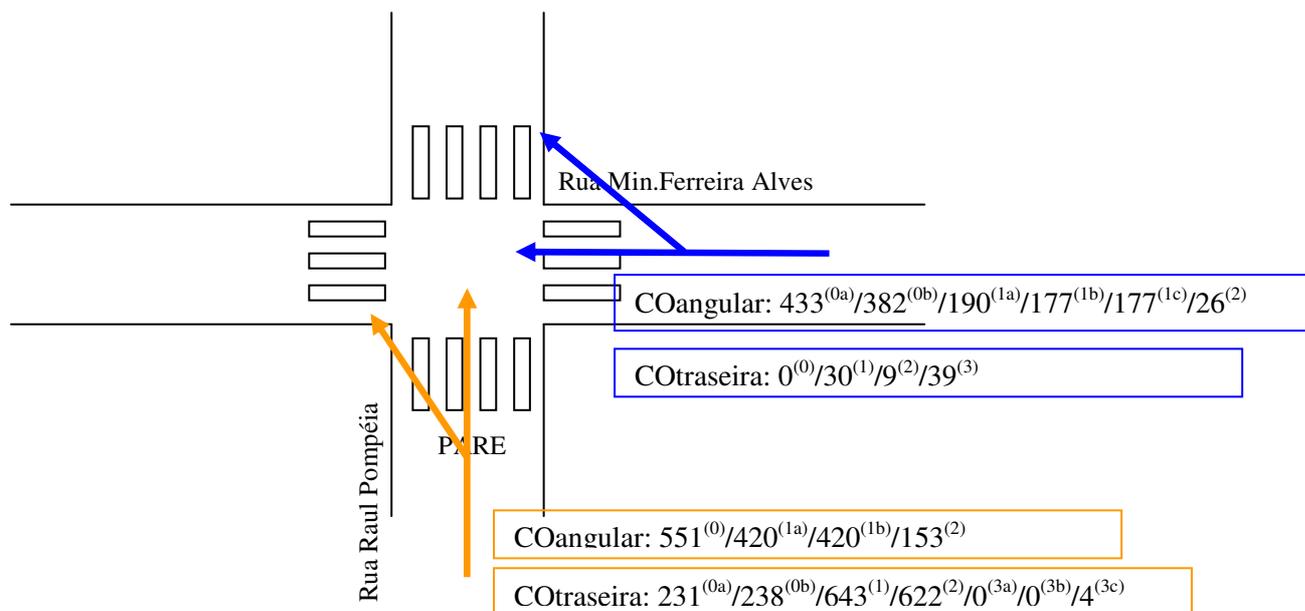


Figura 4.6 – Resumo com os resultados obtidos para a Interseção com Sinalização de Prioridade: Ministro Ferreira Alves x Raul Pompéia

Visando uma visualização alternativa com melhor identificação das características dos métodos, os mesmos resultados compilados na Figura 4.6 estão mostrados na Tabela 4.10.

Não são apresentados os dados relativos às COs com pedestres porque a informação dos diagnósticos não permite analisar os problemas específicos dos pedestres.

Tabela 4.10 – Resultado da aplicação dos modelos na Interseção com Sinalização de Prioridade: R. Ministro Ferreira Alves x R. Raul Pompéia

	Rua Ministro Ferreira Alves (M1B, M2B, M3B)		Rua Raul Pompéia (M5a, M6a, M7a)	
Tipo de CO	Método - Movimentos Prioritários	CO	Método - Movimentos Secundários	CO
CO Angular	0a-TRAF-Safe por conflito e por faixa	433	0-TRAF-Safe por conflito e Exposição pelo tempo de manobra	551
	0b-TRAF-Safe por conflito e por movimento	382	1a- Exposição pelo tempo de manobra e fluxos agregados	420
	1a-Exposição pelo tempo de manobra, por conflito e por faixa	190	1b- Exposição pelo tempo de manobra e por posição	420
	1b- Exposição pelo tempo de manobra, agregado e por faixa	177	2-Exposição em brechas próximas ao tempo de manobra	153
	1c- Exposição pelo tempo de manobra, agregado e por posição	177	---	---
	2-Exposição pelo tempo de manobra e chegada livre	26	---	---
	CO Traseira	0- TRAF-Safe, desprezado	0	0a- TRAF-Safe, por conflito e com atraso de Adams
1- COs secundários		30	0b- TRAF-Safe, por faixa e com atraso de Adams	238
2- com conversões		9	1- Exposição pelo atraso médio e fluxo agregado	643
3-soma de 1 e 2		39	2- Exposição pelo atraso médio de veículos que páram e agregado	622
---		---	3a- Exposição pelo atraso médio de veículos que páram, Dv empírico	0
---		---	3b- Exposição pelo atraso médio de veículos que páram, Dv teórico	0
---		---	3c- Exposição pelo atraso médio de veículos que páram, Tempo reação	4

Com relação aos modelos propostos, pode-se observar que alguns modelos apresentam resultados numéricos semelhantes, o que permite que eles sejam agrupados na comparação feita a seguir.

Comparação do diagnóstico x estimativa de oportunidades de conflito para a Interseção com Sinalização de Prioridade: R. Ministro Ferreira Alves x R. Raul Pompéia

O diagnóstico qualitativo, composto pelas informações fornecidas pela CET/SP, dados de acidentes e observações feitas durante a pesquisa de campo, pode ser consolidado nas três observações da Tabela 4.11 a seguir:

Tabela 4.11 – Síntese do Diagnóstico dos Especialistas da CET/SP na Interseção com Sinalização de Prioridade: R. Ministro Ferreira Alves x R. Raul Pompéia

Observação 1: Desrespeito à R1, problema com COs Angulares
Os acidentes ocorrem por desrespeito à parada obrigatória. Indica que as COs angulares deveriam ser o problema relevante no local, informação confirmada pelos dados parciais sobre acidentes. A pesquisa de campo confirma que existem transgressões à preferência. Não mostra uma frequência acentuada de inversões de preferência mas mostra claramente um número significativo de manobras com aceitação de brechas reduzidas, o que pode ou não ser tomado como indicador de potenciais transgressões à preferência.
Observação 2: Instalação de Semáforo elimina problema com COs Angulares
A sugestão para o local é a implantação de semáforo, há dificuldade por parte dos motoristas provenientes da R. Raul Pompéia em avaliar as brechas para cruzar a R. Ministro Ferreira Alves, face à visibilidade ruim e ao alto volume de veículos nos horários de pico. Entende-se que se trata de intervisibilidade, por ter sido associado a um aspecto que recomenda a implantação de semáforo e confirmaria, novamente, a indicação de que as COs angulares deveriam ser o problema relevante no local, o que é ratificado pelos dados parciais sobre acidentes. Os altos volumes de veículos foram confirmados na pesquisa de campo.
Observação 3: Problema com COs Angulares maior no pico da tarde
Foi fornecida a informação pela CET/SP de que os acidentes ocorrem durante o pico da tarde, o que não é corroborado pelos dados de acidentes disponíveis: nenhum dos 5 acidentes com vítimas registrados ocorreu no pico da tarde. A informação pode ter sido obtida de entrevistas e não confirmada por eventual sub-registro nos acidentes (particularmente, acidentes sem vítima). Pela divergência de informação este aspecto não será analisado.

A seguir estas observações são comparadas com os resultados que poderiam ser inferidos das estimativas de oportunidades de conflito, nas diversas opções consideradas.

A Tabela 4.12 a seguir apresenta a relação que pode ser identificada entre cada grupo de modelos e as três observações do diagnóstico.

Tabela 4.12 – Relação entre o diagnóstico e o resultado obtido pelos modelos de COs na Interseção com Sinalização de Prioridade: R. Ministro Ferreira Alves x R. Raul Pompéia

	Observação 1: Desrespeito à placa R1, problema com COs Angulares	Observação 2: Instalação de Semáforo elimina problema com COs Angulares	Observação 3: Problema com COs Angulares maior no pico da tarde	Avaliação
CO Angular – Métodos baseados nas propostas originais do TRAF-Safe	O problema não é analisado especificamente porque não é considerada a transgressão.	O problema é detectado e a estimativa de CO angular é relevante, sendo relacionado com COs de movimentos prioritários e secundários.	Não foi estudado o pico da tarde.	Todos os métodos detectaram o problema de CO angular.
CO Angular – Método que incorpora o fator de chegada livre P[F].	O problema não é analisado especificamente porque não é considerada a transgressão.	O problema das COs Angulares exclui o risco dos movimentos prioritários (somente às COs de movimentos secundários seriam relevantes).	Não foi estudado o pico da tarde.	Como a via secundária é saturada, P[F] é praticamente nula, resultando em um baixo número de COs angulares relacionados com a exposição de movimentos principais. Os dados de acidentes não permitem confirmar a natureza da exposição mas usualmente é o veículo da via secundária que arrisca a manobra e fica em exposição.
CO Angular – Método que considera brechas de risco.	O problema não é analisado especificamente porque não é considerada a transgressão.	O problema é detectado nas COs de movimentos secundários, com frequência.	Não foi estudado o pico da tarde.	Também detecta o problema de CO angular na via secundária (com uma maior gravidade que não é avaliada).
CO traseira - Métodos baseados nas propostas originais do TRAF-Safe.	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.	O total de CO traseiras indica a existência de problemas de acidentes não observados. A previsão de acidentes decorrente é maior que a de acidentes angulares. Não há problema diagnosticado ou observação de colisões traseiras ou decorrentes de CO traseira que apóie a previsão.
CO traseira - Métodos que avaliam deficiência de visibilidade.	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.	O total de CO traseiras passa a ser compatível com a inexistência de problema diagnosticado ou acidentes observados.
CO com pedestres	Não se aplica.	Não se aplica.	Não se aplica.	Não há informação para analisar COs com pedestres.

4.2.3.2 Interseção com Sinalização Semafórica: R. Cerro Corá x R. Pio XI

De acordo com a disposição geométrica mostrada na Figura 4.2a, a Figura 4.7a mostra a nomenclatura adotada para os movimentos veiculares e de pedestres. A Figura 4.7b mostra um diagrama com a indicação dos pontos de conflito (interseção de movimentos conflitantes).

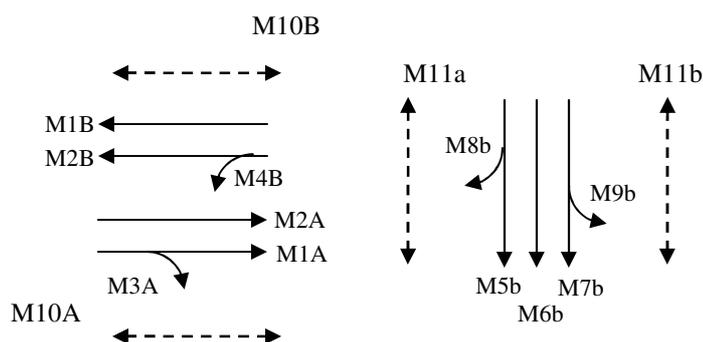


Figura 4.7a – Nomenclatura dos movimentos veiculares e de pedestres da interseção com sinalização semafórica: R. Cerro Corá x R. Pio XI

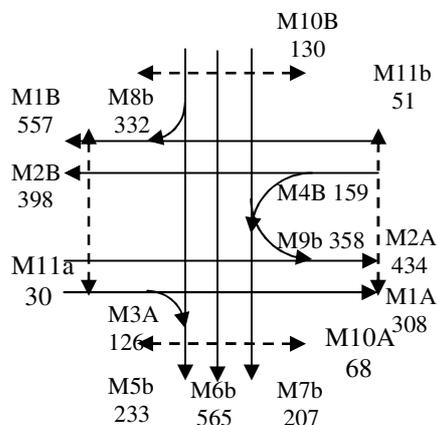


Figura 4.7b – Diagrama mostrando os pontos de conflito da interseção com sinalização semafórica: R. Cerro Corá x R. Pio XI

Os dados de fluxos foram contados, em v/h, a partir da filmagem. Os resultados estão mostrados na Tabela 4.13 a seguir e representados na Figura 4.7b.

*Tabela 4.13 – Dados de fluxos da interseção
com sinalização semafórica: R. Cerro Corá x R. Pio XI
no período das 18:30 às 19:30*

	R. Cerro Corá - B-C			R. Cerro Corá - C-B		
	Frente	Direita	Total	Frente	Esquerda	Total
Auto	651	115	766	862	143	1005
Caminhão	8	1	9	9	1	10
Ônibus	9	0	9	3	11	14
Moto	73	10	83	80	4	84
Total	741	126	867	954	159	1113

	R. Pio XI			
	Frente	Direita	Esquerda	Total
Auto	909	290	326	1525
Caminhão	9	7	2	18
Ônibus	14	0	8	22
Moto	72	35	22	129
Total	1004	332	358	1694

	M10A	M10B	Total	M11a	M11b	Total
Pedestres	68	130	198	30	51	81

A velocidade média e o desvio padrão das velocidades, em km/h, estão mostrados na Tabela 4.14 a seguir.

*Tabela 4.14 – Dados de velocidade (em fluxo livre) da interseção
com sinalização semafórica: R. Cerro Corá x R. Pio XI*

	R. Cerro Corá		R. Pio XI		
	μ_v	σ_v		μ_v	σ_v
B-C Faixa direita	36,92	8,70	Faixa esquerda	(*)	(*)
B-C faixa esquerda	43,32	6,84	Faixa do meio	43,71	8,79
C-B Faixa direita	33,52	6,73	Faixa direita	39,77	6,47
C-B Faixa esquerda	28,27	10,06			

(*) Como não foi possível coletar dados nessa faixa,
para a aplicação dos modelos foram adotados os mesmos valores da faixa da direita.

A Tabela 4.15a fornece os dados físicos da interseção, a Tabela 4.15b mostra os tempos semaforicos da interseção no período da pesquisa e a Tabela 4.15c apresenta os dados obtidos do programa HCS+.

Tabela 4.15a – Dados físicos da interseção

Rua Cerro Corá														
	W	Wi	Wout	Wmi	Win	Wo	Wmo	Rin	Rout	Rc	xin	xout	x	d
M1A	11													
M2A	11													
M3A										1,4				2,2
M1B	9													
M2B	9													
M4B		5,6	6	0,9	0	11	0	11	8	8	0	3	3	15,6
Rua Pio XI														
	W	Wi	Wout	Wmi	Win	Wo	Wmo	Rin	Rout	Rc	xin	xout	x	d
M5b	13													
M6b	13													
M7b	13													
M8b										1,5				2,4
M9b		11	9	0	6	5,6	1,8	8,9	13,25	8,9	4,35	0	4,35	18,3

Tabela 4.15b – Tempos semafóricos

Ciclo	90		
	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3
G	37	32	9
R	49	54	77
Ia	4	3	
Iv	0	1	
I	4	4	4
Int			4

Tabela 4.15c – Dados obtidos do programa HCS+

	Q (*)	S	u	Gq	Gf	Gu	X	te
M1A	276	1761	0,41	14,03068		22,96932	0,53	20,8
M2A	392	1761	0,41	14,03068		22,96932	0,53	20,8
M3A	116							
M1B	766	1507	0,41	37		0	1,21	129,9
M2B	108	517	0,41	12,93888		24,06112	1,21	129,9
M4B	155			12,42	0,6	25,58		
M5b	224	1497	0,36	32		0	0,94	39,2
M6b	521	1497	0,36	28,82582		3,17418	0,94	39,2
M7b	185	1497	0,36	25,64335		6,35665	0,94	39,2
M8b	297							
M9b	336							

(*) Os fluxos fornecidos ao programa HCS+ não contemplam motos.

onde u = taxa de verde (G/Tc).

A seguir, são apresentadas as tabelas de resultados, onde Q é o fluxo do movimento exposto, Qc é o fluxo conflitante, Ti é o tempo de exposição, $P[\text{conflito}]$ é a probabilidade de chegada

de veículo conflitante durante o tempo de exposição e a coluna “Risco” é o número médio de COs por veículo em porcentagem.

Novamente, quando não há nenhum termo de correção (como termos que ponderam o fator visibilidade ou probabilidade de chegadas livres), o valor da coluna “Risco” é igual ao valor da coluna “P[conflito]”. As tabelas mostram como o cálculo foi processado, permitindo identificar subtotais por aproximação e por estágio.

CO Angular para Movimentos Protegidos – Período: Vermelho (R), Dissipação de fila (Gq) e Restante de verde (Gu)

$$CO(\text{angular})/h = 0^5$$

CO Traseira para Movimentos Protegidos – Período: Vermelho (R) e Dissipação de fila (Gq)

- a) Método 1, (Ha e Berg): todos os veículos que chegam durante o período de vermelho e dissipação de fila⁶.

$$\text{Expressão utilizada: } CO(\text{traseira})/h = Q.p \text{ e } p = \frac{R + G_q}{T_c}$$

⁵ As COs angulares sofridas pelos movimentos protegidos (movimentos M1A/M2A) que são o fluxo oposto do movimento de conversão à esquerda M4B serão tratadas à parte.

⁶ O método aqui proposto difere do originalmente proposto por Ha e Berg pela parcela “-1”, conforme visto no Capítulo 2.

Tabela 4.16a – Método 1 para CO Traseira – Movimentos Protegidos em R e Gq

Estágio 1	Q (v/h)	p	CO traseira	Risco
M1A+M3A	434	70,03%	303,95	70,03%
M2A	434	70,03%	303,95	70,03%
Subtotal	868		607,90	70,03%
M1B	557	95,56%	532,24	95,56%
M2B	398	68,82%	273,91	68,82%
Subtotal	955		806,15	84,41%
Estágio 2	Q (v/h)	p	CO traseira	Risco
M5b+M8b	565	95,56%	539,89	95,56%
M6b	565	92,03%	519,96	92,03%
M7b+M9b	565	88,49%	499,98	88,49%
Subtotal	1695		1559,83	92,03%
Total	3518		2973,88	84,53%

b) Método 2a, HA e BERG corrigido por um termo empírico de visibilidade

$$\text{Expressões utilizadas: } CO(\text{traseira})/h = Q \cdot p \cdot P_{sv} \text{ e } (a)P_{sv} = \max\left\{\frac{D_p - D_v}{D_p}, 0\right\}$$

Tabela 4.16b – Método 2a para CO Traseira – Movimentos Protegidos em R e Gq

Estágio 1	Q (v/h)	Dp (m)	Dv (m)	Psv	p	CO traseira	Risco
M1A+M3A	434	39,43	100	0,00%	70,03%	0,00	0,00%
M2A	434	50,11	100	0,00%	70,03%	0,00	0,00%
Subtotal	868					0,00	0,00%
M1B	557	34,22	100	0,00%	95,56%	0,00	0,00%
M2B	398	26,80	100	0,00%	68,82%	0,00	0,00%
Subtotal	955					0,00	0,00%
Estágio 2	Q (v/h)	Dp (m)	Dv (m)	Psv	p	CO traseira	Risco
M5b+M8b	565	44,04	100	0,00%	95,56%	0,00	0,00%
M6b	565	50,80	100	0,00%	92,03%	0,00	0,00%
M7b+M9b	565	44,04	100	0,00%	88,49%	0,00	0,00%
Subtotal	1695					0,00	0,00%
Total	3518					0,00	0,00%

c) Método 2b, HA e BERG, corrigido pelo termo probabilístico de visibilidade $P[D_p > D_v]$.

$$\text{Expressões utilizadas: } CO(\text{traseira})/h = Q \cdot p \cdot P_{sv} \text{ e } (b)P_{sv} = P[D_p > D_v]$$

Tabela 4.16c – Método 2b para CO Traseira – Movimentos Protegidos em R e Gq

Estágio 1	Q (v/h)	Dp (m)	Dv (m)	E[Dp]	Var[Dp]	Psv	p	CO traseira	Risco
M1A+M3A	434	39,43	100	39,75	172,93	0,02%	70,03%	0,07	0,02%
M2A	434	50,11	100	49,81	131,61	0,04%	70,03%	0,11	0,03%
Subtotal	868							0,18	0,02%
M1B	557	34,22	100	34,84	100,01	0,00%	95,56%	0,00	0,00%
M2B	398	26,80	100	28,20	181,78	0,01%	68,82%	0,02	0,00%
Subtotal	955							0,02	0,00%
Estágio 2	Q (v/h)	Dp (m)	Dv (m)	E[Dp]	Var[Dp]	Psv	p	CO traseira	Risco
M5b+M8b	565	44,04	100	44,63	115,27	0,01%	95,56%	0,05	0,01%
M6b	565	50,80	100	51,87	241,72	0,36%	92,03%	1,89	0,33%
M7b+M9b	565	44,04	100	44,63	115,27	0,01%	88,49%	0,04	0,01%
Subtotal	1695							1,98	0,12%
Total	3518							2,18	0,06%

d) Método 2c, Ha e Berg, corrigido pelo termo probabilístico de visibilidade $P[\delta_R > \delta_A]$.

Expressões utilizadas: $CO(traseira)/h = Q \cdot p \cdot P_{sv}$ e $(c)P_{sv} = P[\delta_R > \delta_A]$.

Tabela 4.16d Método 2c para CO Traseira – Movimentos Protegidos em R e Gq

Estágio 1	Q (v/h)	δR (s)	E[δA]	Var[δA]	Psv	p	CO traseira	Risco
M1A+M3A	434	2	8,57	7,31	1,20%	70,03%	3,65	0,84%
M2A	434	2	6,50	2,66	0,67%	70,03%	2,03	0,47%
Subtotal	868						5,68	0,65%
M1B	557	2	9,50	6,21	0,43%	95,56%	2,26	0,41%
M2B	398	2	12,93	25,34	1,91%	68,82%	5,23	1,31%
Subtotal	955						7,49	0,78%
Estágio 2	Q (v/h)	δR (s)	E[δA]	Var[δA]	Psv	p	CO traseira	Risco
M5b+M8b	565	2	7,30	3,23	0,47%	95,56%	2,53	0,45%
M6b	565	2	6,39	4,39	2,20%	92,03%	11,42	2,02%
M7b+M9b	565	2	7,30	3,23	0,47%	88,49%	2,34	0,42%
Subtotal	1695						16,30	0,96%
Total	3518						29,47	0,84%

e) Método 3a, método de Ha e Berg, ponderado pela probabilidade de chegar um veículo conflitante (inspirado na idéia de TRAF-Safe para interseções não semaforizadas), com tempo de exposição igual ao tempo médio de espera por veículo (obtido do HCS+).

Expressão utilizada: $CO(traseira)/h = Q_s \cdot p \cdot (1 - e^{-q \cdot T_e})$ e $T_e = t_e$

Tabela 4.16e- Método 3a para CO Traseira – Movimentos Protegidos em R e Gq

Estágio 1	Qs (v/h)	Q (v/h)	te (HCS) (s)	p	P[conflito]	CO traseira	Risco
M1A+M3A	434	434	20,8	70,03%	91,85%	279,19	64,33%
M2A	434	434	20,8	70,03%	91,85%	279,19	64,33%
Subtotal	868					558,37	64,33%
M1B	557	557	129,9	95,56%	100,00%	532,24	95,56%
M2B	398	557	129,9	68,82%	100,00%	273,91	68,82%
Subtotal	955					806,15	84,41%
Estágio 2	Qs (v/h)	Q (v/h)	te (HCS) (s)	p	P[conflito]	CO traseira	Risco
M5b+M8b	565	565	39,2	95,56%	99,79%	538,74	95,35%
M6b	565	565	39,2	92,03%	99,79%	518,86	91,83%
M7b+M9b	565	565	39,2	88,49%	99,79%	498,92	88,30%
Subtotal	1695					1556,51	91,83%
Total	3518					2921,04	83,03%

- f) Método 3b, igual ao Método 3a, sendo o tempo de espera igual ao tempo médio de espera por veículo parado.

$$\text{Expressão utilizada: } CO(\text{traseira})/h = Q_s \cdot p \cdot (1 - e^{-q \cdot T_e}) \text{ e } T_e = t_{ep} = \frac{t_e}{p}.$$

Tabela 4.16f – Método 3b para CO Traseira – Movimentos Protegidos em R e Gq

Estágio 1	Qs (v/h)	Q (v/h)	te(HCS) (s)	p	P[conflito]	CO traseira	Risco
M1A+M3A	434	434	20,8	70,03%	97,21%	295,48	68,08%
M2A	434	434	20,8	70,03%	97,21%	295,48	68,08%
Subtotal	868					590,96	68,08%
M1B	557	557	129,9	95,56%	100,00%	532,24	95,56%
M2B	398	557	129,9	68,82%	100,00%	273,91	68,82%
Subtotal	955					806,15	84,41%
Estágio 2	Qs (v/h)	Q (v/h)	te(HCS) (s)	p	P[conflito]	CO traseira	Risco
M5b+M8b	565	565	39,2	95,56%	99,84%	539,03	95,40%
M6b	565	565	39,2	92,03%	99,88%	519,31	91,91%
M7b+M9b	565	565	39,2	88,49%	99,90%	499,51	88,41%
Subtotal	1695					1557,84	91,91%
Total	3518					2954,95	84,00%

- g) Método 4a, igual ao Método 3b, ponderado por um fator empírico de visibilidade.

$$\text{Expressões utilizadas: } CO(\text{traseira})/h = Q_s \cdot p \cdot (1 - e^{-q \cdot T_e}) \cdot P_{sv} \text{ e } (a)P_{sv} = \max\left\{\frac{D_p - D_v}{D_p}; 0\right\}$$

Tabela 4.16g – Método 4a para CO Traseira – Movimentos Protegidos em R e Gq

Estágio 1	Qs (v/h)	Q (v/h)	Dp (m)	Dv (m)	te(HCS) (s)	Psv	p	P[conflito]	CO traseira	Risco
M1A+M3A	434	434	39,43	100	20,80	0,00%	70,03%	97,21%	0,00	0,00%
M2A	434	434	50,11	100	20,80	0,00%	70,03%	97,21%	0,00	0,00%
Subtotal	868								0,00	0,00%
M1B	557	557	34,22	100	129,90	0,00%	95,56%	100,00%	0,00	0,00%
M2B	398	557	26,80	100	129,90	0,00%	68,82%	100,00%	0,00	0,00%
Subtotal	955								0,00	0,00%
Estágio 2	Qs	Q (v/h)	Dp (m)	Dv (m)	te(HCS) (s)	Psv	p	P[conflito]	CO traseira	Risco
M5b+M8b	565	565	44,04	100	39,20	0,00%	95,56%	99,84%	0,00	0,00%
M6b	565	565	50,80	100	39,20	0,00%	92,03%	99,88%	0,00	0,00%
M7b+M9b	565	565	44,04	100	39,20	0,00%	88,49%	99,90%	0,00	0,00%
Subtotal	1695								0,00	0,00%
Total	3518								0,00	0,00%

h) Método 4b, igual ao Método 3b, ponderado por pelo fator probabilístico de visibilidade $P[D_p > D_v]$.

Expressões utilizadas: $CO(traseira) / h = Q_s \cdot p \cdot (1 - e^{-qTe}) \cdot P_{sv}$ e $(b)P_{sv} = P[D_p > D_v]$.

Tabela 4.16h – Método 4b para CO Traseira – Movimentos Protegidos em R e Gq

Estágio 1	Qs (v/h)	Q (v/h)	Dp (m)	Dv (m)	E[Dp]	Var[Dp]	Psv	te(HCS)	p	P[conflito]	CO traseira	Risco
M1A+M3A	434	434	39,43	100	39,75	172,93	0,02%	20,80	70,03%	97,21%	0,07	0,02%
M2A	434	434	50,11	100	49,81	131,61	0,04%	20,80	70,03%	97,21%	0,11	0,02%
Subtotal	868										0,18	0,02%
M1B	557	557	34,22	100	34,84	100,01	0,00%	129,90	95,56%	100,00%	0,00	0,00%
M2B	398	557	26,80	100	28,20	181,78	0,01%	129,90	68,82%	100,00%	0,02	0,00%
Subtotal	955										0,02	0,00%
Estágio 2	Qs (v/h)	Q (v/h)	Dp (m)	Dv (m)	E[Dp]	Var[Dp]	Psv	te(HCS)	p	P[conflito]	CO traseira	Risco
M5b+M8b	565	565	44,04	100	44,63	115,27	0,01%	39,20	95,56%	99,84%	0,05	0,01%
M6b	565	565	50,80	100	51,87	241,72	0,36%	39,20	92,03%	99,88%	1,88	0,33%
M7b+M9b	565	565	44,04	100	44,63	115,27	0,01%	39,20	88,49%	99,90%	0,04	0,01%
Subtotal	1695										1,97	0,12%
Total	3518										2,17	0,06%

i) Método 4c, igual ao Método 3b, ponderado por pelo fator probabilístico de visibilidade $P[\delta_R > \delta_A]$.

Expressões utilizadas: $CO(traseira) / h = Q_s \cdot p \cdot (1 - e^{-qTe}) \cdot P_{sv}$ e $(c)P_{sv} = P[\delta_R > \delta_A]$.

Tabela 4.16i – Método 4c para CO Traseira – Movimentos Protegidos em R e Gq

Estágio 1	Qs (v/h)	Q (v/h)	dR (s)	Dv (m)	E[dA]	Var[dA]	Psv	te(HCS)	p	P[conflito]	CO traseira	Risco
M1A+M3A	434	434	2	100	8,57	7,31	1,20%	20,80	70,03%	97,21%	3,55	0,82%
M2A	434	434	2	100	6,50	2,66	0,67%	20,80	70,03%	97,21%	1,97	0,45%
Subtotal	868										5,52	0,64%
M1B	557	557	2	100	9,50	6,21	0,43%	129,90	95,56%	100,00%	2,26	0,41%
M2B	398	557	2	100	12,93	25,34	1,91%	129,90	68,82%	100,00%	5,23	1,31%
Subtotal	955										7,49	0,78%
Estágio 2	Qs	Q	dR	Dv	E[dA]	Var[dA]	Psv	te(HCS)	p	P[conflito]	CO traseira	Risco
M5b+M8b	565	565	2	100	7,30	3,23	0,47%	39,20	95,56%	99,84%	2,53	0,45%
M6b	565	565	2	100	6,39	4,39	2,20%	39,20	92,03%	99,88%	11,41	2,02%
M7b+M9b	565	565	2	100	7,30	3,23	0,47%	39,20	88,49%	99,90%	2,34	0,41%
Subtotal	1695										16,28	0,96%
Total	3518										29,29	0,83%

CO Traseira para Movimentos Protegidos – Período: Restante de Verde (Gu)

- a) Método 1, chegadas de veículos conflitantes durante o tempo de exposição (tempo de desaceleração do veículo que faz a manobra de conversão).

$$\text{Expressões utilizadas: } CO(\text{traseira})/h = Q \cdot \frac{G_u}{T_c} \cdot \left[\left(1 - e^{-\tilde{q}_{Tc} T_{f_{LT}}} \right) P_{LT} + \left(1 - e^{-\tilde{q}_{Tc} T_{f_{RT}}} \right) P_{RT} \right]$$

$$\tilde{q}_{Tc} = q_{Tc} \left(1 - \frac{v_c}{v} \right)$$

Tabela 4.17 – Método 1 para CO Traseira – Movimentos Protegidos em Gu

Estágio 1	Qs	Gu	TfLT	PLT	TfRT	PRT	QTc	QTcLT	QTcRT	P[conf]LT	P[conf]RT	CO traseira	Risco
M1A+M3A	434	22,97			4,47	29,03%	308		221		23,99%	7,71	1,78%
M2A	434												
Subtotal	868											7,71	0,89%
M1B	557												
M2B+M4B	557	24,06	2,33	28,55%			398	47		2,99%		1,27	0,23%
Subtotal	1114											1,27	0,11%
Estágio 2	Qs	Gu	TfLT	PLT	TfRT	PRT	QTc	QTcLT	QTcRT	P[conf]LT	P[conf]RT	CO traseira	Risco
M5b+M9b	565	0,00	3,35	60,58%			233	16		1,49%		0,00	0,00%
M6b	565												
M7b+M8b	565	6,36			4,89	61,60%	207		151		18,54%	4,56	0,81%
Subtotal	1695											4,56	0,27%
Total	3677											13,54	0,37%

CO Angular para Movimentos Permitidos – Período: Vermelho (R) e Dissipação de fila (Gq)

$$CO(\text{angular})/h = 0$$

CO Angular para Movimentos Permitidos – Período: Restante de Verde (Gu)

$$\text{Expressão utilizada: } CO(\text{angular})/h = Q_{LT} \cdot (1 - e^{-q_o T})$$

Tabela 4.18a – Método 1a para CO Angular – Movimentos Permitidos em Gu

Estágio 1	QLT (v/h)	Qo (v/h)	T (s)	P[conflito]	CO angular	Risco
M4B	159	742	7,57	78,99%	125,60	78,99%
Total	159				125,60	78,99%

$$\text{Expressão utilizada: } CO(\text{angular}) = Q_{LT} (1 - e^{-q_o \cdot 0,5T})$$

Tabela 4.18b – Método 1b para CO Angular – Movimentos Permitidos em Gu

Estágio 1	QLT	Qo	T	P[conflito]	CO angular	Risco
M4B	159	742	3,79	54,17%	86,13	54,17%
Total	159				86,13	54,17%

CO Angular para Movimentos de Fluxo Oposto a Movimentos Permitidos – Período: Vermelho (R) e Dissipação de fila (Gq)

$$CO(\text{angular})/h = 0$$

CO Angular para Movimentos de Fluxo Oposto a Movimentos Permitidos – Período: Restante de Verde (Gu)

$$\text{Expressão utilizada: } CO(\text{angular})/h = Q \cdot \frac{G_u}{T_c} \cdot (1 - e^{-q_{LT} T})$$

Tabela 4.19 – Método 1a para CO Angular – Movimentos Opostos em Gu, não considerando P[F]

Estágio 1	Q (v/h)	Gu (s)	QLT (v/h)	T (s)	P[conflito]	CO angular	Risco
M1A	308	22,97	159	1,66	7,06%	5,55	1,80%
M2A	434	22,97	159	1,41	6,05%	6,70	1,54%
Total	742					12,25	1,65%

O Método 1b para CO angular do movimento de fluxo oposto diante do movimento de conversão à esquerda permitida não será aplicado devido a não disponibilidade do valor de X_{LT} .

CO Traseira para Movimentos Permitidos

Expressão utilizada: $CO(traseira) / h = Q_{LT} (1 - e^{-t_e q}) P_{sv}, P_{sv} = P[D_p > D_v]$

Tabela 4.20a – Método 1a para CO Traseira – Movimentos Permitidos

Estágio 1	QLT (v/h)	Te (s)	Q (v/h)	Psv	P[conflito]	CO traseira	Risco
M4B	159	129,9	557	0,01%	100,00%	0,01	0,01%
Total	159					0,01	0,01%

Expressão utilizada: $CO(traseira) / h = Q_{LT} (1 - e^{-t_e q}) P[D_p > D_v] + (1 - e^{-t_p (q_T - q_{LT})})$

Tabela 4.20b – Método 1b para CO Traseira – Movimentos Permitidos, considerando o risco de colisão traseira devido à desaceleração até a parada do veículo que quer fazer a conversão à esquerda

Estágio 1	QLT	Te	Q	Psv	P[conflito]	tp	P1[conflito]	CO traseira	Risco
M4B	159	129,9	557	0,01%	100,00%	0,3	2,18%	3,48	2,19%
Total	159							3,48	0,00%

CO Traseira para Movimentos de Fluxo Oposto a Movimentos Permitidos

Expressão utilizada: $CO(traseira) / h = Q \cdot \frac{G_u}{T_c} (1 - e^{-T_{q_{LT}}}) (1 - e^{-T_{pq}})$

Tabela 4.21 – Método para CO Traseira – Movimentos Opostos

Estágio 1	Q (v/h)	Gu (s)	QLT (v/h)	T (s)	P1	Tp	P2	CO traseira	Risco (%)
M1A	308	22,97	159	1,66	7,06%	5,69	38,54%	2,14	0,69%
M2A	434	22,97	159	1,41	6,05%	6,33	53,37%	3,58	0,82%
Total	742							5,71	0,77%

P1 é a probabilidade de CO angular (evento primário) e P2 é a probabilidade de CO traseira (evento secundário) sendo o tempo de exposição igual ao tempo de parada do veículo da frente.

CO Angular no Entreverdes

Expressão utilizada:

$$CO(\text{angular})_{i_i} / h = Q_i \cdot \frac{0,5 \cdot I_{ai}}{T_c} \cdot (P[F] \cdot P[td_I > \Delta_1] + (1 - P[F]) \cdot P[td_I > \Delta_2])$$

Tabela 4.22 – Método para CO Angular – Entreverdes

Estágio 1	Conflito	Qi (v/h)	Z (m)	Ze (m)	P[tdI>Δ1]	P[tdI>Δ2]	P[F]	P[conflito]	CO angular	Risco
M1A	x b	308	17	16,2	84,75%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00	0,00%
M3A	x b	126	8,2	12	67,65%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00	0,00%
M2A	x b	434	17	13,4	98,26%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00	0,00%
Subtotal		868							0,00	0,00%
M1B	x b	557	15	6	99,09%	0,22%	0,00%	0,23%	0,03	0,01%
M2B	x b	398	15	9	89,15%	5,66%	0,00%	5,66%	0,50	0,13%
Subtotal		955							0,53	0,06%
M4B	x b	159	21,6	9	91,18%	24,62%	0,00%	24,62%	0,87	0,55%
Subtotal		159							0,87	0,55%
Estágio 2	Conflito	Qi (v/h)	Z (m)	Ze (m)	P[tdI>Δ1]	P[tdI>Δ2]	P[F]	P[conflito]	CO angular	Risco
M5b	x B	233	12	6	99,85%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00	0,00%
M5b	x A	233	19	6	99,94%	0,08%	0,00%	0,08%	0,01	0,00%
M6b	x B	565	12	6	99,97%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00	0,00%
M6b	x A	565	19	6	99,97%	0,05%	0,00%	0,05%	0,01	0,00%
M7b	x B	207	12	6	99,85%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00	0,00%
M7b	x A	207	19	6	99,94%	0,08%	0,00%	0,08%	0,00	0,00%
M8b	x B	332	8,4	9	84,94%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00	0,00%
M9b	x B	358	12	6	99,85%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00	0,00%
M9b	x A	358	24,3	12	99,39%	0,06%	0,00%	0,06%	0,00	0,00%
Subtotal		1695							0,02	0,00%
Total		2722							0,89	0,03%

CO Traseira no Entreverdes

$$\text{Expressão utilizada: } CO(\text{traseira})_{ii} / h = Q_i \cdot \frac{0,5 \cdot I_{ai}}{T_c} \cdot P[td_{Ia} > 0]$$

Tabela 4.23 – Método para CO Traseira –Entreverdes

Estágio 1	Q (v/h)	Ia (s)	E[dtIa]	Var[tdIa]	P[tdIa>0]	CO traseira	Risco
M1A+M3A	434	4	-1,27927	0,164415	0,33%	0,03	0,00
M2A	434	4	-0,98098	0,101628	0,38%	0,04	0,00
Subtotal	868					0,07	0,00
M1B	557	4	-1,32534	0,113051	0,08%	0,01	0,00
M2B+M4B	557	4	-1,58763	0,252605	0,32%	0,04	0,00
M1B+M2B	955					0,04	0,00
M4B	159					0,01	0,00
Estágio 2	Q (v/h)	Ia (s)	E[dtIa]	Var[tdIa]	P[tdIa>0]	CO traseira	Risco
M5b+M9b	591	3	-0,01309	0,104485	48,16%	4,74	0,01
M6b	565	3	0,183753	0,192852	68,11%	6,41	0,01
M7b+M8b	539	3	-0,01309	0,104485	48,16%	4,33	0,01
Subtotal	1695					15,48	0,01
Total	3677					15,60	0,00

CO de Pedestres – Movimentos Protegidos – Período: Verde do Pedestre (G)

$$CO(\text{pedestre})/h = 0$$

CO de Pedestres – Movimentos Concorrentes – Conversões com Fluxo Oposto

- a) Método 1a, proposto por ZHANG e PREVEDOUROS (2003), avaliado o risco por pedestre.

$$\text{Expressão utilizada: } CO(\text{pedestre})/h = Q_{ped} \cdot OCC_{pedu} \cdot e^{-Tq_0}$$

Tabela 4.24a – Método para CO de Pedestres – Conversão à esquerda com Fluxo Oposto – Método de ZHANG e PREVEDOUROS

	Qped	Gq	Gped	QpedG	OCCpedg	OCCpedu	Tzc	Qo	CO ped	Risco
M10A	68	14,03	37	165	8,27%	6,70%	9,17	742	0,69	1,01%

b) Método 1b, proposto avaliando risco do pedestre pela conversão.

$$\text{Expressão utilizada: } CO(\text{pedestre})/h = Q_c \cdot OCC_{pedu}$$

Tabela 4.24b – Método para CO de Pedestres – Conversão à esquerda com Fluxo Oposto

	Qped	Qc	OCCpedu	CO ped	Risco
M10A	68	159	6,70%	10,66	15,67%

CO de Pedestres – Movimentos Concorrentes – Conversões sem Fluxo Oposto

a) Método 1a, baseado em ZHANG e PREVEDOUROS (2003), avaliado risco por pedestre.

$$\text{Expressão utilizada: } CO(\text{pedestre})/h = Q_{ped} \cdot OCC_{pedg} \cdot (1 - e^{-tq})$$

Tabela 4.25a – Método 1a para CO de Pedestres – Conversões sem Fluxo Oposto por pedestre

	Qped	Gped	QpedG	OCCpedg	Tzc	Q	P[conflito]	CO ped	Risco
M11a	30	32	84	4,22%	10,92	332	63,47%	0,80	2,68%
M11b	51	32	143	7,17%	10,92	358	66,23%	2,42	4,75%
M10A	68	37	165	8,27%	9,17	126	27,45%	1,54	2,27%

b) Método 1b, proposto avaliando risco do pedestre pela conversão.

$$\text{Expressão utilizada: } CO(\text{pedestre})/h = Q_c \cdot OCC_{pedg}$$

Tabela 4.25b – Método 1b para CO de Pedestres – Conversões sem Fluxo Oposto por conversão

	Qped	Qc	OCCpedg	CO ped	Risco
M11a	30	332	4,22%	14,01	46,69%
M11b	51	358	7,17%	25,68	50,34%
M10A	68	126	8,27%	10,42	15,32%

Resumo dos Resultados para a Intersecção com Sinalização Semafórica: Cerro Corá x Pio XI

A seguir é apresentado um resumo dos resultados obtidos com a aplicação dos modelos propostos por meio da Figura 4.8, sendo que os resultados são indicados da seguinte forma: $nnn^{(x)}$ onde “nnn” é o resultado obtido e (x) é o método. “R” é o período de vermelho, “Gq” é o período de dissipação de fila, “Gu” é o período de restante de verde, “I” é o período de entreverdes e “O” significa “fluxo oposto”.

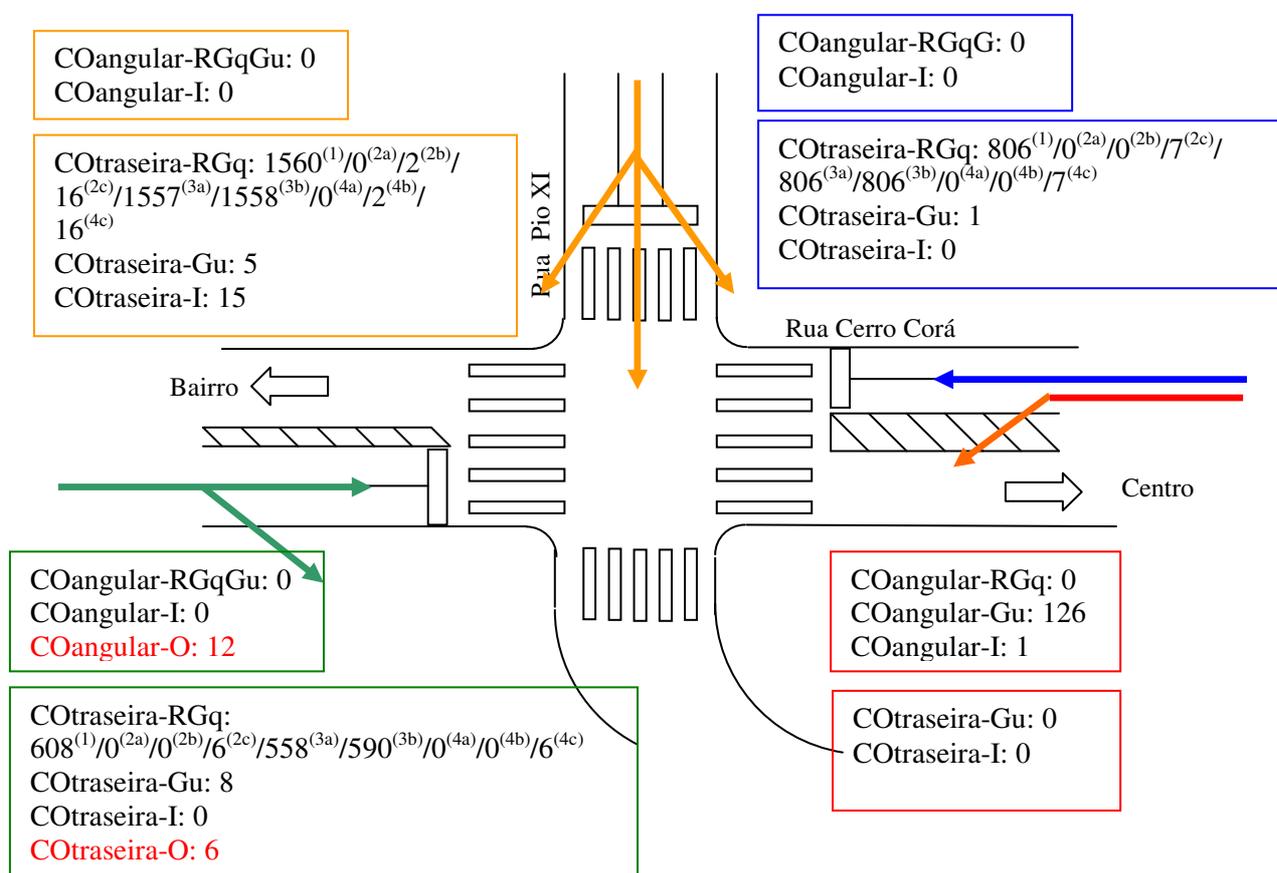


Figura 4.8 – Resultados obtidos com a aplicação dos modelos

Visando uma visualização alternativa com melhor identificação dos métodos, os mesmos resultados compilados na Figura 4.10 estão mostrados nas Tabelas 4.28a, 4.28b, 4.28c, 4.28d e 4.28e.

Novamente não são apresentados os dados relativos às COs com pedestres porque a informação dos diagnóstico não permite analisar os problemas específicos dos pedestres.

Tabela 4.28a – Cerro Corá – B-C (movimentos M1A/M2A/M3A)

Tipo de CO	Período: R&Gq		Período: Gu		Período: I	
	Método	CO	Método	CO	Método	CO
Angular	1- protegido	0	1-protegido	0	1- aleatório	0
Traseira	1-total de paradas	608	1-desaceleração	8	1- aleatório	0
	2a-total de paradas, Dv empírico	0	---	---	---	---
	2b-total de paradas, Dv teórico	0	---	---	---	---
	2c-total de paradas, Treação	6	---	---	---	---
	3a-total de paradas, conflito espera	558	---	---	---	---
	3b-total de paradas, conflito parado	590	---	---	---	---
	4a- conflito parado, Dv empírico	0	---	---	---	---
	4b- conflito parado, Dv teórico	0	---	---	---	---
	4c- conflito parado, Treação	6	---	---	---	---

Tabela 4.28b – Cerro Corá – C-B (Movimentos protegidos M1B/M2B)

Tipo de CO	Período: R&Gq		Período: Gu		Período: I	
	Método	CO	Método	CO	Método	CO
Angular	1- protegido	0	1-protegido	0	1-aleatório	1
Traseira	1-total de paradas	806	1-desaceleração	1	1-aleatório	0
	2a-total de paradas, Dv empírico	0	---	---	---	---
	2b-total de paradas, Dv teórico	0	---	---	---	---
	2c-total de paradas, Treação	7	---	---	---	---
	3a-total de paradas, conflito espera	806	---	---	---	---
	3b-total de paradas, conflito parado	806	---	---	---	---
	4a- conflito parado, Dv empírico	0	---	---	---	---
	4b- conflito parado, Dv teórico	0	---	---	---	---
	4c- conflito parado, Treação	7	---	---	---	---

Tabela 4.28c – Cerro Corá – C-B (Movimento permitido M4B)

Tipo de CO	Período: R&Gq		Período: Gu		Período: I	
	Método	CO	Método	CO	Método	CO
Angular	---	---	1- Exposição conversão	126	1-aleatório	1
Traseira	---	---	1- Exposição desaceleração	0	1-aleatório	0

Tabela 4.28d – Cerro Corá – C-B (Movimento oposto M1A/M2A)

Tipo de CO	Período: R&Gq		Período: Gu		Período: I	
	Método	CO	Método	CO	Método	CO
Angular	---	---	1-Exposição cruzamento	12	---	---
Traseira	---	---	1-Exposição CO secundário	6	---	---

Tabela 4.28e – Pio XI (Movimentos M5b/M6b/M7b/M8b/M9b)

Tipo de CO	Período: R&Gq		Período: Gu		Período: I	
	Método	CO	Método	CO	Método	CO
Angular	1- protegido	0	1-protegido	0	1-aleatório	0
Traseira	1-total de paradas	1560	1-desaceleração	5	1-aleatório	15
	2a-total de paradas, Dv empírico	0	---	---	---	---
	2b-total de paradas, Dv teórico	2	---	---	---	---
	2c-total de paradas, Treação	16	---	---	---	---
	3a-total de paradas, conflito espera	1557	---	---	---	---
	3b-total de paradas, conflito parado	1558	---	---	---	---
	4a- conflito parado, Dv empírico	0	---	---	---	---
	4b- conflito parado, Dv teórico	2	---	---	---	---
	4c- conflito parado, Treação	16	---	---	---	---

Com relação aos modelos propostos, pode-se observar que vários modelos apresentam resultados numéricos semelhantes, o que permite que eles sejam novamente agrupados na comparação feita a seguir.

Comparação do diagnóstico x estimativa de oportunidades de conflito para a Interseção com Sinalização Semafórica: Cerro Corá x Pio XI

O diagnóstico qualitativo, composto pelas informações fornecidas pela CET/SP, dados de acidentes e observações feitas durante a pesquisa de campo, pode ser consolidado nas duas observações da Tabela 4.29 a seguir:

Tabela 4.29- Síntese do Diagnóstico dos Especialistas da CET/Sp na Interseção com Sinalização Semafórica: Cerro Corá x Pio XI

<p>Observação 1: Problemas nas CO Angulares das conversões permitidas</p> <p>Os acidentes ocorrem em sua maioria na conversão à esquerda. Os movimentos de conversão à esquerda não são proibidos e até mesmo os ônibus realizam a conversão à esquerda da R. Cerro Corá para a R. Pio XI, provocando problemas de lentidão e acidentes, inclusive fatais (moto e ônibus). Os registros de acidentes de 2005/2006 não mostraram os eventos mencionados para acidentes com vítimas. Indica que as COs angulares deveriam ser o problema relevante no local. Neste caso, apenas as conversões à esquerda permitidas gerariam CO angulares e o diagnóstico seria confirmado mas de forma genérica (como em qualquer outra interseção com estágio de conversões permitidas). Não há indicação clara de que o nível de CO angulares é um problema de segurança grave (o que é compatível com a ausência de acidentes com vítimas em 2005/2006). No entanto, houve um acidente sem vítima observado no dia da filmagem (dois veículos na conversão à esquerda colidiram lateralmente, um ônibus e um auto). Observa-se que o raio de giro é restritivo para ônibus na conversão à esquerda.</p>
<p>Observação 2: Implantação de estágio para conversões resolve COs Angulares</p> <p>A proposta da CET/SP para o local é a criação de um estágio específico no semáforo para a conversão à esquerda da Cerro Corá para a R. Pio XI, o quarto estágio da interseção, pintura no solo de setas de conversão à esquerda, rebalçamento com pintura de linha dupla amarela. A proibição da conversão em questão não é possível, pois não há vias que sirvam de alternativa para o citado movimento. A proposta confirmaria a indicação que as COs angulares deveriam ser o problema relevante no local e a re-análise normalmente indicaria que a proposta seria considerada eficaz para eliminar as COs angulares, de forma genérica (como em qualquer outra interseção em que um estágio de conversões permitidas é transformado em um estágio de conversões protegidas).</p>

A seguir estas observações são novamente comparadas com os resultados que poderiam ser inferidos das estimativas de oportunidades de conflito, nas diversas opções consideradas.

A Tabela 4.30 a seguir apresenta a relação que pode ser identificada entre cada grupo de modelos e as duas observações do diagnóstico.

Tabela 4.30 – Relação entre o diagnóstico e o resultado obtido pelos modelos de COs na Interseção com Sinalização Semafórica: Cerro Corá x Pio XI

	Observação 1: Problemas nas CO Angulares das conversões permitidas	Observação 2: Implantação de estágio para conversões resolve COs Angulares	Avaliação
CO angular – Movimentos Protegidos.	Não se aplica.	Não se aplica.	Não há indicação de problemas. O método assume que não há problemas quanto a CO angulares.
CO angular – Movimentos Permitidos.	O problema é detectado de forma genérica mas sem indicar uma magnitude acentuada.	O problema é detectado e a proposta é avaliada como potencialmente eficaz de forma genérica.	O problema é detectado genericamente. Sem haver uma referência, não há como saber se o resultado obtido, em termos de frequência de COs, representa risco significativo ou não.
CO traseira – Métodos baseados nas propostas originais de HA-BERG.	Não se aplica.	Não se aplica.	A indicação parece equivocada. O problema não é indicado como relevante. Não é indicado como relevante por outros dados (acidentes, ...). Os métodos indicam problema relevante, com uma grande frequência.
CO traseira – Método que combina HA-BERG com a probabilidade de chegada de veículo conflitante (adaptando o método de TRAF-Safe para semáforos).	Não se aplica.	Não se aplica.	A indicação parece equivocada. O problema não é indicado como relevante. Não é indicado como relevante por outros dados (acidentes, ...). Os métodos indicam problema relevante. O resultado numérico é semelhante ao obtido pelo método de HA-BERG pois a probabilidade de chegada de veículo conflitante é praticamente 1.
CO traseira – Métodos baseados nas propostas originais de HA-BERG, com consideração da visibilidade	Não se aplica.	Não se aplica.	Indica conclusão adequada. O problema não é indicado como relevante. Não é indicado como relevante por outros dados (acidentes, ...). Os métodos corroboram que o problema não é relevante, corrigindo adequadamente a conclusão de métodos que não consideram o fator visibilidade.
CO angular no entreverdes	Não se aplica.	Não se aplica.	Indica conclusão adequada. O método não revelou nenhuma deficiência de entreverdes quanto a COs angulares.
CO traseira no entreverdes.	Não se aplica.	Não se aplica.	Indica conclusão adequada mas o método revelou deficiência de entreverdes quanto a CO traseira para a aproximação da Pio XI. Novamente, por falta de referência, não se pode afirmar quão significativa é essa deficiência.
CO com pedestres	Não se aplica.	Não se aplica.	Não há informação para analisar COs com pedestres.

4.3 AVALIAÇÃO E CONCLUSÕES SOBRE VALIDAÇÃO

Os resultados obtidos são certamente limitados para uma validação conclusiva dos métodos propostos. No entanto, algumas indicações podem ser sugeridas.

Como comentário geral, deve-se notar que a frequência de COs não parecem ser diretamente comparáveis em valor absoluto. Os resultados mostram que existe um problema de escala que não permite a simples comparação de valores. Os valores de alguns tipos de COs naturalmente são menos frequentes, por exemplo, quando se impõe uma condição adicional para sua ocorrência. No entanto, se a condição adicional corresponde a um maior risco, a redução na frequência não corresponde a uma redução de insegurança.

Por exemplo, a aplicação dos métodos não revelou com igual destaque o conflito angular da conversão à esquerda permitida da Cerro Corá para Pio XI, comparando os números absolutos, em contra-posição ao diagnóstico qualitativo. Este fato pode ocorrer porque os métodos não levam em conta outros fatores tais como o tamanho dos veículos, raios de giro, manobras de ultrapassagem, etc., fatos esses observados durante a pesquisa de campo. Uma outra característica não agregada aos métodos é a interferência gerada pelas manobras de estacionamento que ocorrem com frequência na interseção. No entanto, a própria complexidade da manobra é distinta e envolve grau de risco intrinsecamente maior.

Por outro lado, vários métodos fornecem valores numéricos semelhantes, sugerindo que estão distinguindo diferenciações pouco relevantes.

As estimativas de COs angulares para movimentos prioritários em interseções com sinalização de prioridade consideraram diversos métodos que distinguiam a agregação dos fluxos e os resultados obtidos foram essencialmente semelhantes. Mesmo a distinção entre exposição pelo tempo de parada ou pelo tempo de manobra altera o resultado quantitativo sem mudar o resultado qualitativo. Na medida que este padrão de resultados possa ser generalizado, pode-se depreender que este aspecto tem menor importância e pode ser definido por outros critérios, como a simplicidade.

Para COs traseiras em interseções com sinalização de prioridade, os diferentes critérios para definir o tempo de exposição (atraso de Adams, atraso médio por veículo ou por veículo parado) forneceram resultados similares. No caso específico do atraso médio por veículo e atraso médio por veículo parado, os resultados foram idênticos devido à condição de saturação da via secundária. Entretanto, a adição do requisito de deficiência de visibilidade para ter uma oportunidade de conflito traseira torna as estimativas bastante reduzidas.

Para COs traseiras em interseções com sinalização semafórica, vários métodos fornecem valores numéricos semelhantes mas existem dois grupos de valores. Os métodos que desprezam o aspecto visibilidade fornecem valores altos (entre estes os métodos originais do TRAF-Safe e de HA e BERG) e os métodos que adicionam este aspecto fornecem valores baixos. Portanto, a mesma conclusão poderia ser obtida.

Para COs com pedestres em travessias de interseções com sinalização de prioridade foram consideradas diversas formas de estimativa com tempo de travessia integral, exposição por zona de conflito e exposição por faixa, novamente obtendo-se resultados essencialmente semelhantes. Outra vez, na medida que este padrão de resultados possa ser generalizado, a distinção pode ser considerada menos relevante e pode-se optar entre estas formas alternativas com base em outros critérios, como a simplicidade.

Todos estes casos dependem basicamente de fluxos, não diferindo de forma fundamental de outros métodos do tipo “produto de fluxos”. Interseções com altos fluxos resultam, necessariamente, em valores numéricos expressivos. Interseções com baixos fluxos resultam em um número menor de COs. A coluna “Risco” nas tabelas de resultados apresentados tentam eliminar o fator “fluxo”, avaliando o número médio de COs por veículo. Contudo, mesmo assim, métodos como o TRAF-Safe ainda indicarão maiores índices de risco nas interseções com maior fluxo do aquelas com menor fluxo.

Em contraposição, os resultados obtidos para COs traseiras mostram diferentemente que, se não forem considerados fatores relacionados com deficiências particulares da interseção, os métodos podem indicar problemas inexistentes (desde que apresentem altos fluxos). Sem levar em conta o fator de visibilidade, os métodos de TRAF-Safe e Ha-Berg resultaram em valores expressivos de COs traseiras. Introduzindo o fator visibilidade, o número de COs foram reduzidos ao mínimo, o que está mais compatível com o diagnóstico e observações

qualitativas. Assim, da mesma forma, dever-se-ia introduzir o fator “intervisibilidade” para COs angulares ou com pedestres em interseções semaforizadas ou não (aspecto não tratado no presente trabalho).

Na aplicação realizada, diversos aspectos incorporados nos modelos propostos (como o requisito de chegadas livres ou de brechas de risco, a distinção entre o risco de COs angulares prioritários e secundários ou na travessia em brechas ou nos entreverdes) não puderam ser adequadamente analisadas quanto à validade. Embora possa ser ampliado o esforço de observação de campo (analisando mais locais e mais períodos, com variação conveniente nos problemas de segurança existentes), suspeita-se que a necessidade de melhores dados sobre os acidentes ocorridos pode ser fundamental para obter uma validação mais conclusiva.

Em termos de diagnóstico qualitativo, a utilização de modelos de oportunidades de conflito de tráfego identifica um número significativamente maior de questões e aponta também os aspectos observados nos estudos utilizados para comparação. Novamente, e porque a simples comparação das frequências em número absoluto pode ser enganosa, destaca-se a necessidade de ponderar o risco correspondente a cada tipo de conflito para melhor avaliação.

Vale destacar, no entanto, que a aplicação do método pode revelar deficiências difíceis de ser detectada por meio de diagnósticos qualitativos: a possível deficiência com relação a COs traseiras no entreverdes da Pio XI. Isso pode indicar que o amarelo dessa aproximação seja insuficiente, sendo uma recomendação aumentá-lo para 4 segundos. O mesmo pode ser dito da análise de risco nos entreverdes das travessias de pedestres (como observado na caracterização na insegurança durante o intermitente do estágio de pedestres).

Um outro ponto a ressaltar é a interação entre as estimativas de oportunidades de conflito e os modelos de análise da operação do tráfego. Esta vinculação faz com que a qualidade dos modelos de análise da operação tenham influência sobre os modelos de análise da segurança (uma integração que se quis buscar). Por exemplo, o grau de saturação previsto pelo HCS+ não parece totalmente correspondente com a situação operacional observada e afeta a análise da segurança com diversos critérios (como os que usam atrasos ou capacidades). Outro fato relevante a ser observado é que o HCS+ trata do tempo de espera de movimentos permitidos durante o período de restante de verde *Gu* em conjunto com os movimentos compartilhados, sem permitir sua análise em separado. Esses movimentos sofrem paradas e atrasos adicionais

no período G_u por que só conseguem fazer a manobra aproveitando-se de brechas no fluxo oposto. A espera em G_q , por sua vez, é peculiar dos movimentos permitidos (não dos demais).

Como a integração é considerada importante, a observação deve ser traduzida na necessidade de uma calibração adequada dos modelos de análise da operação como requisito para obter resultados adequados na estimativa de oportunidades de conflito. Outra opção seria ajustar os resultados a partir da observação da operação em campo.

Concluindo, apesar de necessitar de aprimoramentos em vários aspectos, os métodos baseados no conceito de oportunidades de conflito de tráfego podem ser ferramentas potencialmente úteis para complementar ou ratificar diagnósticos qualitativos.

5. CONCLUSÕES

A seguir são apresentadas as conclusões obtidas no presente trabalho, bem como a identificação de aspectos não tratados ou que precisam ser aprimorados ou podem ser analisados em trabalhos futuros.

O objetivo buscado com a aplicação dos modelos de oportunidades de conflito foi claramente determinado: o uso do conceito de oportunidade de conflito de tráfego busca permitir o desenvolvimento de métodos analíticos que dependam apenas de dados de tráfego e de parâmetros relacionados à geometria e ao tipo de controle. Historicamente, os estudos de tráfego foram desenvolvidos inicialmente para estimar capacidade e atrasos. As decisões de projetos eram feitas visando máxima obtenção de capacidade e redução de atrasos. Apenas mais tarde, em vistas do crescente aumento do número de acidentes de trânsito, o problema de segurança tornou-se relevante. Contudo, enquanto que capacidades e atrasos eram facilmente tratados por meio de ferramental matemático, com obtenção de resultados numéricos que podem ser comparados, problemas de segurança são difíceis de tratar usando métodos analíticos. Dados de acidentes de tráfego foram os primeiros meios utilizados para a obtenção de medidas de segurança. Outras técnicas foram posteriormente propostas para evitar a dependência de dados de acidentes, entre estas a técnica de análise de conflitos de tráfego e, mais recentemente, os modelos de oportunidades de conflito de tráfego.

A revisão da literatura sobre o assunto indicou um pequeno número de trabalhos relativos ao tema. Por este motivo, a revisão foi feita em duas etapas: a primeira relacionada com estudos diretamente relacionados com oportunidades de conflito de tráfego e na segunda foram revisados estudos correlacionados que forneceram elementos complementares.

O trabalho de KAUB (2005), que descreve métodos incorporados a um software voltado à aplicação profissional (o TRAF-Safe) e ensejou a motivação do presente trabalho, foi a principal referência diretamente relacionada ao assunto. Do seu conteúdo destaca-se uma formulação básica para os modelos de oportunidades de conflito, detalhados para interseções

não semaforizadas;. Resumidamente, a oportunidade de conflito de tráfego está baseada em 3 elementos: (i) veículo exposto; (ii) o tempo em que ele está exposto e, durante esse tempo de exposição, (iii) a probabilidade de chegar veículos conflitantes. A formulação de novos modelos utilizou esta formulação e avaliou a incorporação de um elemento adicional: a existência de fatores que tornam o risco relevante. A análise de validação, pelo menos no caso específico dos fatores relacionados com visibilidade em COs traseiras, caracterizou o novo aspecto como bastante importante para fornecer conclusões aplicáveis.

Ainda em relação a KAUB (2005), notou-se que a documentação é bastante imprecisa, apresentando muitas vezes dados conflitantes e com lacunas na forma de operacionalizar o modelo. Em diversos pontos, a forma ou a expressão utilizada para avaliação foi também criticada e considerada inadequada.

Uma crítica que foi feita ao método do autor no Capítulo 2 é a não agregação dos movimentos conflitantes. Entretanto, os resultados práticos obtidos nas duas interseções validadas e descritas no Capítulo 4 mostraram que não há grande diferença nas duas formas de operacionalizar o modelo. Esta observação é interessante porque permite optar por procedimentos mais simples, na consideração da agregação dos fluxos.

Por outro lado, outras críticas foram consideradas relevantes.

O uso do tempo de parada como tempo de exposição para COs angulares dos movimentos prioritários, conforme adotado pelo autor, resultou em valores numéricos significativamente maiores do que aqueles obtidos utilizando como tempo de exposição o tempo de manobra. A aplicação prática dos modelos feita no Capítulo 4, do modo como foi feita (contra diagnósticos qualitativos), não conseguiu fazer distinção entre essas diferentes formulações ou distinguir a importância de COs angulares relacionadas com movimentos prioritários ou secundários. No entanto, o método de diagnóstico continuou efetivo utilizando apenas COs secundárias ou reduzindo as estimativas de COs prioritárias, como sugerido pelo senso comum.

Outra observação que deve ser registrada é a consideração pelo autor de que movimentos prioritários (por serem movimentos que não param) não geram COs traseiras. Por considerar que essa premissa não é verdadeira, foram propostos métodos considerando que COs traseiras

poderiam ser geradas em consequência de COs angulares primárias ou em decorrência da desaceleração de veículos que fazem manobras de conversão. Em ambos os casos, o tempo de exposição é o tempo de desaceleração, até a parada total do veículo no caso de CO angular primária e até a velocidade de conversão no segundo caso.

No caso de COs traseiras de movimentos secundários, o autor adota como tempo de exposição o tempo de espera dado pela expressão de Adams (tempo de espera no topo da fila). No presente trabalho, foram adotadas duas alternativas para o tempo de exposição: o tempo médio de espera (em fila) por veículo e o tempo médio de espera (em fila) por veículo que pára. Na validação de campo descrita no Capítulo 4, o tempo de espera em fila foi obtido do programa HCS+ e a proporção de veículos que param foi obtida a partir de uma expressão que depende de $X=Q/C$, sendo que o valor de X também foi obtido pelo programa HCS+. Tendo em vista que a interseção Ferreira Alves x Raul Pompéia estava saturada no período da pesquisa, os dois métodos que consideram o tempo médio de espera em fila deram o mesmo resultado (pois a proporção de veículos que param é praticamente igual a 100%), resultando em valores numéricos muito superiores àqueles apresentados pelo método que adota a expressão de Adams como tempo de exposição. Aliás, os tempos de espera obtidos pelo HCS+, de 72 e 48 segundos por veículo, não parecem ser compatíveis com o que foi observado (de forma qualitativa) durante a pesquisa de campo.

A preferência pelas formulações alternativas repousa, nestes casos, em argumentos essencialmente teóricos (dado que a comparação entre os resultados obtidos na aplicação prática com os diagnósticos qualitativos foi insuficiente).

Outros trabalhos sobre o tema foram estudados e revelaram-se essenciais. KAUB (2005) forneceu os elementos para formulações dos modelos em interseções com sinalização de prioridade mas não tratou detalhadamente as interseções semaforizadas, entre outras. HA e BERG (1995) e ZHANG e PREVEDOUROS (2003) forneceram os elementos necessários para as formulações propostas para interseções semaforizadas.

Baseado nestes estudos, a análise tomou como base o critério de dividir o ciclo semafórico em períodos característicos: o vermelho, a dissipação de fila e o restante de verde. O período de entreverdes, cuja análise não foi contemplada pelos autores mencionados, foi incluído nas

propostas formuladas por ser considerado um elemento fundamental na segurança dos semáforos nos demais estudos revisados.

A proposta de HA e BERG (1995) para a estimativa de COs traseiras no período de vermelho e dissipação de fila é contar todos os veículos que param, exceto o primeiro da fila. A proposta adotada no presente trabalho foi desprezar essa parcela “-1” bem como acrescentar um método alternativo, inspirado na idéia de KAUB (2005), que usa um fator que pondera a probabilidade de chegar veículos conflitantes durante o tempo que o veículo está parado. Tendo em vista os altos fluxos apresentados pela interseção validada (Cerro Corá x Pio XI), a probabilidade de chegar veículos durante o tempo de espera é praticamente 1, obtendo-se resultados idênticos em ambos os métodos. Estas formulações foram indistinguíveis e produziram, todas, conclusões inadequadas em termos de diagnóstico. A consideração de existência (ou não) de deficiências de visibilidade permitiu melhorá-las, em todos os casos.

Tanto HA e BERG (1995) como ZHANG e PREVEDOUROS (2003) trataram do problema de COs angulares entre movimento de conversão à esquerda com o seu fluxo oposto, tendo essa metodologia sido adotada, em suas linhas gerais, no presente trabalho. Ambos os autores consideram que há CO angular apenas nas brechas ($T \pm 2$ onde T é o tempo de manobra, com um viés de 2seg em HA e BERG, 1995). Brechas maiores não geram risco. Brechas menores também não gerariam risco uma vez que é admitida que não são aceitas pelos condutores. Foi visto no Capítulo 2 que essa metodologia pode gerar resultados incompatíveis com o senso comum, uma vez que poderá resultar, ao contrário do que se espera, valores maiores de COs angulares para interseções com baixo índice de brechas pequenas e grande número de brechas grandes do que em interseções com grande quantidade de brechas pequenas e reduzido número de brechas grandes¹. Foi proposta uma forma corrigida para avaliar a probabilidade das brechas de risco e sua aplicação mostrou que os resultados obtidos não exibem o problema apontado e podem ser utilizados como uma opção adequada.

ZHANG e PREVEDOUROS (2003) também trataram do problema de COs com pedestres na situação em que há conflito com veículos que fazem a manobra de conversão à esquerda permitida diante de um fluxo oposto. Esta metodologia foi criticada e foi proposta uma formulação alternativa baseada na forma inversa, que avalia a probabilidade da presença de

¹ No texto, entende-se por “brecha grande” aquela que for maior que $T+2$ e por “brecha pequena” aquela que for menor que $T-2$.

um pedestre interferente quando a conversão é realizada. As mesmas metodologias, a original e a proposta, foram estendidas para o caso de travessias diante de conversões sem fluxo oposto. Apesar da consciência de que o método proposto tem como premissa a preferência dos pedestres diante dos movimentos veiculares de conversão, ambas as metodologias foram aplicadas a todos os casos de travessias com fluxos veiculares concorrentes. Não foi possível, no entanto, avaliar sua validade pois os casos estudados não sugeriam problemas de segurança relacionados com pedestres. Foi também formulado um método alternativo baseado na representação de travessias em brechas, na situação em que os pedestres não são prioritários ou não tem sua preferência respeitada, que pode ser desenvolvido e testado da mesma forma.

Apesar de também ter sido aplicada e não ter sido adequadamente validada, novamente porque os casos estudados não sugeriam problemas de segurança relacionados com pedestres, foi proposta também uma formulação para estimativa de COs de pedestres em interseções com sinalização de prioridade.

Deve-se, naturalmente, assinalar que todas as formulações para pedestres devem ser entendidas como preliminares e merecedoras de novos estudos.

É importante enfatizar, com relação a COs traseiras, que tanto KAUB (2005) como HA e BERG (1995) também não consideraram o efeito de visibilidade. A validação de campo mostrou novamente que os resultados assim obtidos levam a um diagnóstico inadequado e que o fator é fundamental para que o resultado da aplicação dos modelos faça algum sentido. De fato, sem considerar o fator visibilidade, todos os métodos resultam em elevado número de COs traseiras. Introduzindo o fator visibilidade, o número de COs traseiras fica bastante reduzido, resultado esse mais compatível com o diagnóstico qualitativo.

Isso mostra que a incorporação de fatores característicos de cada interseção é fundamental para que os resultados sejam coerentes com a realidade. Neste sentido, uma lacuna não tratada no presente trabalho é o efeito de intervisibilidade de interseções semaforizadas e também nas travessias de pedestres.

Outros aspectos foram analisados a partir da revisão dos estudos relacionados, fornecendo elementos complementares. Um destes aspectos já foi mencionado: pode-se destacar o potencial de acidentes relacionados com COs secundárias para o fluxo prioritário em

interseções sem semáforo dos estudos sobre modelos de previsão de colisão. Com base nesses modelos foi extraída a idéia de que CO traseira pode ser considerada como um evento secundário gerado por uma interferência de natureza angular (evento primário).

No entanto, os aspectos mais largamente utilizados foram obtidos dos trabalhos revisados sobre entreverdes, os quais forneceram elementos importantes para a proposição de modelos de oportunidade de conflito angular e traseira para esse período. Deve-se destacar a importância particular do trabalho de EASA (1993), cuja abordagem probabilística foi usada não somente para o período de entreverdes, mas foi extensivamente adotada para tratar de questões como visibilidade e tempos de reação. Apontou-se que os métodos propostos para o período de entreverdes podem não ser adequados por não considerarem o efeito de progressão dos veículos mas suas indicações foram aplicadas nos casos estudados. Os resultados obtidos exibem padrões consistentes, embora não tenha sido coletada nenhuma evidência clara da validade das suas indicações. Notou-se, no entanto, que o método proposto é capaz de identificar problemas não apontados pelos diagnósticos da CET/SP (como a deficiência do amarelo no estágio da Rua Pio XI) de maneira convincente.

Métodos similares foram propostos para diversos contextos (como as interferências por redução de velocidade) mas não puderam ser aplicados.

Um contexto adicional para o qual estes métodos foram aplicados foi a análise da segurança do entreverdes dos pedestres. Este problema foi analisado considerando a transição no final do verde (como para veículos) e também no início do verde (cujas peculiaridades foram consideradas importantes para os pedestres e, eventualmente, também para os veículos). A análise da segurança do entreverdes de pedestres no final do verde foi também aplicada mas, novamente, não pode ser validada pela falta de diagnósticos de problemas específicos para pedestres. Mas, outra vez, podem-se observar resultados consistentes e condizentes com a observação operacional (como a crítica usual aos valores reduzidos do intermitente para pedestres, definidos com base nas recomendações atuais da CET/SP).

Deve-se destacar que, devido à complexidade e abrangência dos assuntos tratados, não houve possibilidade de fazer uma proposição completa sobre modelos de oportunidades de conflito com pedestres, apesar da preocupação especial com o pedestre. Embora tenham sido propostos modelos preliminares para travessias de pedestres em interseções não

semaforizadas, admitindo-se hipóteses bastante simplificadoras, bem como em interseções semaforizadas (estas com maior detalhamento), os mesmos não puderam ser objeto de validação de campo. Essas lacunas podem ser preenchidas oportunamente com estudo e trabalho complementar.

Finalmente, mas não menos importante, deve-se ponderar que a utilização direta dos resultados de estimativas de oportunidades de conflito para diagnóstico de problemas de segurança viária (apenas com base na frequência prevista) mostrou-se bastante difícil ou discutível. Este é o mesmo problema enfrentado na utilização dos resultados de pesquisas de conflito de tráfego.

Na proposta original de KAUB (2005), as estimativas de COs são transformadas em COs anuais e, então, utilizadas para prever a frequência de acidentes e de acidentes graves, em particular. Novamente, segue-se uma trilha também percorrida pelos estudos sobre pesquisas de conflito de tráfego. Uma outra possibilidade seria tentar caracterizar diretamente a periculosidade das COs ou buscar medidas comparáveis em termos de gravidade.

O ponto a mencionar aqui é que esta informação, de uma forma ou de outra, parece fundamental para obter um diagnóstico adequado pois as escalas de frequência observadas parecem não refletir os problemas de segurança correspondente. Por exemplo, as COs nos entreverdes, pela própria duração reduzida dos períodos, tendem a exibir valores baixos (comparando-se os valores absolutos), em desacordo com a visão usual sobre sua relevância.

O caminho de relacionar estimativas de COs com estimativas de acidentes e, particularmente, de acidentes graves, parece naturalmente preferível. No entanto, a qualidade dos dados de acidentes é um aspecto crítico na cidade de São Paulo. Sua utilização seria também fundamental para uma melhor validação dos métodos de estimativas de COs mas, pelo menos nesta cidade, traz um desafio de difícil solução.

REFERÊNCIAS

Adams, W.F.: “*Road Traffic Considered as a Random Series*”, Journal of the Institute of Civil Engineers, Vol. 4, pp. 121-130, 1936

Anuário Estatístico do DENATRAN,
www.infoseg.gov.br/renaest/detalheNoticia.do?noticia.codigo=115 (acesso em 04/08/2007)

Bornsztein, L. L.: “Auditoria de Segurança Viária na Análise e Projeto de Interseções Semaforizadas”, Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil – 2001.

Brillon, W.; Wu, N. – “*Capacity at Unsignalized Intersections Derived by the Conflict Technique*”, TRR 1776, pp. 82-90, 2001

Carrol, P. S.; Carlson, W. L.; McDole, T. L.; Smith, D. W.: “*Acquisition of Information on Exposure and on Non-Fatal Crashes*” Vol. 1 – Exposure Survey Considerations, Highway Safety Research Institute, Univ. of Michigan, Ann Harbor, 1971. NTIS: PB 201414

CET-SP: “Manual de Sinalização Urbana SEMAFÓRICA – Critérios de Projeto, Volume 6, Parte II”, 2001

CET-SP: “Acidentes de Trânsito Fatais no Município de São Paulo – 2005”

Chang, M.: “*Conceptual Development of Exposure Measures for Evaluating Highway Safety*”, Transportation Research Record 847, Washington DC, 37-42, 1982

Council, F. M.; Stewart, J. R.; Reinfurt, D. W. e Hunter, W. W., 1983, “*Exposure Measures for Evaluating Highway Safety Issues*”, Vol. 1, Final Report

Cowan, R. J.: “*Adams’ Formula Revised*”, CSIRO Division of Mathematics and Statistics, Traffic Engineering + Control, May 1984

DENATRAN, Interseções em Nível não Semaforizadas em Áreas Urbanas, 1984

Easa, S. M.: “*Reliability-Based Design of Intergreen Interval at Traffic Signals*”, Journal of Transportation Engineering, Vol. 119, No. 2, March/April, 1993

Folha-Uol: “Acidente de trânsito mata mais que guerra, diz OMS” – 13/05/2003 – 02h55
<http://www1.folha.uol.com.br/folha/mundo/ult94u56744.shtml> (acesso em 04/08/2007)

Gazis, D., R. Herman e A. Maradudin: “*The Problem of the Amber Signal in Traffic Flow*”, Operations Research, Vol. 8, 1960

Gettman, D. e Head, L.: “*Surrogate Safety Measures from Traffic Simulation Models*”, Transportation Research Record 1840, 104-115, 2003

Ghaffari, M.: “*A Stochastic Computer Simulation of Traffic Conflicts*”, Ph. D. Dissertation, University of Illinois at Chicago, 1990

Glauz, W. D. e Migletz, D. J.: “*The Traffic Conflict Technique of the United States of America*”. In *International Calibration Study of Traffic Conflicts*”, NATO ASI Series Vol. F5, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, pp 41-58, 1984

Guo, X., Dunne, C. M., Black, A. J.: “*Modeling of Pedestrian Delays with Pulsed Vehicular Traffic Flow*”, *Transportation Science*, Vol 38, 1 - Feb 2004 - pp. 86 - 96

Ha, T. e Berg, W. D.: “*Development of Safety-Based Level of Service Criteria for Isolated Signalized Intersections*”, *Transportation Research Record* 1484, 98-103, 1995

Hagring, O.: “*A Further Generalization of Tanner’s Formula*”, Department of Traffic Planning and Engineering, Lund Institute of Technology, Lund University, Jan. 1998

Haight, F. A.: “*Mathematical Theories of Traffic Flow*”, New York Academic Press (1963).

Haight, F. A.: “*Indirect Methods for Measuring Exposure Factors as Related to the Incidence of Motor Vehicle Traffic Accidents*”, National Highway Traffic Safety Administration, Sept. 1971. NTIS: PB 205031

Holland, R. C.: “*The Theoretical Calculation of Accident Involvement Rates*”, University of Melbourne, Australia, 1967

Kao, J. H. K.: “*A Summary of Some New Techniques in Failure Analysis*”, Proceedings of Sixth National Symposium on Reliability and Quality Control, Washington DC, 1960, 190-201

Kaub & Associates: “*Intersection & Roundabout Annual Accident Prediction with Conflict Opportunity Theory, Algorithms, Example & Validation – Traffic Safety Software, LLC – TRAF-Safe™ Architecture, Function & Validation*”, 2005, www.trafficsafetysoftware.com (acesso em 22/08/2006)

Lord, D.: “*Analysis of Pedestrian Conflicts with Left-Turning Traffic*”, Transport Safety Group, Department of Civil Engineering, University of Toronto, *Transportation Research Record* 1538, 61-67, 1996

Lewis, R. M. e Michael, H. L.: “*Simulation of Traffic Flow to Obtain Volume Warrants for Intersection Control*”, *Traffic Flow Theory*, Highway Research Record, Washington DC, Highway Research Board, 1963, pp 39

Mahalel, D. e Prashker, J. N.: “*A Behavioral Approach to Risk Estimation of Rear-End Collisions at Signalized Intersections*”, *Transportation Research Record* 1114, 96-102, 1987

Milazzo, J. S. H.; Roupail, N. M.; Hummer, J. E. e Allen, D. P.: “*Effect of Pedestrians on Capacity of Signalized Intersections*”. In *Transportation Research Record*, Journal of the Transportation Research Board, No. 1646, TRB, National Research Council, Washington DC, 1998, 37-46

NHTSA: “*Fatality Analysis Reporting System – FARS, Web-Based Encyclopedia*” (2005), <http://www-fars.nhtsa.dot.gov> (acesso em 13/08/2007)

Parker, Jr. M. R. e Zegeer, C. V.: “*Traffic Conflict Techniques for Safety and Operations – Engineers Guide*”, Publication No. FHWA-IP-88-026, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, USA, 1989

Parker, Jr. M. R. e Zegeer, C. V.: “*Traffic Conflict Techniques for Safety and Operations – Observers Manual*”, Publication No. FHWA-IP-88-027, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, USA, 1989

Parsonson, P. S.: “*Signalization of High Speed Isolated Intersection*” in Transportation Research Record 681, TRB, National Research Council, Washington, DC, 1978

Perkins, S. R. e Harris, J. L.: “*Traffic Conflict Characteristics – Accident Potential at Intersections*” In Highway Research Record 225, HRB, National Research Council, Washington, D.C., pp 35-44, 1968

Pietrantonio, H.: “Exercício: “Medida de Brecha Crítica” – disciplina PTR 5803, www.poli.usp.br/d/ptr5803 (acesso em 11/08/2007)

Pietrantonio, H.: “Relatório de Trabalho No. 2/98 do LEMT – Avaliação da Técnica Sueca de Análises de Conflitos de Tráfego – Aplicação ao Estudo de Problemas de Segurança de Pedestres em Interseções Semaforizadas da Cidade de São Paulo”, 1998 – www.poli.usp.br/p/hugo.pietrantonio/Boletim2-2.pdf (acesso em 13/08/2007)

Pietrantonio, H. e Tourinho, L. B.: “*A Decision Based Criterion for Selecting Parameters in Evaluating of Pedestrian Safety Problems with the Traffic Conflict Analysis Technique*”. In Transportation Planning and Technology, Vol. 29, No. 3, pp 183-216, 2006

Pietrantonio, H. e Tourinho, L. B.: “*Parameters for Evaluating Pedestrian Safety Problems at Signalized Intersections Using the Traffic Conflict Analysis Technique – a Study in São Paulo, Brazil*”, aceito para apresentação no 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2005 (Relatório de Trabalho 06/04 do LEMT – Laboratório de Estudos Metodológicos em Tráfego e Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – www.ptr.poli.usp.br/lemt/documents%5CTCT-Pedestrians.pdf (acesso em 13/08/2007)

Plait, A.: “*The Weibull Distribution – with the Tables*”, Industrial Quality Control, 19(1), 1962, 17-26

Plass, M. e Berg, W. D.: “*Evaluation of Opportunity-Based Accident Rate Expressions*”. In Transportation Research Record 1111, TRB, National Research Council, Washington DC, 1987

Quaye, K.; Larsden, L.; Hauer, E.: “*Pedestrian Accidents and Left-Turning Traffic at Signalized Intersections*”, Department of Civil Engineering, Univ. of Toronto, Ont. Canada, 1993

Seção de Engenharia de Tráfego e Transporte de Passageiros – IPT: “Manual de Procedimento de Pesquisa para Análise de Conflitos de Tráfego em Interseções”, Publicação Interna – Julho/1991

Shefti, Y. e Mahmassani H.: “*A Model of Driver Behavior at High Speed Signalized Intersections*”, Transportation Science, Vol. 15, No. 1, Fev. 1981)

Songchitruksa, P. e Tarko, A. P.: “*Practical Method for Estimating Frequency of Right-Angle Collisions at Traffic Signals*”, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 1953, Transportation Research Board of the National Academies, Washington DC, 2006, 89-97

Tanner, J. C.: “*Delay to Pedestrians Crossing a Road*”, Biometrika, 1951, 38: 383-392

Tarko, A., Li, W. e Laracuate, L.: “*Probabilistic Approach to Controlling Dilemma*”, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1973, Transportation Research Board of the National Academies, Washington DC, 2006, 55-63

Tourinho Jr., P. L. M.: “Análise de Acidentes em Cruzamentos não Sinalizados”, www.estradas.com.br (acesso em 16/08/2007)

Troutbeck, R. J. – “*The Characteristics of the Times Drivers are Stopped at Unsignalized Intersections*” in Daganzo, C., ed. – Transportation and Traffic Theory, Elsevier, USA (Proceedings of the 12th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Berkeley, USA) – 1993

Vasconcelos, V. M. A.: “Oportunidades de Travessia e Oportunidades de Conflito para Pedestres em Interseções Semaforizadas” – Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004

Wang, Y.; Ieda, H.; Saito, K. e Takahashi, K.: “*Using Accident Observations to Evaluate Rear-End Accident Risk at Four-Legged Signalized Intersections*”, Topic C2, Safety Analysis, Paper No. 268, Revised Version – World Transport Research, Selected Proceedings of the 8th World Conference on Transport Research, Vol. 2, 123-136, 1999

Wang, Y.; Ieda, H. e Mannering, F.: “*Estimating Rear-End Accident Probabilities at Signalized Intersections: an Occurrence-Mechanism Approach*”, Journal of Transportation Engineering, Vol. 129, No. 4, 2002, 377-384

Wang, Y. e Nihan, N. L.: “*Quantative Analysis on Angle-Accident Risk at Signalized Intersections*”, World Transport Research, Selected Proceedings of the 9th World Conference on Transport Research, Pergamon Press, Oct 2003

Webster, F. V.: “*Traffic Signal Settings*”, Road Research Paper #39, Road Research Laboratory, Her Majesty's Stationery Office, 1958

Widmer, J. A.: “Análise Teórica da Eficiência de Frenagem de Algumas Configurações de Veículos Unitários e Combinações de Veículos Rodoviários de Carga Brasileiros”, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002

Wu, N.: “*An Approximation for the Distribution of Queue Lengths at Unisnalized Intersections*”, paper published in Akcelik, R. (ed.): Proceedings of the Second International Symposium on Highway Capacity, Sydney, Australia, Aug. 1994, Australian Road Research Board Ltd., Victoria, Australia, 1994 (Modified version, 1999)

Wu, N.: “*Estimation of Queue and Their Percentiles at Signalized Intersections*”, Proceedings of the Third International Symposium on Highway Capacity, Copenhagen, Denmark, June, 1998. Road Directorate, Copenhagen, Denmark, 1998.

Zhang, L. e Prevedouros, P. D.: “*Signalized Intersection Level of Service Incorporating Safety Risk*”, Transportation Research Record 1852, 77-86, Paper No.03-3288, 2003

Zimmerman, K. e Bonneson, J. A.: “*Number of Vehicles in the Dilemma Zone as a Potential Measure of Intersection Safety at High-Speed Signalized Intersections*” – TRR 1897, 126-133, TRB 2004 Annual Meeting CD-ROM)