



## MICROSSIMULAÇÃO DA ZONA DO DILEMA

Daniel Dominguez Gouvêa

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas e Computação, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Sistemas e Computação.

Orientadores: Felipe Maia Galvão França  
Paulo Cezar Martins Ribeiro

Rio de Janeiro  
Setembro de 2013

# MICROSSIMULAÇÃO DA ZONA DO DILEMA

Daniel Dominguez Gouvêa

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Examinada por:

---

Prof. Felipe Maia Galvão França, Ph.D.

---

Prof. Paulo Cezar Martins Ribeiro, Ph.D

---

Prof. Adilson Elias Xavier, D.Sc.

---

Prof. Luerbio Faria, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
SETEMBRO DE 2013

Gouvêa, Daniel Dominguez

Microsimulação da Zona do Dilema/Daniel Dominguez  
Gouvêa. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XV, 124 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Felipe Maia Galvão França

Paulo Cezar Martins Ribeiro

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de  
Engenharia de Sistemas e Computação, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 121 – 124.

1. Zona do Dilema. 2. Simulação de Tráfego. 3.  
Modelo de Motorista. I. França, Felipe Maia Galvão  
*et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,  
Programa de Engenharia de Sistemas e Computação. III.  
Título.

*“Se o conhecimento pode criar  
problemas, não é através da  
ignorância que podemos  
solucioná-los.” Isaac Asimov*

# Agradecimentos

Agradeço à minha família, pelo seu investimento em minha educação e por todos os momentos que passamos por esta grande odisséia que é a vida.

À Lília Franzotti, uma pessoa muito especial na minha vida, que nunca deixou de me incentivar nesta empreitada acadêmica, me apoiando e me confortando sempre.

À minha irmã, pela ajuda com o desenho de alguns diagramas.

Ao meu pai e meu primo Marcos, por me ajudarem a tomar as medidas em campo e fazer as filmagens necessárias.

Ao meu bom amigo Lúcio Paiva, pela ajuda com sua experiência prévia na confecção de uma dissertação, pelas boas ideias que puderam ser aproveitadas neste trabalho, pelo desenvolvimento do simulador de tráfego MicroLAM [1] e pelos pontos levantados na revisão desta dissertação.

Ao meu pitoresco amigo Flávio Faria, que acompanhou de perto esta jornada do mestrado, apresentando sua dissertação apenas três dias depois. Suas revisões *online* em tempo real de trechos desta dissertação foram muito valiosas.

Ao meu amigo sempre otimista e entusiasmado Bernardo Pacheco, que também compartilhou comigo e com o Flávio os momentos de angústia da reta final do mestrado, entregando uma dissertação de qualidade à qual pude assistir a apresentação dois dias antes da minha, me motivando e tranquilizando na eminente apresentação que eu teria que realizar.

Ao meu amigo sóbrio e perspicaz Bruno França, pela colaboração revisando e dando dicas sobre a estrutura da dissertação.

Aos meus orientadores, Felipe e Paulo, pela colaboração e direcionamento durante nossas reuniões de acompanhamento.

Às comunidades que criaram e mantêm o  $\text{\LaTeX}$  e o Inkscape, ferramentas muito boas que deixaram este trabalho sempre dentro do esquadro e com uma apresentação profissional.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## MICROSSIMULAÇÃO DA ZONA DO DILEMA

Daniel Dominguez Gouvêa

Setembro/2013

Orientadores: Felipe Maia Galvão França

Paulo Cezar Martins Ribeiro

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Neste trabalho, serão apresentados vários fundamentos e aspectos relacionados à zona do dilema no trânsito, de forma a consolidar todas as informações necessárias para possibilitar a microssimulação da mesma. O simulador MicroLAM foi estendido com o propósito de criar uma ferramenta mais completa e que permita o estudo desta zona. Um novo modelo de motorista capaz demonstrar os efeitos dela foi concebido, o StDM. Outros modelos também foram propostos com o intuito de estudar algumas estratégias para evitar que o veículo se encontre na zona do dilema: o DZADM, o IZADM, o DIZADM e o AVDM. Por fim, simulações foram realizadas para demonstrar a dinâmica do veículo em relação à zona do dilema, avaliar os modelos propostos, estudar o impacto da temporização do intervalo de amarelo e investigar as infrações de trânsito decorrentes.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## DILEMMA ZONE MICROSIMULATION

Daniel Dominguez Gouvêa

September/2013

Advisors: Felipe Maia Galvão França  
Paulo Cezar Martins Ribeiro

Department: Systems Engineering and Computer Science

This work presents several principles and aspects related to the dilemma zone, in order to consolidate all the necessary information to enable its microsimulation. The MicroLAM simulator was extended with the purpose of creating a more complete tool to study this zone. A new driver model capable of demonstrate its the effects was conceived, called StDM. Further models were also proposed, aiming to study strategies to avoid the vehicle presence in the dilemma zone: DZADM, IZADM, DIZADM and AVDM. Lastly, simulations took place to demonstrate the vehicle dynamics related to the dilemma zone, evaluate the proposed models, study the amber interval duration impact and investigate the arising traffic violations.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos do Trabalho . . . . .	1
1.2 Trabalhos Relacionados . . . . .	2
1.2.1 Zona do Dilema . . . . .	2
1.2.2 Simulação de Tráfego . . . . .	2
1.2.3 Modelo de Motorista . . . . .	3
1.3 Estrutura da Dissertação . . . . .	3
<b>2 Referencial Teórico</b>	<b>4</b>
2.1 Fundamentos de Engenharia de Tráfego . . . . .	4
2.1.1 Usuários . . . . .	4
2.1.2 Veículos . . . . .	8
2.1.3 Vias . . . . .	9
2.1.4 Sinalização Horizontal . . . . .	11
2.1.5 Semáforo . . . . .	16
2.1.6 Sistemas Automáticos de Fiscalização . . . . .	18
2.2 Zona do Dilema . . . . .	20
2.2.1 Zona do Dilema do Tempo de Amarelo . . . . .	21
2.2.2 Zona de Indecisão . . . . .	31
2.2.3 Práticas de Proteção para Zona do Dilema . . . . .	34
2.3 Simulação de Tráfego . . . . .	37
2.3.1 Modelo de Motorista . . . . .	38
2.3.2 <i>Intelligent Driver Model</i> (IDM) . . . . .	39
<b>3 MicroLAM</b>	<b>41</b>
3.1 Múltiplas Faixas . . . . .	42
3.2 Sinalização Horizontal . . . . .	43
3.3 Zona do Dilema . . . . .	44



3.4	Previsão da Zona do Dilema . . . . .	45
3.5	Zona de Indecisão . . . . .	47
3.6	Previsão da Zona de Indecisão . . . . .	48
3.7	Detector de Avanço de Sinal Vermelho do Semáforo . . . . .	50
3.8	Detector de Parada sobre a Faixa para Travessia de Pedestres . . . . .	51
3.9	Interface do Usuário . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Modelos de Motorista</b>	<b>54</b>
4.1	<i>Standard Driver Model</i> (StDM) . . . . .	54
4.2	<i>Dilemma Zone Avoidance Driver Model</i> (DZADM) . . . . .	56
4.3	<i>Indecision Zone Avoidance Driver Model</i> (IZADM) . . . . .	62
4.4	<i>Dilemma and Indecision Zones Avoidance Driver Model</i> (DIZADM) . . . . .	67
4.5	<i>Autonomous Vehicle Driver Model</i> (AVDM) . . . . .	69
<b>5</b>	<b>Microssimulação da Zona do Dilema</b>	<b>71</b>
5.1	Dinâmica do Veículo em Relação à Zona do Dilema . . . . .	71
5.1.1	Decisão de Passar pelo Cruzamento . . . . .	71
5.1.2	Decisão de Parar . . . . .	75
5.2	Medidas de Interesse . . . . .	78
5.3	Cruzamento Simples . . . . .	79
5.3.1	Fluxo de Saturação da Via . . . . .	81
5.3.2	Zona do Dilema . . . . .	82
5.3.3	Zona de Indecisão . . . . .	84
5.3.4	Avanço de Sinal Vermelho do Semáforo . . . . .	85
5.3.5	Parada sobre a Faixa para Travessia de Pedestres . . . . .	89
5.3.6	<i>Dilemma Zone Avoidance Driver Model</i> (DZADM) . . . . .	93
5.3.7	<i>Indecision Zone Avoidance Driver Model</i> (IZADM) . . . . .	98
5.3.8	<i>Dilemma and Indecision Zones Avoidance Driver Model</i> (DIZADM) . . . . .	100
5.3.9	<i>Autonomous Vehicle Driver Model</i> (AVDM) . . . . .	101
5.4	Cruzamento da Rua Barata Ribeiro com a Rua Siqueira Campos . . . . .	102
5.4.1	Zona do Dilema na Rua Barata Ribeiro . . . . .	106
5.4.2	Zona do Dilema na Rua Siqueira Campos . . . . .	107
5.4.3	Zona de Indecisão . . . . .	108
5.4.4	Avanço de Sinal Vermelho do Semáforo . . . . .	109
5.4.5	Parada sobre a Faixa para Travessia de Pedestres . . . . .	109
5.5	Cruzamento da Rua Barão da Torre com a Rua Maria Quitéria . . . . .	110
5.5.1	Zona do Dilema na Rua Barão da Torre . . . . .	114
5.5.2	Zona do Dilema na Rua Maria Quitéria . . . . .	115
5.5.3	Zona de Indecisão . . . . .	116

5.5.4	Avanço de Sinal Vermelho do Semáforo . . . . .	117
5.5.5	Parada sobre a Faixa para Travessia de Pedestres . . . . .	117
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>118</b>
6.1	Sumário . . . . .	118
6.2	Trabalhos Futuros . . . . .	119
6.2.1	MicroLAM . . . . .	119
6.2.2	Modelo de Motorista . . . . .	119
6.2.3	Simulações . . . . .	120
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>121</b>

# Lista de Figuras

2.1	Linha simples contínua numa interseção semaforizada . . . . .	11
2.2	Linha simples seccionada . . . . .	12
2.3	Linha de retenção . . . . .	13
2.4	Linha de retenção precedendo uma interseção . . . . .	14
2.5	Faixa para travessia de pedestres . . . . .	15
2.6	Marcação de área de conflito . . . . .	16
2.7	Linhas de parada e desobstrução . . . . .	22
2.8	Zona de dilema do tempo de amarelo . . . . .	23
2.9	Tempo mínimo de amarelo em função da velocidade de aproximação .	24
2.10	Distâncias críticas de parada e cruzamento da interseção se interceptando em dois pontos . . . . .	25
2.11	Distâncias críticas de parada e cruzamento da interseção não se interceptando . . . . .	26
2.12	Comprimento da zona do dilema para vários valores de tempo de amarelo . . . . .	28
2.13	Comprimento da zona do dilema para vários valores de desaceleração	29
2.14	Comprimento da zona do dilema sem tempo de percepção e reação . .	30
2.15	Comprimento da zona do dilema para vários valores do comprimento do cruzamento mais veículo . . . . .	31
2.16	Zona de indecisão . . . . .	32
2.17	Gráfico da probabilidade de passar no sinal amarelo . . . . .	34
3.1	Interface gráfica do MicroLAM . . . . .	42
3.2	Múltiplas faixas no MicroLAM . . . . .	43
3.3	Sinalização horizontal no MicroLAM . . . . .	44
3.4	Zona do dilema no MicroLAM . . . . .	45
3.5	Previsão da zona do dilema no MicroLAM . . . . .	46
3.6	Previsão da zona do dilema cujo veículo esteja dentro, no MicroLAM	47
3.7	Zona de indecisão no MicroLAM . . . . .	48
3.8	Previsão da zona de indecisão no MicroLAM . . . . .	49
3.9	Previsão da zona de indecisão cujo veículo esteja dentro, no MicroLAM	50

3.10	Detector de avanço de sinal vermelho no MicroLAM . . . . .	50
3.11	Detector de parada sobre a faixa para travessia de pedestres no MicroLAM . . . . .	52
4.1	Distâncias críticas para ficar à frente ou atrás da zona do dilema . . . .	59
4.2	Percurso para evitar a zona do dilema . . . . .	60
4.3	Posicionamento dos veículos que usam o DZADM em relação às suas zonas do dilema no MicroLAM . . . . .	62
4.4	Distâncias críticas para ficar à frente ou atrás da zona de indecisão . . . .	64
4.5	Posicionamento dos veículos que usam o IZADM em relação às suas zonas de indecisão no MicroLAM . . . . .	66
4.6	Comparação do início da zona do dilema com o da zona de indecisão . . . .	67
4.7	Posicionamento dos veículos que usam o DIZADM em relação às suas zonas do dilema e indecisão no MicroLAM . . . . .	68
4.8	Posicionamento dos veículos que usam o AVDM em relação às suas zonas do dilema no MicroLAM . . . . .	70
5.1	Veículo passando pelo cruzamento durante o vermelho geral . . . . .	72
5.2	Veículo passando pelo cruzamento no momento em que o tráfego é liberado na via conflitante . . . . .	73
5.3	Veículo passando pelo cruzamento depois de avançar o sinal vermelho . . . .	75
5.4	Veículo parando sobre a faixa de pedestres . . . . .	76
5.5	Veículo parando sobre a faixa de pedestres depois de avançar o sinal vermelho . . . . .	77
5.6	Cenário do cruzamento simples no MicroLAM . . . . .	80
5.7	Veículos na zona do dilema no cruzamento simples . . . . .	82
5.8	Comprimento da zona do dilema no cruzamento simples . . . . .	83
5.9	Veículos na zona do dilema no cruzamento simples . . . . .	84
5.10	Veículos na zona de indecisão no cruzamento simples . . . . .	85
5.11	Avanços de sinal vermelho no cruzamento simples . . . . .	86
5.12	Avanços de sinal vermelho por veículos que estiveram na zona do dilema no cruzamento simples . . . . .	87
5.13	Avanços de sinal vermelho por veículos que estiveram na zona de indecisão no cruzamento simples . . . . .	88
5.14	Paradas sobre a faixa de pedestres no cruzamento simples . . . . .	89
5.15	Paradas sobre a faixa de pedestres por veículos que estiveram na zona do dilema no cruzamento simples . . . . .	90
5.16	Posicionamento dos veículos que pararam sobre a faixa de pedestres e zona do dilema . . . . .	91

5.17	Paradas sobre a faixa de pedestres por veículos que estiveram na zona de indecisão no cruzamento simples . . . . .	92
5.18	Posicionamento dos veículos que pararam sobre a faixa de pedestres e zona de indecisão . . . . .	93
5.19	Veículos na zona de indecisão no cruzamento simples com DZADM . . . . .	94
5.20	Distância da zona de indecisão para o início da zona do dilema . . . . .	94
5.21	Avanços de sinal vermelho no cruzamento simples com DZADM . . . . .	95
5.22	Avanços de sinal vermelho por veículos que estiveram na zona de indecisão no cruzamento simples com DZADM . . . . .	96
5.23	Paradas sobre a faixa de pedestres no cruzamento simples com DZADM . . . . .	97
5.24	Paradas sobre a faixa de pedestres por veículos que estiveram na zona de indecisão no cruzamento simples com DZADM . . . . .	98
5.25	Avanços de sinal vermelho no cruzamento simples com IZADM . . . . .	99
5.26	Avanços de sinal vermelho no cruzamento simples com DIZADM . . . . .	101
5.27	Cruzamento da Rua Barata Ribeiro com a Rua Siqueira Campos . . . . .	105
5.28	Cruzamento da Rua Barata Ribeiro com a Rua Siqueira Campos no MicroLAM . . . . .	105
5.29	Comprimento da zona do dilema na Rua Barata Ribeiro . . . . .	107
5.30	Comprimento da zona do dilema na Rua Siqueira Campos . . . . .	108
5.31	Cruzamento da Rua Barão da Torre com a Rua Maria Quitéria . . . . .	113
5.32	Cruzamento da Rua Barão da Torre com a Rua Maria Quitéria no MicroLAM . . . . .	113
5.33	Comprimento da zona do dilema na Rua Barão da Torre . . . . .	115
5.34	Comprimento da zona do dilema na Rua Maria Quitéria . . . . .	116

# Lista de Tabelas

2.1	Tempos de percepção e reação de vários estudos . . . . .	7
2.2	Tempos de percepção e reação no Brasil . . . . .	7
2.3	Taxas de desaceleração em vários estudos . . . . .	9
2.4	Taxas de desaceleração no Brasil . . . . .	9
2.5	Limite de velocidade para vias urbanas . . . . .	10
2.6	Limite de velocidade para vias rurais . . . . .	10
2.7	Medidas da linha simples seccionada . . . . .	12
2.8	Medidas da largura da faixa . . . . .	13
2.9	Cálculo do comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo	30
5.1	Medidas da sinalização horizontal das duas vias do cruzamento simples	80
5.2	Medidas da marcação de área de conflito no cruzamento simples . . .	81
5.3	Fluxo da via no cruzamento simples . . . . .	81
5.4	Medidas da sinalização horizontal da Rua Barata Ribeiro . . . . .	103
5.5	Medidas dos sistemas automáticos de fiscalização da Rua Barata Ribeiro	103
5.6	Temporização do semáforo da Rua Barata Ribeiro . . . . .	103
5.7	Medidas da sinalização horizontal da Rua Siqueira Campos . . . . .	104
5.8	Medidas dos sistemas automáticos de fiscalização da Rua Siqueira Campos . . . . .	104
5.9	Temporização do semáforo da Rua Siqueira Campos . . . . .	104
5.10	Cálculo do comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo para a aproximação pela Rua Barata Ribeiro . . . . .	106
5.11	Cálculo do comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo para a aproximação pela Rua Siqueira Campos . . . . .	108
5.12	Medidas da marcação de área de conflito no cruzamento da Rua Barão da Torre com a Rua Maria Quitéria . . . . .	110
5.13	Medidas da sinalização horizontal da Rua Barão da Torre . . . . .	111
5.14	Medidas dos sistemas automáticos de fiscalização da Rua Barão da Torre . . . . .	111
5.15	Temporização do semáforo da Rua Barão da Torre . . . . .	111
5.16	Medidas da sinalização horizontal da Rua Maria Quitéria . . . . .	112

5.17	Medidas dos sistemas automáticos de fiscalização da Rua Maria Quitéria	112
5.18	Temporização do semáforo da Rua Maria Quitéria . . . . .	112
5.19	Cálculo do comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo para a aproximação pela Rua Barão da Torre . . . . .	114
5.20	Cálculo do comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo para a aproximação pela Rua Maria Quitéria . . . . .	116

# Capítulo 1

## Introdução

Num sistema de tráfego, quando duas vias se cruzam, existe um problema de fluxos de tráfego conflitantes. Um dos tipos de controle que é utilizado para resolver este conflito é o semáforo. Ele indica, para cada fluxo em aproximação da interseção, qual deve parar e qual deve seguir. O comando de passagem é dado por uma indicação verde e o de parada é dado por uma indicação vermelha. Entre o verde e o vermelho, existe uma etapa de mudança, dada por uma indicação amarela.

Quando o motorista avista a indicação amarela do semáforo, ele precisa decidir se vai parar o veículo antes da linha de retenção ou se vai passar por todo o comprimento da interseção antes que o tráfego da via conflitante seja liberado. No momento desta decisão, o motorista pode ser confrontado com um dilema. Dependendo da temporização do intervalo de amarelo, pode existir um trecho da via onde os veículos que estejam dentro não tenham condições nem de parar e nem de passar, denominada de zona do dilema.

Associada a esta zona, existe outra, chamada de zona de indecisão, que está ligada ao comportamento do motorista e é de natureza probabilística. Nela, um motorista que está a poucos segundos de viagem da interseção semaforizada, ao perceber a indicação amarela do semáforo, tende a ficar indeciso sobre sua habilidade de parar o veículo antes da linha de retenção.

Este dilema pode levar a acidentes de trânsito: colisões traseiras, quando veículos param bruscamente, e colisões laterais, quando veículos ainda estão cruzando a interseção com o fluxo conflitante já liberado. Infrações de trânsito também podem ocorrer, como o avanço de sinal vermelho do semáforo e parada sobre a faixa para travessia de pedestres.

### 1.1 Objetivos do Trabalho

Para entender melhor este tipo de situação, este trabalho apresentará vários fundamentos e aspectos relacionados à zona do dilema, de forma a consolidar todas as



informações necessárias para possibilitar a microssimulação da mesma.

O simulador de tráfego MicroLAM, desenvolvido por DE PAIVA, será estendido com o propósito de criar uma ferramenta mais completa e que permita o estudo da zona do dilema. Melhorias também serão feitas visando facilitar a interação de usuários que não tenham conhecimentos de codificação de programas de computador.

Será necessário também a concepção de um modelo de motorista que seja capaz de demonstrar os efeitos da zona do dilema. A partir deste modelo, serão sugeridos outros modelos que apliquem estratégias para evitar estar na zona do dilema.

Por fim, simulações serão realizadas para demonstrar a dinâmica do veículo em relação à zona do dilema, avaliar os modelos propostos, estudar o impacto da temporização do intervalo de amarelo e investigar as infrações de trânsito decorrentes.

## 1.2 Trabalhos Relacionados

A seguir será feito um breve apanhado de alguns trabalhos relacionados que foram importantes para o desenvolvimento desta dissertação.

### 1.2.1 Zona do Dilema

A primeira definição da zona do dilema remete ao artigo de GAZIS *et al.* [2], de 1960. Nele, foi apresentada a formulação matemática do problema e foi discutida uma equação para eliminar esta zona para uma determinada velocidade de aproximação baseada na temporização do amarelo do semáforo. Uma revisão desta formulação foi feita por Liu, Herman, e Gazis [3], em 1996.

A zona de indecisão foi definida por ZEGEER [4], em 1977, expondo o componente comportamental do motorista na aproximação do semáforo na forma de distâncias de corte atreladas a probabilidade de passar ou parar. Em 1985, CHANG *et al.* [5] aprimoraram esta definição de modo que ela dependesse do tempo de viagem até o semáforo e não mais da distância.

### 1.2.2 Simulação de Tráfego

Existem vários simuladores de tráfego comerciais e acadêmicos disponíveis. No meio comercial, destaca-se o VisSim [6], que é um simulador microscópico com um poderoso conjunto de ferramentas capaz de representar os mais diversos tipos de cenários e modelar vários tipos de veículos. No ramo acadêmico, o SUMO [7] é um exemplo de um simulador microscópico de código aberto com foco na pesquisa de novos modelos para área de trânsito, sendo mais simples que os simuladores comerciais.

Um outro simulador acadêmico é o MicroLAM, que foi desenvolvido por DE PAIVA de modo que pudesse ser facilmente extensível e ser usado como ferramenta para trabalhos futuros, como esta dissertação.

### 1.2.3 Modelo de Motorista

O modelo de motorista representa o comportamento individual do veículo em simuladores microscópicos de tráfego. Um dos tipos de modelo mais usado é o de perseguição veicular, que descreve a movimentação de um veículo em função do veículo à sua frente. O *Intelligent Driver Model* (IDM) é um modelo de perseguição veicular formulado por TREIBER *et al.* [8], no qual todos os parâmetros do modelo têm um significado intuitivo, com valores plausíveis e de fácil medida.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

Primeiramente, será introduzido no capítulo 2 todo o referencial teórico relacionado aos fundamentos da engenharia de tráfego, ao detalhamento da zona do dilema e às simulações de tráfego. Em seguida, no capítulo 3 serão apresentadas todas as extensões feitas no MicroLAM. No capítulo 4, serão descritos todos os modelos de motorista desenvolvidos. No capítulo 5, serão ilustradas as dinâmicas do veículo em relação à zona do dilema e discutidos os resultados de simulações de algumas interseções semaforizadas. Finalmente, no capítulo 6, todo o trabalho será sumarizado e algumas possibilidades de trabalhos futuros serão expostas.

# Capítulo 2

## Referencial Teórico

Neste capítulo, será apresentada toda a base teórica necessária para o desenvolvimento deste trabalho. Primeiramente, alguns fundamentos da engenharia de tráfego serão apresentados na seção 2.1. Em seguida, na seção 2.2, será discutida em detalhes a zona do dilema, que é tema central desta dissertação. E por fim, a seção 2.3 explorará os principais aspectos da simulação de tráfego.

### 2.1 Fundamentos de Engenharia de Tráfego

Esta seção está fortemente baseada nos conceitos apresentados por Roess, Prassas, e McShane [9] no livro *Traffic Engineering*.

Para começarmos a entender o sistema de tráfego, precisamos primeiro entender os aspectos dos vários elementos que o compõem e como os mesmos interagem. O sistema de tráfego é composto por cinco elementos principais: usuários, veículos, vias, sistemas de controle de tráfego e o ambiente em geral.

O ambiente é um elemento muito extenso que engloba coisas como as condições climáticas, a densidade do desenvolvimento da região onde o sistema está implantado, políticas e normas locais. Seu impacto nas operações de tráfego normalmente é considerado qualitativamente.

Nas próximas subseções, serão descritas as características pertinentes a esta dissertação sobre os usuários, os veículos e as vias. Em seguida, será detalhada a sinalização horizontal brasileira no entorno de uma interseção semaforizada, bem como o funcionamento dos semáforos. Por fim, serão expostos os sistemas automáticos de fiscalização de trânsito.

#### 2.1.1 Usuários

Os principais usuários do sistema de tráfego são os motoristas, pedestres, ciclistas e passageiros. Lidar com estes é o maior desafio da engenharia de tráfego, já

que possuem uma extensa gama de características variáveis, fazendo com que dois indivíduos nunca sejam iguais.

A maioria das características dos seres humanos seguem distribuições normais, o que caracteriza uma forte tendência central. Por exemplo, a maioria dos pedestres atravessam a rua a uma velocidade entre  $1,0\text{ m/s}$  e  $1,5\text{ m/s}$ . Entretanto, é inaceitável projetar um sistema para a média, já que a metade das pessoas que caminham mais devagar que a média estariam expostas a um grande risco de acidente fatal. Portanto, a maioria dos padrões de projetos de tráfego miram no 85<sup>o</sup> percentil ou, analogamente, no 15<sup>o</sup> percentil. No exemplo, usa-se o 15<sup>o</sup> percentil para descartar as pessoas mais lentas. Como a distribuição normal assume valores extremos em suas bordas, não seria viável acomodá-la inteiramente nos projetos. Quando é viável, um percentil maior é utilizado.

As duas características mais importantes dos motoristas são os fatores de acuidade visual e o processo de reação. Os dois têm uma forte ligação, já que a condução de um veículo depende basicamente de informações visuais. Vale registrar que a personalidade e a psicologia do motorista também são fatores importantes, no entanto, ambos são difíceis de quantificar e levar em conta no projeto de sistemas de tráfego.

## **Campo de Visão**

Para saber o impacto da visão na condução de um veículo, primeiro é preciso entender as suas limitações. A visão humana pode ser definida por vários fatores, como: acomodação do foco, acuidade, adaptação à luz, sensibilidade ao contraste, percepção de profundidade e campo de visão. Além disso, as pessoas ainda podem sofrer de algumas condições, como: catarata, glaucoma, déficit de visão periférica, desequilíbrio do músculo ocular, déficit na percepção de profundidade e daltonismo.

Um dos fatores mais importantes a ser considerado no projeto de sistemas de tráfego é o campo de visão. O campo de visão é dividido em três regiões:

- O cone de visão clara, que engloba de 3 a 10 graus ao redor da linha de visão, é a única região onde informações podem ser lidas;
- O cone de visão razoavelmente clara, que engloba de 10 a 12 graus ao redor da linha de visão, é onde ainda é possível discernir cores e formas;
- A visão periférica, que se estende até 90 graus para cada lado, até 60 graus para cima e até 70 graus para baixo da linha de visão, geralmente não permite a visão de objetos estáticos, apenas objetos em movimento.

A maioria dos testes de visão levam em conta apenas aspectos da visão estática, mas na condução de um veículo, o observador está em movimento e isto tem um

impacto negativo no campo de visão. Motoristas dirigindo a uma velocidade baixa, de 30 *km/h*, têm seu campo de visão reduzido a 100 graus e em velocidade alta, de 100 *km/h*, o campo é reduzido para 40 graus.

Levando em conta estas limitações, o projeto de sistemas de tráfego deve prover sinalizações claras e uniformes que tenham um tamanho adequado e estejam dispostas dentro do cone de visão clara do motorista.

### **Tempo de Percepção e Reação**

A atividade de condução de um veículo é uma tarefa que demanda atenção e exige que o motorista faça decisões. Estas decisões envolvem desde a escolha do caminho a ser tomado para chegar no destino até a escolha de parar ou prosseguir ao avistar a luz amarela do semáforo à frente. Para estas decisões mais instantâneas, que são tomadas ao longo de toda a atividade de condução, foi definido um processo de percepção e reação, denominado PIEV, composto por quatro etapas:

**Percepção:** Abrange desde o momento em que um objeto ou condição surge no campo de visão do motorista até que ele perceba conscientemente que algo necessita de sua atenção;

**Identificação:** Começa após a detecção e acaba quando o motorista já tem informação suficiente sobre o objeto ou condição para tomar uma decisão;

**Emoção:** Sucede a identificação e engloba a análise e a tomada de decisão sobre que ação tomar;

**Volição:** Após a decisão, é a execução fisicamente da decisão que o motorista tomou.

O tempo de percepção e reação depende de vários fatores, como o tipo e complexidade do evento percebido e condições ambientais. Naturalmente, este tempo também varia de pessoa para pessoa.

A *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) indica alguns valores como padrões de projeto. Para a maioria dos casos de reação e frenagem, o PIEV indicado é de 2,5 s, cobrindo aproximadamente o 90<sup>o</sup> percentil. Para calculos de temporização de semáforos, o PIEV recomendado é de apenas 1 s, devido a simplicidade da resposta e o pré-condicionamento dos motoristas, cobrindo aproximadamente o 85<sup>o</sup> percentil. Já em casos mais complexos, por exemplo, quando uma mudança de velocidade, caminho e/ou direção é necessária para evitar uma colisão, o PIEV indicado pode chegar até 14,5 s.

O tempo de percepção e reação que mais interessa para este trabalho é aquele que os motoristas levam em interseções semaforizadas, a partir do momento em que a luz amarela é acesa até o início da frenagem. Na sua dissertação de mestrado em

2011, DE SOUSA [10] fez uma revisão sobre os trabalhos que mediram este PIEV em outros países, sumarizado na tabela 2.1. De modo geral, os estudos apontaram para tempos consideravelmente maiores do que o aconselhado por órgãos públicos, quando tomamos o 85<sup>o</sup> percentil.

Um dos focos da dissertação de DE SOUSA foi fazer medidas do PIEV no Brasil. O seu trabalho analisou quatro interseções na cidade do Rio de Janeiro e chegou aos resultados listados na tabela 2.2, para automóveis. Novamente, o resultado para o 85<sup>o</sup> percentil está acima do aconselhado em 30%. DE SOUSA também coletou dados de 36 motos e 32 ônibus, nos quais o PIEV médio foi de 1,5 s e 1,3 s respectivamente.

Estudo	Tipo de Estudo	Tempo de Percepção e Reação (s)			
		Médio	Varição	Mediana	85 <sup>o</sup> Percentil
Gazis <i>et al.</i> (1960)	Observação	1,14	0,6 - 2,4	1,10	1,50
Crawford (1962)	Experimental pista de testes	—	0,8 - 1,85	—	—
Wortman e Matthias (1983)	Observação, em campo	1,30	1,09 - 1,55	—	1,80
Chang <i>et al.</i> (1985)	Observação, em campo	1,3 <sup>1</sup> 0,9 <sup>2</sup>	0,70 - 1,55	1,10 <sup>1</sup> 0,90 <sup>2</sup>	1,90
Mussa <i>et al.</i> (1996)	Experimental, simulador	1,16	—	—	—
Caird <i>et al.</i> (2005)	Experimental, simulador	0,96	0,50 - 2,20	0,92	1,22
Colella (2008)	Experimental, pista de testes	0,65 <sup>3</sup> 0,86 <sup>4</sup>	—	—	0,8 <sup>3</sup> 1,1 <sup>4</sup>

Tabela 2.1: Tempos de percepção e reação para frenagem ao avistar a luz amarela do semáforo, medidos em vários trabalhos. <sup>1</sup> Para velocidade < 64 km/h. <sup>2</sup> Para velocidade > 64 km/h. <sup>3</sup> Para distância de 55 m. <sup>4</sup> Para distância de 111 m.

Aproximação	Amostra	Média	85 <sup>o</sup> Percentil	Desvio Padrão
Av. Atlântica	35	1,1	1,2	0,17
Av. 24 de Maio	36	1,0	1,2	0,20
Av. Pres. Vargas	38	1,0	1,2	0,21
Av. D. Hélder	37	1,2	1,3	0,33
<b>Total</b>	<b>146</b>	<b>1,1</b>	<b>1,3</b>	<b>0,25</b>

Tabela 2.2: Tempos de percepção e reação para frenagem de automóveis ao avistar a luz amarela do semáforo, medidos no Brasil por DE SOUSA.

## 2.1.2 Veículos

Atualmente existem 77.849.890 veículos registrados no Brasil, em Abril de 2013, segundo dados do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN) [11]. Destes, 46.323.074 (59,50%) são automóveis, camionetas ou utilitários; 20.421.257 (26,23%) são motocicletas ou motonetas; 7.807.001 (10,03%) são caminhões ou caminhonetes; 851.357 (1,09%) são ônibus ou microônibus; e os 2.447.201 (3,14%) restantes são outros tipos de veículos.

As características destes tipos de veículos variam bastante de um para o outro e devem ser consideradas nos projetos de sistemas de tráfego. Algumas das principais características que devem ser consideradas são: dimensões físicas, peso total e por eixo, taxas de aceleração e desaceleração e características de viragem. Duas destas características são de interesse deste trabalho: comprimento do veículo e taxa de desaceleração.

### Comprimento

O informativo da Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores (FENABRAVE) de dezembro de 2012 [12], que lista os modelos de veículos mais emplacados de 2012, foi usado como base para obter os comprimentos mais comuns de veículos no Brasil. O comprimento de automóveis, camionetas ou utilitários varia de 3,5 *m* a 5,3 *m*. O comprimento de caminhões ou caminhonetes começa em 5,7 *m* e pode chegar a no máximo 19,8 *m*, fixado pela resolução nº 210/11 do CONTRAN [13]. O comprimento de ônibus ou microônibus varia de 8,3 *m* a 14,0 *m*. O comprimento de motocicletas ou motonetas varia de 2,0 *m* a 2,1 *m*.

### Taxa de Desaceleração

A taxa de desaceleração que interessa para este trabalho, é aquela para parada total do veículo quando o motorista decidir por frear ao avistar a luz amarela do semáforo. O guia do *Institute of Transportation Engineers* (ITE) [14], de 2009, sugere para esta situação, uma desaceleração confortável no valor de 3,0  $m/s^2$ .

Na sua dissertação de mestrado, DE SOUSA [10] fez uma revisão sobre os trabalhos que mediram esta taxa de desaceleração em outros países, sumarizado na tabela 2.3. Os estudos apontaram para taxas consideravelmente diferentes do sugerido pelo ITE. DE SOUSA ressalta que órgãos públicos como a CET-SP utilizam o valor sugerido por VILLANOVA para a desaceleração, que é de 2,8  $m/s^2$ .

Um dos focos da dissertação de DE SOUSA foi fazer medidas da taxa de desaceleração no Brasil. O seu trabalho analisou quatro interseções na cidade do Rio de Janeiro e chegou aos resultados listados na tabela 2.4, para automóveis. DE SOUSA

também coletou dados de 36 motos e 32 ônibus, nos quais a taxa de desaceleração encontrada foi de  $4,0 m/s^2$  e  $2,5 m/s^2$  respectivamente.

Estudo	Tipo de Estudo	Desaceleração Média ( $m/s^2$ )	Velocidade ( $km/h$ )
Gazis <i>et al.</i> (1960)	Observação	3,3	—
Williams (1977)	Observação	2,5	16,1 - 40,2
Parsonson e Santiago (1980)	Observação	3,0	25 - 40
Wortman e Matias (1983)	Observação	3,5	48,3 - 80,5
Chang (1985)	Observação	2,9	> 32
Villanova (1985)	Observação	2,8	—
Wang <i>et al.</i> (2005)	Veículo	2,4	40 - 60
	Instrumentado	2,7	60 - 70
Caird <i>et al.</i> (2005)	Veículo	3,7 (> 50 anos)	—
	Instrumentado	4,2 (< 50 anos)	—
El-Shawarby <i>et al.</i> (2005)	Veículo	3,27 (média)	72
	Instrumentado	2,2 (> 111m)	
		5,9 (< 32m)	
Gates <i>et al.</i> (2007)	Observação Filmagem	3,7	40 - 80
Colella (2008)	Veículo Instrumentado	4,17 (55m)	—
		3,71 (66m)	
		2,73 (88m)	
		2,13 (111m)	

Tabela 2.3: Taxas de desaceleração de automóveis ao avistar a luz amarela do semáforo, medidos em vários trabalhos.

Aproximação	Amostra	Média ( $m/s^2$ )	85 <sup>o</sup> Percentil ( $m/s^2$ )	Desvio Padrão	Velocidade ( $km/h$ )
Av. Atlântica	49	2,91	3,30	0,51	68,1
Av. 24 de Maio	33	2,87	3,42	0,55	65,3
Av. Pres. Vargas	30	2,44	2,70	0,33	60,4
Av. D. Hélder	34	2,88	3,31	0,53	70,0
<b>Total</b>	<b>146</b>	<b>2,8</b>	<b>3,3</b>	<b>0,52</b>	<b>66,3</b>

Tabela 2.4: Taxas de desaceleração de automóveis ao avistar a luz amarela do semáforo, medidos no Brasil por DE SOUSA.

### 2.1.3 Vias

As vias são um componente principal do sistema de tráfego, provendo acessibilidade aos terrenos lindeiros e mobilidade para os usuários do sistema. O Código Brasileiro de Trânsito [15] primeiro divide as vias em dois grandes grupos: urbanas e rurais. As vias urbanas são classificadas em:

**Via de trânsito rápido** Caracterizada por acessos especiais com trânsito livre,



sem interseções em nível, sem acessibilidade direta aos lotes lindeiros e sem travessia de pedestres em nível.

**Via arterial** Caracterizada por interseções em nível, geralmente controlada por semáforo, com acessibilidade aos lotes lindeiros e às vias secundárias e locais, possibilitando o trânsito entre as regiões da cidade.

**Via coletora** Destinada a coletar e distribuir o trânsito que tenha necessidade de entrar ou sair das vias de trânsito rápido ou arteriais, possibilitando o trânsito entre as regiões da cidade.

**Via local** Caracterizada por interseções em nível não semaforizadas, destinada apenas ao acesso local ou a áreas restritas.

As vias rurais são classificadas em:

**Rodovia** Via rural pavimentada.

**Estrada** Via rural não pavimentada.

Os limites de velocidade padrão para estas vias está listado nas tabelas 2.5 e 2.6, mas o órgão ou entidade com circunscrição sobre a via pode regulamentar limites inferiores ou superiores a estes, por meio de sinalização.

<b>Vias Urbanas</b>	<b>Limite de Velocidade (km/h)</b>
Via de trânsito rápido	80
Via arterial	60
Via coletora	40
Via local	30

Tabela 2.5: Limite de velocidade para vias urbanas, onde não existe sinalização regulamentadora. [15]

<b>Vias Rurais</b>	<b>Limite de Velocidade (km/h)</b>
Rodovia	
para automóveis, camionetas e motocicletas	110
para ônibus e microônibus	90
para os demais veículos	80
Estrada	60

Tabela 2.6: Limite de velocidade para vias rurais, onde não existir sinalização regulamentadora. [15]

## 2.1.4 Sinalização Horizontal

A sinalização horizontal tem a finalidade de transmitir e orientar os usuários sobre as condições de utilização adequada da via, compreendendo as proibições, restrições e informações que lhes permitam adotar comportamento adequado, de forma a aumentar a segurança e ordenar os fluxos de tráfego [16]. No Brasil, esta sinalização é definida pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) e está descrita no Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, Volume IV, Sinalização Horizontal de 2007.

Nas subseções a seguir estão descritas as sinalizações horizontais encontradas no entorno de uma interseção semaforizada, bem como suas principais medidas. Estas sinalizações são: a linha simples contínua, a linha simples seccionada, a linha de retenção, a faixa para travessia de pedestres e a marcação de área de conflito.

### Linha Simples Contínua

A linha simples contínua é uma linha longitudinal que ordena o fluxo de mesmo sentido delimitando cada faixa de trânsito e regulamentando as situações em que são proibidas a ultrapassagem e a transposição de faixa de trânsito. Ela é utilizada na aproximação de interseções semaforizadas, como ilustrada na figura 2.1. Seu comprimento,  $L$ , deve ter no mínimo  $15,00\text{ m}$  e no máximo  $30,00\text{ m}$ , contando a partir da linha de retenção, exceto quando estudos apontem o contrário. Sua largura,  $l$ , deve ter  $0,10\text{ m}$  para vias com velocidade regulamentada inferior a  $80\text{ km/h}$  e  $0,15\text{ m}$  para vias com velocidade regulamentada superior ou igual a  $80\text{ km/h}$ . Sua cor é branca.

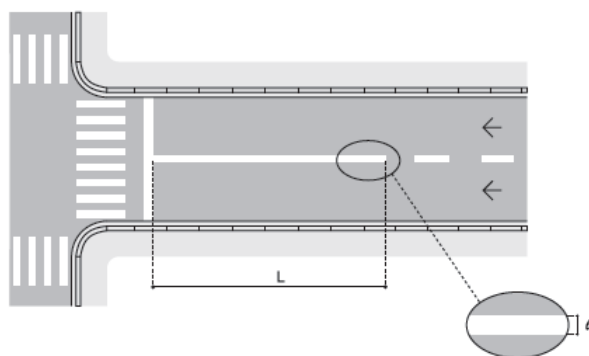


Figura 2.1: Linha simples contínua na aproximação de uma interseção semaforizada. Seu comprimento,  $L$ , deve ser  $15,00\text{ m} \leq L \leq 30,00\text{ m}$ . Sua largura,  $l$ , deve ser  $0,10\text{ m}$  para vias com velocidade regulamentada,  $v$ ,  $v < 80\text{ km/h}$  e  $0,15\text{ m}$  para  $v \geq 80\text{ km/h}$ . [16]

## Linha Simples Seccionada

A linha simples seccionada é uma linha longitudinal que ordena o fluxo de mesmo sentido delimitando cada faixa de trânsito e regulamentando as situações em que são permitidas a ultrapassagem e a transposição de faixa de trânsito. Ela está ilustrada na figura 2.2 e suas medidas em função da velocidade regulamentada da via estão sumarizadas na tabela 2.7. Sua cor é branca.

Cada faixa de trânsito tem sua largura definida em função da composição do tráfego, mas de modo geral, seu valor desejável é de  $3,50\text{ m}$ . Os valores recomendados estão na tabela 2.8.

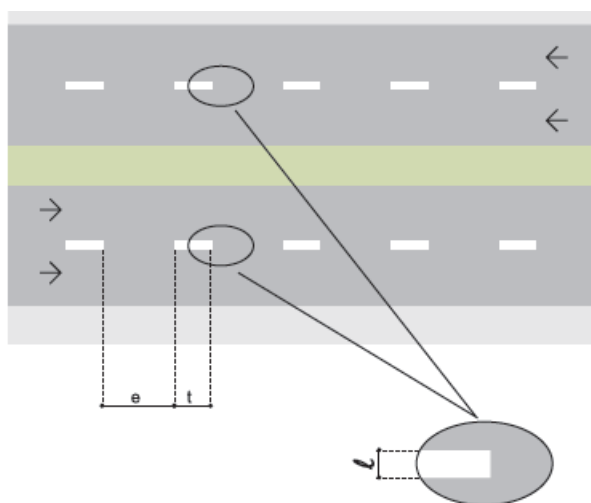


Figura 2.2: Linha simples seccionada. [16]

Velocidade $v$ (km/h)	Largura $l$ (m)	Cadência $t : e$	Traço $t$ (m)	Espaçamento $e$ (m)
$v < 60$	0,10	1 : 2	2	4
		1 : 3	2	6
$60 \leq v < 80$	0,10 <sup>1</sup>	1 : 2	3	6
		1 : 2	4	8
		1 : 3	2	6
		1 : 3	3	9
$v \geq 80$	0,15	1 : 3	3	9
		1 : 3	4	12

Tabela 2.7: Medidas da linha simples seccionada em função da velocidade regulamentada da via. <sup>1</sup> A largura pode ser maior no caso em que estudos apontem a necessidade. [16]

Tipo de Faixa	Largura da Faixa	
	Mínima (m)	Desejável (m)
adjacente à guia	3,00	3,50
não adjacente à guia	3,00	3,50
em rodovias e vias de trânsito rápido	3,00	3,50

Tabela 2.8: Medidas da largura da faixa. Em condições especiais, admite-se larguras variando entre  $2,50\text{ m}$  e  $4,00\text{ m}$ . [16]

### Linha de Retenção

A linha de retenção é uma linha transversal que indica o local limite em que o condutor deve parar o veículo. Ela está ilustrada na figura 2.3. Sua largura,  $l$ , deve ter no mínimo  $0,30\text{ m}$  e no máximo  $0,60\text{ m}$ , de acordo com estudos de engenharia, e sua extensão deve abranger toda a largura da pista no sentido do tráfego. Sua cor é branca.

No caso em que a linha de retenção precede uma interseção semaforizada, ela indica o limite de parada quando o fluxo que a atravessa está interrompido. Quando existe uma faixa para travessia de pedestres na interseção, como na figura 2.4a, a distância mínima da linha de retenção para a faixa de travessia de pedestres é de  $1,60\text{ m}$ . Quando não existe uma faixa de pedestres, como na figura 2.4b, a distância mínima da linha de retenção para o prolongamento do meio fio da pista transversal é de  $1,00\text{ m}$ .

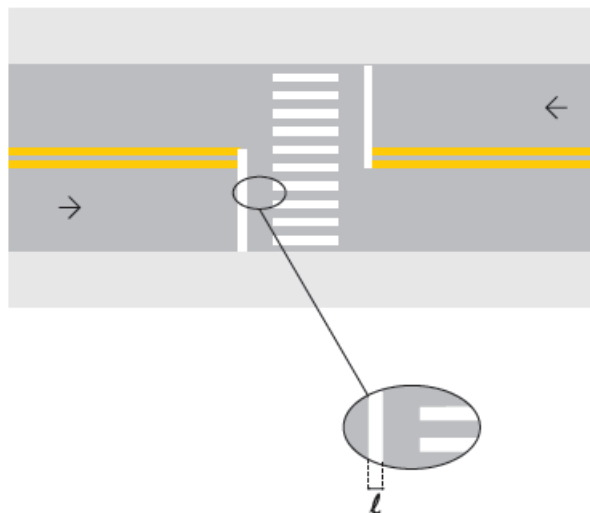


Figura 2.3: Linha de retenção. Sua largura,  $l$ , deve ser  $0,30\text{ m} \leq l \leq 0,60\text{ m}$ , de acordo com estudos de engenharia. [16]

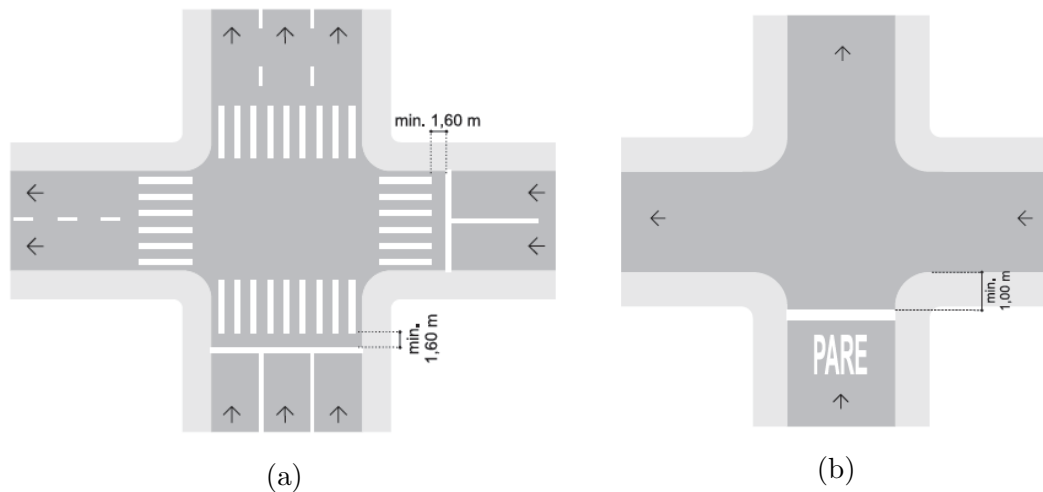


Figura 2.4: Linha de retenção precedendo uma interseção. Em (a), sua distância mínima para faixa para travessia de pedestres é de 1,60 *m*. Em (b), sua distância mínima para o prolongamento do meio fio da pista transversal é de 1,00 *m*. [16]

### Faixa para Travessia de Pedestres

A faixa para travessia de pedestres delimita a área destinada à travessia de pedestres e regulamenta a prioridade de passagem dos mesmos em relação aos veículos. Em interseções, ela deve ser demarcada no mínimo a 1,00 *m* do prolongamento do meio fio da pista transversal. Existem dois tipos de faixas: a zebra e a paralela, ambas na cor branca.

A faixa zebra, ilustrada na figura 2.5a, pode ser utilizada em locais semaforizados ou não. A largura das faixas, *l*, varia de 0,30 *m* a 0,40 *m*. A distância entre as faixas, *d*, varia de 0,30 *m* a 0,80 *m*. A extensão das faixas tem um valor mínimo de 3,00 *m* e recomendado de 4,00 *m*, mas pode variar em função do volume de pedestres e da visibilidade.

A faixa paralela, ilustrada na figura 2.5b, só pode ser utilizada em interseções semaforizadas. A largura das linhas, *l*, varia de 0,40 *m* a 0,60 *m*. A distância entre as linhas, *d*, tem um valor mínimo de 3,00 *m* e recomendado de 4,00 *m*. Em casos onde o volume exija uma largura superior a 4,00 *m*, deve ser usada a faixa zebra.

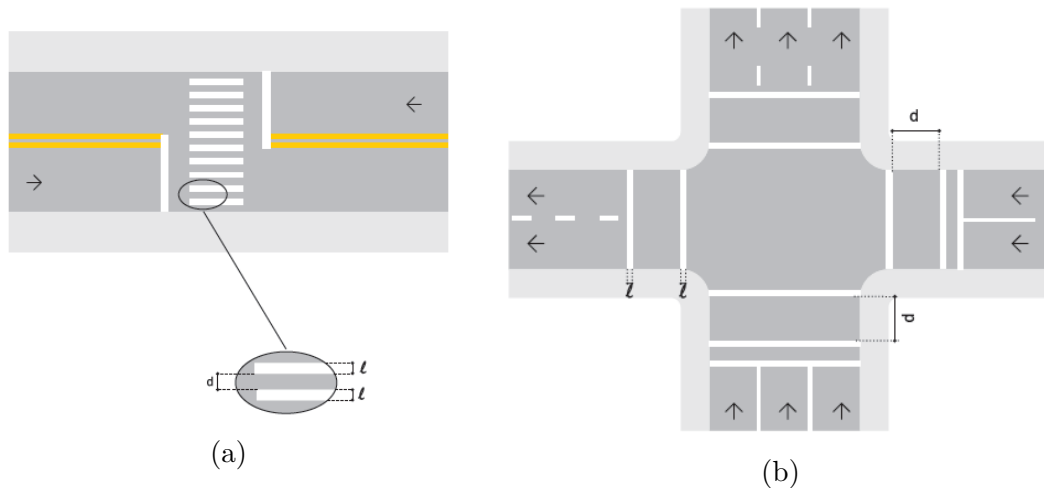


Figura 2.5: Faixa para travessia de pedestres. Em (a), faixa zebraada com largura,  $l$ , variando de  $0,30\text{ m}$  a  $0,40\text{ m}$  e distância,  $d$ , variando de  $0,30\text{ m}$  a  $0,80\text{ m}$ . Em (b), faixa paralela com largura,  $l$ , variando de  $0,40\text{ m}$  a  $0,60\text{ m}$  e distância,  $d$ , com valor mínimo de  $3,00\text{ m}$  e recomendado de  $4,00\text{ m}$ . [16]

### Marcação de Área de Conflito

A marcação da área de conflito reforça a proibição de parada na área da interseção que prejudica a circulação do fluxo transversal. Seu desenho está ilustrado na figura 2.6. As dimensões recomendáveis para o seu desenho são:  $0,15\text{ m}$  de largura para a linha de borda externa,  $0,10\text{ m}$  de largura para as linhas internas e  $2,50\text{ m}$  de espaçamento entre os eixos das linhas internas, como indicado na figura 2.6a. A distância recomendável de cada linha de borda externa para o prolongamento do seu respectivo meio fio é de  $0,30\text{ m}$ , como mostrado na figura 2.6b. Sua cor é amarela.

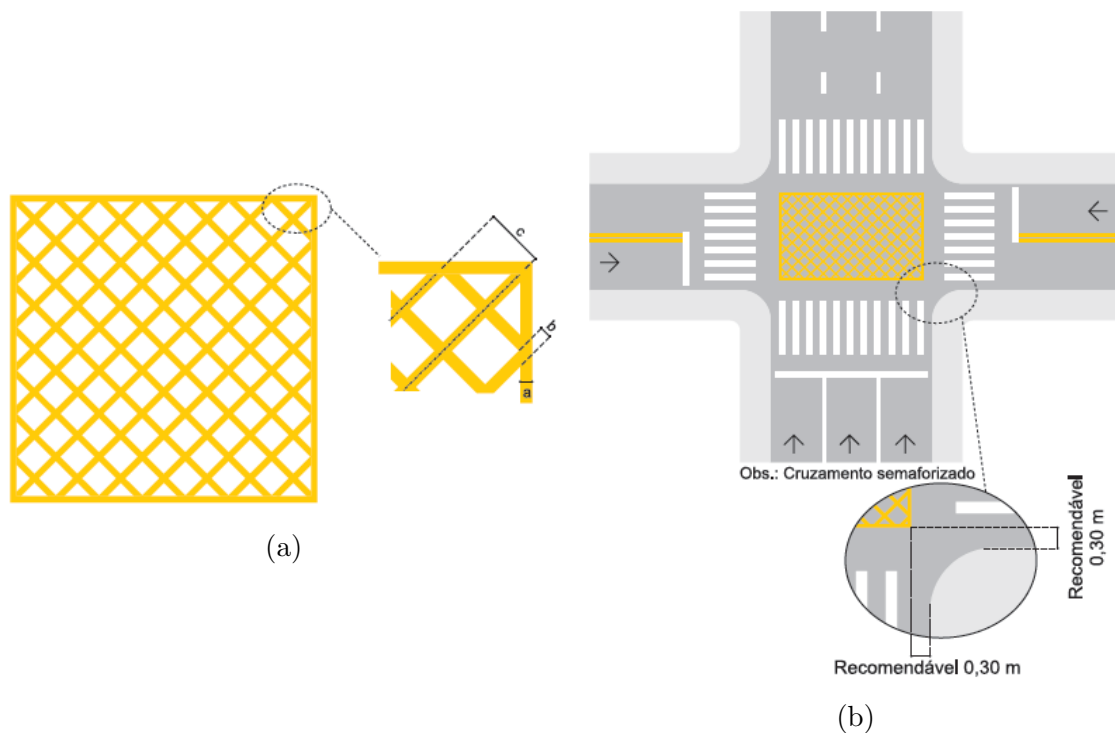


Figura 2.6: Marcação de área de conflito. Em (a), as dimensões recomendadas são: largura da linha de borda externa,  $a = 0,15 \text{ m}$ , largura das linhas internas,  $b = 0,10 \text{ m}$ , e espaçamento entre os eixos das linhas internas,  $c = 2,50 \text{ m}$ . Em (b), a distância recomendável de cada linha de borda externa para o prolongamento do seu respectivo meio fio é de  $0,30 \text{ m}$  para o meio fio de ambos os fluxos. [16]

### 2.1.5 Semáforo

Uma interseção apresenta um problema de fluxos de tráfego conflitantes. Existem vários tipos de controle que podem ser usados para resolver esse conflito. O mais básico é a regra de preferência, que diz que em uma interseção, o veículo que se aproxima pela esquerda deve dar preferência ao veículo que se aproxima pela direita. Outro tipo é a colocação de placas de pare para um dos fluxos, indicando que o outro fluxo tem preferência de passagem pela interseção. O último tipo é a implantação de um semáforo, que indica para cada fluxo, em cada momento, a ação permitida por meio de um código de cores.

Numa interseção, podemos agrupar os fluxos de tráfego de modo que cada grupo não tenha fluxos que conflitem entre si. Naturalmente, podem existir várias maneiras de combinar os fluxos para formar estes grupos. Idealmente, devemos buscar a combinação que gere o menor número de grupos. O semáforo deve permitir o movimento de cada um destes grupos por vez, enquanto proíbe o movimento de todos os outros grupos.

O tempo alocado para a movimentação de um grupo de fluxos não conflitantes é chamado de *fase*. A fase é comumente composta por um intervalo de verde, seguido

de um intervalo de mudança e encerrada por um intervalo de liberação.

Um *intervalo* é um período de tempo no qual a indicação do semáforo se mantém fixa. Existem quatro tipos de intervalos, descritos a seguir:

**Intervalo de Verde** Libera a movimentação de um grupo de fluxos não conflitantes entre si, enquanto proíbe a movimentação dos demais fluxos. O semáforo indica verde para os fluxos que podem seguir.

**Intervalo de Vermelho** Proíbe a movimentação de todos os fluxos conflitantes aos liberados pela indicação verde. O semáforo indica vermelho para os fluxos que devem parar.

**Intervalo de Mudança** Corresponde a indicação amarela do semáforo, que informa a transição do verde para o vermelho, enquanto todos os outros fluxos conflitantes estão com indicação vermelha. Seu tempo deve ser dimensionado de modo a permitir que um veículo que não possa parar com segurança, cruze a interseção legalmente.

**Intervalo de Vermelho Total** Também faz parte da transição do verde para o vermelho, mas todos os fluxos estão com indicação vermelha, permitindo que qualquer fluxo remanescente na interseção se encerre antes de liberar um fluxo conflitante. Este intervalo também é conhecido como vermelho geral. Ele nem sempre é usado.

Uma sequência completa de indicações luminosas é chamada de ciclo. Em um ciclo, é assegurado que todos os fluxos tenham tido pelo menos um intervalo de verde. Ao final de um ciclo, um novo ciclo se inicia. O tempo total em segundos para completar um ciclo é chamado de comprimento do ciclo.

Para controlar toda esta operação, o semáforo possui um controlador. Estes controladores podem ser classificados nos seguintes tipos:

**Tempo Fixo** Todos os parâmetros de funcionamento: comprimento do ciclo, sequenciamento das fases e tempo dos intervalos, são pré-definidos e constantes. Em alguns casos, o controlador permite o cadastro de mais de um conjunto de configurações atrelado ao horário do dia, por exemplo: uma configuração padrão, uma segunda para o horário de pico da manhã e uma última para o horário de pico do fim do dia.

**Semi-atuado** Detectores são posicionados nas vias secundárias, mas não na via principal. A via principal está sempre com indicação verde, a não ser quando acontece uma detecção em alguma das vias secundárias e o verde seja transferido para via em questão, respeitando o tempo mínimo de verde para via



principal. O verde volta à via principal quando o detector percebe que não há mais demanda na via secundária ou quando esgota o tempo máximo de verde para uma via secundária.

**Atuado** Detectores são colocados em todas as vias. O tempo de verde é alocado de acordo com informações dos detectores e regras pré-programadas. Em alguns casos, detectores são posicionados apenas nas vias secundárias, mas não na via principal. A via principal está sempre com indicação verde, a não ser quando acontece uma detecção em alguma das vias secundárias e o verde seja transferido para via em questão, respeitando o tempo mínimo de verde para via principal. O verde volta à via principal quando o detector percebe que não há mais demanda na via secundária ou quando esgota o tempo máximo de verde para uma via secundária.

**Controlado por Computador** Seus parâmetros são configurados dinamicamente por um sistema maior, que coordena vários semáforos de uma região com base em dados coletados por vários detectores espalhados por ela. Estes coordenadores podem ser sistemas com um controle centralizado ou distribuído. Sua frequência de reconfigurações pode estar associada apenas aos horários de pico ou ter uma granularidade tão fina quanto de 15 em 15 minutos. DE PAIVA [1] propõe um sistema deste tipo em sua dissertação, distribuído e com grão fino.

No Brasil, não há uma regulamentação clara sobre onde os semáforos devem ser posicionados. No presente momento, o volume V do Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, que trata da sinalização semaforica, ainda está em desenvolvimento pela Câmara Temática de Engenharia de Tráfego, de Sinalização e da Via, para ser aprovado pelo CONTRAN. A norma atual vigente é a do Manual de Semáforos [17], de 1984, publicado pelo DENATRAN, que não faz qualquer referência ao arranjo físico dos semáforos. A maioria das cidades brasileiras posiciona as colunas de fixação dos grupos focais do semáforo antes do cruzamento, mas algumas, como por exemplo a cidade de São Paulo, as posiciona após o cruzamento [18].

### 2.1.6 Sistemas Automáticos de Fiscalização

Hoje em dia é muito comum termos sistemas automáticos fazendo a fiscalização das regras de trânsito. Estes sistemas podem ser usados para fiscalizar os limites de velocidade, a exclusividade de determinadas faixas a certos tipos de veículos, o avanço do sinal vermelho do semáforo, a parada sobre a faixa de travessia de pedestres na mudança de sinal luminoso, entre outros.

Todos esses sistemas precisam de detectores de tráfego, para indicar a presença de veículos, sua velocidade e até mesmo seu tipo. Estes detectores podem funcionar com base em diversos princípios [19], como:

**Laços indutivos** Cabos metálicos são colocados em cortes finos no pavimento, geralmente em padrões retangulares e ligados ao controlador. Uma corrente elétrica passa por estes cabos, induzindo um campo magnético que se altera na passagem ou presença de um veículo. Este tipo é o mais comum no Brasil.

**Laços virtuais por tratamento de imagem** Uma câmera de vídeo fixa capta a imagem de toda a largura da via e em cima desta imagem, são definidas zonas virtuais para cada faixa da via. Conforme os veículos cruzam estas regiões virtuais, a mudança no padrão de imagem é detectado por um sistema de processamento de imagem.

**Microondas** O equipamento emite um feixe de microondas que projeta uma região oval na superfície da via. Regiões são configuradas em seu sistema e um sensor detecta a distância percorrida pelas ondas. Quando esta distância difere do padrão, quando a pista está vazia, é acusada a detecção de um veículo.

**Fluxo magnético** O sensor é instalado na superfície do pavimento e monitora as perturbações que os veículos causam no fluxo do campo magnético terrestre. Ele não é capaz de detectar veículos parados ou com velocidades inferiores a  $15 \text{ km/h}$ , pois depende de uma variação significativa no fluxo magnético.

**Infravermelho** Pode ser do tipo passivo ou ativo. O ativo emite luz infravermelha e capta as ondas refletidas pelos veículos. O passivo não emite energia, se aproveita por exemplo da luz do sol e apenas capta os reflexos.

**Ultrassom** O aparelho emite pulsos de ultrassom sobre a pista e mede o tempo que eles demoram até retornar. Com base na velocidade do som, é possível estimar o tempo para o pulso retornar quando não há nenhum veículo. Caso haja um veículo passando, o tempo se altera e o veículo é detectado.

Neste trabalho, o interesse são os sistemas de fiscalização de avanço do sinal e de parada sobre a faixa de pedestres, que serão apresentados a seguir.

### **Avanço de Sinal Vermelho do Semáforo**

Os sistemas de fiscalização de avanço de sinal vermelho do semáforo são compostos de um detector de tráfego, um dispositivo registrador de imagem e um controlador. Quando o controlador recebe a informação da indicação vermelha do semáforo, ele

deve aguardar um tempo de retardo pré-definido e depois registrar a imagem de qualquer veículo que cruze o sinal durante o intervalo de vermelho.

No Brasil, não há uma norma indicando onde deve ser posicionado o detector de tráfego para fiscalização do avanço de sinal. Segundo a resolução nº 165/04 do CONTRAN [20], compete à autoridade de trânsito com circunscrição sobre a via dispor sobre a localização, instalação e operação do sistema. O mais comum é colocar o detector junto à linha de retenção, ver figura 2.4.

A portaria nº 16/04 do CONTRAN [21] define que o tempo de retardo pode ser configurado para valores de no mínimo 0 e de no máximo 5 segundos, em passos de 1 em 1 segundo. A portaria também define que a imagem do veículo só deve ser registrada após ele transpor a área de influência do detector.

O tempo de retardo também é conhecido como tempo de *perdão* no jargão da engenharia de tráfego.

### **Parada sobre a Faixa de Traversia de Pedestres**

Os sistemas de fiscalização de parada sobre a faixa de travessia de pedestres na mudança de sinal luminoso são compostos de um detector de tráfego, um dispositivo registrador de imagem e um controlador. Quando o controlador recebe a informação da indicação vermelha do semáforo, ele deve detectar qualquer veículo que fique sobre a faixa de pedestres durante o intervalo de vermelho por mais tempo que um tempo de permanência pré-definido e registrar a imagem do veículo.

Embora não haja uma norma indicando exatamente onde o detector deve estar, ele normalmente é posicionado no centro da faixa de travessia para pedestres, ver figura 2.5. Segundo a resolução nº 165/04 do CONTRAN [20], compete a autoridade de trânsito com circunscrição sobre a via dispor sobre a localização, instalação e operação do sistema.

A portaria nº 16/04 do CONTRAN [21] define que o tempo de permanência pode ser configurado para valores de no mínimo 5 e de no máximo 12 segundos, em passos de 1 em 1 segundo.

## **2.2 Zona do Dilema**

A falta de rigor no que diz respeito à definição da terminologia e documentação das premissas, quando se discute a zona do dilema, torna difícil ter uma discussão informada das questões [22]. A primeira coisa a se observar claramente, é que existem duas definições para zona do dilema, e que estas duas definições são complementares. A primeira definição, também conhecida como zona do dilema do tempo de amarelo, está associada à temporização do semáforo, detalhada na seção 2.2.1. A segunda

definição, também conhecida como zona de indecisão ou zona do dilema do tipo II, está associada ao comportamento do motorista, detalhada na seção 2.2.2.

### 2.2.1 Zona do Dilema do Tempo de Amarelo

Na formulação descrita por GAZIS *et al.* [2], um veículo a uma certa distância da linha de retenção de uma interseção semaforizada, ao avistar a luz amarela do semáforo, tem duas opções: desacelerar, de modo a parar antes da linha de retenção, ou cruzar toda a interseção antes que o semáforo mude para vermelho. Sua formulação leva em conta o tempo de reação e também o tempo de decisão do condutor.

O guia do *Institute of Transportation Engineers* (ITE) [14] define a zona do dilema como a distância entre dois pontos na aproximação de uma interseção semaforizada, sendo o ponto inicial onde o condutor em aproximação seria capaz de parar até a linha de retenção e sendo o ponto final onde os condutores conseguiriam passar por toda a interseção antes que o semáforo indique a luz vermelha. Ou seja, a zona do dilema é a interseção da região onde o condutor já está perto demais para parar com segurança, com a região onde o condutor não conseguirá passar sem avançar o sinal vermelho.

O estudo de GAZIS *et al.* aponta que esta zona do dilema pode existir devido a uma má temporização do intervalo de amarelo no semáforo. Neste caso, veículos que estão trafegando próximos à velocidade máxima estabelecida para via estão sujeitos a uma zona do dilema mais extensa, enquanto que veículos trafegando a baixas velocidades podem não estar sujeitos a nenhum dilema. GAZIS *et al.* ainda ressaltam uma situação bem crítica, onde o tempo de amarelo está muito curto e um condutor viajando na velocidade máxima permitida, ao perceber o sinal amarelo, não conseguiria nem frear e nem cruzar a interseção, mesmo que ele tivesse disposto a utilizar toda a potência do seu carro e violar o limite de velocidade.

Observamos claramente que existe uma incompatibilidade entre o desejo do condutor obedecer o sinal amarelo e as limitações impostas ao mesmo. A solução para mitigar este dilema envolve regular o tempo de amarelo com base nas velocidades comuns de circulação pela interseção.

#### Formulação Matemática

Na revisão da formulação de GAZIS *et al.* [2], feita por Liu, Herman, e Gazis [3], a definição da zona do dilema começa a ser construída considerando o cenário ilustrado pela figura 2.7. Neste cenário, o motorista está se movendo em uma velocidade constante  $v$  em direção à interseção. Quando a luz amarela do semáforo acende, o motorista está a uma distância  $x$  da linha de retenção. Neste momento, o motorista

tem duas opções: parar o veículo antes da linha de retenção ou cruzar totalmente a interseção antes que o sinal mude para luz vermelha.

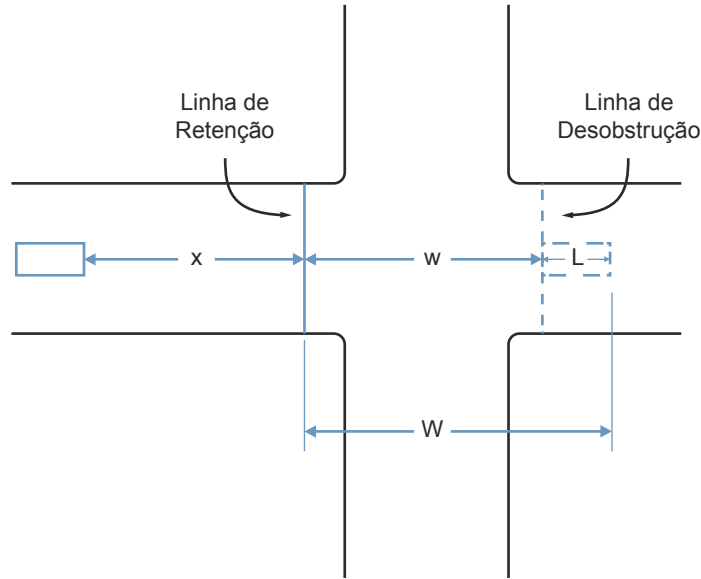


Figura 2.7: Linhas de parada e desobstrução. O veículo está a uma distância  $x$  da linha de parada. A distância entre a linha de parada e a linha de desobstrução é  $w$ . O comprimento do veículo é  $L$ . [2]

Caso o motorista decida parar, ele precisa desacelerar o seu veículo, de modo a chegar na parada completa antes da linha de retenção. Considerando uma desaceleração  $b$  e um tempo de percepção e reação  $\delta$ , temos:

$$x - v\delta \geq \frac{v^2}{2b} \quad (2.1)$$

O termo da esquerda é o espaço disponível para parada, já descontado o espaço percorrido durante o tempo de percepção e reação. O termo da direita é a distância necessária para uma parada completa com uma desaceleração constante. Desse modo é possível definir uma distância crítica de parada,  $x_c$ , como:

$$x_c = v\delta + \frac{v^2}{2b} \quad (2.2)$$

Caso o motorista decida seguir em velocidade constante, ele precisa cruzar a interseção, que tem comprimento  $w$ , de modo que o seu veículo, com comprimento  $L$ , fique fora da interseção. Definindo o tempo de amarelo como  $\tau$ , temos:

$$x + w + L \leq v\tau \quad (2.3)$$

O termo da esquerda é a distância total que deve ser percorrida e o termo da direita é a distância que pode ser percorrida em velocidade constante durante o

tempo de amarelo. Desse modo é possível definir uma distância crítica para o cruzamento da interseção,  $x_0$ , como:

$$x_0 = v\tau - w - L \quad (2.4)$$

Quando um veículo se encontra na região  $x_0 < x < x_c$ , dizemos que ele se encontra na zona do dilema, já que não há distância suficiente para parada total e nem tempo para cruzar a interseção. Assim, podemos definir a zona do dilema,  $D$ , como:

$$D = x_c - x_0 = v(\delta - \tau) + \frac{v^2}{2b} + w + L \quad (2.5)$$

Só faz sentido falar em zona do dilema quando  $D > 0$ . Quando  $D < 0$ , existe uma região onde o motorista pode decidir tanto entre parar ou prosseguir em velocidade constante. A figura 2.8 ilustra as distâncias críticas de parada e para o cruzamento da interseção e as regiões onde o veículo não consegue parar e não consegue cruzar, de modo que exista uma zona do dilema configurada.

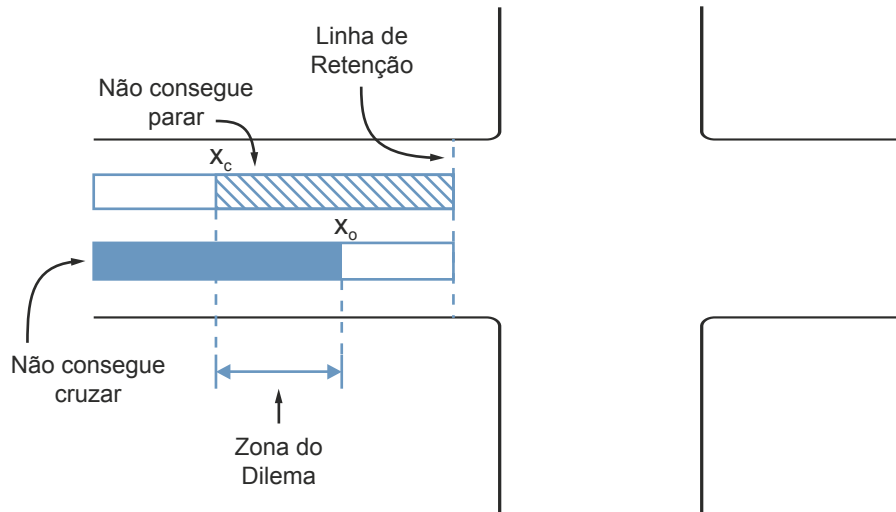


Figura 2.8: Zona de dilema do tempo de amarelo. [2]

Então, para eliminar a zona do dilema é necessário que  $D \leq 0$ , desse modo é possível definir um tempo mínimo de amarelo para o semáforo,  $\tau_{min}$ , como:

$$\tau_{min} = \delta + \frac{v}{2b} + \frac{w + L}{v} \quad (2.6)$$

A figura 2.9 ilustra  $\tau_{min}$  em função de  $v_0$  para vários valores de  $w + L$ . O valor de  $\tau_{min}$  diverge tanto para valores pequenos quanto para valores grandes de  $v$ , mas podemos observar que para valores grandes,  $\tau_{min}$  diverge muito mais lentamente do que para valores pequenos. Como o Código Brasileiro de Trânsito [15] determina o

maior limite de velocidade como  $110 \text{ km/h}$ , ver subsecção 2.1.3, o gráfico foi limitado a esta velocidade. Próximo aos  $110 \text{ km/h}$ , mesmo para interseções grandes, é possível eliminar a zona de dilema com tempos factíveis de amarelo. Já para velocidades pequenas, para eliminar a zona do dilema, seriam necessários tempos de amarelo muito altos. Papacostas e Kasamoto [23] ressaltaram que um veículo que se aproxima lentamente pode estar na zona do dilema não importando o quão grande seja a duração do tempo de amarelo.

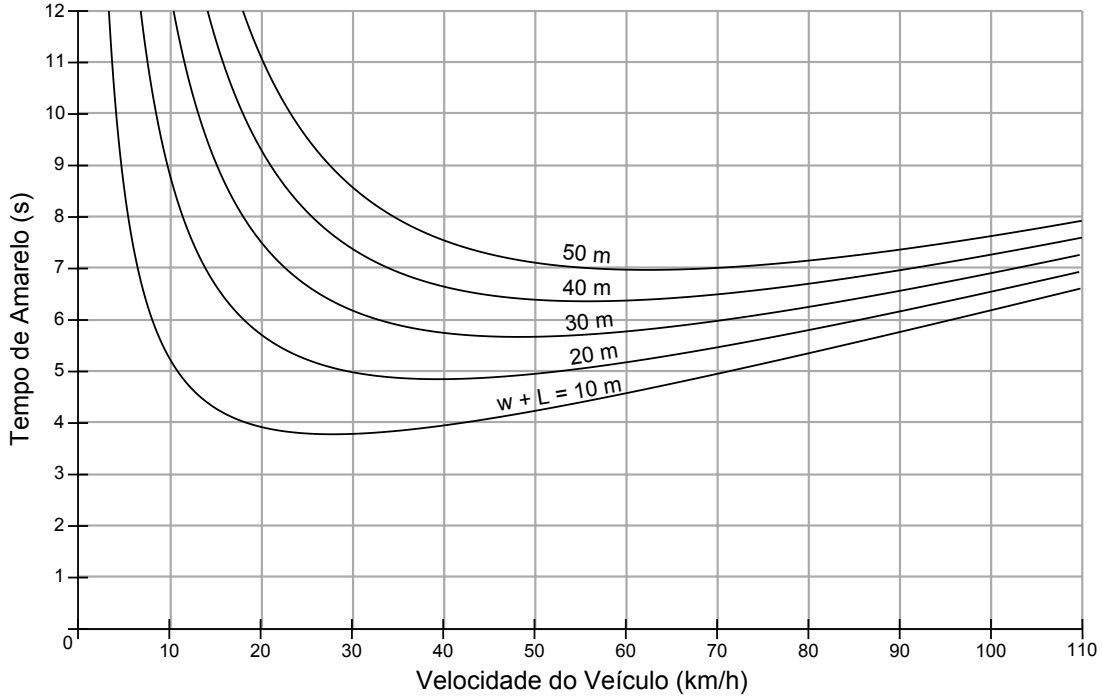


Figura 2.9: Tempo mínimo de amarelo,  $\tau_{min}$ , para não existir zona do dilema em função da velocidade de aproximação,  $v$ , para vários comprimentos de interseção mais comprimento do veículo,  $w + L$ . Foi considerado um tempo de percepção e reação,  $\delta = 1,2 \text{ s}$ , e desaceleração,  $b = 3 \text{ m/s}^2$ . Adaptado de [2].

Podemos observar na figura 2.9, que a equação 2.6 nem sempre admite uma solução para  $v$  para qualquer valor de  $\tau_{min}$ . Fazendo uma manipulação matemática temos:

$$\tau_{min} - \delta - \sqrt{\frac{2(w + L)}{b}} = \left( \sqrt{\frac{v}{2b}} - \sqrt{\frac{w + L}{v}} \right)^2 \quad (2.7)$$

Logo, quando  $\tau_{min} < \delta + \sqrt{2(w + L)/b}$ , não há uma solução para equação. Neste caso, para qualquer velocidade de aproximação existiria uma zona do dilema, mas não necessariamente todos os veículos estariam nestas regiões quando a indicação amarela do semáforo aparecesse.

Papacostas e Kasamoto [23] discutem a figura 2.10, que traça  $x_0$  e  $x_c$  em função

da velocidade de aproximação, no caso em que as duas se interceptam em dois pontos, formando cinco regiões:

**Região A:** O veículo não consegue cruzar a interseção, mas consegue parar antes da linha de retenção;

**Região B:** O veículo não consegue parar antes da linha de retenção, mas consegue cruzar a interseção mantendo sua velocidade;

**Região C:** O veículo pode tanto parar quanto cruzar a interseção;

**Região D:** O veículo se aproximando em alta velocidade tem uma zona onde não consegue nem parar e nem cruzar a interseção, uma zona do dilema;

**Região E:** O veículo se aproximando em baixa velocidade tem uma zona onde não consegue nem parar e nem cruzar a interseção, uma zona do dilema.

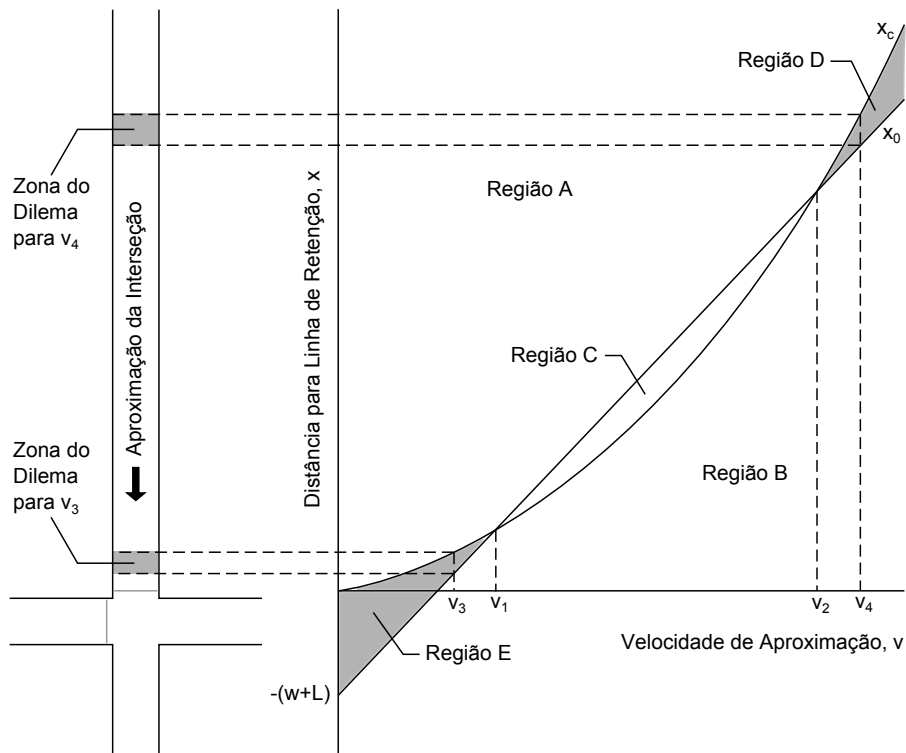


Figura 2.10: Distância crítica de parada,  $x_c$ , e distância crítica para cruzar a interseção,  $x_0$ , no caso em que as duas se interceptam em dois pontos, formando cinco regiões distintas. As zonas de dilema para as velocidades de aproximação  $v_3$  e  $v_4$  estão desenhadas, à esquerda, na representação de uma interseção. Adaptado de [23].

A zona do dilema ocorre nas Regiões D e E, então veículos em aproximação com uma determinada velocidade  $v$ , dependendo de sua distância para linha de retenção



ao acender o amarelo,  $x$ , podem estar ou não em uma zona do dilema. A título de exemplo, a figura 2.10 ilustra a zona do dilema para uma velocidade de aproximação baixa,  $v_3$ , e outra alta,  $v_4$ . A figura também mostra que para velocidades de aproximação no intervalo  $[v_1, v_2]$  não existe zona do dilema, independente da posição do veículo.

Existem também outras duas situações. Uma onde  $x_0$  e  $x_c$  se interceptam em apenas um ponto, eliminando a zona do dilema para apenas uma velocidade. E outra onde  $x_0$  e  $x_c$  não se interceptam, ilustrada na figura 2.11, onde temos apenas três regiões:

**Região A:** O veículo não consegue cruzar a interseção, mas consegue parar antes da linha de retenção;

**Região B:** O veículo não consegue parar antes da linha de retenção, mas consegue cruzar a interseção mantendo sua velocidade;

**Região C:** O veículo se aproximando em qualquer velocidade tem uma zona onde não consegue nem parar e nem cruzar a interseção, uma zona do dilema.

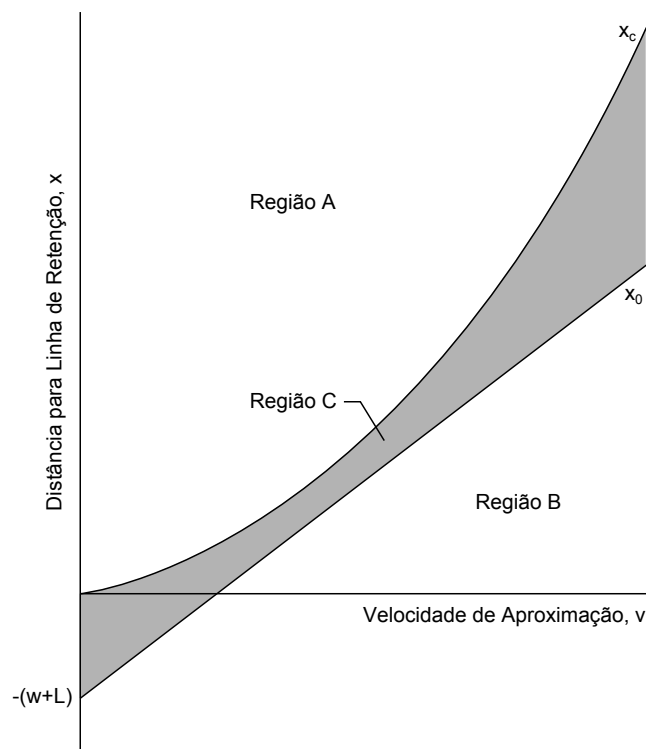


Figura 2.11: Distância crítica de parada,  $x_c$ , e distância crítica para cruzar a interseção,  $x_0$ , no caso em que as duas não se interceptam, formando três regiões distintas. Adaptado de [23].

Quando calculamos  $\tau_{min}$ , garantimos a eliminação da zona do dilema para uma determinada velocidade de aproximação,  $v$ , fazendo com que  $x_c$  e  $x_0$  se interceptem exatamente em  $v$ . Caso  $x_c$  e  $x_0$  se interceptem apenas em um ponto, então a zona do dilema foi eliminada unicamente para  $v$ . No entanto, caso  $x_c$  e  $x_0$  se interceptem em dois pontos, então a zona do dilema é eliminada para todo o intervalo entre estes dois pontos, sendo um deles  $v$ , como no intervalo  $[v_1, v_2]$  ilustrado na figura 2.10.

Por mais que seja possível criar um intervalo com velocidades de aproximação onde não exista zona do dilema, não é possível eliminá-la para baixas velocidades. Assim, impedindo que seja especificado um tempo de amarelo que acabe com a zona do dilema para todas as velocidades entre zero e o limite da via. Isso acontece porque  $x_c$  é uma equação quadrática com concavidade para cima que intercepta o eixo  $y$  em zero e  $x_0$  é uma equação linear crescente com inclinação  $\tau$  que intercepta o eixo  $y$  em  $-(w + L)$ , com  $w + L > 0$  e  $\tau > 0$ , então seria preciso que  $\tau \rightarrow \infty$  para erradicar totalmente a zona do dilema para baixas velocidades, representada como Região E na figura 2.10.

Tanto na figura 2.10, quanto na figura 2.11, podemos observar que  $x_0$  assume valores negativos para baixas velocidades, mais especificamente para  $v \leq (w + L)/\tau$ . Não faz sentido dizer que um veículo está na zona do dilema quando ele já passou da linha de retenção, já que ele não tem mais como parar antes dela. Então, a equação 2.4 pode ser limitada em zero, sendo reescrita como:

$$x_0 = \max(0, v\tau - w - L) \quad (2.8)$$

Assim, podemos obter o comprimento da zona do dilema alterando a equação 2.5 de modo que a contribuição de  $x_0$  só apareça quando ela é maior do que zero:

$$D = v\delta + \frac{v^2}{2b} - \max(0, v\tau - w - L) \quad (2.9)$$

A figura 2.12 ilustra o comprimento da zona do dilema,  $D$ , em função da velocidade de aproximação,  $v$ , para vários valores de tempo de amarelo,  $\tau$ . A linha contínua mostra o comprimento de acordo com a equação 2.9 e a linha tracejada mostra o prolongamento do que seria o comprimento de acordo com a equação 2.5. Podemos notar que a maior parte do que era considerado como comprimento da zona do dilema em baixas velocidades é reduzido consideravelmente da equação 2.5 para equação 2.9.

No Brasil, os valores típicos de tempo de amarelo podem chegar até 5 s, variando normalmente em função da velocidade máxima da via. Quanto maior a velocidade máxima da via, maior o tempo de amarelo indicado. No exemplo da figura 2.12, nenhum dos tempos até 5 s elimina a zona do dilema para nenhuma velocidade. Seria necessário um tempo de amarelo de 6 s para eliminar a zona do dilema para

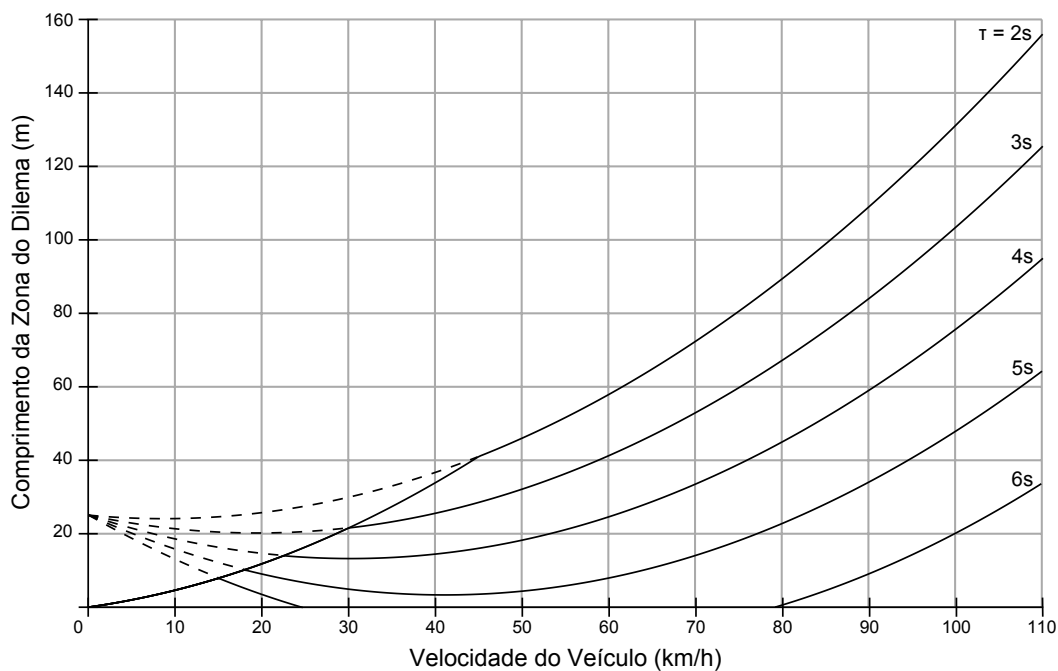


Figura 2.12: Comprimento da zona do dilema,  $D$ , em função da velocidade de aproximação,  $v$ , para vários valores de tempo de amarelo,  $\tau$ . Foi considerado um tempo de percepção e reação,  $\delta = 1,2$  s, desaceleração,  $b = 3$  m/s<sup>2</sup>, e comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo,  $w + L = 25$  m.

velocidades entre 24 km/h e 79 km/h. Mesmo assim, as velocidades abaixo de 24 km/h teriam zonas do dilema de até 7,8 m de comprimento e as velocidades mais altas que 79 km/h teriam zonas do dilema de até 33,6 m de comprimento.

A figura 2.13 ilustra o comprimento da zona do dilema,  $D$ , em função da velocidade de aproximação,  $v$ , para vários valores de desaceleração,  $b$ . A desaceleração de 3 m/s<sup>2</sup> é a indicada pelo guia do *Institute of Transportation Engineers* (ITE) [14] como a desaceleração normal do dia a dia. A desaceleração de 3,3 m/s<sup>2</sup> é a que DE SOUSA observou no Brasil para o 85<sup>o</sup> percentil em sua dissertação. A desaceleração de 5 m/s<sup>2</sup> é usada por GAZIS *et al.* como uma frenagem bem agressiva, possivelmente gerando o risco de uma colisão traseira pelo veículo que vem atrás. A desaceleração de 5,7 m/s<sup>2</sup> é descrita pelo guia do ITE como a máxima taxa de frenagem para um carro de passeio comum.

Podemos verificar que a desaceleração contribui fortemente para o comprimento da zona do dilema. No exemplo da figura 2.13, uma pequena variação de 0,3 m/s<sup>2</sup> na desaceleração pode reduzir o comprimento da zona do dilema em 4,2 m, 17%, para a velocidade de 60 km/h e até 14,2 m, 15%, para a velocidade de 110 km/h. Uma variação de 2 m/s<sup>2</sup> pode reduzir substancialmente o comprimento da zona do dilema, mas também incorrem em um aumento no risco de acidentes de trânsito.

A figura 2.14 ilustra o comprimento da zona do dilema,  $D$ , em função da velo-

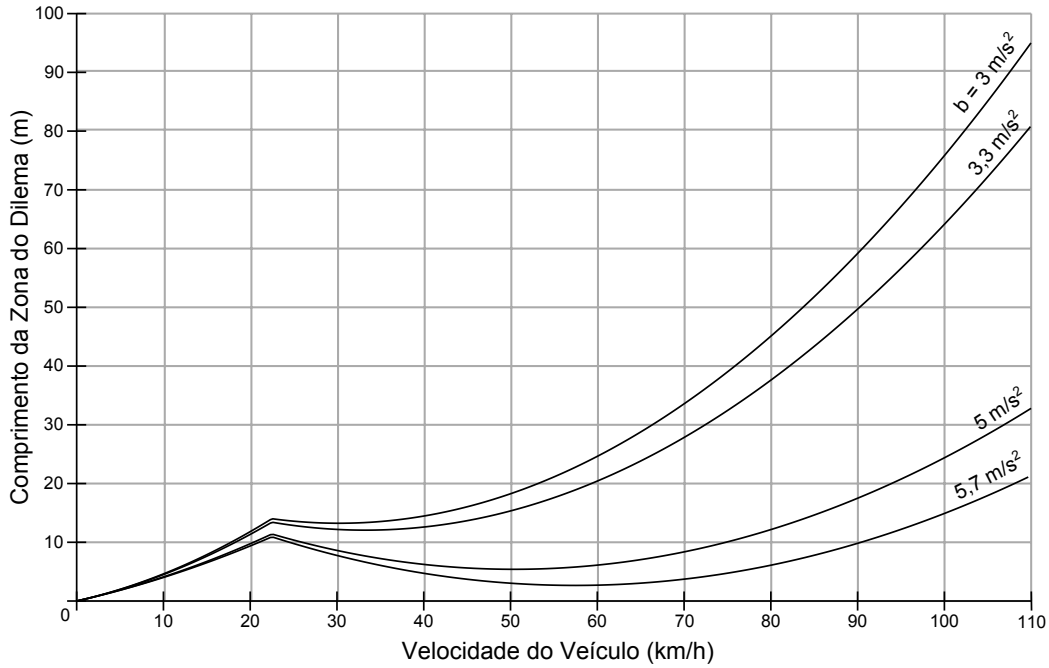


Figura 2.13: Comprimento da zona do dilema,  $D$ , em função da velocidade de aproximação,  $v$ , para vários valores de desaceleração,  $b$ . Foi considerado um tempo de percepção e reação,  $\delta = 1,2 \text{ s}$ , tempo de amarelo,  $\tau = 4 \text{ s}$ , e comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo,  $w + L = 25 \text{ m}$ .

cidade de aproximação,  $v$ , com e sem o tempo de percepção e reação,  $\delta$ . A ideia é mostrar qual é o impacto do tempo de percepção e reação no comprimento da zona do dilema, já que um sistema automático poderia reduzir de fato o tempo de reação para praticamente zero. Verificamos que a eliminação do tempo de percepção e reação reduz consideravelmente o comprimento da zona do dilema, chegando a uma redução de até  $19,8 \text{ m}$ ,  $80\%$ , para a velocidade de  $60 \text{ km/h}$  e de  $36,7 \text{ m}$ ,  $38\%$ , para a velocidade de  $110 \text{ km/h}$ .

A figura 2.15 ilustra o comprimento da zona do dilema,  $D$ , em função da velocidade de aproximação,  $v$ , para vários comprimentos do cruzamento em função do número de faixas na via transversal mais comprimento do veículo,  $w(f) + L$ . A tabela 2.9 mostra quais foram as medidas levadas em conta para o cálculo de  $w(f) + L$ . O comprimento do cruzamento foi baseado nas medidas recomendadas, quando existentes, ou mínimas indicadas pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), ver subseção 2.1.4. O comprimento do veículo foi baseado num tamanho comum de automóvel no Brasil, ver subseção 2.1.2.

Como este comprimento  $w + L$  é justamente o coeficiente constante da equação 2.8, a sua variação simplesmente desloca a curva no eixo  $y$ , quando a contribuição de  $x_0$  é maior que zero. Assim, quanto maior o comprimento do cruzamento ou do veículo, maior o comprimento da zona do dilema. Nas baixas velocidades, este efeito

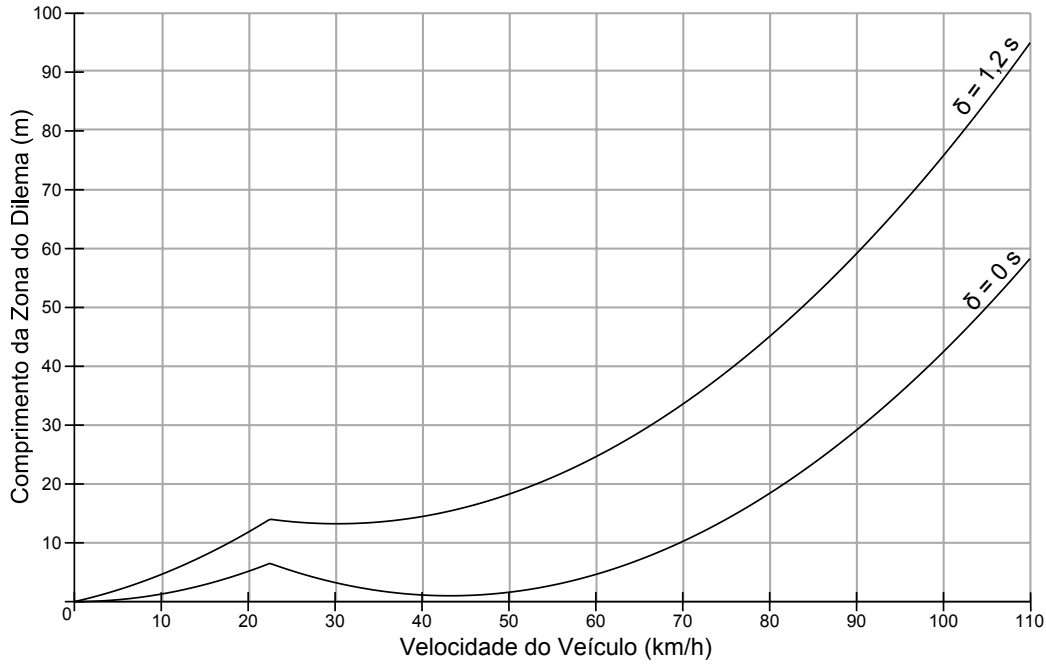


Figura 2.14: Comprimento da zona do dilema,  $D$ , em função da velocidade de aproximação,  $v$ , com e sem o tempo de percepção e reação,  $\delta$ . Foi considerado um tempo de amarelo,  $\tau = 4 \text{ s}$ , desaceleração,  $b = 3 \text{ m/s}^2$ , e comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo,  $w + L = 25 \text{ m}$ .

Nome	Medida (m)
Comprimento do cruzamento em função do número de faixas na via transversal, $w(f)$	$6,90 + 3,50f$
Largura recomendada de cada faixa da via transversal	3,50
Distância mínima da faixa de pedestres para a via transversal	1,00
Comprimento recomendado da faixa para travessia de pedestres	4,00
Distância mínima da linha de retenção para faixa de pedestres	1,60
Largura mínima da linha de retenção	0,30
Comprimento do veículo, $L$	4,00
Comprimento do cruzamento em função do número de faixas na via transversal mais comprimento do veículo, $w(f) + L$	$10,90 + 3,50f$

Tabela 2.9: Cálculo do comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo em função do número de faixas na via transversal mais veículo,  $w(f) + L$ . O comprimento do cruzamento foi baseado nas medidas recomendadas, quando existentes, ou mínimas indicadas pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) para a sinalização horizontal, ver subseção 2.1.4 para mais detalhes. O comprimento do veículo foi baseado num tamanho comum de automóvel no Brasil, ver subseção 2.1.2

não acontece, justamente porque nestas velocidades a contribuição de  $x_0$  deixa de ser maior que zero.

Estabelecendo-se uma desaceleração normal do dia a dia e um tempo de percepção e reação comum dentre os motoristas para parar ao avistar a indicação ama-

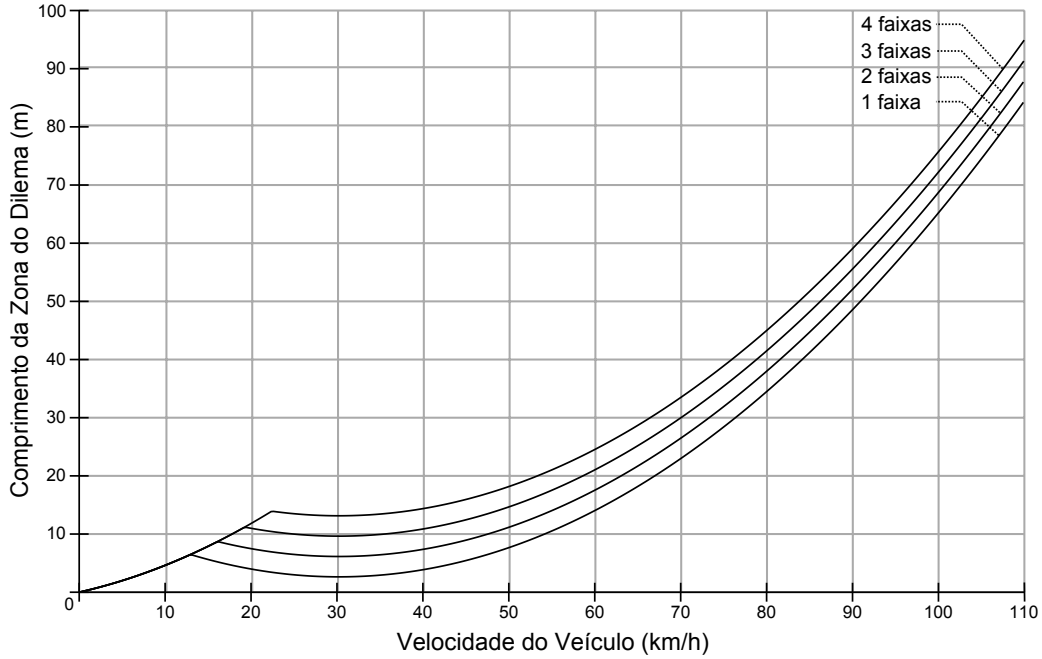


Figura 2.15: Comprimento da zona do dilema,  $D$ , em função da velocidade de aproximação,  $v$ , para vários comprimentos do cruzamento em função do número de faixas na via transversal mais comprimento do veículo,  $w(f)+L$ . Foi considerado um tempo de amarelo,  $\tau = 4$  s, tempo de percepção e reação,  $\delta = 1, 2$  s, e desaceleração,  $b = 3$  m/s<sup>2</sup>.

rela do semáforo, os únicos parâmetros que restam para definir o comprimento da zona do dilema em função das velocidades de aproximação são o comprimento do cruzamento, o comprimento do veículo e o tempo de amarelo. O comprimento do cruzamento depende basicamente da largura da via conflitante, que é dimensionada para comportar o seu fluxo, e das medidas da sinalização horizontal, que são estabelecidas por estudos visando garantir a segurança dos usuários do sistema de tráfego. O comprimento dos veículos é bastante variado e depende basicamente da categoria em que ele se enquadra, sendo limitado pela legislação apenas para veículos muito longos. Conclui-se então que, de fato, o tempo de amarelo é o parâmetro chave para tentar reduzir o comprimento da zona do dilema.

### 2.2.2 Zona de Indecisão

A zona de indecisão, também chamada de zona do dilema do tipo II, é de natureza probabilística e está associada ao comportamento do motorista. Um motorista que está a poucos segundos de viagem de uma interseção semaforizada, ao perceber a luz amarela do sinal, tende a ficar indeciso sobre sua habilidade de parar antes da linha de retenção. Este comportamento gera uma zona de indecisão, onde o condutor pode decidir por parar ou prosseguir.

ZEGEER [4] define a zona de indecisão em termos da distância para a linha de retenção. Ele define o início como a distância além da qual 90% dos motoristas confrontados com a indicação amarela do semáforo iriam parar e define o fim como a distância dentro da qual apenas 10% dos motoristas iriam parar.

A zona de indecisão também foi definida em termos do tempo de viagem até a linha de retenção por CHANG *et al.* [5]. Eles observaram que 85% dos motoristas que estavam a mais de 3 s de viagem da linha de retenção paravam, independentemente de sua velocidade, e que motoristas a menos de 2 s de viagem da linha de retenção quase sempre continuavam.

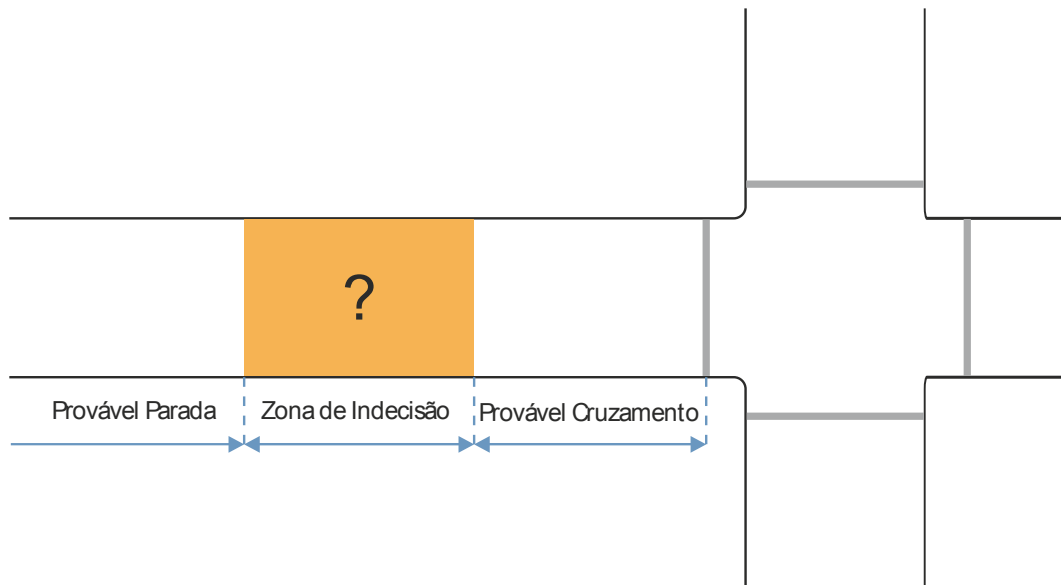


Figura 2.16: Zona de indecisão.

A figura 2.16 ilustra estas regiões. A região de provável cruzamento é onde a probabilidade de um motorista parar é menor que 10%. A zona da indecisão é onde a probabilidade do motorista parar varia de 10% a 90%. E a região de provável parada é onde a probabilidade de um motorista parar é maior que 90%.

### Formulação Matemática

GATES *et al.* [24] usaram uma técnica estatística, conhecida como regressão logística, em cima de dados coletados em suas observações para definir a probabilidade de um motorista parar ou passar ao avistar a indicação amarela em uma interseção semaforizada.

A regreção logística levou em conta vários aspectos, como: tempo de viagem estimado para linha de retenção, fluxo estimado por faixa, comprimento do ci-

clo do semáforo, tempo de amarelo, tempo de *headway*<sup>1</sup>, tempo de *tailway*<sup>2</sup>, ação de veículos nas faixas adjacentes, classificação do veículo por peso e presença de veículos, bicicletas ou pedestres na via conflitante. Nem todos estes aspectos medidos tiveram um efeito significativo na decisão, mas a análise mostrou que, de longe, o tempo de viagem estimado para linha de retenção é a variável preditiva mais forte. Levando em conta apenas esta variável preditiva mais forte, a regressão logística resultou na equação 2.10, a seguir.

$$\ln \left[ \frac{\pi_{passar}}{\pi_{parar}} \right] = 6,34 - 1,69t_x \quad (2.10)$$

Na equação 2.10,  $\pi_{passar}$  é a probabilidade do motorista decidir por passar pelo cruzamento,  $\pi_{parar}$  é a probabilidade dele parar e  $t_x$  representa o tempo de viagem estimado para linha de retenção ao avistar a indicação amarela do semáforo, em segundos. Este tempo de viagem pode ser definido como  $t_x = x/v$ , onde  $x$  é a distância para linha de retenção e  $v$  é a velocidade constante em que o motorista está viajando no momento. Deste modo, a probabilidade do motorista parar ou passar é definida a seguir.

$$\begin{cases} \pi_{passar} = \frac{e^{6,34-1,69(\frac{x}{v})}}{1 + e^{6,34-1,69(\frac{x}{v})}} \\ \pi_{parar} = 1 - \pi_{passar} \end{cases} \quad (2.11)$$

Observa-se então, que quanto menor a distância para linha de retenção e quanto maior a velocidade no momento da transição para o amarelo, maior a probabilidade do motorista decidir por passar pelo cruzamento ao invés de parar.

Usando a equação 2.11, é possível traçar o gráfico ilustrado na figura 2.17, que mostra a probabilidade do motorista passar pela interseção ao avistar o sinal amarelo ao invés de parar,  $\pi_{passar}$ , em função do tempo de viagem para linha de retenção. Na figura, a zona de indecisão definida por ZEGEER está marcada em cinza, entre 2,45 s e 5,05 s de tempo de viagem para linha de retenção.

A zona de indecisão pode ser formalizada com base na velocidade de aproximação do veículo,  $v$ , o tempo de viagem para linha de retenção além do qual mais do que 90% dos motoristas vão decidir por parar ao avistar a indicação amarela do semáforo,  $t_{90\% \text{ parar}}$ , e o tempo de viagem para linha de retenção abaixo do qual apenas 10% dos motoristas vão parar ao avistar a mesma indicação,  $t_{10\% \text{ parar}}$ . Assim, o início da

<sup>1</sup>Tempo de *headway* é um termo usado na engenharia de tráfego para descrever o tempo que um veículo leva para percorrer a distância entre o seu para-choque dianteiro e o para-choque dianteiro do veículo que está à sua frente.

<sup>2</sup>Tempo de *tailway* é um termo usado na engenharia de tráfego para descrever o tempo que um veículo leva para percorrer a distância entre o seu para-choque dianteiro e o para-choque traseiro do veículo que está à sua frente.



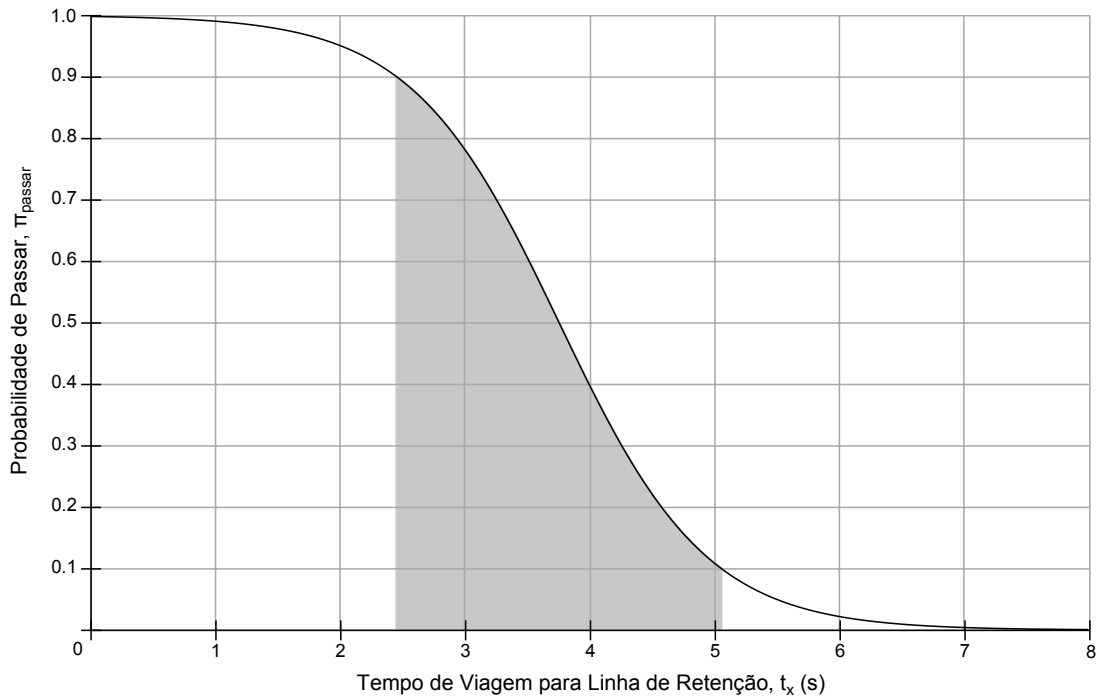


Figura 2.17: Gráfico da probabilidade do motorista de passar pela interseção ao avistar o sinal amarelo ao invés de parar,  $\pi_{passar}$ , em função do tempo de viagem para linha de retenção. A zona de indecisão está marcada em cinza, entre 2,45 s e 5,05 s. Ver equação 2.11.

zona de indecisão é estabelecido na distância  $d_i = v t_{90\% \text{ parar}}$  e o final na distância  $d_f = v t_{10\% \text{ parar}}$ , ambas em relação a linha de retenção. É importante notar que nesta formulação, a zona de indecisão não depende do tempo de amarelo do semáforo.

A equação 2.11 será usada pelos modelos de motorista desenvolvidos ao longo desta dissertação para indicar a decisão do motorista ao avistar a indicação amarela do semáforo. Do mesmo modo, os tempos que definem o início e o final da zona de indecisão usados nesta dissertação serão  $t_{90\% \text{ parar}} = 5,05 \text{ s}$  e  $t_{10\% \text{ parar}} = 2,45 \text{ s}$ .

### 2.2.3 Práticas de Proteção para Zona do Dilema

As zonas do dilema estão associadas a dois tipos de acidente de trânsito. O primeiro tipo é definido pelas colisões traseiras, quando o motorista não consegue frear a tempo e bate com a frente do seu veículo na traseira do veículo à frente, que acontecem devido à paradas abruptas ao avistar a indicação amarela do semáforo. O segundo tipo é definido pelas colisões laterais, quando a frente de um veículo se choca com a lateral de outro, que acontecem devido ao avanço do sinal vermelho. Na média, as colisões laterais resultam em ferimentos mais graves do que as colisões traseiras, logo, mais ênfase é dada na prevenção deste tipo de colisão [25].

Para reduzir a chance destes tipos de acidentes, algumas práticas são utilizadas para mitigar a zona do dilema. Elas envolvem a própria temporização dos semáforos, sistemas de extensão ou terminação do verde e mecanismos de aviso antecipado aos motoristas.

### Temporização de Semáforos

A temporização de semáforos tem um papel fundamental, justamente porque o tempo de amarelo influencia fortemente no tamanho da zona do dilema e o tempo de vermelho geral assegura a liberação do cruzamento.

O Manual de Semáforos [17], de 1984, que é a última publicação nacional sobre a norma vigente, não descreve como deve ser calculado nenhum desses dois tempos. Entretanto, a minuta do Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, Volume V, Sinalização Semafórica [19], já trás as equações indicadas para calcular o tempo de amarelo,  $\tau$ , e o tempo de vermelho geral,  $t_{vg}$ :

$$\tau = \delta + \frac{v}{2(b \pm ig)} \quad (2.12)$$

$$t_{vg} = \frac{d_2 + L}{v} \quad (2.13)$$

Onde as constantes têm os seguintes significados:  $\delta$  é o tempo de percepção e reação,  $b$  é a máxima taxa de frenagem em via plana,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $L$  é o comprimento do veículo. E as variáveis têm os seguintes significados:  $v$  é a velocidade do veículo,  $i$  é a inclinação da via na aproximação, sendo positivo em rampas ascendentes e negativo em rampas descendentes, e  $d_2$  é a distância entre a linha de retenção e o término da área de conflito.

Os valores sugeridos para as constantes são:  $\delta = 1 \text{ s}$ ,  $b = 3,0 \text{ m/s}^2$ ,  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$  e  $L = 5 \text{ m}$ , onde o fluxo é predominantemente constituído por automóveis. Também é sugerido que  $v$  seja a velocidade máxima regulamentada da via em  $\text{m/s}$ .

O tempo de amarelo não deve ser inferior a  $3 \text{ s}$  em vias com velocidade máxima igual ou menor que  $40 \text{ km/h}$ , nem inferior a  $4 \text{ s}$  em vias com limite igual a  $50 \text{ km/h}$  ou  $60 \text{ km/h}$  e igual a  $5 \text{ s}$  quando o limite é de  $70 \text{ km/h}$ . Por outro lado, o tempo de amarelo não deve ser superior a  $5 \text{ s}$  para todas as velocidades regulamentadas.

### Sistemas de Extensão do Verde

Os sistemas de extensão do verde funcionam reagindo à detecção de veículos na zona de indecisão. Os mais comuns usam detectores com laços indutivos que são instalados no pavimento da via. Quando um veículo é detectado dentro da zona de indecisão, o tempo de verde é estendido de modo que o veículo possa liberar a

interseção antes que seja iniciado o intervalo de amarelo.

Os detectores mais simples são posicionados em duas ou três distâncias que correspondem a um tempo de viagem fixo, baseado normalmente no 85<sup>o</sup> percentil das velocidades de aproximação, e a cada detecção que fazem, estendem o tempo de verde em um valor pré-configurado [4]. Outros detectores mais avançados são capazes de determinar a velocidade e o tamanho do veículo, podendo determinar com mais precisão se o veículo está ou não na zona de indecisão [26].

O tempo de extensão do verde deve ser limitado de acordo com as características de tráfego da interseção, já que ele acarreta num aumento do tempo de vermelho para os fluxos conflitantes. Quando o fluxo do tráfego é muito baixo, como em algumas vias rurais, a extensão pode ser ilimitada.

O problema com esse tipo de sistema aparece quando a via atinge um fluxo moderado, fazendo com que o tempo de verde seja estendido progressivamente até chegar ao limite definido. Quando este limite é atingido, o sistema não tem mais como atuar, logo, qualquer veículo que esteja na zona de indecisão a partir deste momento vai ter que enfrentar o problema de decisão. Além disso, ao maximizar sempre o tempo de verde, o fluxo nas vias conflitantes é prejudicado. Alguns sistemas mais avançados têm a capacidade de manter o verde além do tempo limite para a via principal, aliviando o problema da maximização [27].

### **Sistemas de Terminação do Verde**

Os sistemas de terminação do verde, ao contrário dos sistemas de extensão, não estendem o tempo do verde, mas decidem quando será o melhor momento para terminar a fase. Detectores de veículos independentes são instalados para cada faixa da via em todas as aproximações e todos os semáforos são totalmente atuados.

O sistema monitora a presença dos veículos e estima a posição deles num futuro próximo em intervalos fixos, por exemplo de 0,5 s em 0,5 s, até um horizonte máximo de tempo, por exemplo 20 s. Então, ele determina o custo de encerrar o verde em cada um destes intervalos, levando em conta o atraso gerado para os veículos esperando nas vias conflitantes e o número de veículos dentro da zona de indecisão. O intervalo com menor custo é onde o verde será terminado. Enquanto o tempo passa em direção ao intervalo de menor custo, a estimativa de custo é constantemente atualizada usando o conceito de janela deslizante e um novo mínimo pode ser escolhido. Esse processo continua até o intervalo de menor custo chegar ou um limite de tempo for atingido [27].

## Mecanismos de Aviso Antecipado

Os mecanismos de aviso antecipado têm a função de alertar aos motoristas da presença de um semáforo à frente e possivelmente a iminência dele estar terminando a sua fase para os motoristas em questão. Este aviso se dá na forma de sinalizações verticais de advertência, sinalizações semaforicas de advertência, na própria sinalização semaforica e outras sinalizações especiais.

A sinalização vertical de advertência consiste em uma placa com aviso de semáforo à frente, que pode aparecer em conjunto com uma sinalização semaforica de advertência. A sinalização semaforica de advertência pode ter o amarelo intermitente sempre ou apenas durante a indicação de amarelo e vermelho do semáforo à frente [25].

O aviso antecipado também pode ser dado pela própria sinalização semaforica. Uma das maneiras de se fazer isso é substituindo o final do tempo de verde por verde intermitente, por exemplo os últimos 3 s. MAHALEL *et al.* apontam que esta solução levou a um aumento do número de acidentes por colisão traseira, por causa de decisões precoces e um alto número de decisões inadequadas de parada, particularmente próximo à interseção. NEWTON *et al.* citam várias abordagens semelhantes a esta, como verde intermitente com amarelo fixo e verde e amarelo intermitentes alternados, mas concluem que nenhuma dessas abordagens melhorou significativamente a segurança na interseção.

Um mecanismo que está se tornando comum no Brasil é um temporizador instalado ao lado do grupo focal<sup>3</sup> do semáforo. Ele mostra uma contagem regresiva numérica no final do tempo de verde que chega a zero exatamente no momento em que a indicação muda do verde para o amarelo. CHIOU e CHANG concluem que embora este tipo de sistema reduza a taxa de paradas abruptas, ele aumenta a zona de indecisão e torna a decisão de passar mais inconsistente entre os veículos em aproximação, criando um risco potencial de colisões traseiras. LUM e HALIM apontam que este tipo de sistema é eficaz em incentivar o motorista a parar no sinal vermelho em fluxos de tráfego pesado, mas não combate o número de avanços de sinal vermelho do semáforo.

## 2.3 Simulação de Tráfego

Os simuladores de tráfego são programas escritos para reproduzir a dinâmica de um sistema de tráfego num computador, de modo que possam ser feitos estudos, planejamentos e testes com cenários reais ou fictícios. O *Highway Capacity Manual* [32] classifica os simuladores de acordo com a abordagem que eles usam para cada

---

<sup>3</sup>O grupo focal é o conjunto de indicações luminosas que informam a cor do semáforo ao acender.

parte do modelo da simulação.

O modelo pode ser determinístico ou estocástico. Modelos determinísticos têm seu resultado diretamente ligado aos valores de entrada, não dependendo de nenhuma aleatoriedade. Já os estocásticos têm seus valores ligados à alguma função de distribuição de probabilidade. Naturalmente, um mesmo simulador pode ter algumas partes do modelo determinísticas e outras estocásticas convivendo juntas.

O modelo pode ser baseado em eventos ou no tempo. Modelos baseados em eventos avançam de um evento para o evento consecutivo, independentemente do intervalo de tempo de simulação que se passou entre eles. Nos modelos baseados no tempo, a simulação flui em passos de tempo, que dependem do detalhe que deseja se dar para a situação modelada.

O nível de abstração em que o fluxo de tráfego é representado determina se o modelo é microscópico, mesoscópico ou macroscópico. Os modelos microscópicos simulam cada veículo individualmente, com o seu posicionamento, trajetória e decisões. Os modelos macroscópicos simulam o tráfego como se fossem fluxos, sendo fortemente baseados nas equações de conservação de fluxo e ondas de choque. Os modelos mesoscópicos se encaixam entre os dois anteriores, geralmente modelando pelotões de veículos como unidades mínimas do sistema.

O modelo de geração de fluxo de tráfego pode ser estático ou dinâmico. No estático o fluxo é constante, enquanto que no dinâmico, pode ter mudanças com granularidades de até 15 em 15 minutos, sendo muito raro serem mais frequentes que este valor.

Um modelo cujo objetivo é simplesmente descrever como o tráfego vai se comportar em um determinado cenário é chamado de descritivo. Em contra partida, caso o modelo tenha um objetivo e busque otimizá-lo ao longo de suas iterações, ele é chamado de normativo.

O modelo pode ser em tempo real ou *off-line*. Os de tempo real têm que ser executados na taxa de 1 s de simulação para cada 1 s que se passa no relógio, comumente recebendo entradas de sistemas externos reais. Já os *off-lines* recebem seus parâmetros de entrada e não têm o seu tempo atrelado ao tempo do relógio.

### 2.3.1 Modelo de Motorista

Nos simuladores microscópicos, como cada veículo é simulado individualmente, é necessário um modelo de motorista para representar o comportamento do veículo nas mais variadas situações do trânsito. Os veículos devem ser capazes de interagir com a infraestrutura do sistema de tráfego, bem como outros veículos que também circulam pelo mesmo.

Um dos tipos de modelo mais usados é o de perseguição veicular, que descreve a

movimentação de um veículo que viaja atrás de outro em uma via de apenas uma faixa. Nestes modelos, a posição e velocidade dos veículos é calculada em função da distância e diferença de velocidade para o veículo imediatamente à frente.

### 2.3.2 *Intelligent Driver Model (IDM)*

O *Intelligent Driver Model* (IDM) é um modelo de perseguição veicular formulado por TREIBER *et al.* [8]. Todos os parâmetros do modelo têm um significado intuitivo, com valores plausíveis e de fácil medida. O modelo é definido pelas equações a seguir.

$$\frac{dv}{dt} = a \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_0} \right)^\lambda - \left( \frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right] \quad (2.14)$$

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + \max \left[ 0, \quad vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \right] \quad (2.15)$$

Onde as variáveis têm os seguintes significados:  $v$  é a velocidade do veículo,  $\Delta v$  é a diferença de velocidade para o veículo à sua frente e  $s$  é a distância entre o veículo e o veículo à sua frente. E as constantes têm os seguintes significados:  $a$  é a aceleração convencional no tráfego do dia a dia,  $b$  é a desaceleração confortável de frenagem,  $v_0$  é a velocidade desejada numa viagem em uma via livre,  $s_0$  é a distância mínima entre o veículo e o veículo sua à frente,  $T$  é o tempo de *headway* de segurança para o veículo sua à frente e  $\lambda$  é o expoente de aceleração, que especifica como a aceleração decresce ao se aproximar da velocidade desejada.

Na equação 2.14, o primeiro termo,  $1 - (v/v_0)^\lambda$ , representa a aceleração desejada em uma via livre e o segundo termo,  $(s^*(v, \Delta v)/s)^2$ , representa a desaceleração induzida pelo veículo à frente. A aceleração numa via livre, partindo de uma velocidade inicial igual a zero, começa positiva e decai até zero quando a velocidade desejada é atingida. A desaceleração é baseada na comparação entre a distância dinâmica desejada para o veículo à frente,  $s^*$ , e a distância atual,  $s$ , onde a desaceleração aumenta quando é feita a aproximação de um veículo mais lento, diminui quando é feita a aproximação de um veículo mais rápido e basicamente se anula com o termo da aceleração quando o fluxo do tráfego é constante.

Veículos mais pesados, como caminhões e ônibus, são caracterizados por valores baixos de  $v_0$ ,  $a$  e  $b$ . Motoristas mais cautelosos são definidos por valores altos de  $T$ , em contraponto com motoristas mais agressivos, que são descritos com valores baixos de  $T$  em conjunção com valores altos de  $v_0$ ,  $a$  e  $b$ .

Os valores sugeridos por TREIBER *et al.* para as constantes em automóveis são:  $a = 0,73 \text{ m/s}^2$ ,  $b = 1,67 \text{ m/s}^2$ ,  $v_0 = 120 \text{ km/h}$ ,  $s_0 = 2 \text{ m}$ ,  $T = 1,6 \text{ s}$  e  $\lambda = 4$ . A aceleração,  $a$ , foi calculada para equivaler a uma aceleração de 0 à 100  $\text{km/h}$

em 45 s. Para o tráfego urbano,  $v_0$  deve ser adaptado de acordo com a velocidade normal de circulação na via.

# Capítulo 3

## MicroLAM

O MicroLAM é um simulador de tráfego que foi criado como parte da dissertação de mestrado de DE PAIVA [1], em 2012. Seu nome foi dado juntando “Micro”, pelo fato do simulador usar um modelo microscópico para o nível de abstração do fluxo de tráfego, e “LAM” de Laboratório de Arquitetura e Microeletrônica, que é o laboratório coordenado pelo orientador desta dissertação e da dissertação de DE PAIVA.

Em sua dissertação, DE PAIVA avaliou a possibilidade de usar algum simulador pré-existente, mas chegou à conclusão que os simuladores comerciais não oferecem muita flexibilidade para as necessidades da pesquisa acadêmica. Ele também avaliou os simuladores desenvolvidos no meio acadêmico com código-fonte aberto, mas encontrou dificuldade em estender o código deles, devido à falta de modularização e ao código ser confuso e pouco comentado. Além disso, eles não geravam na saída as medidas de interesse para as conclusões do trabalho. Assim, DE PAIVA decidiu desenvolver o MicroLAM de modo que pudesse ser facilmente extensível e ser usado como ferramenta para trabalhos futuros, como esta dissertação.

O MicroLAM é um simulador microscópico descritivo *off-line* baseado no tempo, ver seção 2.3. Ele provê modelos de geração de fluxo de tráfego tanto estáticos quanto dinâmicos. Ele possui alguns módulos que são estocásticos e outros determinísticos, mas todos os módulos estocásticos usam um único gerador de números pseudoaleatórios centralizado, cuja semente pode ser definida antes da simulação, ou seja, quando o mesmo cenário é executado repetidas vezes usando a mesma semente, observamos simulações idênticas, facilitando a reprodutibilidade.

O MicroLAM pode ser executado em segundo plano, apenas para gerar resultados gravados em arquivos de texto, mas também oferece uma interface gráfica, ilustrada na figura 3.1, que desenha todo o cenário em funcionamento, mostrando informações sobre os veículos, as ruas, as interseções semaforizadas e o processo de simulação em si. Nesta dissertação, a interface gráfica é importante para permitir a visualização da dinâmica das zonas do dilema e indecisão. No entanto, a execução em segundo



plano é menos custosa computacionalmente e mais conveniente para agrupar os resultados, por esses motivos, ela também é utilizada nesta dissertação, desta vez com o propósito de gerar resultados de simulações mais extensas que são expostos no capítulo 5.

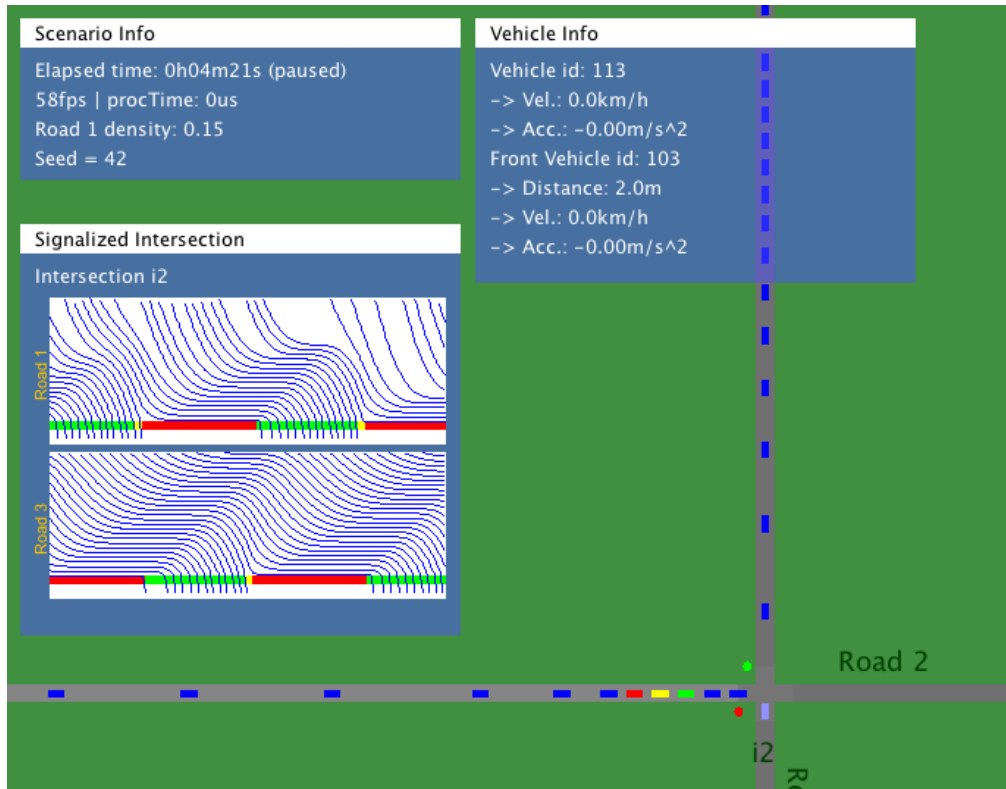


Figura 3.1: Interface gráfica do MicroLAM. [1]

Para alcançar os objetivos desta dissertação, o MicroLAM precisou ser estendido com as funcionalidades que serão explicadas nas seções a seguir, neste capítulo. Primeiramente são descritas as implementações de múltiplas faixas e suporte a sinalização horizontal, respectivamente nas seções 3.1 e 3.2. Em seguida, nas seções 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 são descritas funcionalidades que foram desenvolvidas para visualizar as zonas do dilema e indecisão. Nas seções 3.7 e 3.8 são relatados o desenvolvimento do detector de avanço de sinal vermelho do semáforo e do detector de parada sobre a faixa para travessia de pedestres, possibilitando o estudo desses eventos no cruzamento. E por fim, são descritas as melhorias desenvolvidas na interface do usuário, na seção 3.9.

### 3.1 Múltiplas Faixas

Observando a figura 3.1, vemos que todas as vias têm apenas uma única faixa. Isto acontece porque a estrutura do MicroLAM, até então, só permitia uma única faixa por via. Para poder representar cenários mais realistas e comportar a sinalização

horizontal, a estrutura do MicroLAM foi alterada para suportar múltiplas faixas por via, como ilustrado na figura 3.2. Isto, no entanto, não quer dizer que os veículos mudem de faixa durante a simulação, já que esta decisão cabe ao modelo de motorista, ver subseção 2.3.1. Nesta dissertação não foi desenvolvido nenhum modelo de motorista que seja capaz de mudar de faixa.

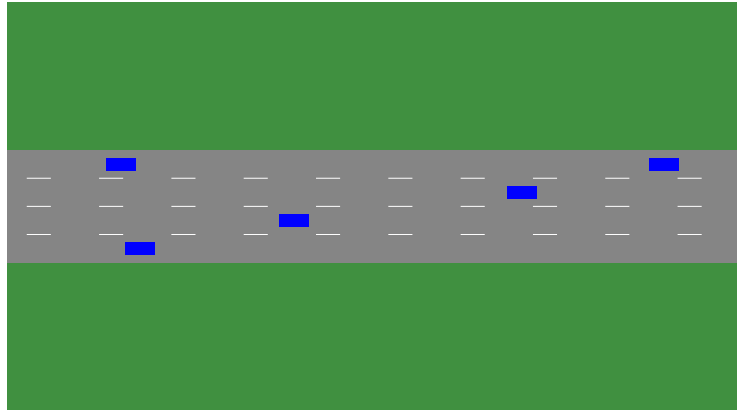


Figura 3.2: Múltiplas faixas no MicroLAM.

## 3.2 Sinalização Horizontal

Um dos pré-requisitos fundamentais para poder representar e discutir a zona do dilema no MicroLAM é a representação de toda a sinalização horizontal relacionada a uma interseção semaforizada. Por isso, o MicroLAM foi estendido para poder mostrar a linha simples seccionada, a linha simples contínua, a linha de retenção, a faixa para travessia de pedestres e a marcação da área de conflito. Estas sinalizações estão descritas em maior detalhe na subseção 2.1.4.

Todas estas sinalizações são desenhadas seguindo a regulamentação determinada pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), mas ao mesmo tempo, dando a flexibilidade de poderem ser ajustadas no arquivo de configuração do cenário. Um exemplo de uma interseção semaforizada com todas estas sinalizações está ilustrada na figura 3.3, a seguir.

Além do desenho da sinalização, também foi preciso fazer pequenas alterações no comportamento dos modelos de motorista que já existiam no MicroLAM. Quando surgia a indicação vermelha do semáforo, o comportamento destes modelos era parar exatamente no limite entre o fim da rua e o início da interseção. Este comportamento foi alterado para que a parada ocorra atrás da linha de retenção.

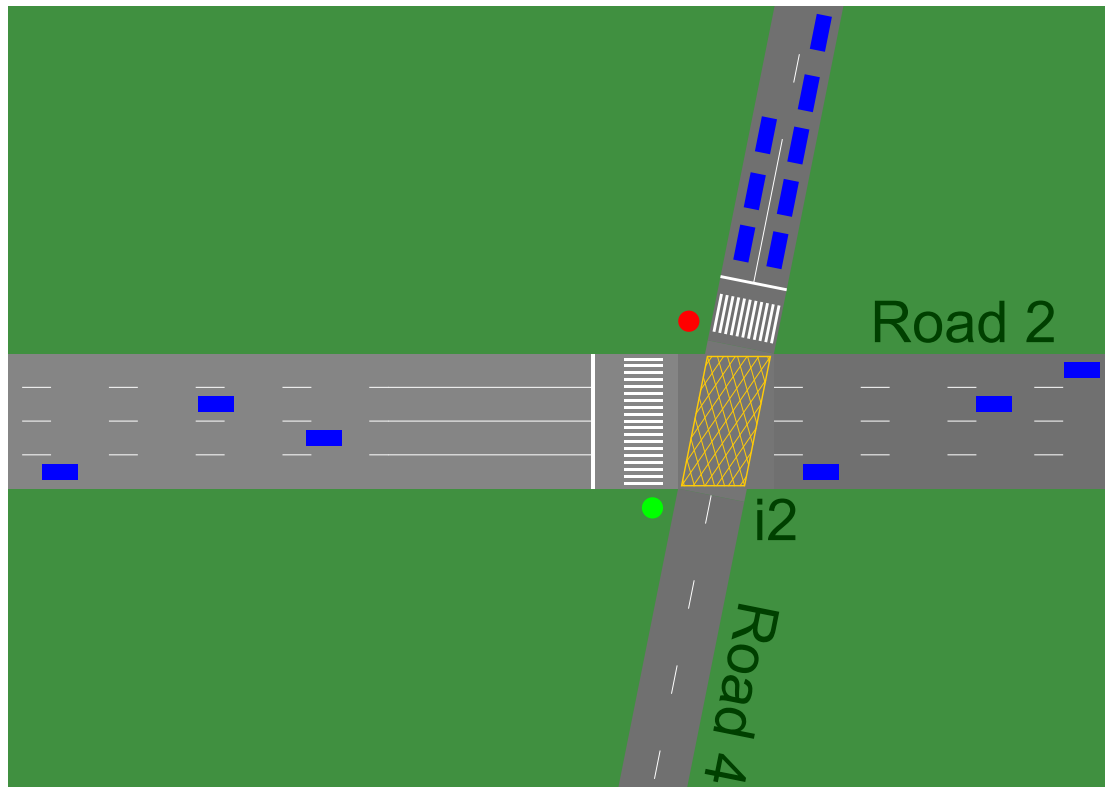


Figura 3.3: Sinalização horizontal no MicroLAM.

### 3.3 Zona do Dilema

Com a linha de retenção posicionada, já é possível ter todas as informações necessárias para desenhar a zona do dilema, descrita na subseção 2.2.1. É importante lembrar que a zona do dilema só existe no momento exato em que a indicação do semáforo transiciona do verde para o amarelo. Em função disso, foi desenvolvida uma opção para que a simulação parasse exatamente no momento deste evento. Para cada faixa da via foi desenhada uma zona do dilema, considerando a velocidade de aproximação, a desaceleração máxima e o tempo de percepção e reação do veículo mais próximo da linha de retenção e que ainda não a tenha cruzado.

A figura 3.4 ilustra a zona do dilema no MicroLAM na cor amarela transparente. A região compreendida entre a linha de retenção e o final da zona do dilema é onde o veículo consegue cruzar completamente a interseção antes do tempo de amarelo do semáforo. A região que começa antes do início da zona do dilema e que se estende indefinidamente ao longo do resto da via é onde o veículo consegue frear com segurança, chegando à parada total até a linha de retenção.

Considerando a faixa mais à direita da via como a primeira faixa, podemos fazer algumas observações sobre a figura 3.4. As zonas do dilema desenhadas na primeira e quarta faixas correspondem a veículos que não apareceram no desenho, pois estão posicionados em uma porção anterior da via. Na segunda faixa, a zona do dilema

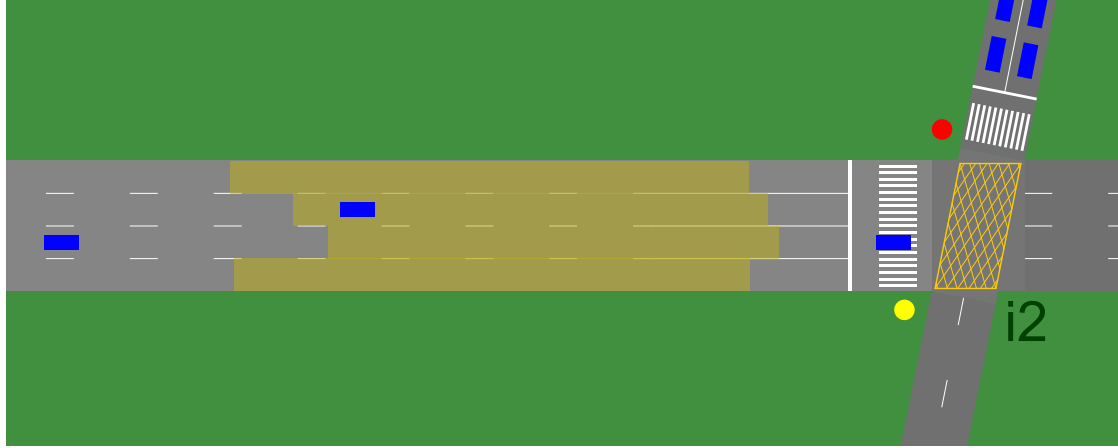


Figura 3.4: Zona do dilema no MicroLAM para cada faixa da via na cor amarela transparente.

apresentada corresponde ao veículo que está atrás dela, pois o outro veículo desta faixa já cruzou a linha de retenção. Na terceira faixa existe um veículo dentro de sua zona do dilema.

### 3.4 Previsão da Zona do Dilema

Como explicado na seção anterior, a zona do dilema só existe no momento exato em que a indicação do semáforo transiciona do verde para o amarelo. Surge então a necessidade de fazer uma previsão, durante o intervalo de verde do semáforo, se o veículo estará na zona do dilema quando esta transição acontecer.

Esta previsão cria a zona do dilema considerando a velocidade de aproximação, a desaceleração máxima e o tempo de percepção e reação do veículo. Em seguida, a zona que acabou de ser calculada é deslocada para trás da distância que o veículo irá percorrer no tempo restante de verde, considerando sua velocidade atual. Deste modo, se o veículo mantiver sua velocidade, quando ocorrer a transição para o amarelo, a posição relativa entre o veículo e sua zona do dilema será a mesma entre sua posição atual e a previsão da zona do dilema.

Revisitando as equações 2.2 e 2.8, podemos formular a previsão da distância crítica de parada,  $x'_c$ , e a previsão da distância crítica para o cruzamento da interseção,  $x'_0$ . Considerando  $v_x$  como a velocidade instantânea do veículo a uma distância  $x$  da linha de retenção e  $t_g$  como o tempo restante de verde, temos:

$$x'_c = v_x \delta + \frac{v_x^2}{2b} + v_x t_g \quad (3.1)$$

$$x'_0 = \max(0, v_x \tau - w - L) + v_x t_g \quad (3.2)$$

Assim, analogamente à zona do dilema definida na equação 2.5, podemos definir a previsão da zona do dilema,  $D'$ , como:

$$D' = x'_c - x'_0 = v_x \delta + \frac{v_x^2}{2b} - \max(0, v_x \tau - w - L) \quad (3.3)$$

Caso o valor de  $v_x$  seja bem próximo ao valor da velocidade no início do amarelo,  $v$ , o tamanho da previsão da zona do dilema será bem próximo ao tamanho da zona do dilema, dado pela equação 2.9. Do mesmo modo, se um veículo manter a sua velocidade próxima a um valor constante durante todo o tempo restante de verde, a sua posição relativa à previsão da zona de dilema será próxima à sua posição relativa à zona do dilema em si.

A previsão é feita para cada veículo que esteja em uma via com uma interseção semaforizada à frente. Na figura 3.5 podemos observar as previsões das zonas do dilema para todos os veículos que estão na via, na cor amarela transparente. O lado direito da figura ilustra um trecho da via próximo à interseção semaforizada, onde aparecem previsões de zonas do dilema curtas, para os veículos que começaram a se deslocar em função do semáforo ter transicionado do vermelho para o verde. O lado esquerdo da figura ilustra um outro trecho da mesma via um pouco mais distante da interseção, onde aparecem várias previsões juntas e sobrepostas para os veículos que não estavam aguardando no semáforo e estão circulando em velocidades maiores e com valores próximos entre si.

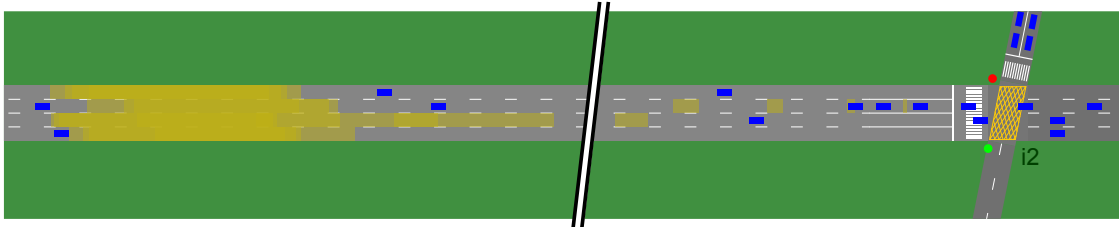


Figura 3.5: Previsão da zona do dilema no MicroLAM. Para cada veículo está desenhada uma previsão da sua zona do dilema em sua faixa na cor amarela transparente. O lado direito ilustra um trecho da via próximo a interseção semaforizada. O lado esquerdo ilustra um outro trecho da mesma via um pouco mais distante da interseção.

A quantidade de previsões que aparecem em uma via é no máximo igual ao número de veículos nela, então, em uma via com muitos veículos fica difícil correlacionar os veículos com as suas previsões da zona do dilema. Vale ressaltar que um veículo pode estar antes, dentro ou atrás da sua previsão da zona do dilema. Em alguns casos, não estamos interessados em ver todas as previsões, por isso foi desenvolvido um mecanismo para escolher quais previsões devem ser desenhadas: nenhuma, todas, apenas as previsões cujos veículos estejam dentro ou atrás ou apenas as previsões cujos veículos estejam dentro. A figura 3.6 ilustra uma situação

onde estão desenhadas apenas as previsões cujos veículos estejam dentro.

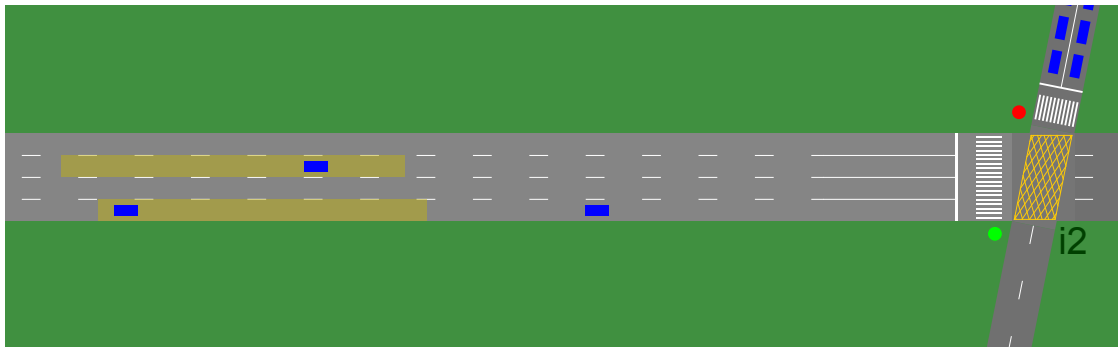


Figura 3.6: Previsão da zona do dilema cujo veículo esteja dentro, no MicroLAM.

A previsão da zona do dilema é um mecanismo importante para avaliar se um veículo que mantém sua velocidade passará por um dilema na transição do verde para o amarelo do semáforo. Mostrar esta previsão graficamente ajuda a avaliar mecanismos que podem evitar que o motorista passe por este dilema.

### 3.5 Zona de Indecisão

Além da zona do dilema clássica, também é importante representar no MicroLAM a zona de indecisão, descrita na subsecção 2.2.2. Da mesma forma que a zona do dilema, a zona de indecisão só existe no momento exato em que a indicação do semáforo transiciona do verde para o amarelo. Assim, também foi desenvolvida uma opção para que a simulação parasse exatamente no momento deste evento. Para cada faixa da via foi desenhada uma zona de indecisão, considerando a velocidade de aproximação do veículo mais próximo da linha de retenção e que ainda não a tenha cruzado.

A figura 3.7 ilustra a zona de indecisão no MicroLAM na cor laranja transparente. A região compreendida entre a linha de retenção e o final da zona de indecisão é onde a probabilidade do motorista decidir por parar quando confrontado com a indicação amarela do semáforo é menor que 10%. A região que começa antes do início da zona de indecisão e que se estende indefinidamente ao longo do resto da via é onde a probabilidade do motorista decidir por parar é maior que 90%.

Considerando a faixa mais à direita da via como a primeira faixa, podemos fazer algumas observações sobre a figura 3.7. As zonas de indecisão desenhadas na primeira e segunda faixas correspondem aos veículos que estão dentro delas. Na terceira faixa, o veículo se encontra atrás de sua zona de indecisão. A zona de indecisão desenhada na quarta faixa corresponde a um veículo que não aparece no desenho, pois está posicionado em uma porção anterior da via.

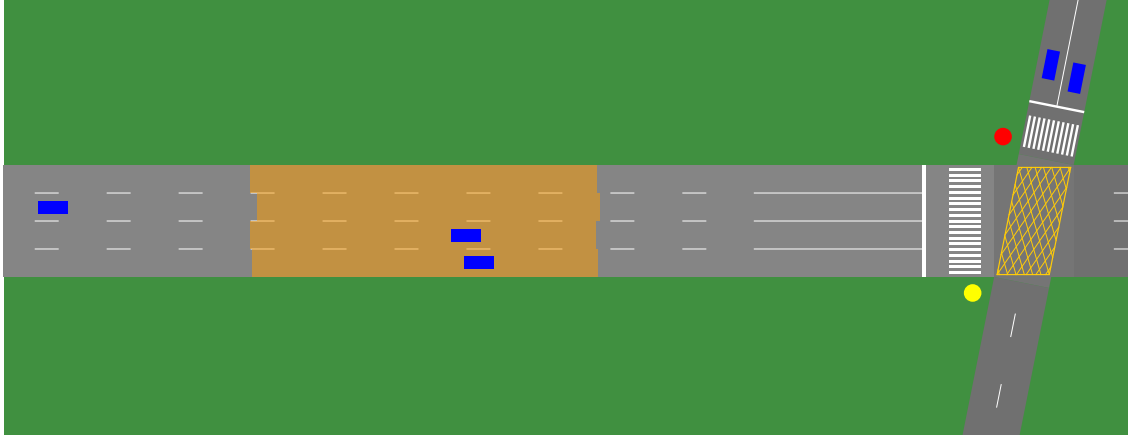


Figura 3.7: Zona de indecisão no MicroLAM para cada faixa da via na cor laranja transparente.

### 3.6 Previsão da Zona de Indecisão

Assim como a zona do dilema, a zona de indecisão só existe no momento exato da transição do verde para o amarelo do semáforo. Logo, do mesmo modo, é interessante ter a possibilidade de fazer uma previsão, durante o intervalo de verde, se o veículo estará na zona de indecisão quando esta transição ocorrer.

Analogamente à previsão da zona do dilema, a previsão da zona de indecisão cria a zona de indecisão levando em conta a velocidade de aproximação do veículo e em seguida desloca esta zona para trás da distância que o veículo irá percorrer no tempo de verde, considerando sua velocidade atual. Deste modo, se o veículo mantiver sua velocidade, quando a transição para o amarelo acontecer, a posição relativa do veículo para a sua zona de indecisão será a mesma entre a sua posição atual e sua previsão da zona de indecisão.

Para calcular a previsão da zona de indecisão, primeiramente são calculadas as distâncias do início e final da zona de indecisão em relação à linha de retenção, considerando a velocidade instantânea do veículo,  $v_x$ , como a velocidade de aproximação,  $v = v_x$ . Em seguida, estas distâncias são deslocadas para trás da distância que o veículo irá percorrer no tempo restante de verde,  $t_g$ , novamente considerando sua velocidade atual,  $v_x$ . Então, a previsão da distância de início da zona de indecisão,  $d'_i$ , e a previsão da distância do final da zona de indecisão,  $d'_f$ , são dadas por:

$$d'_i = v_x t_{90\% \text{ parar}} + v_x t_g \quad (3.4)$$

$$d'_f = v_x t_{10\% \text{ parar}} + v_x t_g \quad (3.5)$$

A previsão é feita para cada veículo que esteja em uma via com uma interseção semaforizada à frente. Na figura 3.8 é possível observar as previsões das zonas de

indecisão para todos os veículos que estão na via, na cor laranja transparente. O lado direito da figura ilustra um trecho da via próximo à interseção semaforizada, onde aparecem previsões de zonas de indecisão curtas, para os veículos que começaram a se deslocar em função do semáforo ter transicionado do vermelho para o verde. O lado esquerdo da figura ilustra um outro trecho da mesma via um pouco mais distante da interseção, onde aparecem várias previsões juntas e sobrepostas para os veículos que não estavam aguardando no semáforo e estão circulando em velocidades maiores e com valores próximos entre si.

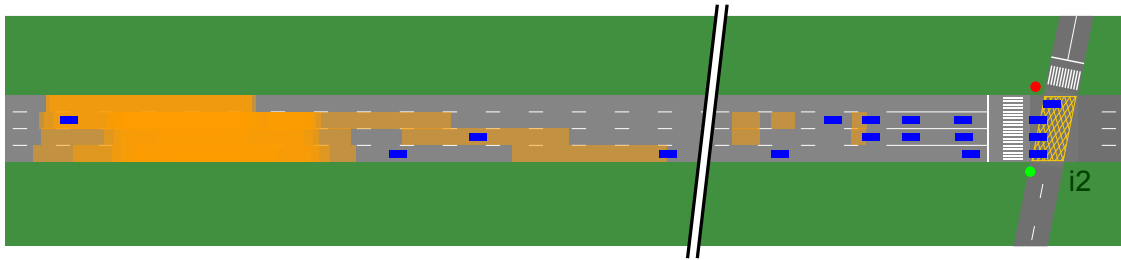


Figura 3.8: Previsão da zona de indecisão no MicroLAM. Para cada veículo está desenhada uma previsão da sua zona de indecisão em sua faixa na cor laranja transparente. O lado direito ilustra um trecho da via próximo a interseção semaforizada. O lado esquerdo ilustra um outro trecho da mesma via um pouco mais distante da interseção.

A quantidade de previsões que aparecem em uma via é no máximo igual ao número de veículos nela, então, em uma via com muitos veículos fica difícil correlacionar os veículos com as suas previsões da zona de indecisão. Vale ressaltar que um veículo pode estar antes, dentro ou atrás da sua previsão da zona de indecisão. Em alguns casos, é interessante ver apenas algumas destas previsões, por isso foi desenvolvido um mecanismo para escolher quais previsões devem ser desenhadas: nenhuma, todas, apenas as previsões cujos veículos estejam dentro ou atrás ou apenas as previsões cujos veículos estejam dentro. A figura 3.9 ilustra uma situação onde estão desenhadas apenas as previsões cujos veículos estejam dentro.

A previsão da zona de indecisão é um mecanismo importante para avaliar se um veículo que mantém sua velocidade estará em uma zona onde o motorista não terá segurança na decisão se deve parar ou prosseguir no momento em que avistar a indicação amarela do semáforo. Mostrar esta previsão graficamente ajuda a avaliar mecanismos que podem evitar que o motorista passe por esta situação.



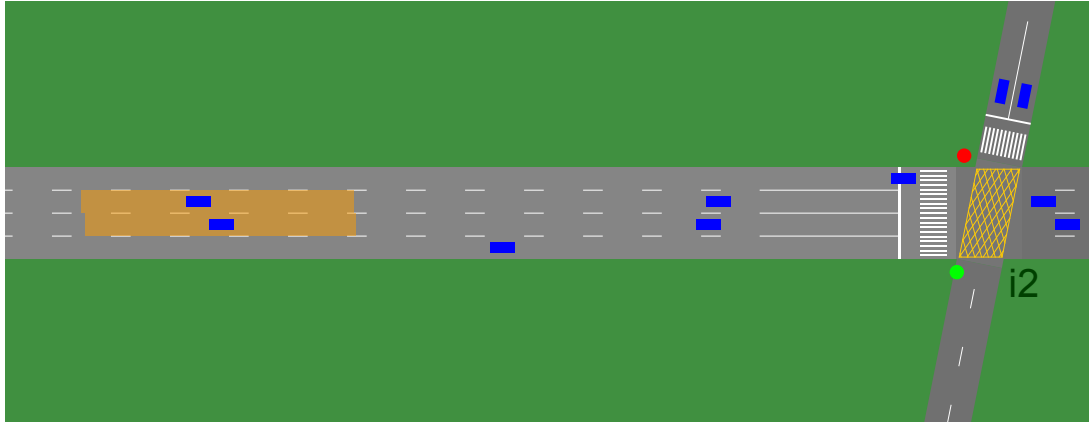


Figura 3.9: Previsão da zona de indecisão cujo veículo esteja dentro, no MicroLAM.

### 3.7 Detector de Avanço de Sinal Vermelho do Semáforo

O detector de avanço de sinal vermelho do semáforo foi desenvolvido para reproduzir o comportamento do sistema automático de fiscalização de mesmo nome, descrito na subseção 2.1.6.

Como não existe nenhuma norma indicando onde o detector deve ser posicionado, a sua posição padrão é exatamente sobre a linha de retenção, abrangendo toda a largura da linha, como ilustrado na figura 3.10 por um contorno na cor rosa. Caso seja desejado outro posicionamento, o sistema permite que a distância do detector para o final da via e o comprimento do detector em si sejam configurados livremente, dando bastante flexibilidade para reproduzir a maioria dos cenários reais.

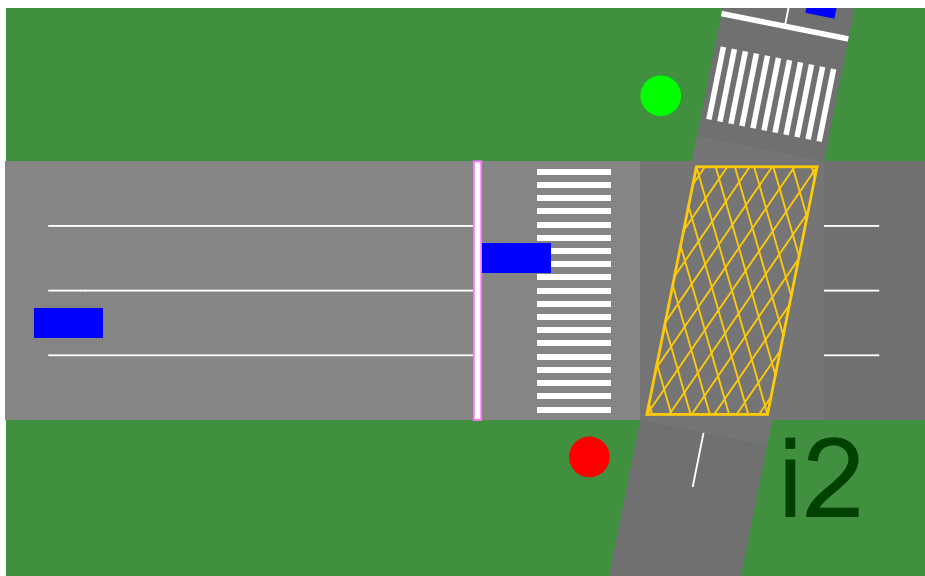


Figura 3.10: Detector de avanço de sinal vermelho do semáforo com seu contorno na cor rosa, no MicroLAM. O veículo na terceira faixa da direita para esquerda acabou de ser contabilizado como um avanço do sinal.

A portaria nº 16/04 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) [21] define que o tempo de retardo para a ativação do detector pode ser configurado para valores inteiros entre 0 e 5 s, logo, o valor do tempo de retardo também pode ser definido na configuração como qualquer valor inteiro maior ou igual a zero.

Esta mesma portaria também define que o avanço do sinal só deve ser registrado após o veículo transpor a área de influência do detector, dessa forma, o detector foi implementado de modo a só contabilizar avanços de sinal vermelho no momento deste evento. Com o intuito de facilitar o estudo deste tipo de situação, também foi desenvolvida uma opção para que a simulação parasse exatamente no momento deste evento.

Além da contabilização do número total de avanços de sinal vermelho do semáforo, o detector também consegue indicar a parcela destes avanços que foram feitos por veículos que estiveram em uma zona do dilema, bem como os que estiveram em uma zona de indecisão.

### **3.8 Detector de Parada sobre a Faixa para Travessia de Pedestres**

O detector de parada sobre a faixa para travessia de pedestres foi implementado para imitar o comportamento do sistema automático de fiscalização de mesmo nome, descrito na subseção 2.1.6.

Da mesma forma que o detector explicado na seção anterior, também não existe nenhuma norma indicando onde este detector deve ser posicionado. Assim, sua posição padrão é sobre a faixa para travessia de pedestres, se estendendo por todo o comprimento das faixas, como ilustrado na figura 3.11 por um contorno na cor rosa. Qualquer outro posicionamento pode ser escolhido, bastando configurar a distância do detector para o final da via e o comprimento do detector em si.

A portaria nº 16/04 do CONTRAN [21] define que o tempo de permanência para o registro da infração pelo detector pode ser configurado para valores inteiros entre 5 e 12 s, assim, este tempo também pode ser definido na configuração como qualquer valor inteiro maior ou igual a zero. Como a detecção só vai acontecer um tempo depois do veículo permanecer parado, foi desenvolvida uma opção para que a simulação parasse exatamente no momento deste evento.

Além da contabilização do número total de paradas sobre a faixa para travessia de pedestres, o detector também consegue indicar a parcela destas paradas que foram feitas por veículos que estiveram em uma zona do dilema, como também os que estiveram em uma zona de indecisão.

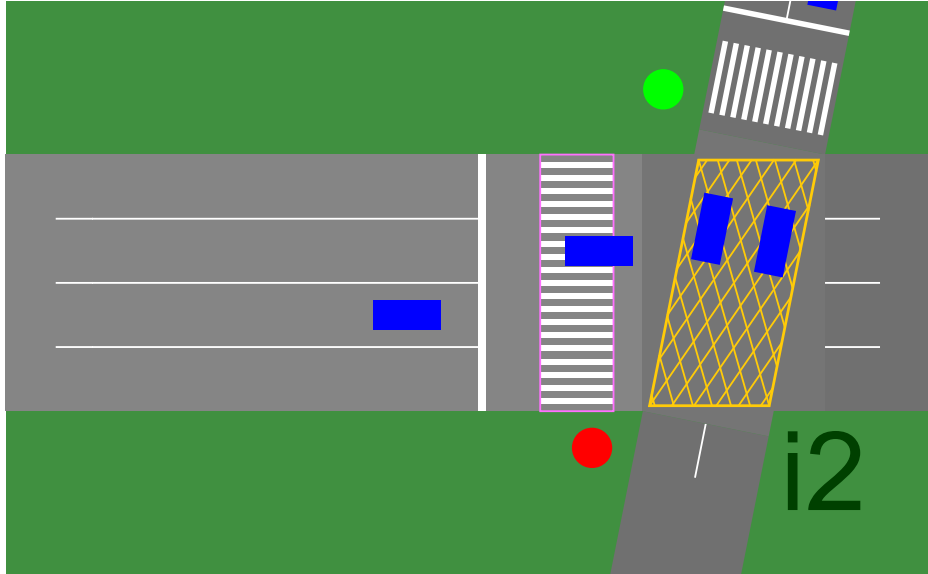


Figura 3.11: Detector de parada sobre a faixa para travessia de pedestres com seu contorno na cor rosa, no MicroLAM. O veículo parado sobre a faixa acabou de ser registrado pelo detector.

### 3.9 Interface do Usuário

Várias melhorias de âmbito geral foram feitas na interface do usuário no MicroLAM. A motivação principal era facilitar a interação com o simulador para um usuário sem conhecimentos de codificação de programas de computador. Esta melhoria foi feita através de uma barra de menu que concentra todas as principais funcionalidades do programa. A seguir, será apresentado um breve resumo sobre elas.

A escolha do cenário que será simulado deixou de ser um parâmetro na execução do programa e passou a ser uma opção do menu. Esta opção dá acesso a uma janela de seleção de arquivos, que filtra pelo tipo de arquivo do cenário. Além desta opção, também foi criada uma outra opção no menu para que o cenário seja fechado e a simulação abortada. Deste modo, não é mais necessário entrar e sair do programa para cada simulação.

Durante o estudo de uma simulação visualizada na interface gráfica, é interessante poder registrar a imagem de situações que estão sendo apresentadas. Assim, foram implementadas duas opções no menu para a captura de tela. Uma que captura todo o cenário e outra que captura apenas a porção que está aparecendo na tela. A imagem é capturada em formato vetorial, preservando todos os detalhes do cenário, independentemente do nível de *zoom* que esteja aplicado no momento. O formato da imagem vetorial escolhido foi o *Scalable Vector Graphics* (SVG), por ser um padrão aberto e amplamente suportado.

A velocidade da simulação já podia ser controlada no MicroLAM, mas este controle era feito exclusivamente através de atalhos de teclado. Então, entradas foram

criadas no menu para cada uma das opções já existentes: reduzir a velocidade, aumentar a velocidade e parar a simulação. Uma nova opção também foi criada, com a simulação parada, ela permite que seja executado apenas a próxima iteração, possibilitando acompanhar em detalhe a evolução de uma situação.

Alguns eventos são objetos de estudo importantes em uma simulação de tráfego, portanto, foram criadas opções no menu que fazem com que a simulação pare exatamente no momento dos seguintes eventos: a formação de uma zona do dilema, a formação de uma zona de indecisão, a transição para indicação vermelha do semáforo, o registro de um avanço do sinal vermelho do semáforo e o registro de uma parada sobre a faixa para travessia de pedestres.

Algumas informações são apresentadas como camadas sobrepostas às vias, assim, opções no menu foram criadas para controlar quais delas devem ser desenhadas. Um conjunto de opções define quais previsões da zona do dilema devem ser apresentadas: nenhuma, todas, apenas as previsões cujos veículos estejam dentro ou atrás ou apenas as previsões cujos veículos estejam dentro. Um outro conjunto de opções define quais previsões da zona de indecisão devem ser mostradas, com as mesmas possibilidades de escolha da previsão da zona do dilema. E por fim, existe uma opção para exibir as ondas verdes<sup>1</sup>.

Todas estas funcionalidades melhoram a usabilidade do MicroLAM e o tornam acessível para qualquer indivíduo que precise de uma ferramenta flexível e de código aberto para estudar as dinâmicas do sistema de tráfego.

---

<sup>1</sup>A onda verde é um fenômeno intencionalmente induzido em que uma série de semáforos, geralmente três ou mais, são coordenados para permitir o fluxo de tráfego contínuo ao longo de vários cruzamentos em uma direção principal.

# Capítulo 4

## Modelos de Motorista

Neste capítulo serão apresentados todos os modelos de motorista desenvolvidos para este trabalho. Na seção 4.1 é discutido um novo modelo que foi criado para superar algumas limitações do IDM. Na sequência, nas seções 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, são expostos outros modelos de motorista concebidos para evitar as zonas do dilema e indecisão.

### 4.1 *Standard Driver Model (StDM)*

O único modelo de motorista que foi desenvolvido por completo para o MicroLAM até então é o *Intelligent Driver Model (IDM)*, descrito na subseção 2.3.2. Infelizmente, este modelo tem algumas limitações que o impedem de ser usado para alcançar os objetivos desta dissertação.

A primeira limitação é uma característica intrínseca à formulação do seu modelo. Se analisarmos a equação 2.14 do IDM, podemos concluir que fixado um valor positivo para a constante  $a$ , que representa a aceleração convencional do tráfego do dia a dia, e escolhendo  $\lambda = 4$ , que é o valor sugerido pelos autores do modelo, não importa quais sejam os valores das demais constantes e variáveis, o valor resultante de  $dv/dt$  sempre será menor ou igual a  $a$ . No entanto, não existe uma limitação negativa para o valor de  $dv/dt$ , logo, a desaceleração resultante pode assumir valores irrealis. Ou seja, o veículo sempre consegue parar, não importando a velocidade em que está e a distância para o obstáculo à frente.

A segunda limitação é a forma como a implementação do modelo interage com as indicações do semáforo. O IDM é um modelo de perseguição veicular, logo, o seu comportamento também depende de informações do veículo à frente. Entretanto, existem situações onde não há um veículo à frente, mas mesmo assim é preciso que o veículo pare, como na indicação vermelha do semáforo. Para este tipo de situação, os autores do IDM sugerem o uso de um veículo virtual de comprimento zero, posicionado na linha de retenção durante todo o intervalo de vermelho.

A terceira limitação também está relacionada à formulação do modelo, que não

prevê nenhum tempo de percepção e reação para a tomada de decisões, como por exemplo: o tempo para decidir se o motorista vai parar ou não o veículo ao avistar a indicação amarela do semáforo.

Juntando estas limitações, é possível concluir que quando um veículo está se aproximando da linha de retenção e a luz do semáforo transiciona para o vermelho, um veículo virtual é materializado poucos metros à frente dele, fazendo com que o modelo gere valores de desaceleração altíssimos induzido pela presença do novo veículo à frente. Estes valores ilimitados de desaceleração e a ausência de um tempo de percepção e reação são incompatíveis com o objetivo de simular a zona do dilema, já que para uma desaceleração infinita e tempo de percepção e reação nulo, a distância crítica de parada é sempre zero, ver equação 2.2.

Percebe-se também, que o IDM não tem nenhuma sensibilidade ao intervalo de amarelo do semáforo, ignorando completamente a sua existência. No IDM, o intervalo de amarelo é equivalente ao verde, permitindo que o veículo passe livremente, ao contrário do que indica o Código Brasileiro de Trânsito [15], que na indicação amarela, o condutor deve parar o veículo, salvo se isto resultar em situação de perigo.

Levando em consideração estas limitações, foi necessário o desenvolvimento de um novo modelo de motorista, que foi batizado de Modelo de Motorista Padrão ou *Standard Driver Model* (StDM) em inglês. O StDM é uma extensão do IDM, que elimina as desacelerações ilimitadas, dispensa o uso do veículo virtual, é sensível ao amarelo do semáforo e tem um tempo de percepção e reação para parar no amarelo.

A solução para as desacelerações ilimitadas consiste simplesmente em avaliar se o resultado da equação 2.14 do IDM é uma desaceleração maior do que  $b$ , que é a desaceleração confortável, e limitá-la a este valor. Esta desaceleração foi escolhida ao invés da desaceleração máxima, de modo a não criar um efeito agressivo nas frenagens. Assim, as equações do StDM são:

$$\frac{dv}{dt} = \max \left( -b, a \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_0} \right)^\lambda - \left( \frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right] \right) \quad (4.1)$$

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + \max \left[ 0, vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \right] \quad (4.2)$$

Os significados das variáveis e constantes são os mesmos já definidos para o IDM na subseção 2.3.2.

Com esta alteração, dependendo da situação em que o veículo é colocado, ele pode ser incapaz de frear e passar literalmente por cima de outro veículo, já que o simulador não está preparado para tratar situações de colisão. Um evento como este configuraria uma situação de acidente de trânsito.

O tratamento dado para as indicações do semáforo deixou de ser orquestrado pelo posicionamento de um veículo virtual e passou a fazer parte do modelo como

uma rotina orientada a eventos. O modelo de motorista passa a observar os eventos de transição das indicações do semáforo. Quando ocorre a transição do verde para o amarelo, o modelo decide se vai parar ou não com base em uma distribuição de probabilidade que é função do seu tempo de viagem até a linha de retenção, ver equação 2.11.

Caso o modelo de motorista decida por parar, ele entra no modo de parada, que consiste em duas etapas. Na primeira etapa, o veículo continua se movendo normalmente, enquanto aguarda o tempo de percepção e reação passar,  $\delta$ . Na segunda etapa, o veículo calcula duas acelerações diferentes usando a equação 4.1. Uma em função do veículo à frente, como o de costume. Outra tomando a sua distância para a linha de retenção como se fosse a distância para o veículo à frente,  $s = x$ , e a diferença de velocidade para o veículo à frente como se o veículo à frente estivesse parado,  $\Delta v = v$ . As duas são comparadas e a maior desaceleração é utilizada de fato. Esta ponderação é necessária porque pode existir um veículo à frente freando mais intensamente.

Os valores adotados para as constantes do StDM nas simulações feitas para esta dissertação estão listados a seguir. Aceleração normal do dia a dia,  $a = 1,1 \text{ m/s}^2$ , que é o valor indicado pelo guia do *Institute of Transportation Engineers* (ITE) [14]. Desaceleração confortável,  $b = 3,3 \text{ m/s}^2$ , e tempo de percepção e reação,  $\delta = 1,2 \text{ s}$ , com base nos valores observados por DE SOUSA no Brasil para o 85<sup>o</sup> percentil em sua dissertação. Velocidade desejada,  $v_0$ , sendo igual a velocidade máxima da via. Distância mínima para o veículo à frente,  $s_0 = 2 \text{ m}$ , tempo de *headway*,  $T = 1,6 \text{ s}$ , e expoente de aceleração,  $\lambda = 4$ , como indicado pelos autores do IDM [8].

A elaboração deste modelo trouxe a possibilidade de simular situações mais realistas, que favorecem o estudo da zona do dilema. Uma destas situações é quando o motorista decide parar ao avistar a indicação amarela do semáforo, mas o veículo não tem frenagem suficiente para parar antes da linha de retenção e acaba parando sobre a própria linha de retenção ou sobre a faixa para travessia de pedestres. Outra situação é quando o motorista decide passar ao avistar a indicação amarela do semáforo, mas ainda está muito longe do cruzamento e acaba passando pela linha de retenção após a transição da indicação amarela para a vermelha.

## 4.2 *Dilemma Zone Avoidance Driver Model* (DZADM)

Dispondo de acesso às informações sobre a temporização do semáforo e às medidas do cruzamento, é factível pensar em um modelo de motorista que pudesse evitar estar dentro da zona do dilema quando a indicação amarela do semáforo surgisse.

Então, foi desenvolvido um modelo de motorista com o objetivo de testar este comportamento, que foi batizado de Modelo de Motorista que Evita a Zona do Dilema ou *Dilemma Zone Avoidance Driver Model* (DZADM) em inglês.

Usando como ponto de partida o conhecimento sobre a previsão da zona do dilema, descrita na seção 3.4, existem duas estratégias para evitar estar na zona do dilema: manter o veículo à frente da previsão da sua zona do dilema ou mantê-lo atrás dela.

Um veículo que em um momento inicial está a uma distância  $x$  da linha de retenção e se movendo a uma velocidade  $v_x$ , quando emprega uma aceleração constante  $\alpha$  durante o tempo  $t_\alpha$ , estará em um momento final a uma nova distância  $x^*$  da linha de retenção, dada por:

$$x^* = x - v_x t_\alpha - \frac{\alpha t_\alpha^2}{2} \quad (4.3)$$

No momento inicial, a distância do início da previsão da zona do dilema para a linha de retenção é  $x'_c$ , dada pela equação 3.1. No momento final esta distância pode mudar, já que ela é função da velocidade do veículo. A velocidade final do veículo é dada por  $v_x^* = v_x + \alpha t_\alpha$ , desse modo, a nova distância do início da previsão da zona do dilema para a linha de retenção passa a ser  $x_c^*$ , formulada como:

$$x_c^* = (v_x + \alpha t_\alpha)\delta + \frac{(v_x + \alpha t_\alpha)^2}{2b} + (v_x + \alpha t_\alpha)(t_g - t_\alpha) \quad (4.4)$$

Analogamente, a distância do final da previsão da zona do dilema para a linha de retenção, que no momento inicial é  $x'_0$ , dada pela equação 3.2, no momento final passa a ser  $x_0^*$ , formulada como:

$$x_0^* = \max \left[ 0, (v_x + \alpha t_\alpha)\tau - w - L \right] + (v_x + \alpha t_\alpha)(t_g - t_\alpha) \quad (4.5)$$

Considerando que em um certo momento, um motorista que esteja dentro ou atrás da previsão da zona do dilema decida pela estratégia de estar à frente da zona do dilema, no caso limite, ele terá no máximo o tempo restante de verde para se movimentar, logo,  $t_\alpha = t_g$ . Durante este tempo, ele terá que acelerar o veículo para ultrapassar a previsão da zona do dilema e só poderá fazer isso com a aceleração máxima do veículo  $a$ . Outra restrição é que o veículo não poderá passar da velocidade máxima da via, que também é a velocidade desejada de viagem  $v_0$ . Para ser bem sucedido, no final de  $t_g$  o veículo deve estar a uma distância menor da linha de retenção do que o final da zona do dilema, ou seja,  $x^* < x_0^*$ .

Com as restrições descritas, o veículo atingirá a sua velocidade máxima no tempo  $(v_0 - v_x)/a$ , o que pode acontecer antes do final de  $t_g$ . Logo, é preciso dividir  $t_g$  em duas partes, uma em que o veículo está acelerando até a velocidade máxima,  $t_a$ , e outra em que ele viaja na velocidade máxima,  $t_{v_0}$ .



$$t_a = \min \left[ t_g, \frac{v_0 - v_x}{a} \right] \quad (4.6)$$

$$t_{v_0} = \max \left[ 0, t_g - \frac{v_0 - v_x}{a} \right] \quad (4.7)$$

Deste modo, a distância mínima que o veículo pode ficar da linha de retenção ao final de  $t_g$  é dada por:

$$x_{min}^* = x - v_x t_a - \frac{at_a^2}{2} - v_0 t_{v_0} \quad (4.8)$$

A velocidade do veículo ao final de  $t_g$  é dada por  $v = \min(v_0, v_x + at_g)$ , assim, é possível determinar a distância máxima que o veículo pode estar da linha de retenção,  $x_{max}^{zd}$ , para que ainda seja possível para ele estar à frente da zona do dilema. Tomando  $x_{min}^* < x_0^*$ , tem-se:

$$x_{max}^{zd} = v_x t_a + \frac{at_a^2}{2} + v_0 t_{v_0} + \max(0, v\tau - w - L) \quad (4.9)$$

Agora, considerando que em um certo momento, um motorista que esteja dentro ou à frente da previsão da zona do dilema decida pela estratégia de estar atrás da zona do dilema, no caso limite, ele terá no máximo o tempo restante de verde para se movimentar, logo,  $t_\alpha = t_g$ . Durante este tempo, ele terá que desacelerar o veículo para que a previsão da zona do dilema se desloque para frente dele e só poderá fazer isso com a desaceleração máxima do veículo  $b$ . Outra restrição é que o veículo não pode se movimentar em marcha à ré, sendo sua velocidade mínima igual a zero. Para ser bem sucedido, no final de  $t_g$  o veículo deve estar a uma distância maior da linha de retenção do que o início da zona do dilema, ou seja,  $x^* > x_c^*$ .

Com as restrições descritas, o veículo atingirá a parada total no tempo  $v_x/b$ , o que pode acontecer antes do final de  $t_g$ . Logo, é preciso dividir  $t_g$  em duas partes, uma em que o veículo está desacelerando até a parada total,  $t_b$ , e outra em que ele está parado.

$$t_b = \min \left[ t_g, \frac{v_x}{b} \right] \quad (4.10)$$

Deste modo, a distância máxima que o veículo pode ficar da linha de retenção ao final de  $t_g$  é dada por:

$$x_{max}^* = x - v_x t_b + \frac{bt_b^2}{2} \quad (4.11)$$

A velocidade do veículo ao final de  $t_g$  é dada por  $v = \max(0, v_x - bt_g)$ , assim, é possível determinar a distância mínima que o veículo pode estar da linha de retenção,  $x_{min}^{zd}$ , para que ainda seja possível para ele estar atrás da zona do dilema. Tomando

$x_{max}^* > x_c^*$ , tem-se:

$$x_{min}^{zd} = v_x t_b - \frac{bt_b^2}{2} + v\delta + \frac{v^2}{2b} \quad (4.12)$$

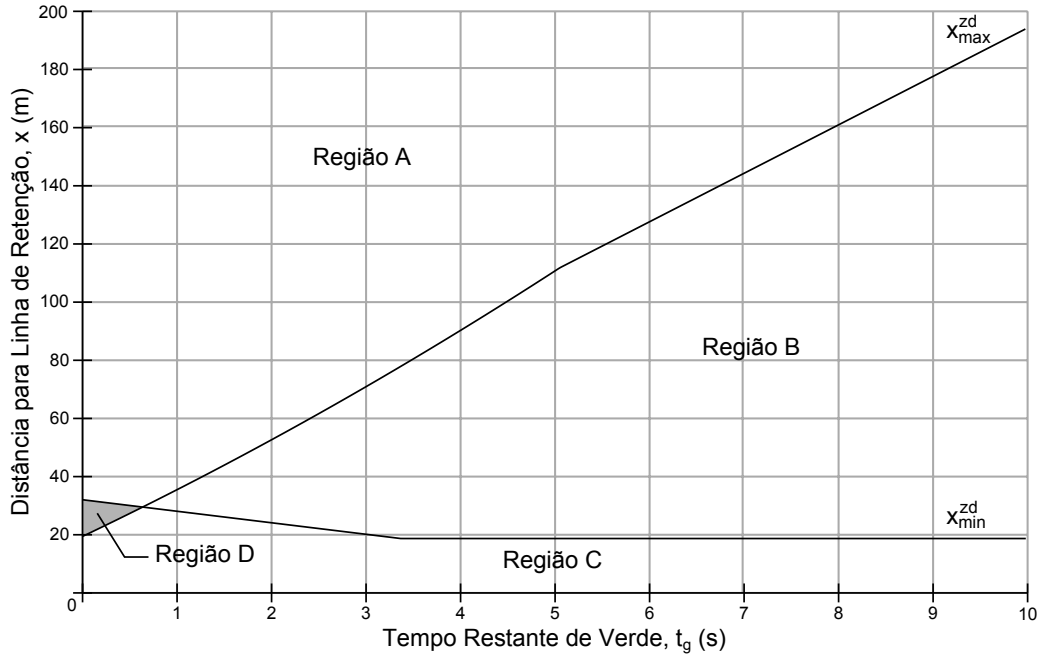


Figura 4.1: Distância máxima que o veículo pode estar da linha de retenção,  $x_{max}^{zd}$ , para que ainda seja possível para ele estar à frente da zona do dilema e distância mínima,  $x_{min}^{zd}$ , para que ainda seja possível para ele estar atrás da zona do dilema em função do tempo restante de verde. Foi considerado um tempo de percepção e reação  $\delta = 1,2$  s, aceleração máxima  $a = 1,1$  m/s<sup>2</sup>, desaceleração máxima  $b = 3,3$  m/s<sup>2</sup>, tempo de amarelo  $\tau = 4$  s, comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo  $w + L = 25$  m, velocidade máxima  $v_0 = 60$  km/h e velocidade na distância  $x$  de  $v_x = 40$  km/h.

A figura 4.1 ilustra as distâncias críticas  $x_{max}^{zd}$  e  $x_{min}^{zd}$  em função do tempo restante de verde  $t_g$ , considerando um tempo de percepção e reação  $\delta = 1,2$  s, aceleração máxima  $a = 1,1$  m/s<sup>2</sup>, desaceleração máxima  $b = 3,3$  m/s<sup>2</sup>, tempo de amarelo  $\tau = 4$  s, comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo  $w + L = 25$  m, velocidade máxima  $v_0 = 60$  km/h e velocidade na distância  $x$  de  $v_x = 40$  km/h. Nesta figura, é possível notar que são formadas quatro regiões distintas:

**Região A** O veículo não consegue mais ficar à frente da zona do dilema, mas consegue ficar atrás da mesma.

**Região B** O veículo consegue ficar à frente ou atrás da zona do dilema.

**Região C** O veículo consegue ficar à frente da zona do dilema, mas não consegue mais ficar atrás da mesma.

**Região D** O veículo não consegue mais ficar à frente e nem atrás da zona do dilema.

Considerando estas regiões, restrições são impostas às duas estratégias. A estratégia de ficar à frente da zona do dilema só é possível nas regiões B e C, enquanto que a estratégia de ficar atrás da zona do dilema só é possível nas regiões A e B. Independentemente da estratégia adotada, na região D não é mais possível escapar da zona do dilema.

Um veículo que se move em velocidade constante  $v_x$  pode usar este mapa de regiões para definir quais estratégias ainda podem ser adotadas ao longo de seu percurso, mas assim que a velocidade do veículo mude, este mapa de regiões deve ser atualizado, já que as distâncias críticas são função da velocidade do veículo no momento  $t_g$ .

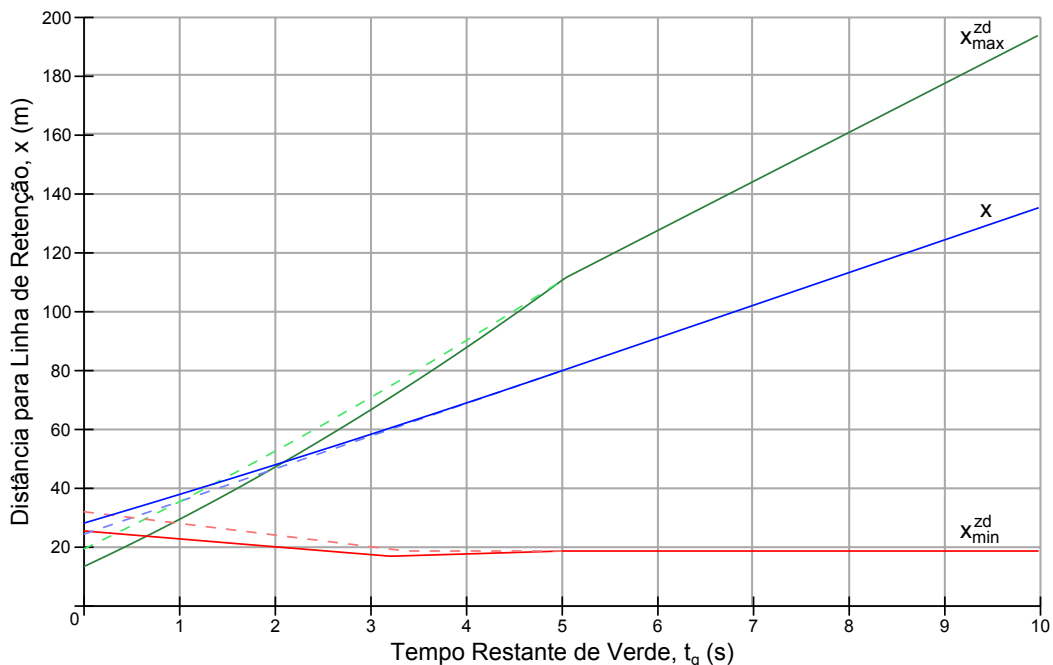


Figura 4.2: A linha contínua representa o movimento de um veículo em velocidade constante de  $40 \text{ km/h}$  entre  $t_g = 10 \text{ s}$  e  $t_g = 5 \text{ s}$  e desaceleração de  $0,3 \text{ m/s}^2$  entre  $t_g = 5 \text{ s}$  e  $t_g = 0 \text{ s}$ . A linha tracejada representa a projeção do percurso caso fosse feito todo em velocidade constante. Foi considerado um tempo de percepção e reação  $\delta = 1,2 \text{ s}$ , aceleração máxima  $a = 1,1 \text{ m/s}^2$ , desaceleração máxima  $b = 3,3 \text{ m/s}^2$ , tempo de amarelo  $\tau = 4 \text{ s}$ , comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo  $w + L = 25 \text{ m}$  e velocidade máxima  $v_0 = 60 \text{ km/h}$ .

A figura 4.2 ilustra o caso em que um veículo que se desloca em velocidade constante de  $40 \text{ km/h}$  no intervalo entre  $t_g = 10 \text{ s}$  e  $t_g = 5 \text{ s}$ , no momento  $t_g = 5 \text{ s}$  começa a empregar uma desaceleração constante de  $0,3 \text{ m/s}^2$  até  $t_g = 0 \text{ s}$ . As linhas contínuas representam  $x_{\max}$ ,  $x_{\min}$  e o percurso do veículo ao longo do tempo  $t_g$ . As

linhas tracejadas representam como seriam  $x_{max}$ ,  $x_{min}$  e o percurso do veículo, caso ele continuasse em velocidade constante.

Podemos observar que se o veículo continuasse em velocidade constante, ele passaria da região B para região A e logo em seguida para região D, estando dentro da zona do dilema quando terminasse o tempo de verde. No entanto, ao empregar uma desaceleração constante a partir de  $t_g = 5$  s, o veículo aumentou a sua distância final para linha de retenção e ao mesmo tempo reduziu as distâncias finais  $x_{max}^{zd}$  e  $x_{min}^{zd}$ . Com essa estratégia, o veículo ficou atrás da zona do dilema, passando da região B para região A, sem depois entrar na região D.

Caso fosse adotada a estratégia de acelerar a partir de  $t_g = 5$  s, a distância final do veículo para linha de retenção reduziria e as distâncias finais  $x_{max}^{zd}$  e  $x_{min}^{zd}$  aumentariam. O veículo viajaria da região B para região C e dependendo da aceleração empregada, não entraria na região D.

A estratégia de ficar à frente da zona do dilema é uma aposta, porque em algum momento o veículo terá que cruzar o limiar  $x_{min}^{zd}$ , entrando na região C. A partir desse momento, se existir alguma situação que exija que o veículo reduza a velocidade, ele poderá acabar entrando na região D. Por este motivo, o DZADM utiliza a estratégia de ficar atrás da zona do dilema, caso isto ainda seja possível.

Para estar atrás da zona do dilema é preciso que  $x^* > x_c^*$ . Entretanto, é desejável que o veículo não fique exatamente no início da zona do dilema, mas a uma certa distância atrás da mesma,  $F$ . Assim, é possível calcular a aceleração máxima,  $\alpha_{max}^{zd}$ , que o veículo possa empregar durante o tempo restante de verde  $t_g$  para que isto aconteça.

$$\alpha_{max}^{zd} = \frac{\sqrt{b}\sqrt{b(t_g + 2\delta)^2 - 4t_g v_x + 8(x - F)} - b(t_g + 2\delta) - 2v_x}{2t_g} \quad (4.13)$$

O DZADM é uma extensão do StDM que herda todo o comportamento dele, descrito na seção 4.1. A este comportamento é imposta uma restrição de aceleração,  $\alpha < \alpha_{max}^{zd}$ , a partir de um determinado momento  $t_g$ , caso o veículo ainda possa ficar atrás da zona do dilema com uma certa folga,  $x > x_{min}^{zd} + F$ .

A figura 4.3 ilustra o efeito da restrição de aceleração do DZADM ativada num tempo restante de verde  $t_g = 5$  s. Considerando a faixa mais à direita da via como a primeira faixa, os veículos na primeira e segunda faixas desaceleraram para sair das suas previsões da zona do dilema e ficaram exatamente atrás das suas zonas do dilema, respeitando uma folga  $F = 0,50$  m. Na terceira e quarta faixas, os veículos já estavam a uma grande distância atrás das suas previsões da zona do dilema quando a restrição foi ativada, desse modo, eles ficaram a uma distância grande do início das suas zonas do dilema e nem aparecem ilustrados na figura.

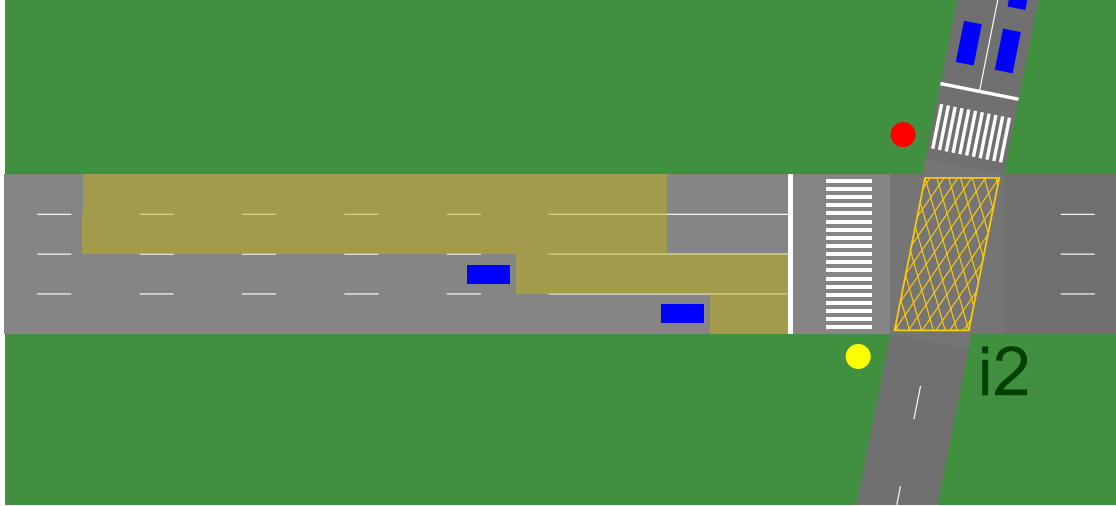


Figura 4.3: Posicionamento dos veículos que usam o DZADM em relação às suas zonas do dilema no MicroLAM. Foi considerado o tempo restante de verde  $t_g = 5$  s para a restrição de aceleração ser imposta e uma folga  $F = 0,50$  m.

A elaboração deste modelo permite estudar os efeitos de um mecanismo simples que poderia assistir o motorista a evitar a zona do dilema. Para tal, haveria a necessidade de existir um sistema de comunicação entre os veículos e o semáforo para obter as informações sobre: o comprimento total do cruzamento à frente a partir da linha de retenção,  $w$ , o tempo restante de verde,  $t_g$ , e o tempo de amarelo,  $\tau$ . Detalhes sobre a performance deste modelo serão apresentados nos resultados das simulações na subseção 5.3.6.

### 4.3 *Indecision Zone Avoidance Driver Model* (IZADM)

Depois de elaborar o DZADM, é natural pensar também em um modelo de motorista que pudesse evitar estar dentro da zona de indecisão quando a indicação amarela do semáforo surgisse. Deste modo, foi implementado um modelo de motorista que tivesse este comportamento, que foi batizado de Modelo de Motorista que Evita a Zona de Indecisão ou *Indecision Zone Avoidance Driver Model* (IZADM) em inglês.

Desta vez, usando como ponto de partida a previsão da zona de indecisão, discutida na seção 3.6, existem também duas estratégias para evitar estar na zona de indecisão: manter o veículo à frente da previsão da sua zona de indecisão ou mantê-lo atrás dela.

Um veículo que em um momento inicial está a uma distância  $x$  da linha de retenção e se movendo a uma velocidade  $v_x$ , quando emprega uma aceleração constante  $\alpha$  durante o tempo  $t_\alpha$ , estará em um momento final a uma nova distância  $x^*$  da linha de retenção, dada pela equação 4.3.

No momento inicial, a distância do início da previsão da zona de indecisão para a linha de retenção é  $d'_i$ , dada pela equação 3.4. No momento final esta distância pode mudar, já que ela é função da velocidade do veículo. A velocidade final do veículo é dada por  $v_x^* = v_x + \alpha t_\alpha$ , desse modo, a nova distância do início da previsão da zona de indecisão para a linha de retenção passa a ser  $d_i^*$ , formulada como:

$$d_i^* = (v_x + \alpha t_\alpha)t_{90\% \text{ parar}} + (v_x + \alpha t_\alpha)(t_g - t_\alpha) \quad (4.14)$$

Analogamente, a distância do final da previsão da zona de indecisão para a linha de retenção, que no momento inicial é  $d'_f$ , dada pela equação 3.5, no momento final passa a ser  $d_f^*$ , formulada como:

$$d_f^* = (v_x + \alpha t_\alpha)t_{10\% \text{ parar}} + (v_x + \alpha t_\alpha)(t_g - t_\alpha) \quad (4.15)$$

Considerando que em um certo momento, um motorista que esteja dentro ou atrás da previsão da zona de indecisão decida pela estratégia de estar à frente da zona de indecisão, no caso limite, ele terá no máximo o tempo restante de verde para se movimentar, logo,  $t_\alpha = t_g$ . Durante este tempo, ele terá que acelerar o veículo para ultrapassar a previsão da zona de indecisão e só poderá fazer isso com a aceleração máxima do veículo  $a$ . Outra restrição é que o veículo não poderá passar da velocidade máxima da via, que também é a velocidade desejada de viagem  $v_0$ . Para ser bem sucedido, no final de  $t_g$  o veículo deve estar a uma distância menor da linha de retenção do que o final da zona de indecisão, ou seja,  $x^* < d_f^*$ .

Com as restrições descritas, o veículo atingirá a sua velocidade máxima no tempo  $(v_0 - v_x)/a$ , o que pode acontecer antes do final de  $t_g$ . Logo, é preciso dividir  $t_g$  em duas partes, uma em que o veículo está acelerando até a velocidade máxima,  $t_a$ , dada pela equação 4.6, e outra em que ele viaja na velocidade máxima,  $t_{v_0}$ , dada pela equação 4.7. Deste modo, a distância mínima que o veículo pode ficar da linha de retenção ao final de  $t_g$  é dada pela equação 4.8.

A velocidade do veículo ao final de  $t_g$  é dada por  $v = \min(v_0, v_x + at_g)$ , assim, é possível determinar a distância máxima que o veículo pode estar da linha de retenção,  $x_{max}^{zi}$ , para que ainda seja possível para ele estar à frente da zona de indecisão. Tomando  $x_{min}^* < d_f^*$ , tem-se:

$$x_{max}^{zi} = v_x t_a + \frac{at_a^2}{2} + v_0 t_{v_0} + v t_{10\% \text{ parar}} \quad (4.16)$$

Agora, considerando que em um certo momento, um motorista que esteja dentro ou à frente da previsão da zona de indecisão decida pela estratégia de estar atrás da zona de indecisão, no caso limite, ele terá no máximo o tempo restante de verde para se movimentar, logo,  $t_\alpha = t_g$ . Durante este tempo, ele terá que desacelerar o veículo para que a previsão da zona de indecisão se desloque para frente dele e só

poderá fazer isso com a desaceleração máxima do veículo  $b$ . Outra restrição é que o veículo não pode se movimentar em marcha à ré, sendo sua velocidade mínima igual a zero. Para ser bem sucedido, no final de  $t_g$  o veículo deve estar a uma distância maior da linha de retenção do que o início da zona de indecisão, ou seja,  $x^* > d_i^*$ .

Com as restrições descritas, o veículo atingirá a parada total no tempo  $v_x/b$ , o que pode acontecer antes do final de  $t_g$ . Logo, é preciso dividir  $t_g$  em duas partes, uma em que o veículo está desacelerando até a parada total,  $t_b$ , dada pela equação 4.10, e outra em que ele está parado. Deste modo, a distância máxima que o veículo pode ficar da linha de retenção ao final de  $t_g$  é dada pela equação 4.11.

A velocidade do veículo ao final de  $t_g$  é dada por  $v = \max(0, v_x - bt_g)$ , assim, é possível determinar a distância mínima que o veículo pode estar da linha de retenção,  $x_{min}^{zi}$ , para que ainda seja possível para ele estar atrás da zona de indecisão. Tomando  $x_{max}^* > d_i^*$ , tem-se:

$$x_{min}^{zi} = v_x t_b - \frac{bt_b^2}{2} + v_{t_{90\% \text{ parar}}} \quad (4.17)$$

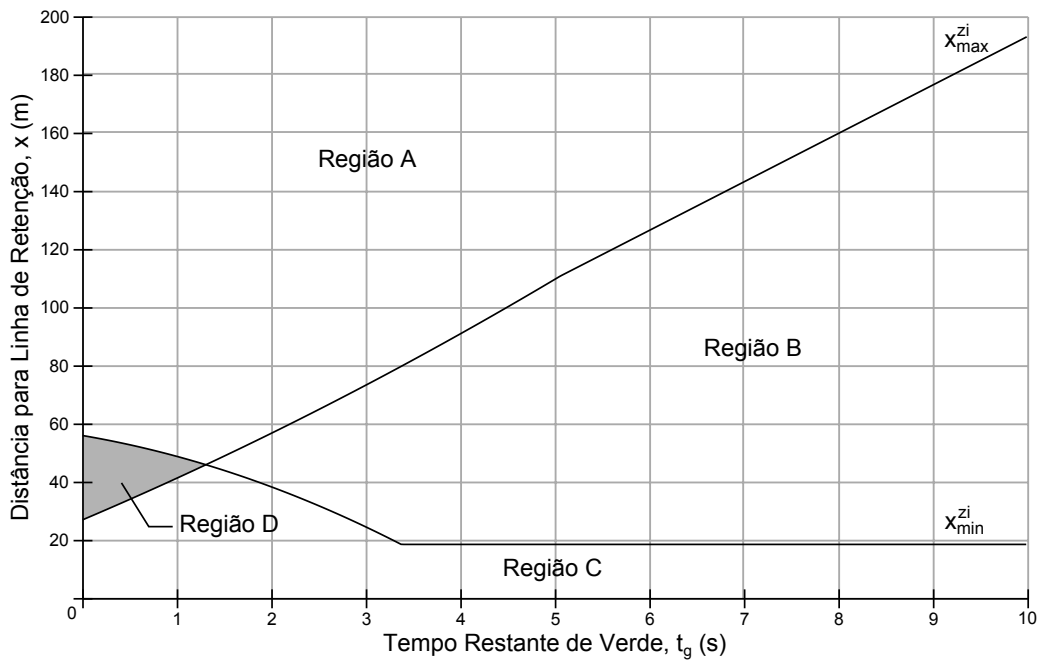


Figura 4.4: Distância máxima que o veículo pode estar da linha de retenção,  $x_{max}^{zi}$ , para que ainda seja possível para ele estar à frente da zona de indecisão e distância mínima,  $x_{min}^{zi}$ , para que ainda seja possível para ele estar atrás da zona de indecisão em função do tempo restante de verde. Foi considerado um tempo de viagem do início da zona de indecisão para linha de retenção  $t_{90\% \text{ parar}} = 5,05 \text{ s}$ , um tempo de viagem do final da zona de indecisão para linha de retenção  $t_{10\% \text{ parar}} = 2,45 \text{ s}$ , aceleração máxima  $a = 1,1 \text{ m/s}^2$ , desaceleração máxima  $b = 3,3 \text{ m/s}^2$ , velocidade máxima  $v_0 = 60 \text{ km/h}$  e velocidade na distância  $x$  de  $v_x = 40 \text{ km/h}$ .

A figura 4.4 ilustra as distâncias críticas  $x_{max}^{zi}$  e  $x_{min}^{zi}$  em função do tempo restante de verde  $t_g$ , considerando um tempo de viagem do início da zona de indecisão para linha de retenção  $t_{90\% \text{ parar}} = 5,05 \text{ s}$ , um tempo de viagem do final da zona de indecisão para linha de retenção  $t_{10\% \text{ parar}} = 2,45 \text{ s}$ , aceleração máxima  $a = 1,1 \text{ m/s}^2$ , desaceleração máxima  $b = 3,3 \text{ m/s}^2$ , velocidade máxima  $v_0 = 60 \text{ km/h}$  e velocidade na distância  $x$  de  $v_x = 40 \text{ km/h}$ . Nesta figura, é possível notar que são formadas quatro regiões distintas:

**Região A** O veículo não consegue mais ficar à frente da zona de indecisão, mas consegue ficar atrás da mesma.

**Região B** O veículo consegue ficar à frente ou atrás da zona de indecisão.

**Região C** O veículo consegue ficar à frente da zona de indecisão, mas não consegue mais ficar atrás da mesma.

**Região D** O veículo não consegue mais ficar à frente e nem atrás da zona de indecisão.

Considerando estas regiões, restrições são impostas às duas estratégias. A estratégia de ficar à frente da zona de indecisão só é possível nas regiões B e C, enquanto que a estratégia de ficar atrás da zona de indecisão só é possível nas regiões A e B. Independentemente da estratégia adotada, na região D não é mais possível escapar da zona de indecisão.

Um veículo que se move em velocidade constante  $v_x$  pode usar este mapa de regiões para definir quais estratégias ainda podem ser adotadas ao longo de seu percurso, mas assim que a velocidade do veículo mude, este mapa de regiões deve ser atualizado, já que as distâncias críticas são função da velocidade do veículo no momento  $t_g$ .

Caso o veículo desacelerasse, ele aumentaria a sua distância final para linha de retenção e ao mesmo tempo reduziria as distâncias finais  $x_{max}^{zi}$  e  $x_{min}^{zi}$ . Com essa estratégia, o veículo ficaria atrás da zona de indecisão, passando da região B para região A, sem depois entrar na região D. Caso fosse adotada a estratégia de acelerar, a distância final do veículo para linha de retenção reduziria e as distâncias finais  $x_{max}^{zi}$  e  $x_{min}^{zi}$  aumentariam. O veículo viajaria da região B para região C e dependendo da aceleração empregada, não entraria na região D.

A estratégia de ficar à frente da zona de indecisão é uma aposta, porque em algum momento o veículo terá que cruzar o limiar  $x_{min}^{zi}$ , entrando na região C. A partir desse momento, se existir alguma situação que exija que o veículo reduza a velocidade, ele poderá acabar entrando na região D. Por este motivo, o IZADM utiliza a estratégia de ficar atrás da zona de indecisão, caso isto ainda seja possível.



Para estar atrás da zona de indecisão é preciso que  $x^* > d_i^*$ . Entretanto, é desejável que o veículo não fique exatamente no início da zona de indecisão, mas a uma certa distância atrás da mesma,  $F$ . Assim, é possível calcular a aceleração máxima,  $\alpha_{max}^{zi}$ , que o veículo possa empregar durante o tempo restante de verde  $t_g$  para que isto aconteça.

$$\alpha_{max}^{zi} = \frac{2(x - F - v_x(t_g + t_{90\% \text{ parar}}))}{t_g(t_g + 2t_{90\% \text{ parar}})} \quad (4.18)$$

O IZADM é uma extensão do StDM que herda todo o comportamento dele, descrito na seção 4.1. A este comportamento é imposta uma restrição de aceleração,  $\alpha < \alpha_{max}^{zi}$ , a partir de um determinado momento  $t_g$ , caso o veículo ainda possa ficar atrás da zona de indecisão com uma certa folga,  $x > x_{min}^{zi} + F$ .

A figura 4.5 ilustra o efeito da restrição de aceleração do IZADM ativada num tempo restante de verde  $t_g = 5 \text{ s}$ . Considerando a faixa mais à direita da via como a primeira faixa, os veículos na primeira e segunda faixas desaceleraram para sair das suas previsões da zona de indecisão e ficaram exatamente atrás das suas zonas de indecisão, respeitando uma folga  $F = 0,50 \text{ m}$ . Na segunda faixa também aparece um veículo mais atrás na via, cuja zona de indecisão não está representada. Na terceira e quarta faixas, os veículos já estavam a uma grande distância atrás das suas previsões da zona de indecisão quando a restrição foi ativada, desse modo, eles ficaram a uma distância grande do início das suas zonas de indecisão e nem aparecem ilustrados na figura.

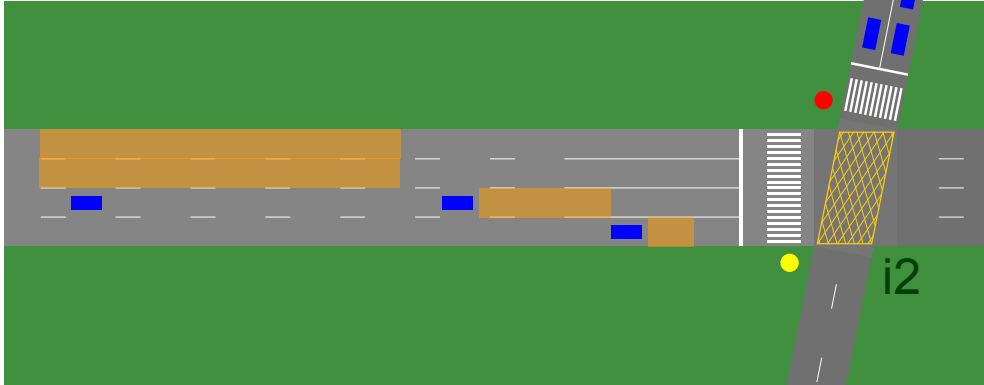


Figura 4.5: Posicionamento dos veículos que usam o IZADM em relação às suas zonas de indecisão no MicroLAM. Foi considerado o tempo restante de verde  $t_g = 5 \text{ s}$  para a restrição de aceleração ser imposta e uma folga  $F = 0,50 \text{ m}$ .

A elaboração deste modelo permite estudar os efeitos de um mecanismo simples que poderia assistir o motorista a evitar a zona de indecisão. Para tal, haveria a necessidade de existir um sistema de comunicação entre os veículos e o semáforo para obter apenas a informação sobre o tempo restante de verde,  $t_g$ . Detalhes sobre a performance deste modelo serão apresentados nos resultados das simulações na

subseção 5.3.7.

## 4.4 *Dilemma and Indecision Zones Avoidance Driver Model (DIZADM)*

Após a concepção do DZADM e IZADM, surge a possibilidade da criação de um modelo de motorista híbrido, que pudesse evitar tanto estar dentro da zona do dilema, quanto evitar estar dentro da zona de indecisão quando acontecesse a transição do verde para o amarelo do semáforo. Então, um modelo de motorista com este comportamento também foi desenvolvido. Ele foi batizado de Modelo de Motorista que Evita a Zona do Dilema e Indecisão ou *Dilemma and Indecision Zones Avoidance Driver Model* (DIZADM) em inglês.

A motivação para este modelo híbrido é que dependendo da velocidade de aproximação do veículo, o início da zona de indecisão pode estar mais distante da linha de retenção do que o início da zona do dilema ou vice-versa. Como pode ser observado na figura 4.6, entre as velocidades de 0 e 91,5 km/h, o início da zona de indecisão fica mais distante da linha de retenção, e acima desta velocidade, o início da zona do dilema passa a ficar mais distante.

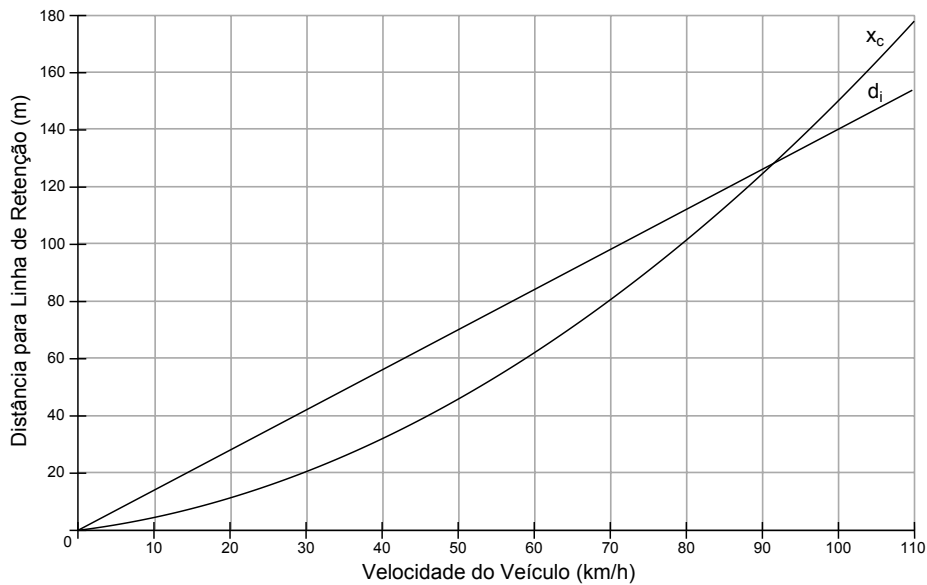


Figura 4.6: Comparação da distância para linha de retenção do início da zona do dilema,  $x_c$ , com o início da zona de indecisão,  $d_i$ , em função da velocidade de aproximação do veículo. Foi considerado um tempo de viagem do início da zona de indecisão para linha de retenção  $t_{90\% \text{ parar}} = 5,05 \text{ s}$ , tempo de percepção e reação  $\delta = 1,2 \text{ s}$  e desaceleração  $b = 3,3 \text{ m/s}^2$ .

O modelo aproveita as ideias discutidas nas seções 4.2 e 4.3, adotando a estratégia

de ficar atrás da previsão da zona do dilema e da previsão da zona de indecisão. O DIZADM é uma extensão do StDM que herda todo o comportamento dele, descrito na seção 4.1. A partir de um determinado tempo restante de verde,  $t_g$ , duas restrições de aceleração podem ser impostas. A restrição  $\alpha < \alpha_{max}^{zd}$ , caso o veículo ainda possa ficar atrás da zona do dilema com uma certa folga,  $x > x_{min}^{zd} + F$ . E a restrição  $\alpha < \alpha_{max}^{zi}$ , caso o veículo ainda possa ficar atrás da zona de indecisão com uma certa folga,  $x > x_{min}^{zi} + F$ .

A figura 4.7 ilustra o efeito das restrições de aceleração do DIZADM ativadas num tempo restante de verde  $t_g = 5$  s. As zonas do dilema são representadas na cor amarela transparente e as zonas de indecisão na cor laranja transparente. Considerando a faixa mais à direita da via como a primeira faixa, os veículos na primeira e segunda faixas desaceleraram para sair das suas previsões da zona do dilema e indecisão e ficaram exatamente atrás das suas zonas de indecisão, respeitando uma folga  $F = 0,50$  m. Na segunda faixa também aparece um veículo mais atrás na via, cujas zonas do dilema e indecisão não estão representadas. Na terceira e quarta faixas, os veículos já estavam a uma grande distância atrás das suas previsões da zona do dilema e indecisão quando a restrição foi ativada, desse modo, eles ficaram a uma distância grande do início das suas zonas de indecisão e nem aparecem ilustrados na figura.

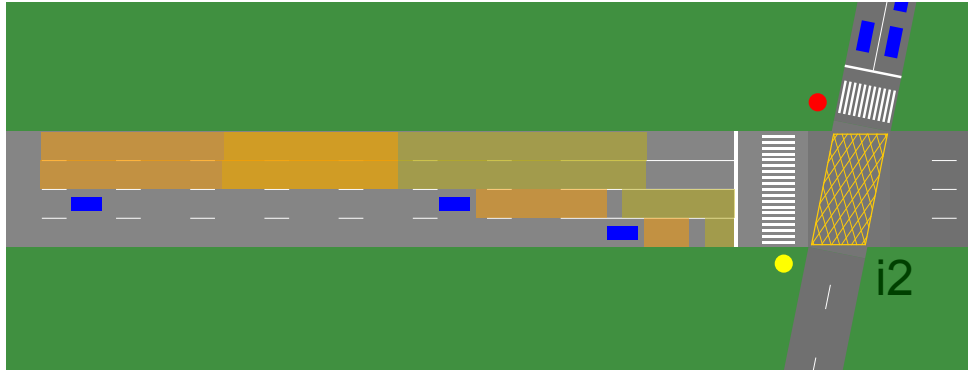


Figura 4.7: Posicionamento dos veículos que usam o DIZADM em relação às suas zonas do dilema e indecisão no MicroLAM. As zonas do dilema são representadas na cor amarela transparente e as zonas de indecisão na cor laranja transparente. Foi considerado o tempo restante de verde  $t_g = 5$  s para as restrições de aceleração serem impostas e uma folga  $F = 0,50$  m.

A elaboração deste modelo permite estudar os efeitos da combinação de dois mecanismos simples que poderiam assistir o motorista a evitar tanto a zona do dilema, quanto a zona de indecisão. Assim como no DZADM e no IZADM, seria necessária a existência de um sistema de comunicação entre os veículos e o semáforo para obter as informações sobre: o comprimento total do cruzamento à frente a partir da linha de retenção,  $w$ , o tempo restante de verde,  $t_g$ , e o tempo de amarelo,

$\tau$ . Detalhes sobre a performance deste modelo serão apresentados nos resultados das simulações na subseção 5.3.8.

## 4.5 *Autonomous Vehicle Driver Model (AVDM)*

Os três modelos anteriores apresentaram mecanismos para assistir o motorista, mas existe também a possibilidade de substituí-lo completamente por um sistema autônomo de condução do veículo. Para estudar os efeitos deste tipo de sistema na aproximação de um semáforo, foi desenvolvido um modelo batizado de Modelo de Motorista de Veículo Autônomo ou *Autonomous Vehicle Driver Model (AVDM)* em inglês.

Quando o motorista humano deixa de existir, o primeiro efeito é que a zona de indecisão também deixa de existir. O sistema autônomo segue estritamente o disposto no Código Brasileiro de Trânsito [15], que é parar o veículo ao receber a indicação amarela do semáforo, salvo se isto resultar em situação de perigo. Ou seja, no momento em que o amarelo aparece, o modelo verifica a distância para a linha de retenção e decide se é possível frear até a parada total sem ultrapassar ela, usando no máximo a desaceleração normal do dia a dia,  $b$ .

O segundo efeito é a eliminação do tempo de percepção e reação para parar ao avistar a indicação amarela do semáforo,  $\delta = 0$  s. O impacto desta eliminação é uma redução considerável no comprimento da zona do dilema, algo que já foi discutido na subseção 2.2.1. Como a zona do dilema vai continuar existindo para algumas velocidades de aproximação, este efeito reduz as correções de curso que o modelo precisará fazer para evitá-la.

O modelo emprega a mesma estratégia do DZADM para evitar a zona do dilema, descrita na seção 4.2. Ele controla sua velocidade de modo a ficar atrás da previsão da zona do dilema. Para isso, é imposta uma restrição de aceleração,  $\alpha < \alpha_{max}^{zd}$ , a partir de um determinado momento  $t_g$ , caso o veículo ainda possa ficar atrás da zona do dilema com uma certa folga,  $x > x_{min}^{zd} + F$ .

A figura 4.8 ilustra o efeito da restrição de aceleração do AVDM ativada num tempo restante de verde  $t_g = 5$  s. Em todas as faixas, os veículos desaceleraram para sair das suas previsões da zona do dilema e ficaram exatamente atrás das suas zonas do dilema, respeitando uma folga  $F = 0,50$  m. É importante ressaltar que todos os veículos ilustrados têm condições de parar antes da linha de retenção sem exceder a desaceleração  $b$ . Mesmo o veículo que se encontra a poucos metros da linha de retenção. Ocorre que ele já havia desacelerado para estar atrás da zona do dilema e por isso está em baixa velocidade.

Este modelo permite estudar os benefícios trazidos ao utilizar um sistema autônomo de condução de veículos, eliminando algumas limitações e imprevisibi-

lidades do motorista humano. Detalhes sobre a performance deste modelo serão apresentados nos resultados das simulações na subseção 5.3.9.

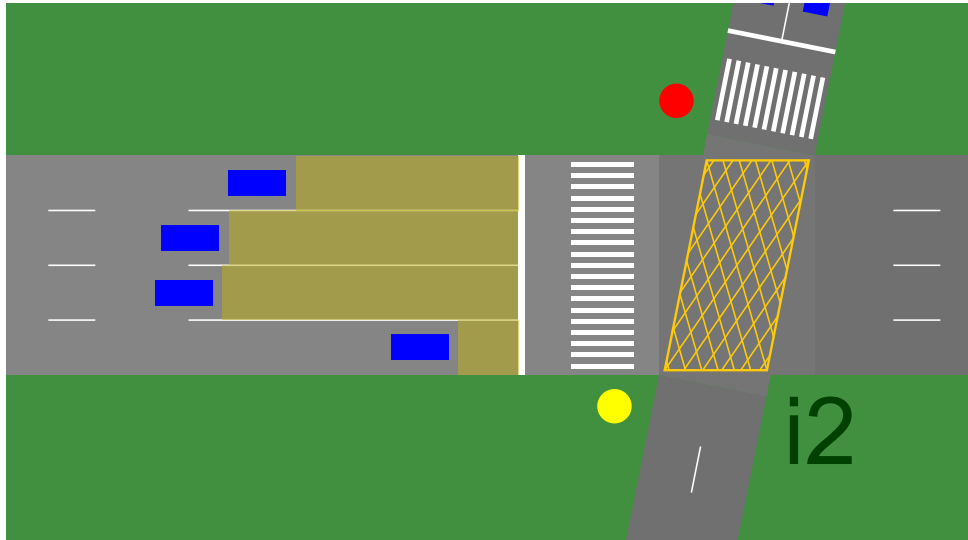


Figura 4.8: Posicionamento dos veículos que usam o AVDM em relação às suas zonas do dilema no MicroLAM. Foi considerado o tempo restante de verde  $t_g = 5 s$  para a restrição de aceleração ser imposta e uma folga  $F = 0,50 m$ .

# Capítulo 5

## Microssimulação da Zona do Dilema

Neste capítulo, serão apresentadas microsimulações de cruzamentos usando o MicroLAM. Primeiramente, algumas dinâmicas do veículo em relação à zona do dilema serão apresentadas na seção 5.1 usando a interface gráfica do simulador. Em seguida, na seção 5.2, serão descritas as medidas de interesse que serão colhidas nas simulações das seções posteriores. Na seção 5.3, serão expostos os resultados das simulações de um cruzamento simples semaforizado. Na sequência, será feita uma simulação do cruzamento da Rua Barata Ribeiro com a Rua Siqueira Campos, na seção 5.4. E por fim, na seção 5.5, uma outra simulação de um cruzamento real, o da Rua Barão da Torre com a Rua Maria Quitéria.

### 5.1 Dinâmica do Veículo em Relação à Zona do Dilema

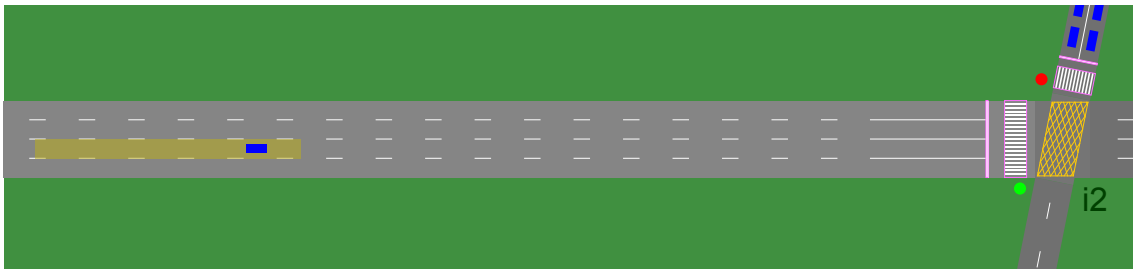
No momento em que avista a indicação amarela do semáforo, o motorista precisa decidir se vai parar ou passar pelo cruzamento. Entretanto, neste momento, o veículo pode estar posicionado dentro da zona do dilema. Algumas dinâmicas do veículo em relação à zona do dilema para as decisões de parar ou passar serão apresentadas nas subseções a seguir.

#### 5.1.1 Decisão de Passar pelo Cruzamento

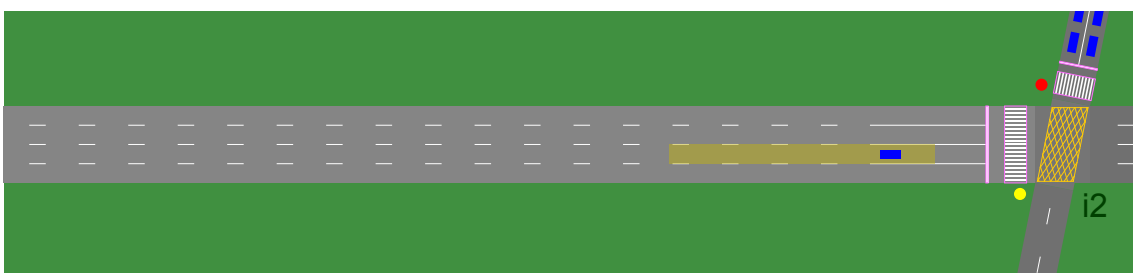
Quando o motorista decide por passar pelo cruzamento, assumindo que o veículo está dentro da zona do dilema, já é certo que ele não conseguirá viajar toda a extensão do cruzamento no tempo restante de amarelo. Deste modo, ele vai passar pelo cruzamento durante o intervalo de vermelho geral ou em algum momento no

qual o trânsito da via conflitante já estiver liberado.

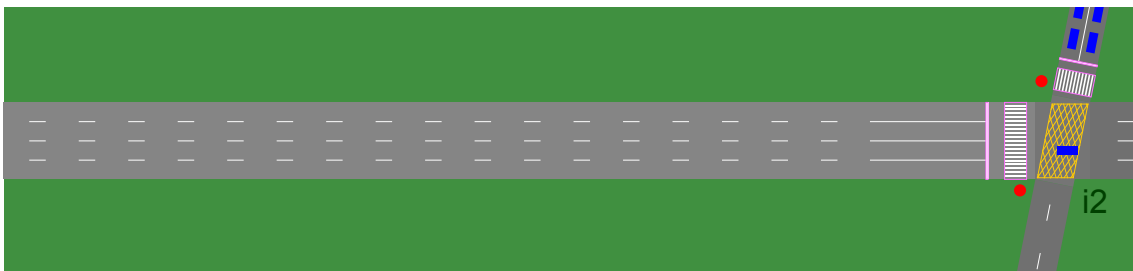
### Veículo Passando pelo Cruzamento Durante o Vermelho Geral



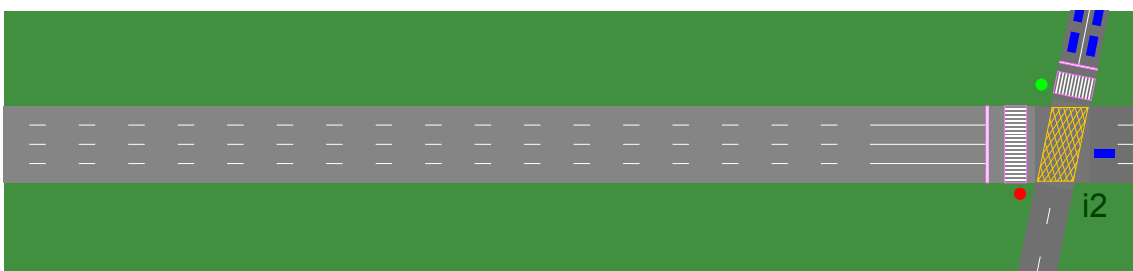
(a) Veículo na previsão da zona do dilema.



(b) Veículo na zona do dilema.



(c) Veículo no cruzamento durante o intervalo de vermelho geral.



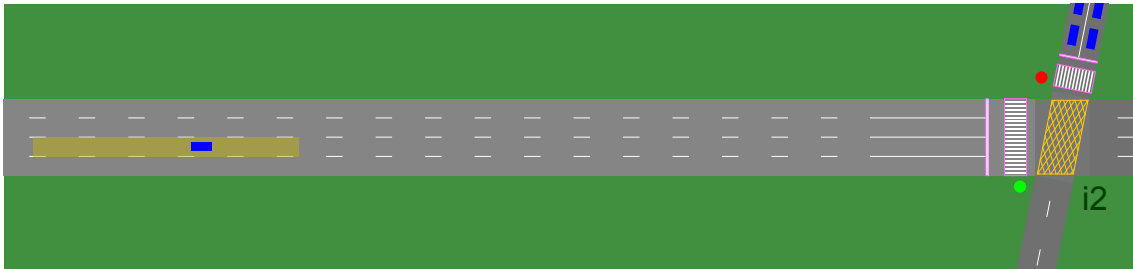
(d) Veículo fora do cruzamento quando o fluxo conflitante é liberado.

Figura 5.1: Dinâmica de um veículo que esteve na zona do dilema e passou pelo cruzamento durante o intervalo de vermelho geral.

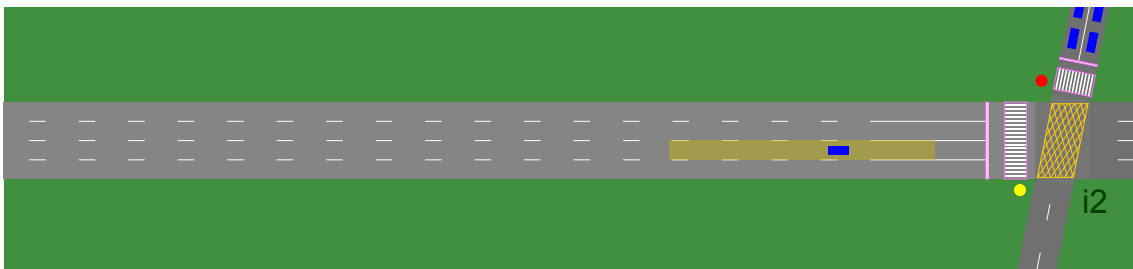
A figura 5.1 ilustra a dinâmica de um veículo que esteve na zona do dilema e passou pelo cruzamento durante o intervalo de vermelho geral. Durante o intervalo de verde, é possível observar que o veículo está dentro da previsão da zona do dilema. Quando o semáforo transiciona do verde para o amarelo, o veículo está dentro da

zona do dilema, posicionado próximo ao final dela. Durante o intervalo de vermelho geral, o veículo ainda está transitando pelo cruzamento, mas não gera nenhum risco de colisão, porque o trânsito na via conflitante ainda está suspenso. Finalmente, o semáforo da via conflitante libera o fluxo de veículos e neste momento o veículo em questão já não está mais no cruzamento.

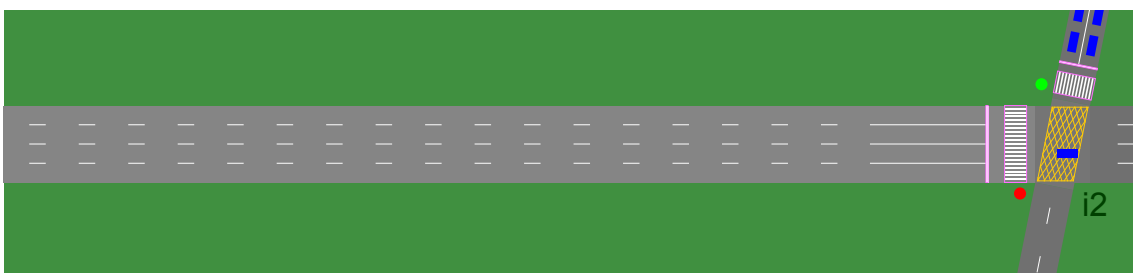
### Veículo Passando pelo Cruzamento com o Fluxo Conflitante Liberado



(a) Veículo na previsão da zona do dilema.



(b) Veículo na zona do dilema.



(c) Veículo no cruzamento durante o momento em que o tráfego é liberado na via conflitante.

Figura 5.2: Dinâmica de um veículo que esteve na zona do dilema e passou pelo cruzamento no momento em que o tráfego é liberado na via conflitante.

A figura 5.2 ilustra a dinâmica de um veículo que esteve na zona do dilema e passou pelo cruzamento no momento em que o tráfego é liberado na via conflitante. Durante o intervalo de verde, é possível verificar que o veículo está dentro da previsão da zona do dilema. Quando o semáforo transiciona do verde para o amarelo, o veículo está dentro da zona do dilema, posicionado pouco a frente do meio dela. No momento em que o tráfego é liberado na via conflitante, o veículo ainda está



passando pela interseção.

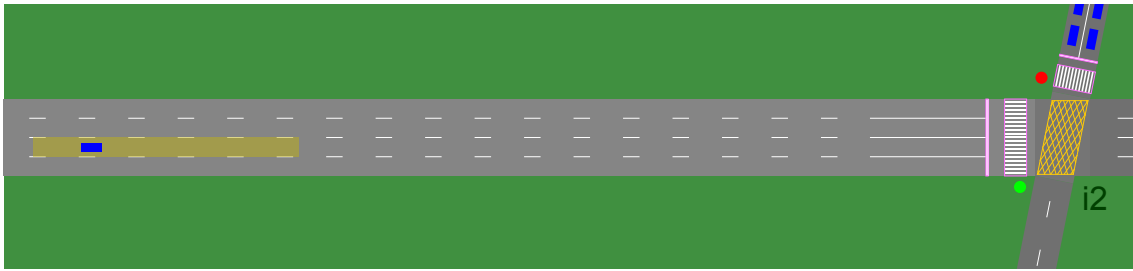
Neste tipo de situação, existe o risco de acidentes de trânsito com colisão lateral. No exemplo da figura 5.2, os veículos da via conflitante formavam um fila aguardando pela liberação do semáforo. Entretanto, esta fila poderia não existir e um veículo em movimento de aproximação pela via conflitante, ao avistar a transição do vermelho para o verde, poderia acelerar e colidir com o veículo que não tinha liberado o cruzamento ainda.

### **Veículo Passando pelo Cruzamento e Avançando o Sinal Vermelho**

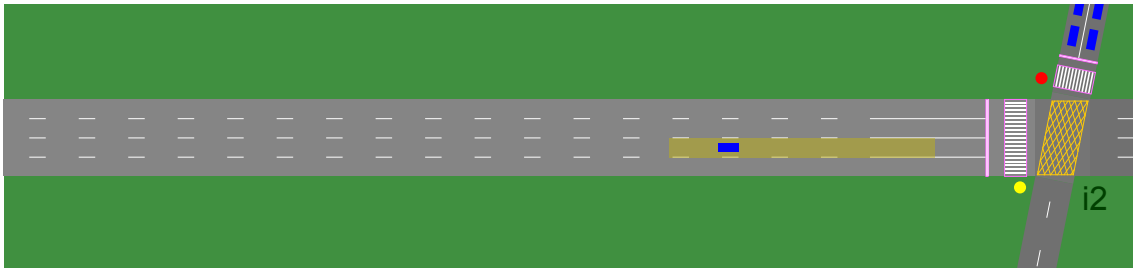
A figura 5.3 ilustra a dinâmica de um veículo que esteve na zona do dilema, que foi registrado avançando o sinal vermelho do semáforo e passou pelo cruzamento com o tráfego da via conflitante liberado há pouco tempo.

Durante o intervalo de verde, é possível notar que o veículo está dentro da previsão da zona do dilema. Quando o semáforo transiciona do verde para o amarelo, o veículo está dentro da zona do dilema, posicionado próximo ao início dela. Pouco após o momento em que o detector de avanço de sinal vermelho é ativado, o veículo é registrado avançando o sinal. Neste exemplo, a duração do tempo de perdão do detector é igual a duração do intervalo de vermelho geral, deste modo, o trânsito na via conflitante é liberado pouco tempo antes do veículo ser registrado pelo detector. Finalmente, enquanto o veículo ainda está passando pelo cruzamento, os veículos da via conflitante já estão se movimentando em direção à interseção.

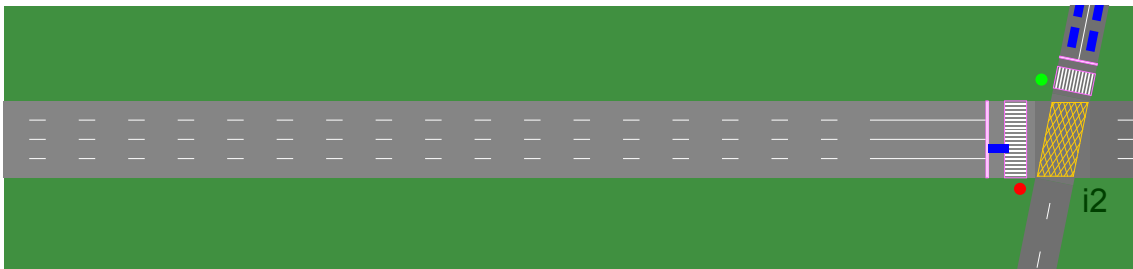
Esta situação gera ainda mais riscos de acidentes de trânsito com colisão lateral do que a discutida anteriormente. Como o semáforo já tinha liberado o fluxo da via conflitante a mais tempo, a chance é maior de que um veículo que venha pela mesma colida com o veículo que foi registrado avançando o sinal vermelho.



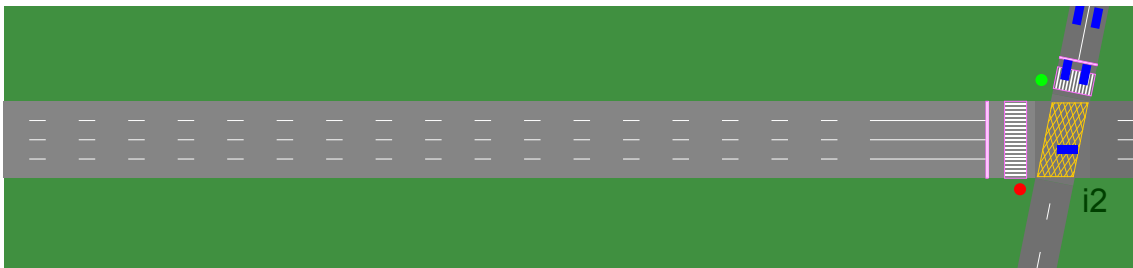
(a) Veículo na previsão da zona do dilema.



(b) Veículo na zona do dilema.



(c) Veículo no momento em que foi registrado avançando o sinal vermelho do semáforo.



(d) Veículo no cruzamento com o tráfego da via conflitante liberado há pouco tempo.

Figura 5.3: Dinâmica de um veículo que esteve na zona do dilema, que foi registrado avançando o sinal vermelho do semáforo e passou pelo cruzamento com o tráfego da via conflitante liberado a pouco tempo.

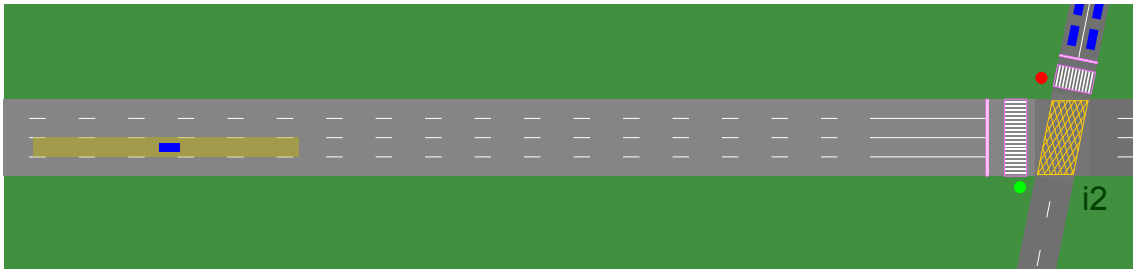
### 5.1.2 Decisão de Parar

Quando o motorista decide por parar, assumindo que o veículo está dentro da zona do dilema, já é certo que ele não conseguirá fazê-lo antes da linha de retenção. Deste modo, ele acabará parando em algum lugar entre a linha de retenção e o início do cruzamento.

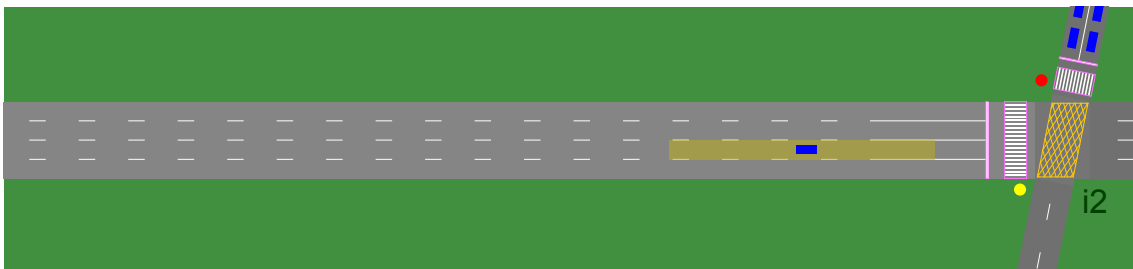
### Veículo Parando sobre a Faixa para Travessia de Pedestres

A figura 5.4 ilustra a dinâmica de um veículo que esteve na zona do dilema e parou sobre a faixa para travessia de pedestres. Durante o intervalo de verde, é possível observar que o veículo está dentro da previsão da zona do dilema. Quando o semáforo transiciona do verde para o amarelo, o veículo está dentro da zona do dilema, posicionado no meio dela. O motorista decide por frear, mas não consegue parar o veículo antes da linha de retenção, acabando parado sobre a faixa de pedestres. Assim que o tempo de permanência do detector de parada sobre a faixa de pedestres se esgota, o veículo é registrado.

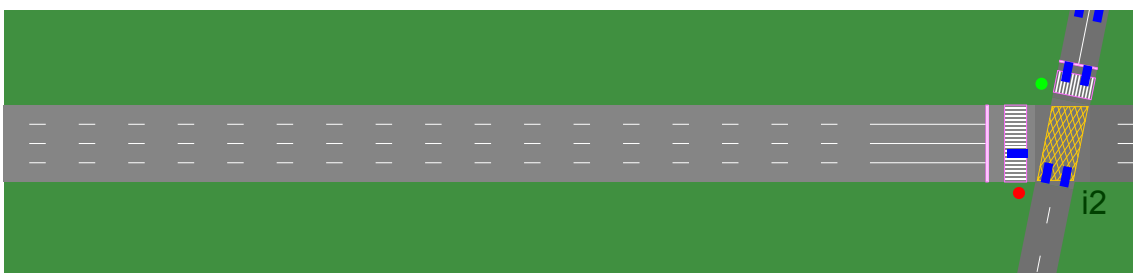
Este tipo de situação gera inconveniência para os pedestres que precisam atravessar a rua, podendo em alguns casos obstruir completamente a passagem.



(a) Veículo na previsão da zona do dilema.



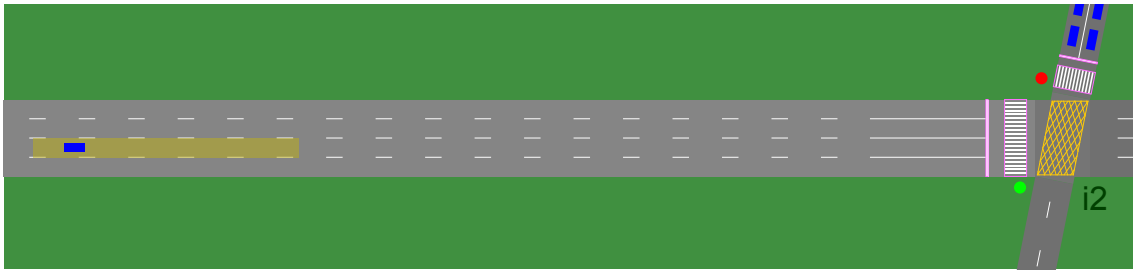
(b) Veículo na zona do dilema.



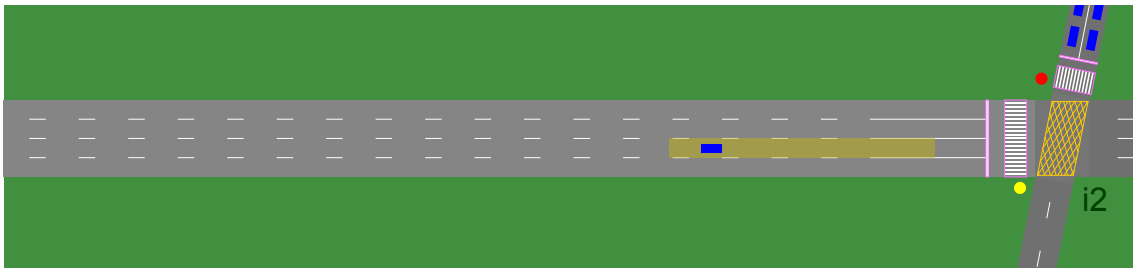
(c) Veículo no momento em que foi registrado parado sobre a faixa para travessia de pedestres.

Figura 5.4: Dinâmica de um veículo que esteve na zona do dilema e parou sobre a faixa para travessia de pedestres.

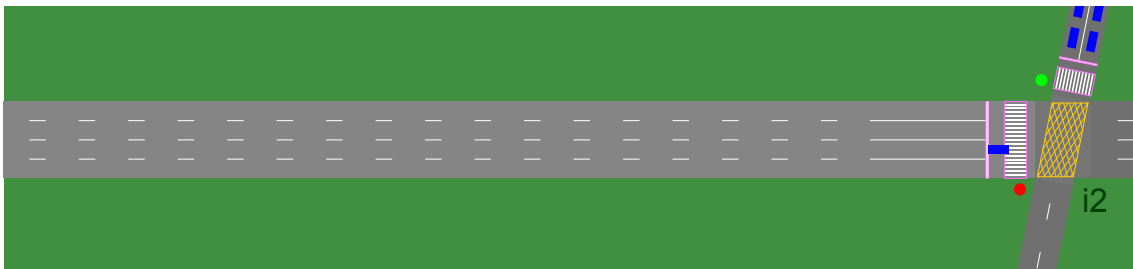
## Veículo Avançando o Sinal Vermelho e Parando sobre a Faixa de Pedestres



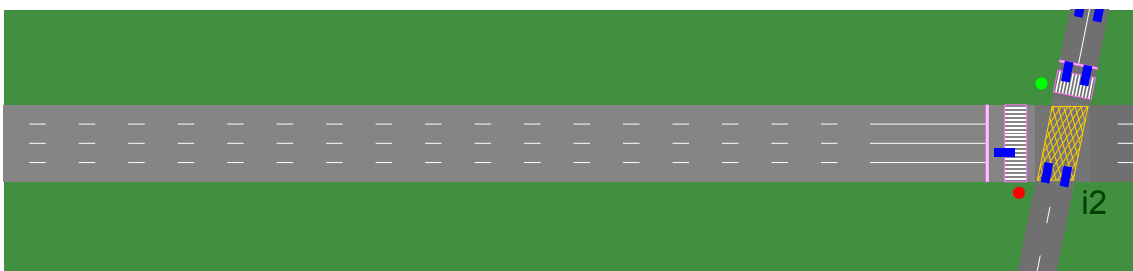
(a) Veículo na previsão da zona do dilema.



(b) Veículo na zona do dilema.



(c) Veículo no momento em que foi registrado avançando o sinal vermelho do semáforo.



(d) Veículo no momento em que foi registrado parado sobre a faixa para travessia de pedestres.

Figura 5.5: Dinâmica de um veículo que esteve na zona do dilema, que foi registrado avançando o sinal vermelho do semáforo e parou sobre a faixa para travessia de pedestres.

A figura 5.5 ilustra a dinâmica de um veículo que esteve na zona do dilema, que foi registrado avançando o sinal vermelho do semáforo e parou sobre a faixa para travessia de pedestres. Durante o intervalo de verde, é possível verificar que o veículo

está dentro da previsão da zona do dilema. Quando o semáforo transiciona do verde para o amarelo, o veículo está dentro da zona do dilema, posicionado próximo ao início dela. O motorista decide por frear, mas o tempo que o veículo demora para parar é maior que a soma do tempo de amarelo com o tempo de perdão do detector de avanço de sinal vermelho do semáforo. Deste modo, quase no final do percurso de frenagem, o veículo é registrado pelo detector de avanço de sinal. Quando o veículo para, parte dele está sobre a faixa para travessia de pedestres. Assim, quando o tempo de permanência é esgotado, ele é registrado pelo detector de parada sobre a faixa de pedestres.

É interessante ressaltar que neste tipo de situação, o motorista será multado por duas infrações de trânsito. Uma por avançar o sinal vermelho e outra por parar sobre a faixa de pedestres.

## **5.2 Medidas de Interesse**

As medidas de interesse capturadas nas simulações apresentadas nesta dissertação são as descritas a seguir.

### **Contagem de Veículos**

É a quantidade total de veículos que passaram pela via e cruzaram o semáforo que está sendo analisado.

### **Veículos na Zona do Dilema**

É a quantidade total de veículos que estiveram em uma zona do dilema dividida pela contagem de veículos, expressa em porcentagem.

### **Veículos na Zona de Indecisão**

É a quantidade total de veículos que estiveram em uma zona de indecisão dividida pela contagem de veículos, expressa em porcentagem.

### **Avanços de Sinal Vermelho do Semáforo**

É a quantidade total de avanços de sinal vermelho registrados pelo detector no semáforo que está sendo analisado dividida pela contagem de veículos, expresso em porcentagem.

Derivada desta medida, existe a quantidade total de veículos que avançaram o sinal vermelho e estiveram em uma zona do dilema, que é expressa como um percentual do total de avanços de sinal vermelho.

Outra derivação é a quantidade total de veículos que avançaram o sinal vermelho e estiveram em uma zona de indecisão, que também é expressa como um percentual do total de avanços de sinal vermelho.

### **Paradas sobre a Faixa para Travessia de Pedestres**

É a quantidade total de paradas sobre a faixa de pedestres registradas pelo detector no semáforo que está sendo analisado dividida pela contagem de veículos, expressa em porcentagem.

Derivada desta medida, existe a quantidade total de veículos que pararam sobre a faixa de pedestres e estiveram em uma zona do dilema, que é expressa como um percentual do total de paradas sobre a faixa de pedestres.

Outra derivação é a quantidade total de veículos que pararam sobre a faixa de pedestres e estiveram em uma zona de indecisão, que também é expressa como um percentual do total de paradas sobre a faixa de pedestres.

## **5.3 Cruzamento Simples**

O cenário do cruzamento simples, ilustrado na figura 5.6, possui apenas duas vias se cruzando em uma interseção semaforizada, sendo que cada via tem somente uma faixa. As medidas da sinalização horizontal estão relacionadas nas tabelas 5.1 e 5.2 e foram baseadas nas medidas recomendadas, quando existentes, ou mínimas indicadas pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), ver subseção 2.1.4 para mais detalhes.

A via analisada nas simulações será sempre a horizontal. Ela possui um detector de avanço de sinal vermelho do semáforo posicionado exatamente em cima da linha de retenção, abrangendo toda a largura da linha, e um detector de parada sobre a faixa para travessia de pedestres, que compreende todo o comprimento das faixas. Sua velocidade máxima é de  $60 \text{ km/h}$ .

As fases de cada via têm a mesma duração, na qual o tempo de verde é de  $30 \text{ s}$ , o tempo de amarelo é de  $4 \text{ s}$  e o tempo de vermelho geral é de  $1 \text{ s}$ . O tempo de amarelo da via horizontal será variado em algumas simulações para possibilitar o estudo do efeito deste tempo no tráfego da via.

O modelo de motorista utilizado nas simulações é o StDM, descrito na seção 4.1. Os valores adotados para as suas constantes são os indicados no final da mesma seção. O comprimento adotado para o veículo é  $L = 4,00 \text{ m}$ , que é o comprimento médio de um automóvel no Brasil, ver subseção 2.1.2.

Os resultados das simulações deste cenário são apresentados nas subseções a seguir, onde são feitas as análises de todas as medidas de interesse descritas na seção

5.2. Também foram feitos testes com os novos modelos de motoristas propostos: DZADM, IZADM, DIZADM e AVDM. Todas as simulações têm uma duração de 240 horas, de modo que as medidas de interesse convirjam seguindo a Lei dos Grandes Números.

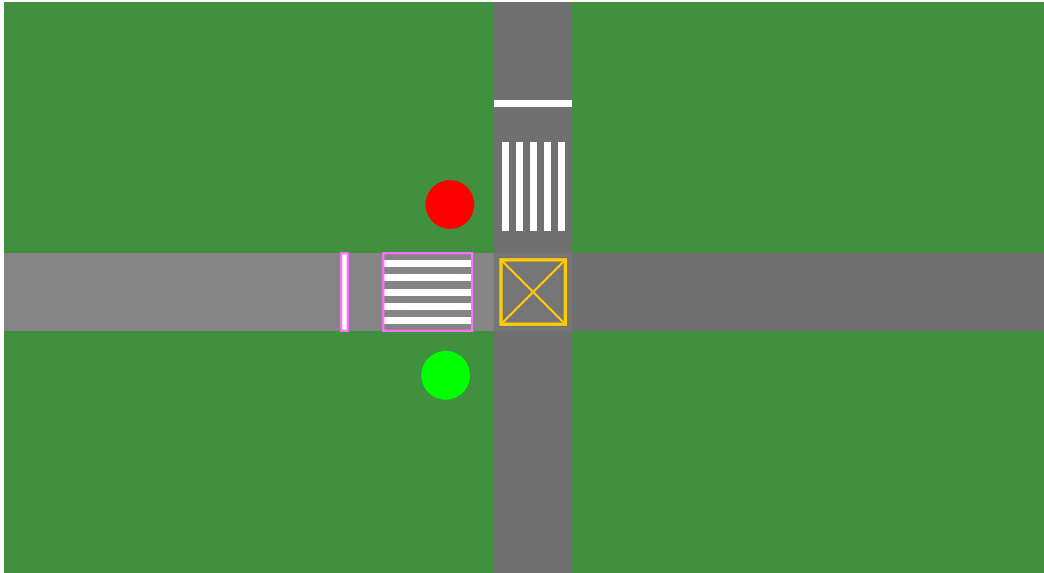


Figura 5.6: Cenário do cruzamento simples no MicroLAM.

Nome	Medida (m)
Linha simples contínua	
Comprimento	15,00
Largura	0,10
Linha simples seccionada	
Largura	0,10
Traço	3,00
Espaçamento	6,00
Linha de retenção	
Largura	0,30
Distância para a faixa de travessia de pedestres	1,60
Faixa para travessia de pedestres	
Largura	0,30
Distância entre faixas	0,30
Extensão	3,00
Distância para o prolongamento do meio fio da pista transversal	1,00

Tabela 5.1: Medidas da sinalização horizontal das duas vias do cruzamento simples.

Nome	Medida (m)
Largura da linha de borda externa	0,15
Largura das linhas internas	0,10
Espaçamento entre os eixos das linhas internas	1,00
Distância de cada linha de borda externa para o prolongamento do seu respectivo meio fio	0,30

Tabela 5.2: Medidas da marcação de área de conflito no cruzamento simples.

### 5.3.1 Fluxo de Saturação da Via

Primeiramente foram realizadas simulações variando o fluxo desejado de entrada de veículos na via em busca de determinar o fluxo de saturação<sup>1</sup> da mesma. O fluxo desejado de entrada foi fixado inicialmente em 100 veículos por hora (*vph*) e incrementado de 100 em 100 veículos por hora. Os resultados destas simulações são apresentados na tabela 5.3.

Fluxo de Entrada Desejado ( <i>vph</i> )	Contagem de Veículos	Fluxo da Via ( <i>vph</i> )
100	23.881	100
200	47.444	198
300	72.346	301
400	95.921	400
500	120.019	500
600	136.135	567
700	136.143	567

Tabela 5.3: Fluxo da via horizontal do cruzamento simples. Para cada fluxo desejado de entrada foi feita uma simulação de 240 horas de duração.

Analisando os resultados do teste de fluxo, percebe-se que a via satura com um fluxo de 567 *vph*. Sendo assim, não há razão para fazer simulações variando o fluxo de entrada desejado para além de 600 *vph* quando o tempo de amarelo é de 4 s.

Algumas simulações a seguir vão exigir que o tempo de amarelo seja variado para a observação do comportamento do tráfego, então, é importante verificar a influência da duração do amarelo no fluxo de saturação da via. Os resultados para o fluxo da via em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados estão ilustrados na figura 5.7.

Nota-se que o tempo de amarelo não tem nenhuma influência no fluxo da via enquanto ela não está saturada. Entretanto, quando a via satura, quanto menor o tempo de amarelo, mais fluxo consegue transitar pela via. Para um tempo de amarelo de 2 s, o fluxo de saturação é de 584 *vph*, enquanto que para um tempo de amarelo de 7 s, o fluxo de saturação reduz para 544 *vph*. O tempo de amarelo

<sup>1</sup>O fluxo de saturação corresponde ao número máximo de veículos que poderia passar em uma aproximação controlada por sinalização. [19]



é um intervalo de mudança, de forma que os veículos não fluem livremente por ele. Alguns veículos decidem por parar e outros por prosseguir. Quando todos veículos estiverem parados, o tempo restante de amarelo se somará ao tempo de espera pelo próximo intervalo de verde, assim, quanto maior o tempo de amarelo, mais tempo o fluxo ficará interrompido na via.

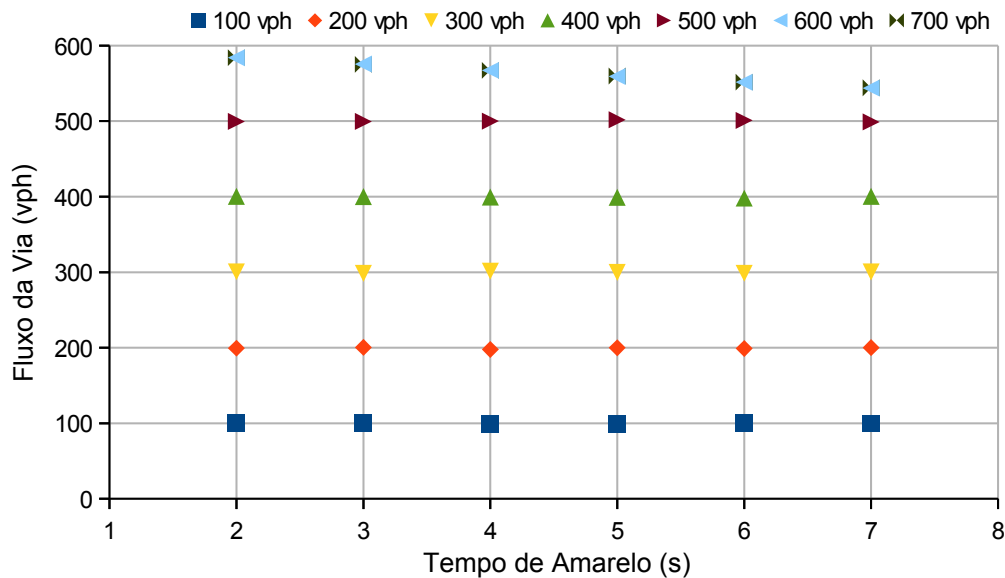


Figura 5.7: Fluxo da via horizontal do cruzamento simples em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados.

Conclui-se que o fluxo de entrada desejado de 600 *vph* pode ser usado para simular o fluxo de saturação para qualquer tempo de amarelo entre 2 e 7 *s* na via horizontal deste cenário.

### 5.3.2 Zona do Dilema

Baseando-se nas medidas da sinalização horizontal das vias, listadas na tabela 5.1, é possível calcular o comprimento do cruzamento como  $w = 10,40 \text{ m}$ . Sabendo que o comprimento dos veículos é de  $L = 4,00 \text{ m}$  e as constantes do StDM são: desaceleração confortável,  $b = 3,3 \text{ m/s}^2$ , e tempo de percepção e reação,  $\delta = 1,2 \text{ s}$ , a zona do dilema pode ser calculada para vários tempos de amarelo e o seu comprimento está ilustrado na figura 5.8.

Percebe-se que para o tempo de amarelo de 4 *s* definido para via, seguindo a equação 2.12 e as orientações da minuta do Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, Volume V, Sinalização Semafórica [19], ainda sim existe uma zona do dilema para todas as velocidades de aproximação. Com um tempo de amarelo de 5 *s* ou maior, só existiria a zona do dilema para velocidades baixas de aproximação.

Foram feitas simulações para determinar a porcentagem dos veículos que passaram pela via e que estiveram dentro de uma zona do dilema em função do tempo de amarelo do semáforo para vários fluxos de entrada desejados. Os resultados destas simulações são apresentados na figura 5.9.

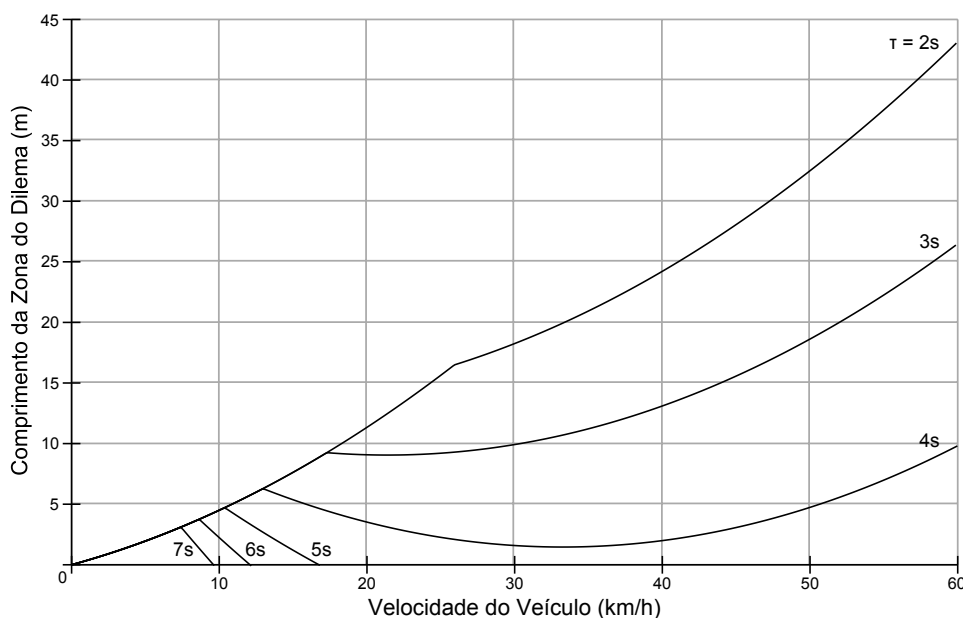


Figura 5.8: Comprimento da zona do dilema na via horizontal do cruzamento simples em função da velocidade de aproximação para vários tempos de amarelo,  $\tau$ . O comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo é de  $14,40\text{ m}$ . Foi considerado um tempo de percepção e reação de  $1,2\text{ s}$  e desaceleração de  $3,3\text{ m/s}^2$ .

Observa-se que, de fato, quando o tempo de amarelo aumenta, a quantidade relativa de veículos que estiveram em uma zona do dilema diminui, independentemente do fluxo de entrada da via. Para os tempos de amarelo de 5 a 7 s, nenhum veículo esteve dentro de uma zona do dilema.

Nos tempos de amarelo de 2 e 3 s, nos quais as zonas do dilema têm os maiores comprimentos, conforme o fluxo aumenta, o percentual de veículos que estiveram em uma zona do dilema também aumenta. Isso ocorre porque o aumento do fluxo gera um aumento da ocupação da via na aproximação do semáforo, que juntamente com o aumento dos comprimentos das zonas do dilema, aumentam a chance de um veículo estar dentro de uma dessas zonas.

No fluxo de saturação, o aumento da ocupação da via gera uma fila de espera no semáforo que dificilmente se dissipa por completo no tempo de verde, fazendo com que quase todos os veículos que passem ao abrir o semáforo tenham que acelerar a partir do repouso. Esta situação propicia um esvaziamento da fila semelhante para várias aberturas do semáforo, levando a velocidades de aproximação parecidas quando o semáforo transiciona para o amarelo. No tempo de amarelo de 4 s, estas

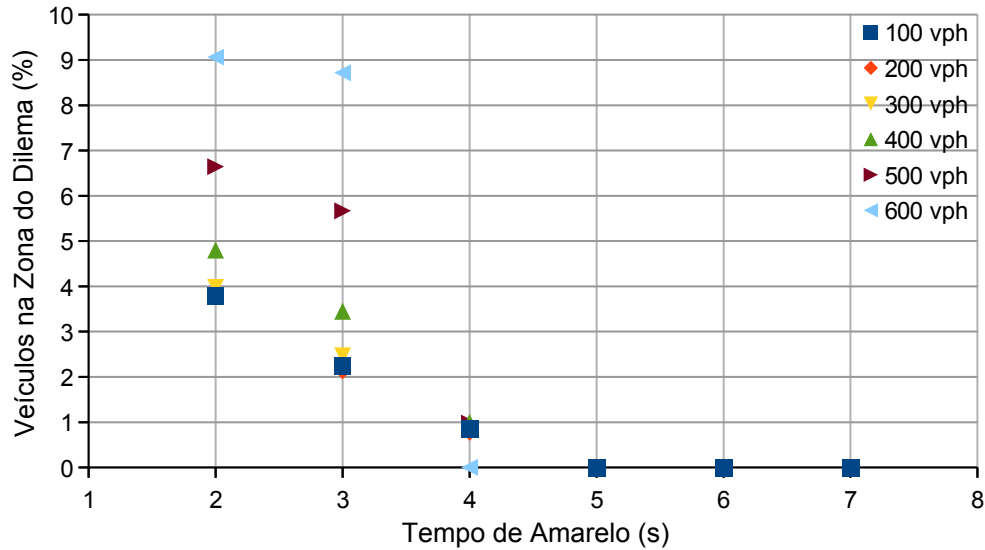


Figura 5.9: Porcentagem dos veículos que passaram pela via horizontal do cruzamento simples e que estiveram dentro de uma zona do dilema em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados.

velocidades de aproximação resultam em comprimentos da zona do dilema próximos ao mínimo, reduzindo bastante as chances de que um veículo esteja nela. Logo, verifica-se que no fluxo de saturação, para o tempo de amarelo de 4 s, nenhum veículo esteve em uma zona do dilema.

Conclui-se que o tempo de amarelo influencia fortemente na quantidade de veículos que estiveram em uma zona do dilema, sendo que para fluxos intensos e tempos de amarelo muito curtos esta influência se destaca ainda mais.

### 5.3.3 Zona de Indecisão

A zona de indecisão se baseia unicamente no tempo de viagem do veículo até a linha de retenção, começando num tempo de viagem de 2,45 s e terminando num tempo de viagem de 5,05 s, como explicado na subseção 2.2.2.

A figura 5.10 apresenta a porcentagem de veículos que estiveram em uma zona de indecisão na via horizontal em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados.

Nos fluxos de entrada de 100 a 400 *vph*, a porcentagem de veículos que estiveram em uma zona de indecisão se mantém ao redor de uma média de 3,8%. No fluxo de entrada de 500 *vph*, esse percentual varia entre 2,5% e 3,6%, sendo que conforme o tempo de amarelo aumenta, este percentual diminui. A explicação para esta diminuição é que o fluxo de 500 *vph* já está bem próximo do fluxo de saturação da via. Como discutido na subseção 5.3.1, quanto maior o tempo de amarelo, menor é o

fluxo de saturação da via, logo, mais próximo o fluxo de 500 *vph* está da saturação e menores são as velocidades de circulação. Como as velocidades de circulação diminuem, o comprimento da zona de indecisão também diminui, reduzindo as chances de um veículo estar dentro de uma destas zonas. Por fim, no fluxo de saturação, a porcentagem se conserva em torno de uma média de 0,38%. Isso acontece porque neste fluxo, a via está saturada para qualquer tempo de amarelo, resultando nas mais baixas velocidades de circulação possíveis.

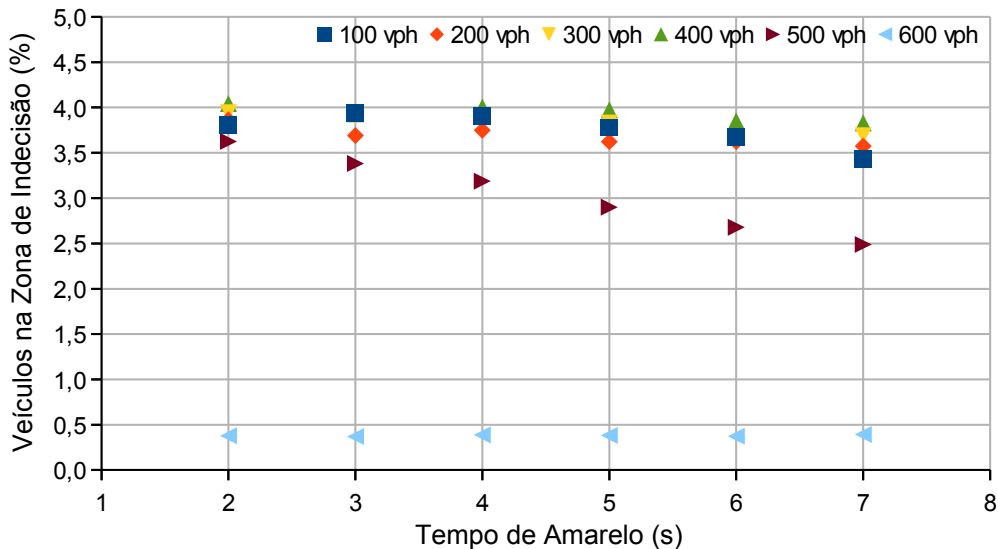


Figura 5.10: Porcentagem de veículos que estiveram em uma zona de indecisão na via horizontal do cruzamento simples em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados.

Conclui-se que o tempo de amarelo não têm influência significativa sobre a quantidade de veículos que estiveram em uma zona de indecisão. A velocidade de aproximação está mais ligada ao número de veículos nesta situação, reduzindo substancialmente a quantidade de veículos nela, conforme as velocidades de circulação diminuem.

### 5.3.4 Avanço de Sinal Vermelho do Semáforo

Através do detector de avanço de sinal vermelho do semáforo posicionado exatamente em cima da linha de retenção da via horizontal, é possível contabilizar tanto a quantidade total de avanços, quanto a quantidade de avanços por veículos que estiveram em uma zona do dilema ou em uma zona de indecisão.

A porcentagem de avanços de sinal vermelho do semáforo na via horizontal em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados é apresentada na figura 5.11. O tempo de perdão configurado para o detector foi de 1 s.

De modo geral, independentemente do fluxo de entrada desejado, à medida que o tempo de amarelo aumenta, menos veículos são detectados avançando o sinal vermelho do semáforo. Esta redução ocorre porque quando um motorista avista a indicação amarela do semáforo e decide por cruzar a interseção, ele tem apenas o tempo de amarelo mais o tempo de perdão para conseguir viajar a distância que o veículo está do detector, neste caso, a mesma distância até a linha de retenção. Assim, quanto menor o tempo de amarelo, maior a probabilidade que o veículo não consiga viajar esta distância a tempo.

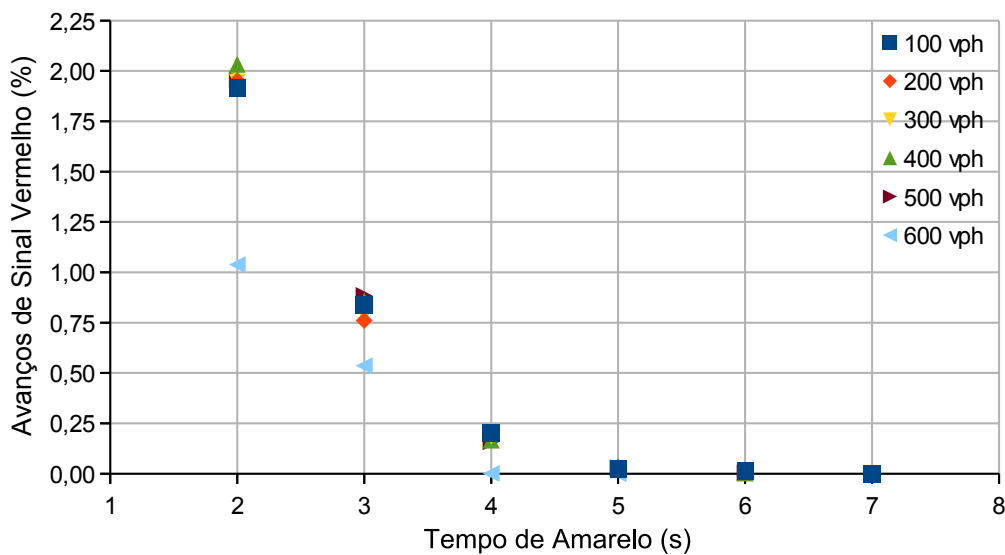


Figura 5.11: Porcentagem de veículos que avançaram o sinal vermelho do semáforo na via horizontal do cruzamento simples em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados.

Quando o fluxo da via satura, a chance de um veículo estar na zona de indecisão também diminui bastante, como discutido na subseção 5.3.3. Deste modo, os veículos que estão depois das suas zonas de indecisão têm uma probabilidade maior que 90% de decidir por cruzar a interseção. Como eles estão a menos de 2,45 s de viagem da linha de retenção, então eles conseguem passar pelo detector antes que ele seja ativado para qualquer tempo de amarelo a partir de 2 s. Já os veículos que estão antes das suas zonas de indecisão têm uma probabilidade maior que 90% de decidir por parar. Como eles estão a mais de 5,05 s de viagem da linha de retenção, eles são capazes de parar antes de chegar ao detector para qualquer velocidade dentro do limite de 60 km/h da via. Estes fatores fazem com que o percentual de avanços de sinal vermelho sejam significativamente menores para o fluxo de saturação, como observado na figura 5.11.

## Avanços de Sinal por Veículos que Estiveram em uma Zona do Dilema

O segundo resultado das simulações é a porcentagem dos avanços de sinal vermelho do semáforo por veículos que estiveram em uma zona do dilema em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados, apresentado na figura 5.12.

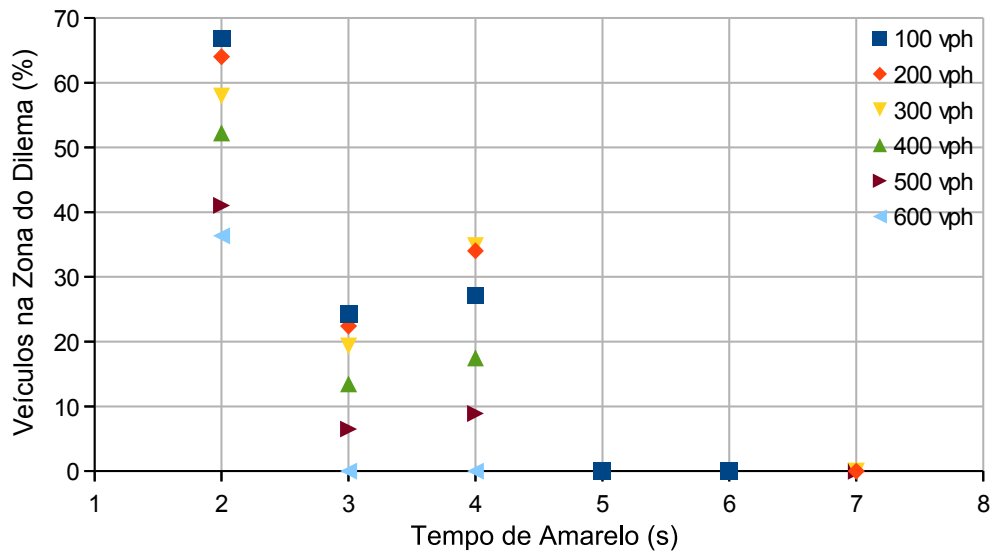


Figura 5.12: Porcentagem dos avanços de sinal vermelho do semáforo por veículos que estiveram em uma zona do dilema na via horizontal do cruzamento simples em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados.

No tempo de amarelo de 2 s, o percentual dos veículos que avançaram o sinal vermelho e estiveram dentro de uma zona do dilema fica entre 36% e 67%. No tempo de amarelo de 3 s, essa porcentagem encolhe para valores menores que 24%. No tempo de amarelo de 4 s, o percentual tem um aumento, mas fica com valores abaixo de 35%. Não houve nenhum avanço de sinal vermelho por veículos que estiveram em uma zona do dilema para tempos de amarelo de 5 a 7 s.

Conforme o tempo de amarelo aumenta, o comprimento da zona do dilema diminui, de modo que para tempos de amarelo a partir de 5 s, ela é eliminada para a maior parte das velocidades de aproximação, como explicado na subseção 5.3.2. Entretanto, quanto maior o tempo de amarelo, maior o tempo de viagem que o motorista tem para passar pelo detector enquanto ele ainda não está ativo. Estes dois fatores contribuem para a diminuição do percentual de veículos que avançaram o sinal e estiveram em uma zona do dilema.

## Avanços de Sinal por Veículos que Estiveram em uma Zona de Indecisão

O terceiro resultado é a porcentagem dos avanços de sinal vermelho do semáforo por veículos que estiveram em uma zona de indecisão em função do tempo de amarelo

para vários fluxos de entrada desejados, apresentado na figura 5.13.

Observa-se que para o tempo de amarelo de 2 s, para fluxos entre 100 *vph* e 500 *vph*, mais de 82% dos veículos que avançaram o sinal estiveram em uma zona de indecisão. Conforme o tempo de amarelo aumenta, este percentual decresce. Nos tempos de amarelo de 6 e 7 s, nenhum dos veículos que avançaram o sinal estiveram em uma zona de indecisão.

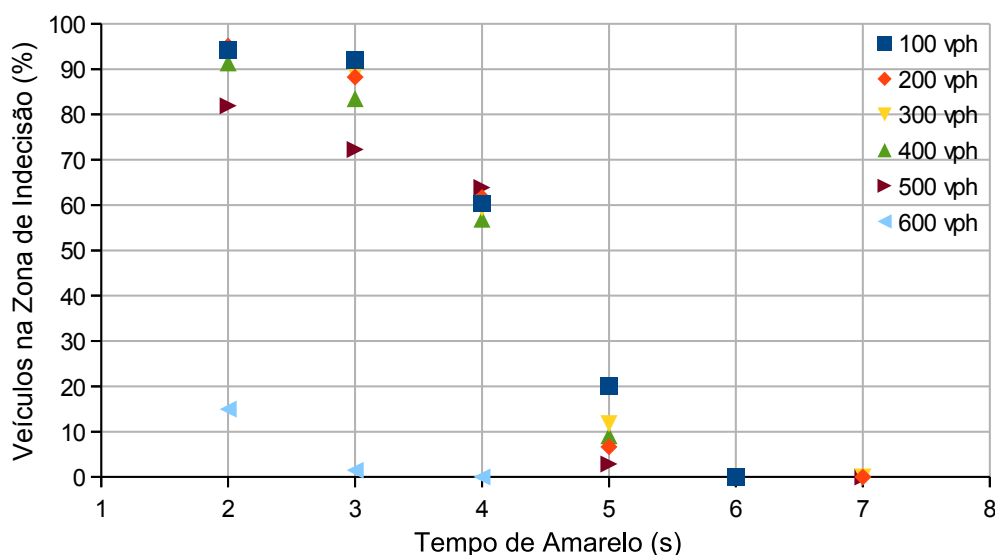


Figura 5.13: Porcentagem dos avanços de sinal vermelho do semáforo por veículos que estiveram em uma zona de indecisão na via horizontal do cruzamento simples em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados.

No fluxo de saturação, a maioria dos veículos que avançaram o sinal não estavam na zona de indecisão, como explicado anteriormente nesta subseção. No tempo de amarelo de 2 s, apenas 15% dos veículos que avançaram o sinal estiveram em uma zona de indecisão. No tempo de amarelo de 3 s este percentual cai para 1%. E para tempos de amarelo de 4 a 7 s, nenhum dos veículos que avançaram o sinal estiveram em uma zona de indecisão.

Conclui-se que o tempo de amarelo tem relação direta com o número de avanços de sinal vermelho do semáforo. Quanto menor o tempo de amarelo, maior o número de veículos que estiveram em uma zona do dilema ou em uma zona de indecisão e avançaram o sinal. Ou seja, os motoristas foram colocados em uma situação na qual a percepção da viabilidade de parada não era clara. Em alguns casos, mesmo que decidissem por parar, o veículo não teria condições de fazê-lo sem ultrapassar a linha de retenção.

### 5.3.5 Parada sobre a Faixa para Travessia de Pedestres

Utilizando o detector de parada sobre a faixa para travessia de pedestres posicionado de modo a cobrir todo o comprimento dela na via horizontal, é possível contabilizar tanto a quantidade de paradas sobre a faixa, quanto a quantidade de paradas sobre a faixa por veículos que estiveram em uma zona do dilema ou em uma zona de indecisão.

Foram feitas simulações para determinar a porcentagem de paradas sobre a faixa para travessia de pedestres na via horizontal em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados. O tempo de permanência configurado para o detector foi de 5 s. Os resultados são apresentados na figura 5.14.

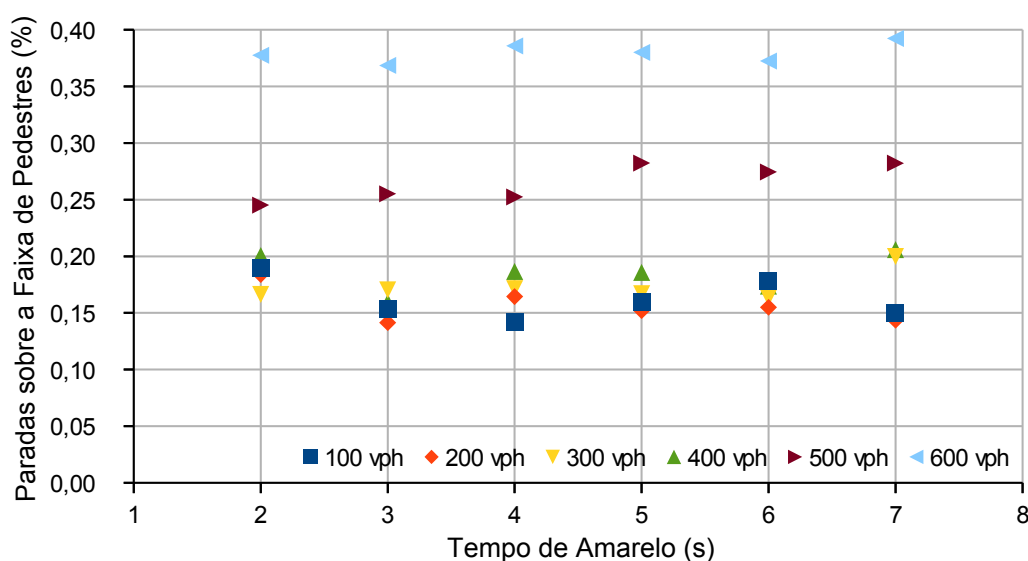


Figura 5.14: Porcentagem de veículos que pararam sobre a faixa para travessia de pedestres na via horizontal do cruzamento simples em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados.

Verifica-se que o percentual de veículos que param sobre a faixa para travessia de pedestres independe do tempo de amarelo do semáforo. Fluxos de entrada entre 100 vph e 400 vph têm uma taxa de paradas sobre a faixa média de 0,17%. No fluxo de entrada de 500 vph esta taxa sobe para uma média de 0,27%. E no fluxo de saturação esta taxa chega até uma média de 0,38%.

À medida em que o fluxo da via chega próximo ao fluxo de saturação, aumentam as chances de existirem veículos que já estejam a uma distância da linha de retenção onde não seja mais possível parar antes dela, ou seja, terem passado da distância crítica de parada. Assim, os veículos que decidirem por parar ao avistar a indicação amarela do semáforo, vão acabar parando sobre a faixa de pedestres.



## Paradas sobre a Faixa de Pedestres por Veículos que Estiveram em uma Zona do Dilema

O segundo resultado das simulações é a porcentagem de paradas sobre a faixa para travessia de pedestres por veículos que estiveram em uma zona do dilema em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados, ilustrado na figura 5.15.

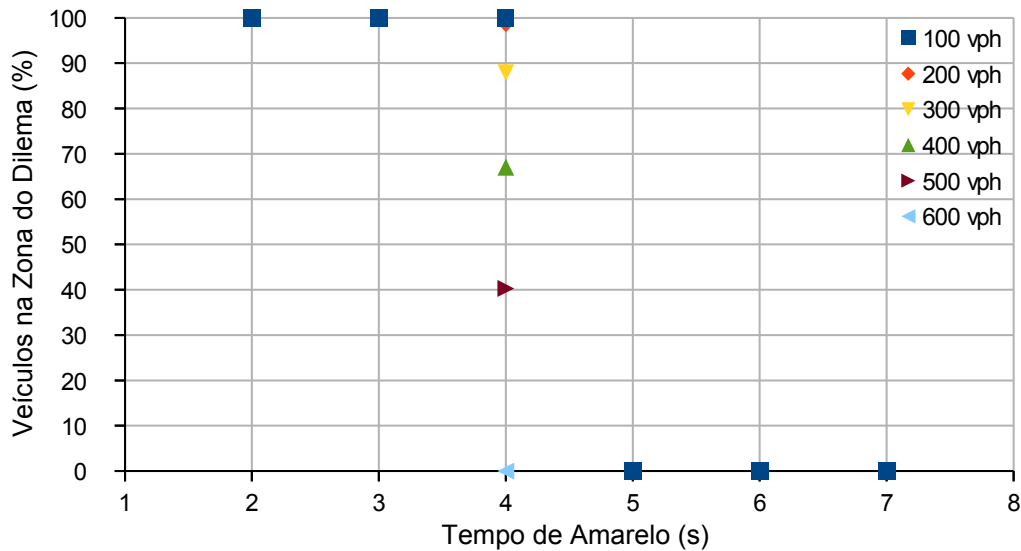


Figura 5.15: Porcentagem de paradas sobre a faixa para travessia de pedestres por veículos que estiveram em uma zona do dilema na via horizontal do cruzamento simples em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados.

Nos tempos de amarelo de 2 e 3 s, todos os veículos que pararam sobre a faixa de pedestres estiveram em uma zona do dilema. No tempo de amarelo de 4 s, acontece uma transição em função do fluxo de entrada. No tempo de amarelo de 5 a 7 s, nenhum veículo que parou sobre a faixa de pedestres esteve em uma zona do dilema.

A figura 5.16 mostra a distância para linha de retenção e a velocidade dos veículos que pararam sobre a faixa para travessia de pedestres, no momento em que o semáforo transicionou para o amarelo. Observa-se que para o fluxo de 100 vph, todos os veículos que pararam sobre a faixa de pedestres estavam em velocidades maiores que 50 km/h e distâncias para linha de retenção maiores que 40 m. Isto acontece porque a ocupação da via está baixa e os veículos circulam com maiores velocidades. No fluxo de 500 vph, se torna evidente o aumento da ocupação da via. Nota-se uma grande concentração de veículos que pararam sobre a faixa de pedestres que estavam em baixas velocidades e próximos da linha de retenção. No fluxo de saturação, todos os veículos que pararam sobre a faixa de pedestres estavam quase na mesma velocidade e posição. A explicação para isso é a formação de uma fila de

espera no semáforo que não se desfaz durante o tempo de verde, fazendo com que o esvaziamento da fila aconteça de forma similar todas as vezes que o semáforo libera a passagem.

Como a figura 5.16 ilustra a zona do dilema para um tempo de amarelo de 4 s, fica claro o motivo da transição do percentual de paradas sobre a faixa de travessia de pedestres por veículos que estiveram em uma zona do dilema em função do fluxo da via. Para os tempos de amarelo de 2 e 3 s, a zona do dilema aumenta e engloba todos os veículos que pararam sobre a faixa de pedestres. E para os tempos de amarelo de 5 a 7 s, a zona do dilema só existe para velocidades menores que 16,6 km/h, não englobando nenhum veículo que parou sobre a faixa de pedestres.

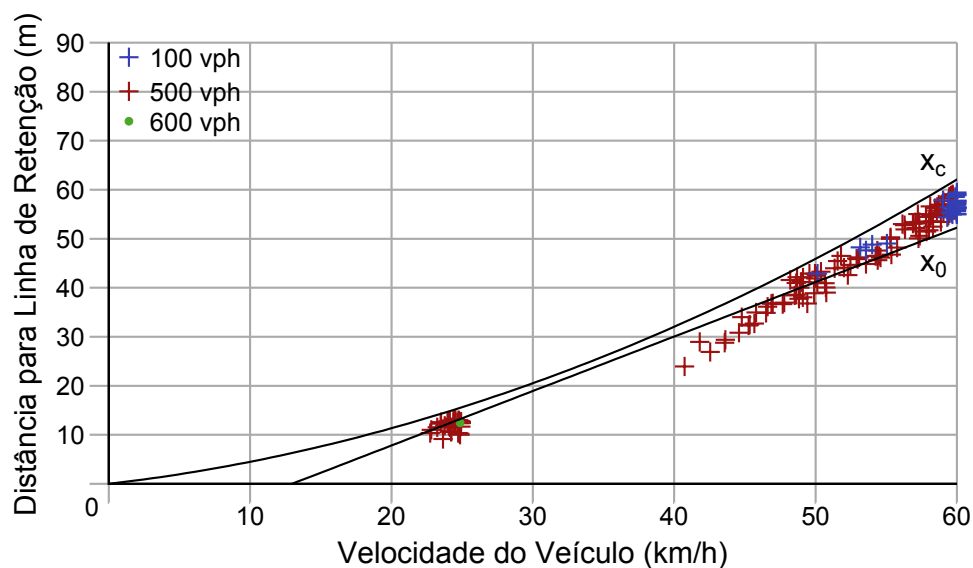


Figura 5.16: Distância para linha de retenção e velocidade dos veículos que pararam sobre a faixa para travessia de pedestres, no momento em que o semáforo transicionou para o amarelo. As linhas representam o início e o final da zona do dilema em função da velocidade de aproximação. Foi considerado um tempo de percepção e reação de 1,2 s, uma desaceleração de  $3,3 \text{ m/s}^2$  e um tempo de amarelo de 4 s.

### Paradas sobre a Faixa de Pedestres por Veículos que Estiveram em uma Zona de Indecisão

O terceiro resultado das simulações é a porcentagem de paradas sobre a faixa para travessia de pedestres por veículos que estiveram em uma zona de indecisão em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados, ilustrado na figura 5.17.

Observa-se que independente do tempo de amarelo, o percentual de veículos que pararam sobre a faixa de pedestres e estiveram em uma zona de indecisão diminui

conforme o fluxo de entrada aumenta. No fluxo de 100 *vph*, todos os veículos que pararam sobre a faixa de pedestres estiveram em uma zona de indecisão. No fluxo de saturação, nenhum veículo que parou sobre a faixa de pedestres esteve em uma zona de indecisão.

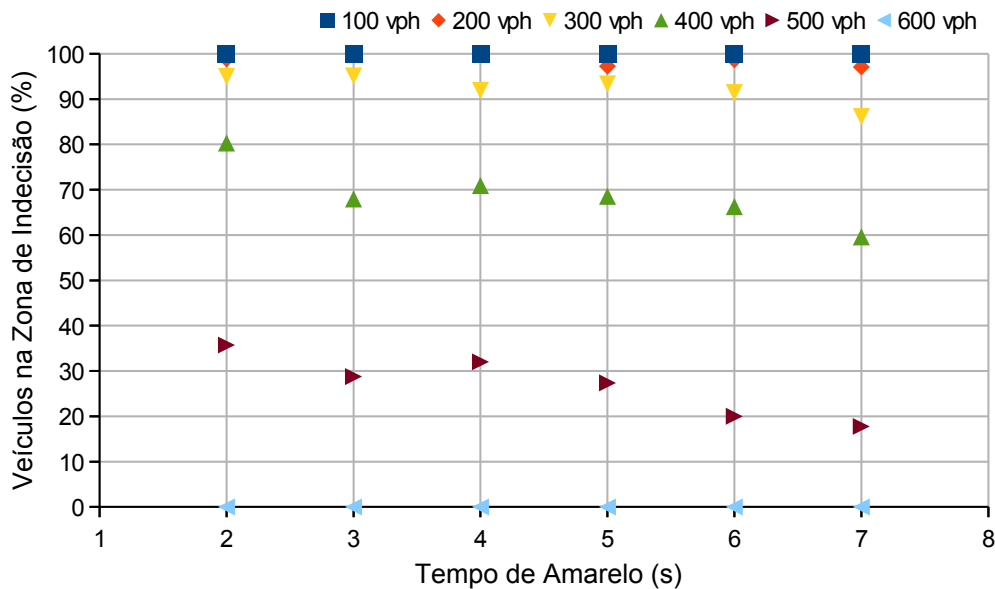


Figura 5.17: Porcentagem de paradas sobre a faixa para travessia de pedestres por veículos que estiveram em uma zona de indecisão na via horizontal do cruzamento simples em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados.

A figura 5.18 mostra a distância para linha de retenção e velocidade dos veículos que pararam sobre a faixa para travessia de pedestres, no momento em que o semáforo transicionou para o amarelo. Desta vez, com as linhas representando o início e o final da zona de indecisão em função da velocidade de aproximação. Verifica-se que conforme o fluxo da via aumenta, a concentração de veículos que pararam sobre a faixa de pedestres sai da zona de indecisão, novamente devido ao aumento da ocupação da via e a diminuição das velocidades de circulação.

Conclui-se que o tempo de amarelo, a zona do dilema e a zona de indecisão não exercem qualquer influência na quantidade de paradas sobre a faixa para travessia de pedestres. O crescimento das ocorrências deste tipo de evento está ligado ao aumento do fluxo na via, que torna mais provável que haja veículos posicionados depois da distância crítica de parada. Caso estes veículos decidam por parar, é provável que eles parem sobre a faixa de pedestres.

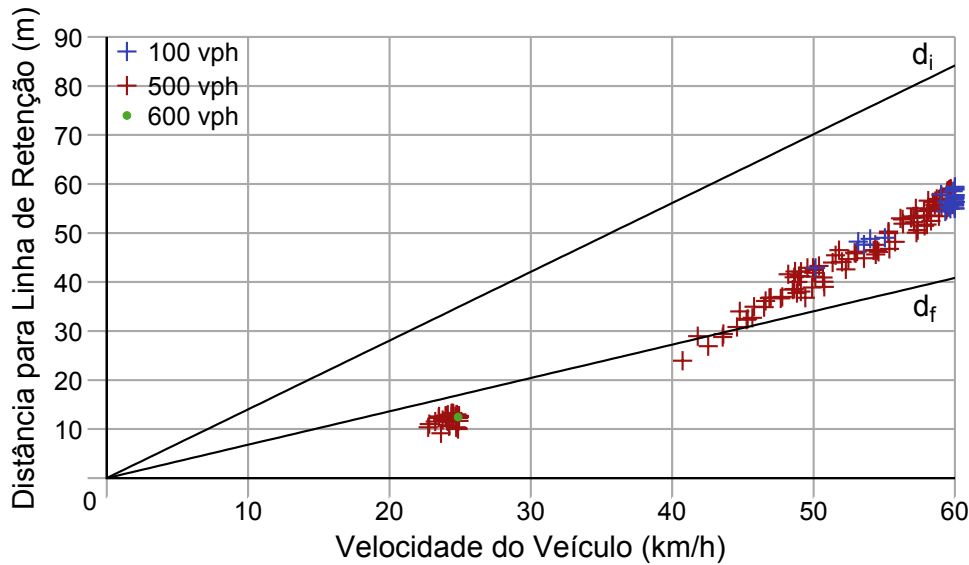


Figura 5.18: Distância para linha de retenção e velocidade dos veículos que pararam sobre a faixa para travessia de pedestres, no momento em que o semáforo transicionou para o amarelo. As linhas representam o início e o final da zona de indecisão em função da velocidade de aproximação. Foi considerado um tempo de amarelo de 4 s.

### 5.3.6 *Dilemma Zone Avoidance Driver Model (DZADM)*

O objetivo principal do DZADM é evitar que o veículo esteja na zona do dilema quando a indicação amarela do semáforo aparece. De acordo com as simulações feitas usando apenas veículos conduzidos por este tipo de modelo de motorista, para tempos de amarelo de 2 a 7 s e fluxos de entrada variando de 100 *vph* até o fluxo de saturação, o percentual de veículos que estiveram dentro de uma zona do dilema não superou o patamar de 0,01%.

#### Zona de Indecisão

Entretanto, ao adotar a estratégia de posicionar os veículos atrás da zona do dilema, muitos deles acabaram ficando dentro da zona de indecisão, como ilustrado nos resultados na figura 5.19. Nos fluxos de entrada de 100 a 300 *vph*, a porcentagem de veículos que estiveram em uma zona de indecisão subiu de uma média de 3,8% para 7,4%. No fluxo de 400 *vph*, a média subiu de 3,8% para 8,5%. No fluxo de 500 *vph*, o percentual subiu de uma faixa de 2,5% a 3,6% para uma média de 9,7%. E no fluxo de saturação a média subiu de 0,38% para 9,7%.

A figura 5.20 ilustra a distância da zona de indecisão para o início da zona do dilema em função da velocidade de aproximação do veículo. A zona de indecisão está presente na porção imediatamente anterior ao início da zona do dilema e se

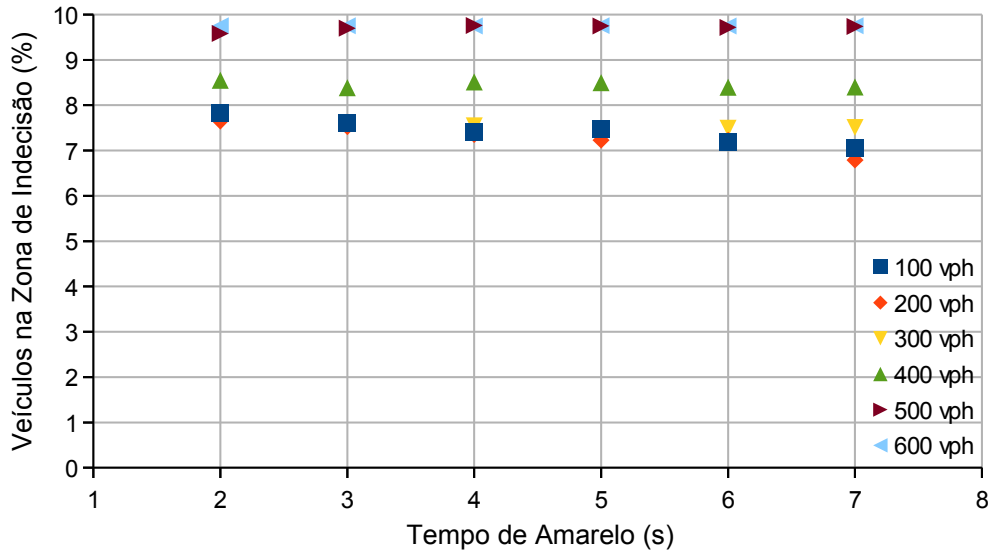


Figura 5.19: Porcentagem de veículos que estiveram em uma zona de indecisão na via horizontal do cruzamento simples em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados usando o modelo de motorista DZADM.

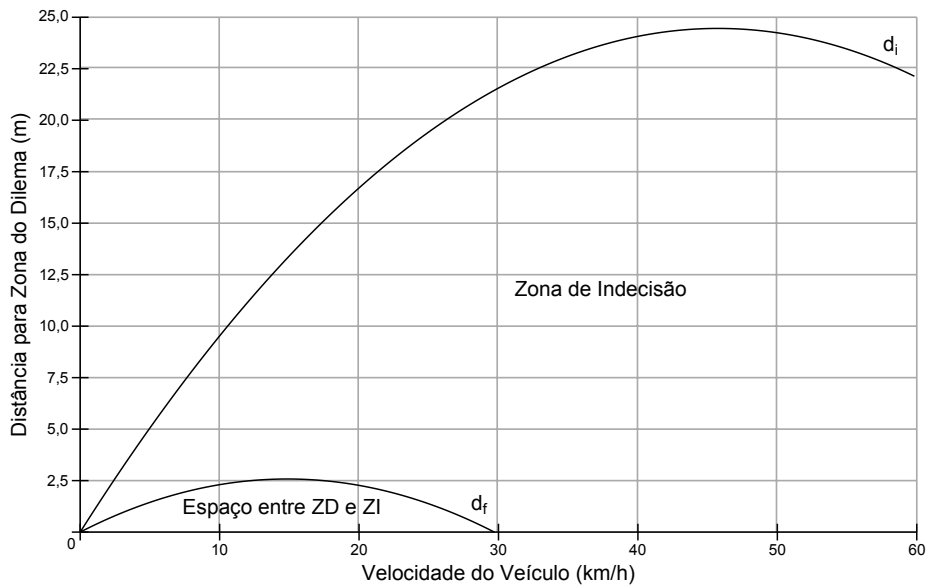


Figura 5.20: Distância da zona de indecisão para o início da zona do dilema em função da velocidade de aproximação do veículo.

estende por vários metros dependendo da velocidade de aproximação. Existe apenas um pequeno espaço entre as duas zonas para velocidades de aproximação de até  $29,7 \text{ km/h}$ . Deste modo, veículos que estejam posicionados a uma folga  $F = 0,5 \text{ m}$  antes da zona do dilema estarão dentro da zona de indecisão para velocidades acima de  $29,7 \text{ km/h}$ . Conforme o fluxo da via aumenta, as velocidades de circulação e as distâncias de *headway* diminuem, assim, mesmo que um veículo ocupe o espaço

entre as zonas, o veículo que vem atrás dele acaba dentro da zona de indecisão.

### Avanço de Sinal Vermelho do Semáforo

Devido a este aumento do número de motoristas na zona de indecisão, a porcentagem de veículos que avançaram o sinal vermelho do semáforo também aumentou, como ilustrado nos resultados na figura 5.21. No tempo de amarelo de 2 s, o percentual aumentou de uma média de 1,8% para 3%. No tempo de amarelo de 3 s, aumentou de um intervalo de 0,5% a 0,9% para 0,8% a 2,9%. No tempo de amarelo de 4 s, aumentou de um intervalo de 0% a 0,2% para 0,2% a 0,7%. E nos tempos de amarelo de 5 a 7 s, deixaram de ser percentuais menores que 0,03% e passaram para porcentagens menores que 0,1%.

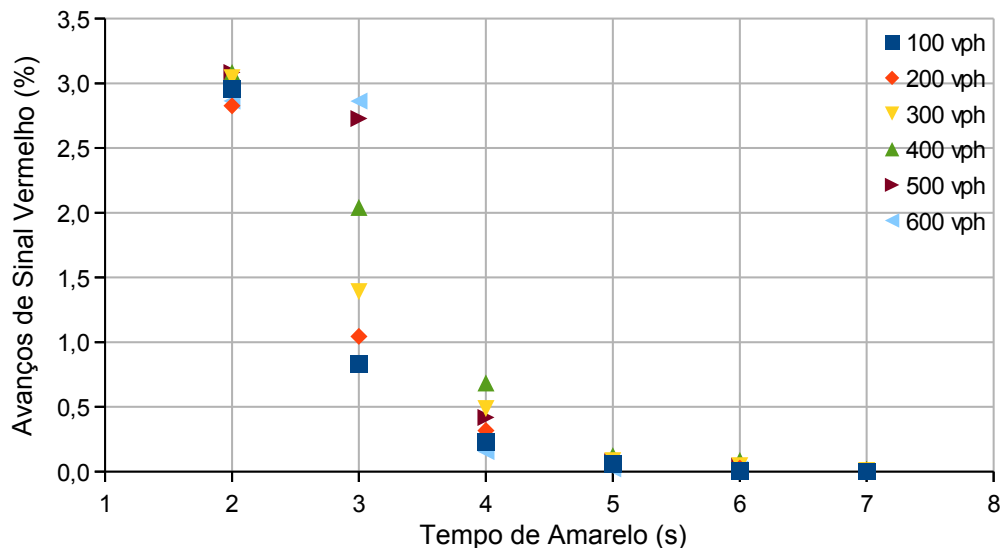


Figura 5.21: Porcentagem de veículos que avançaram o sinal vermelho do semáforo na via horizontal do cruzamento simples em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados usando o modelo de motorista DZADM.

### Avanços de Sinal por Veículos que Estiveram em uma Zona de Indecisão

A figura 5.22 ilustra a porcentagem dos avanços de sinal vermelho do semáforo por veículos que estiveram em uma zona de indecisão em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados. Nela é possível observar o aumento na contribuição da zona de indecisão para que os veículos avançassem o sinal, principalmente para tempos de amarelo entre 4 e 7 s.

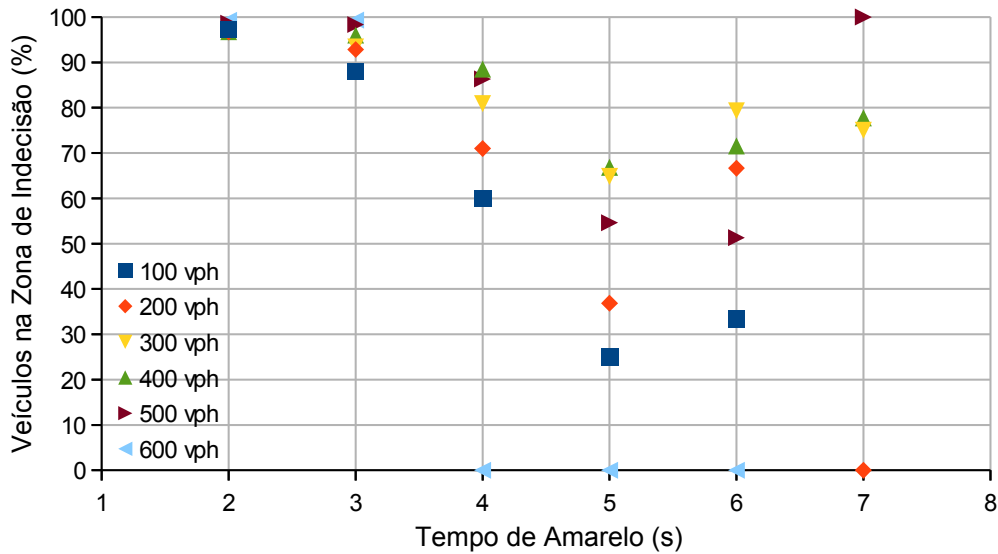


Figura 5.22: Porcentagem dos avanços de sinal vermelho do semáforo por veículos que estiveram em uma zona de indecisão na via horizontal do cruzamento simples em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados usando o modelo de motorista DZADM.

### Parada sobre a Faixa para Travessia de Pedestres

A figura 5.23 mostra a porcentagem de veículos que pararam sobre a faixa para travessia de pedestres em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados. Observa-se que também houve mudanças no percentual de paradas sobre a faixa de pedestres em função do fluxo da via por causa da mudança de modelo de motorista. No fluxo de 100 *vph*, a porcentagem subiu de uma média de 0,17% para 0,96%. No fluxo de 200 *vph*, aumentou de uma média de 0,17% para 0,85%. No fluxo de 300 *vph*, cresceu de uma média de 0,17% para 0,72%. No fluxo de 400 *vph*, subiu de uma média de 0,17% para 0,47%. No fluxo de 500 *vph*, diminuiu de uma média de 0,27% para 0,11%. E no fluxo de saturação, nenhum veículo parou sobre a faixa de pedestres, sendo que no StDM a média era de 0,38%.

No final do tempo de verde, a estratégia do DZADM posiciona o veículo atrás da zona do dilema, deste modo, o veículo está a uma distância da linha de retenção superior a distância crítica de parada. Entretanto, no momento em que aparece a indicação amarela, o motorista passa por um tempo de percepção e reação (PIEV) de 1,2 s antes que decida por parar ou passar. Durante este tempo, não existe mais a restrição de aceleração imposta pelo DZADM, logo, o motorista pode acelerar o veículo e acabar passando da distância crítica de parada. Deste modo, caso no final do PIEV o motorista decida por parar, existe a possibilidade dele não conseguir fazê-lo antes da linha de retenção e acabar parando sobre a faixa de pedestres.

Nos fluxos mais leves, a ocupação da via é menor, fazendo com que a distância

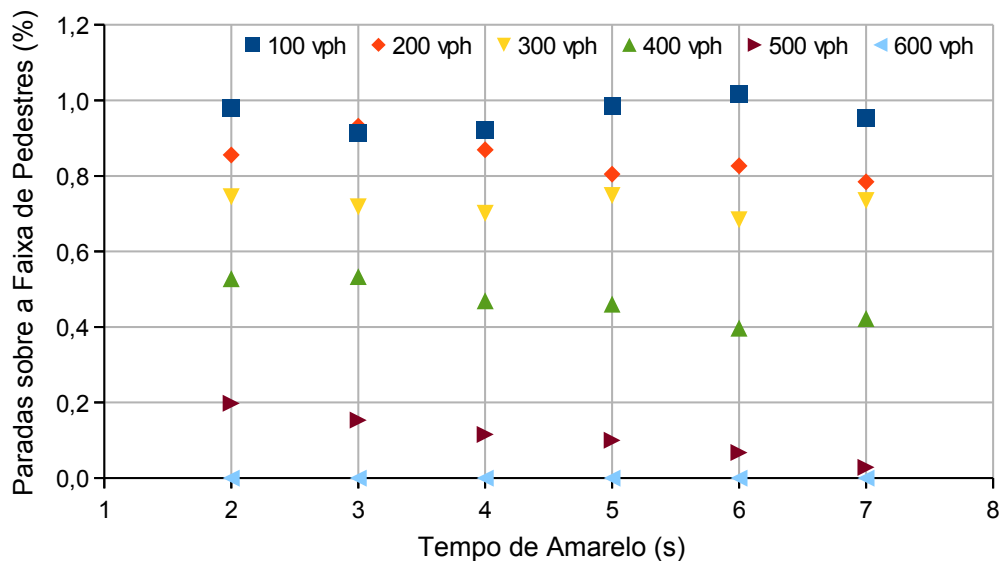


Figura 5.23: Porcentagem de veículos que pararam sobre a faixa para travessia de pedestres na via horizontal do cruzamento simples em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados usando o modelo de motorista DZADM.

para o veículo à frente seja grande. Assim, os motoristas são mais compelidos a acelerar o veículo durante o PIEV, o que resulta num maior percentual de paradas sobre a faixa de pedestres, caso eles decidam por parar. Nos fluxos mais intensos, acontece exatamente o oposto.

No fluxo de saturação, a formação de uma fila de espera no semáforo que não se desfaz completamente durante o tempo de verde, faz com que o esvaziamento da fila aconteça de forma similar todas as vezes que o semáforo libera a passagem. Deste modo, o veículo que decide por parar está sempre a uma distância considerável antes da zona do dilema e numa velocidade baixa, não ultrapassando a distância crítica de parada durante o PIEV.

### Paradas sobre a Faixa de Pedestres por Veículos que Estiveram em uma Zona de Indecisão

A figura 5.24 apresenta a porcentagem de paradas sobre a faixa para travessia de pedestres por veículos que estiveram em uma zona de indecisão em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados. Nela, verifica-se que para todos os fluxos, menos o de saturação, a maior parte dos veículos que pararam sobre a faixa de pedestres estiveram em uma zona de indecisão. Justamente por terem sido deslocados para dentro da zona de indecisão pela estratégia do DZADM, como explicado anteriormente nesta subseção.

Conclui-se que a estratégia de posicionar o veículo atrás da zona do dilema



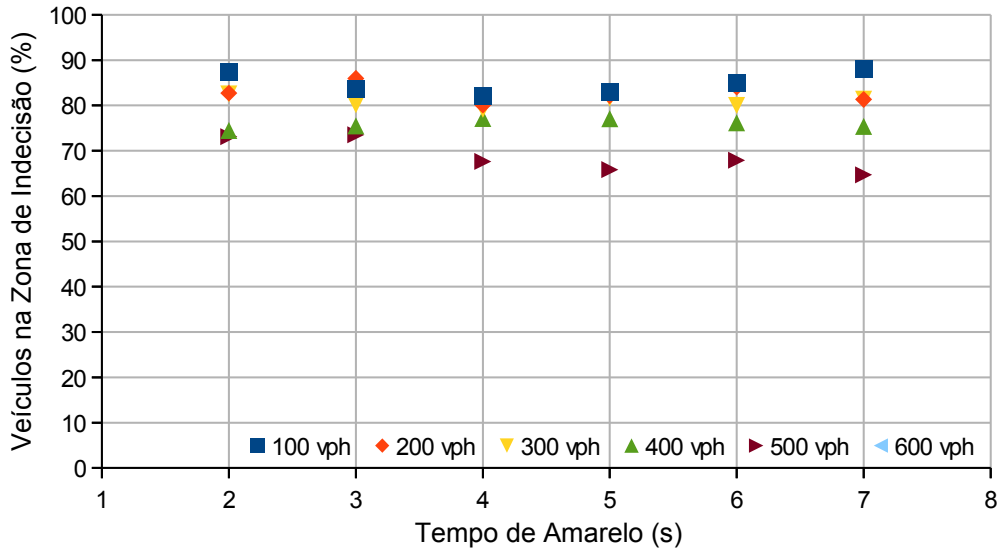


Figura 5.24: Porcentagem de paradas sobre a faixa para travessia de pedestres por veículos que estiveram em uma zona de indecisão na via horizontal do cruzamento simples em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados usando o modelo de motorista DZADM.

usada pelo DZADM trouxe mais malefícios do que benefícios, aumentando o número de avanços do sinal vermelho do semáforo e paradas sobre a faixa para travessia de pedestres. A principal causa para o fracasso desta estratégia foi deslocar os veículos para dentro da zona de indecisão ao tirá-los da zona do dilema. Outro efeito indesejado foi a movimentação dos veículos para depois da distância crítica de parada durante o tempo de percepção e reação, quando a restrição de aceleração do modelo já tinha sido suspensa.

### 5.3.7 *Indecision Zone Avoidance Driver Model (IZADM)*

O objetivo principal do IZADM é evitar que o veículo esteja na zona de indecisão quando a indicação amarela do semáforo aparece. De acordo com as simulações feitas usando apenas veículos conduzidos por este tipo de modelo de motorista, para tempos de amarelo de 2 a 7 s e fluxos de entrada variando de 100 *vph* até o fluxo de saturação, nenhum veículo esteve dentro de uma zona de indecisão.

A porcentagem de veículos que estiveram dentro de uma zona do dilema ficou abaixo de 0,01%, também para tempos de amarelo de 2 a 7 s e fluxos de entrada variando de 100 *vph* até o fluxo de saturação. Esta diminuição acompanhou a diminuição no percentual de veículos na zona de indecisão, justamente porque a zona de indecisão começa sempre antes da zona do dilema para velocidades abaixo do limite de 60 *km/h* da via, como ilustrado na figura 4.6.

## Avanço de Sinal Vermelho do Semáforo

A figura 5.25 ilustra a porcentagem de veículos que avançaram o sinal vermelho do semáforo em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada. Observa-se uma diminuição significativa no percentual de avanços para o tempo de amarelo de 2 s, chegando a reduções de até 62%. Nos tempo de amarelo de 3 e 4 s, quanto maior o fluxo, maior o encolhimento na porcentagem de avanços. Alcançando uma redução de 96% para o fluxo de 500 *vph* no tempo de amarelo de 3 s e 81% no tempo de amarelo de 4 s. Nos tempos de amarelo de 5 a 7 s, o percentual de avanços ficou abaixo do patamar de 0,04%.

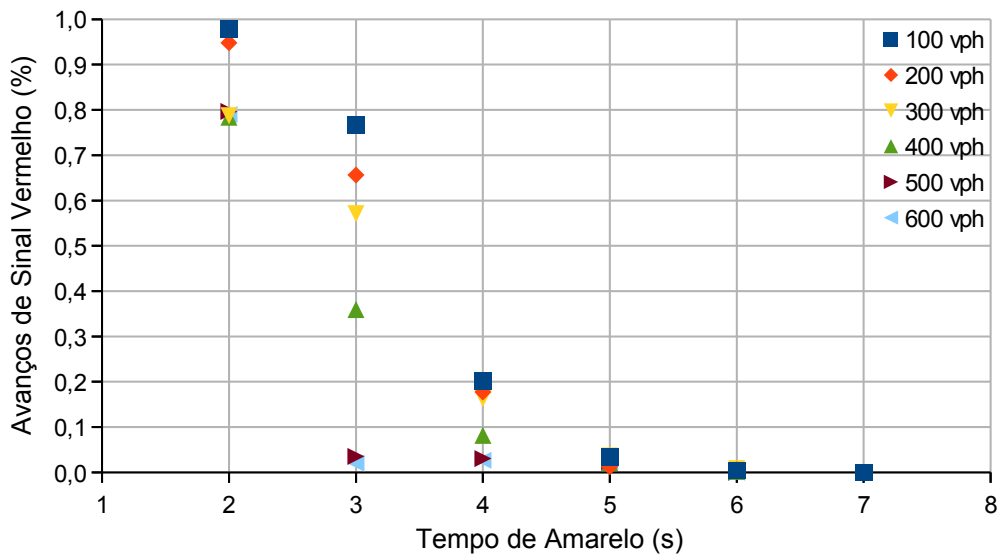


Figura 5.25: Porcentagem de veículos que avançaram o sinal vermelho do semáforo na via horizontal do cruzamento simples em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados usando o modelo de motorista IZADM.

Poderia se esperar que ao adotar a estratégia de posicionar os veículos antes da zona de indecisão, o número de avanços de sinal vermelho diminuiria mais do que o verificado, já que haveria uma probabilidade de 90% do motorista decidir por parar e o veículo estaria posicionado antes da distância crítica de parada. No entanto, ainda existe 10% de chance do motorista decidir por passar. Caso ele decida por passar, ele tem apenas o tempo de amarelo mais o tempo de perdão para poder viajar a distância até o detector, antes que ele seja ativado. Na posição em que o veículo está, isso só é possível para tempos de amarelo maiores que 4 s. Deste modo, ao mesmo tempo que o posicionamento da maior parte dos veículos antes da zona de indecisão aumenta as chances de parada, também contribui para um aumento na quantidade de avanços.

## **Parada sobre a Faixa para Travessia de Pedestres**

Não houve nenhuma parada sobre a faixa para travessia de pedestres para nenhum dos tempos de amarelo de 2 a 7 s combinado com os fluxos de entrada de 100 *vph* até o fluxo de saturação, justamente porque a maior parte dos veículos está posicionada antes da zona de indecisão, tendo 90% de chances de parar e estando antes da distância crítica de parada.

Conclui-se que a estratégia do IZADM reduz a quantidade de avanços de sinal vermelho do semáforo e elimina totalmente as paradas sobre a faixa para travessia de pedestres. A redução no número de avanços só não é maior porque ainda existe uma probabilidade de 10% do motorista decidir por cruzar a interseção e não conseguir passar pelo detector antes que ele seja ativado, para tempos de amarelo menores ou iguais a 4 s.

### **5.3.8 *Dilemma and Indecision Zones Avoidance Driver Model (DIZADM)***

Os principais objetivos do DIZADM são evitar que o veículo esteja na zona do dilema ou na zona de indecisão quando a indicação amarela do semáforo aparece. De acordo com as simulações feitas usando apenas veículos conduzidos por este tipo de modelo de motorista, para tempos de amarelo de 2 a 7 s e fluxos de entrada variando de 100 *vph* até o fluxo de saturação, o percentual de veículos que estiveram dentro de uma zona do dilema não superou o patamar de 0,01% e a porcentagem de veículos dentro de uma zona de indecisão não foi maior que 0,03%.

### **Avanço de Sinal Vermelho do Semáforo**

A figura 5.26 ilustra a porcentagem de veículos que avançaram o sinal vermelho do semáforo em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados. Percebe-se que os resultados são muito próximos dos apresentados pelo IZADM na figura 5.25. Isto acontece porque para velocidades abaixo do limite de 60 *km/h* da via, a zona de indecisão começa sempre antes da zona do dilema. Deste modo, por mais que o DIZADM junte as estratégias do DZADM e IZADM, a estratégia do IZADM vai prevalecer. Ainda assim, houve uma pequena redução no percentual de avanços para alguns fluxos de entrada.

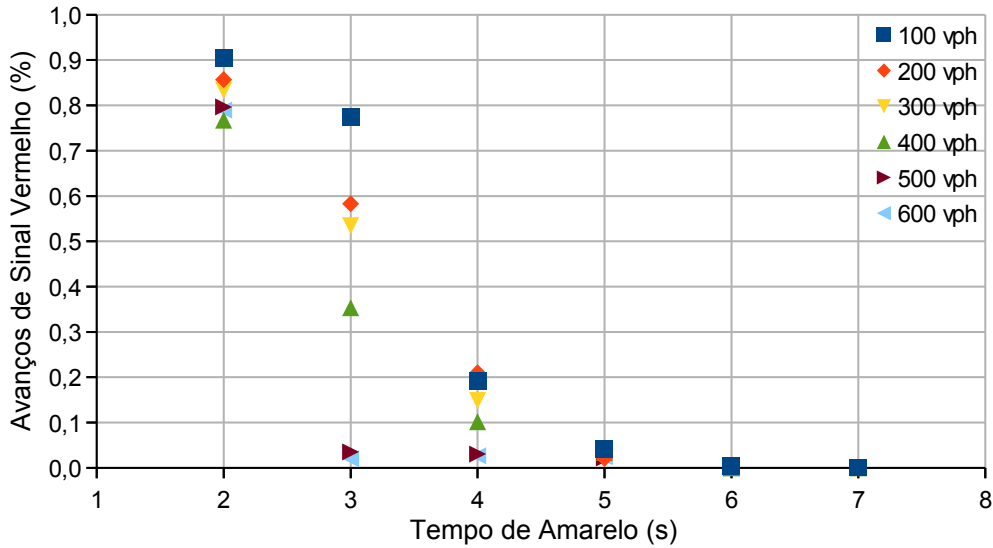


Figura 5.26: Porcentagem de veículos que avançaram o sinal vermelho do semáforo na via horizontal do cruzamento simples em função do tempo de amarelo para vários fluxos de entrada desejados usando o modelo de motorista DIZADM.

### Parada sobre a Faixa para Travessia de Pedestres

Não houve nenhuma parada sobre a faixa para travessia de pedestres para nenhum dos tempos de amarelo de 2 a 7 s combinado com os fluxos de entrada de 100 *vph* até o fluxo de saturação, justamente porque a maior parte dos veículos está posicionada antes da zona de indecisão, tendo 90% de chances de parar e estando antes da distância crítica de parada.

Conclui-se que a estratégia híbrida do DIZADM mantém os bons resultados na redução da quantidade de avanços de sinal vermelho do semáforo e elimina totalmente as paradas sobre a faixa para travessia de pedestres.

### 5.3.9 *Autonomous Vehicle Driver Model (AVDM)*

O AVDM, assim como o DZADM, adota a estratégia de manter o veículo atrás da zona do dilema, mas ao mesmo tempo elimina a zona de indecisão, sempre decidindo por parar ao identificar a indicação amarela do semáforo, caso isto seja possível.

De acordo com as simulações feitas usando apenas veículos conduzidos por este tipo de modelo de motorista, para tempos de amarelo de 2 a 7 s e fluxos de entrada variando de 100 *vph* até o fluxo de saturação, o percentual de veículos que estiveram dentro de uma zona do dilema não superou o patamar de 0,02%. Entretanto, mesmo que alguns poucos veículos tenham estado na zona do dilema, não foi registrado nenhum avanço de sinal vermelho do semáforo ou paradas sobre a faixa para travessia de pedestres.

Conclui-se que evitando a zona do dilema e suprimindo o fator de indecisão sobre a capacidade de parar ao avistar o sinal amarelo do semáforo, o AVDM consegue compensar temporizações muito curtas do intervalo de amarelo e eliminar os avanços de sinal vermelho e as paradas sobre a faixa de pedestres.

## 5.4 Cruzamento da Rua Barata Ribeiro com a Rua Siqueira Campos

O cruzamento da Rua Barata Ribeiro com a Rua Siqueira Campos fica localizado no bairro de Copacabana, na cidade do Rio de Janeiro. A Rua Barata Ribeiro é uma via arterial importante que cruza o bairro de ponta a ponta, servindo também de ligação entre os bairros vizinhos. A Rua Siqueira Campos é uma via arterial que serve de entrada para o bairro. O cruzamento está ilustrado na figura 5.27.

Medidas em campo foram necessárias para uma representação fiel da sinalização horizontal do cruzamento e para o posicionamento dos sistemas automáticos de fiscalização. As medidas da sinalização horizontal de cada via estão relacionadas nas tabelas 5.4 e 5.7. As medidas do posicionamento dos sistemas de fiscalização estão listadas nas tabelas 5.5 e 5.8. O cruzamento não tinha a marcação de área de conflito na ocasião das medições.

Para medir a temporização dos semáforos e os fluxos das vias na hora do *rush* do final da tarde, foram feitas filmagens com duração de 15 minutos enquadrando todo o cruzamento e o grupo focal dos semáforos. As temporizações aferidas estão listadas nas tabelas 5.6 e 5.9. Os fluxos contabilizados foram de 1.881 *vph* na Rua Barata Ribeiro e 631 *vph* na Rua Siqueira Campos.

A representação deste cruzamento no MicroLAM, seguindo todas as medidas tomadas, está ilustrada na figura 5.28. O modelo de motorista utilizado nas simulações é o StDM, descrito na seção 4.1. Os valores adotados para as suas constantes são os indicados no final da mesma seção. Todas as simulações têm uma duração de 240 horas, de modo que as medidas de interesse convirjam seguindo a Lei dos Grandes Números.

<b>Nome</b>	<b>Medida (m)</b>
Linha simples contínua	
Comprimento	19,00
Largura	0,10
Linha simples seccionada	
Largura	0,10
Traço	3,00
Espaçamento	6,00
Linha de retenção	
Largura	0,40
Distância para a faixa de travessia de pedestres	4,70
Faixa para travessia de pedestres	
Largura	0,40
Distância entre faixas	0,60
Extensão	4,10
Distância para o prolongamento do meio fio da pista transversal	4,00

Tabela 5.4: Medidas da sinalização horizontal da Rua Barata Ribeiro no cruzamento com a Rua Siqueira Campos.

<b>Nome</b>	<b>Medida (m)</b>
Detector de avanço de sinal vermelho	
Comprimento	1,30
Distância para o início da linha de retenção	1,00
Detector de parada sobre a faixa de pedestres	
Comprimento	1,30
Distância para o início da faixa para travessia de pedestres	1,00

Tabela 5.5: Medidas dos sistemas automáticos de fiscalização da Rua Barata Ribeiro no cruzamento com a Rua Siqueira Campos.

<b>Intervalo</b>	<b>Tempo (s)</b>
Verde	77
Amarelo	4
Vermelho Geral	7

Tabela 5.6: Temporização do semáforo da Rua Barata Ribeiro no cruzamento com a Rua Siqueira Campos no horário do *rush* do final da tarde.

<b>Nome</b>	<b>Medida (m)</b>
Linha simples contínua	
Comprimento	13,00
Largura	0,10
Linha simples seccionada	
Largura	0,10
Traço	3,00
Espaçamento	6,00
Linha de retenção	
Largura	0,40
Distância para a faixa de travessia de pedestres	4,80
Faixa para travessia de pedestres	
Largura	0,40
Distância entre faixas	0,60
Extensão	4,00
Distância para o prolongamento do meio fio da pista transversal	3,50

Tabela 5.7: Medidas da sinalização horizontal da Rua Siqueira Campos no cruzamento com a Rua Barata Ribeiro.

<b>Nome</b>	<b>Medida (m)</b>
Detector de avanço de sinal vermelho	
Comprimento	1,30
Distância para o início da linha de retenção	0,05
Detector de parada sobre a faixa de pedestres	
Comprimento	1,30
Distância para o início da faixa para travessia de pedestres	1,40

Tabela 5.8: Medidas dos sistemas automáticos de fiscalização da Rua Siqueira Campos no cruzamento com a Rua Barata Ribeiro.

<b>Intervalo</b>	<b>Tempo (s)</b>
Verde	47
Amarelo	4
Vermelho Geral	1

Tabela 5.9: Temporização do semáforo da Rua Siqueira Campos no cruzamento com a Rua Barata Ribeiro no horário do *rush* do final da tarde.

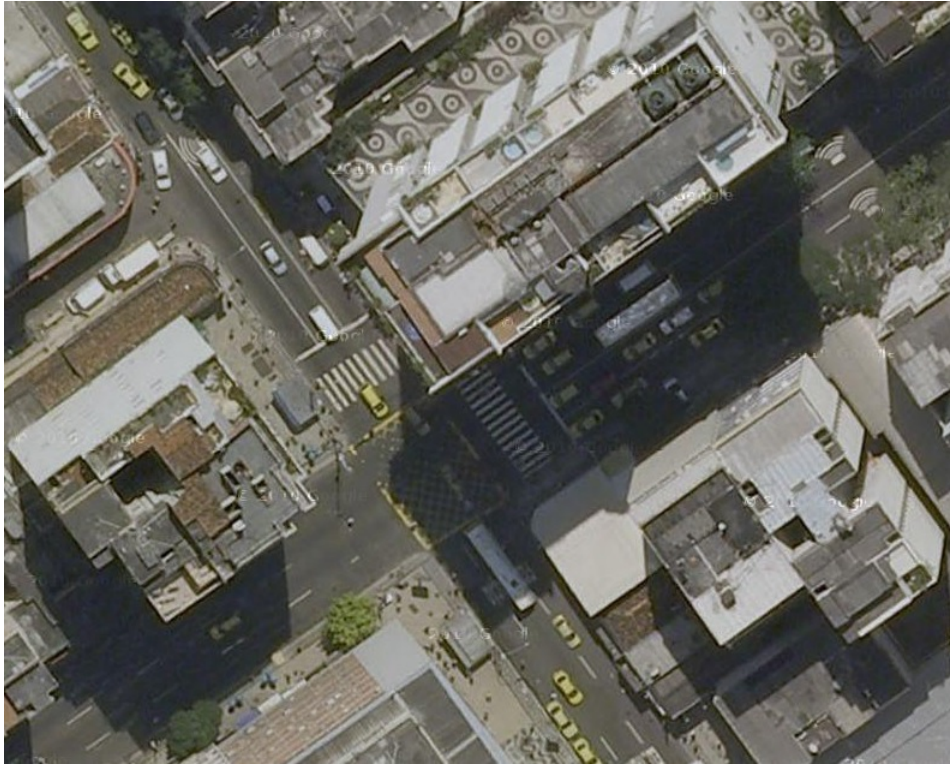


Figura 5.27: Foto do cruzamento da Rua Barata Ribeiro com a Rua Siqueira Campos. A Rua Barata Ribeiro segue do canto superior direito para o canto inferior esquerdo e a Rua Siqueira Campos segue do canto superior esquerdo para o canto inferior direito.

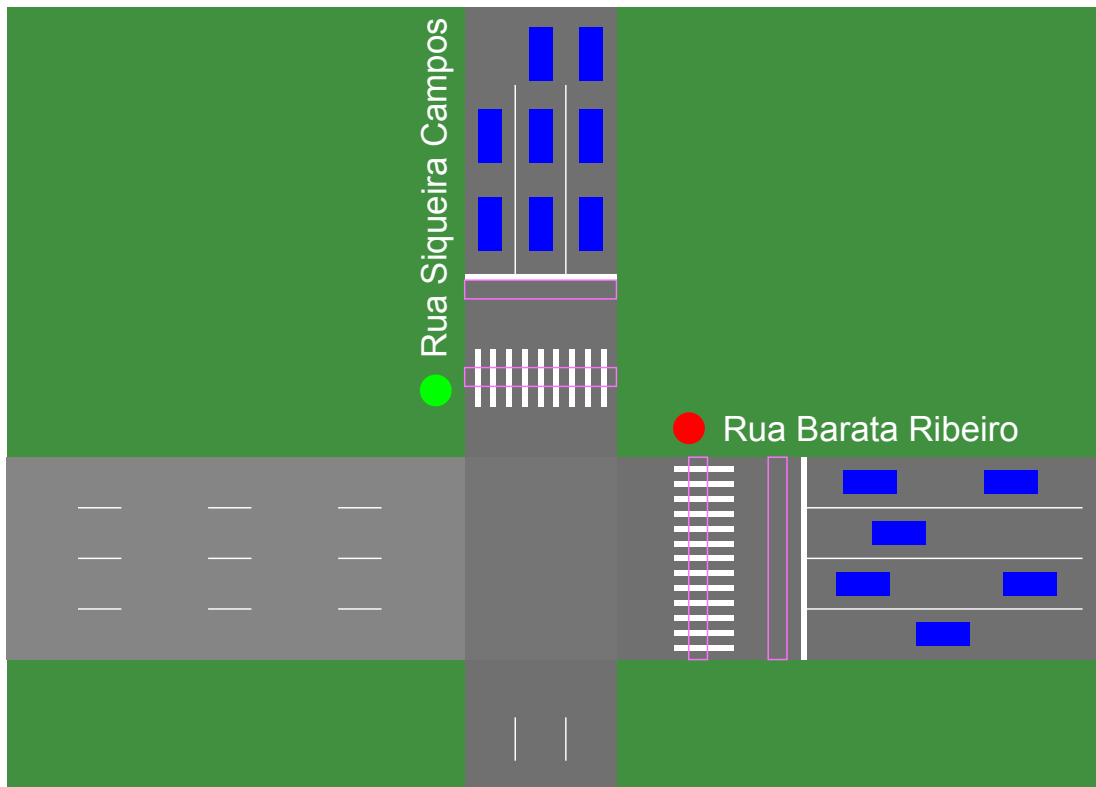


Figura 5.28: Desenho do cruzamento da Rua Barata Ribeiro com a Rua Siqueira Campos no MicroLAM.



### 5.4.1 Zona do Dilema na Rua Barata Ribeiro

Com base nas medidas da sinalização horizontal da Rua Barata Ribeiro, relacionadas na tabela 5.4, e assumindo o comprimento do veículo como  $4,00\text{ m}$ , que é o tamanho comum de um automóvel no Brasil, ver subseção 2.1.2, é possível calcular o comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo para a aproximação pela Rua Barata Ribeiro, como detalhado na tabela 5.10.

Nome	Medida (m)
Cruzamento ( $w$ )	23,80
Largura da Rua Siqueira Campos	10,60
Distância da faixa para travessia de pedestres para o prolongamento do meio fio da pista transversal	4,00
Extensão da faixa para travessia de pedestres	4,10
Distância da linha de retenção para faixa para travessia de pedestres	4,70
Largura da linha de retenção	0,40
Veículo ( $L$ )	4,00
Cruzamento mais veículo ( $w + L$ )	27,80

Tabela 5.10: Cálculo do comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo para a aproximação pela Rua Barata Ribeiro. As medidas do cruzamento foram baseadas nos valores da tabela 5.4. O comprimento do veículo foi baseado num tamanho comum de automóvel no Brasil, ver subseção 2.1.2

A figura 5.29 ilustra o comprimento da zona do dilema na Rua Barata Ribeiro no cruzamento com a Rua Siqueira Campos em função da velocidade de aproximação. Observa-se que na maioria das velocidades de aproximação, o comprimento da zona do dilema supera  $14,9\text{ m}$ . Quando é considerado o tempo de vermelho geral como um tempo adicional para liberar o cruzamento, a zona do dilema é eliminada para velocidades de aproximação a partir de  $10,7\text{ km/h}$ . Entretanto, notou-se na avaliação em campo, que este tempo de vermelho geral de  $7\text{ s}$  é aproveitado pelos pedestres para atravessar a rua do lado oposto ao cruzamento, mesmo não existindo uma faixa ou semáforo para travessia de pedestres neste local. Deste modo, este tempo excessivo de vermelho geral pode colocar os pedestres em perigo, já que eles não têm acesso a uma informação clara de quando o trânsito de veículos será liberado.

A simulação feita considerando os fluxos do cruzamento no horário do *rush* do final da tarde apontaram para uma porcentagem de  $0,96\%$  de veículos que estiveram em uma zona do dilema.

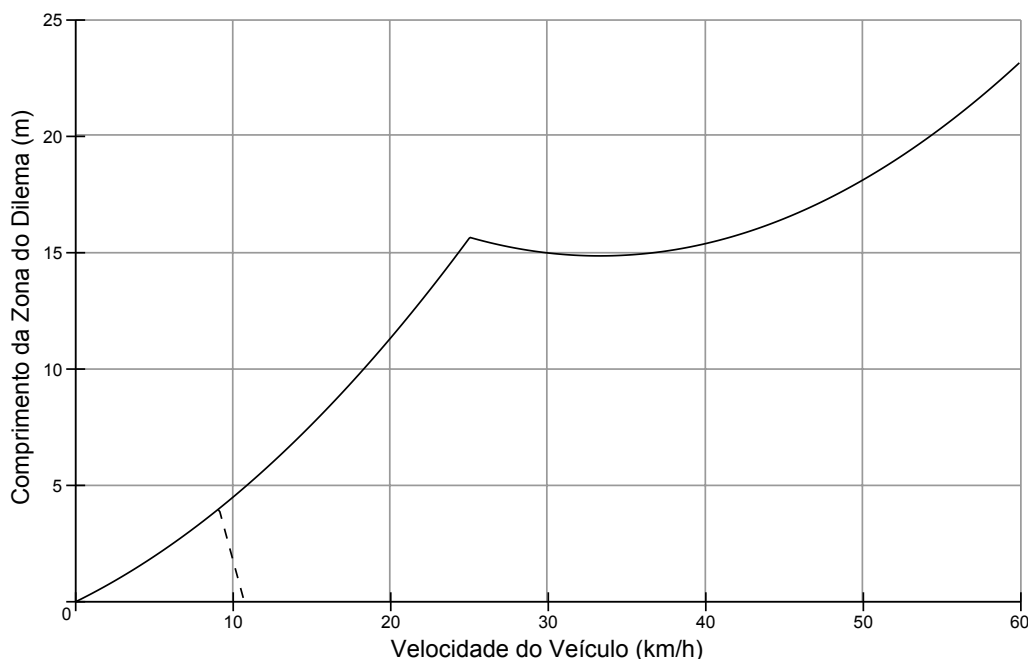


Figura 5.29: Comprimento da zona do dilema na Rua Barata Ribeiro no cruzamento com a Rua Siqueira Campos em função da velocidade de aproximação. A linha contínua considera apenas o tempo de amarelo e a linha tracejada considera o tempo de amarelo mais o tempo de vermelho geral. O comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo é de 27,80 m, calculado na tabela 5.10. O tempo de amarelo é de 4 s e o tempo de vermelho geral é de 7 s, ver tabela 5.6. Foi considerado um tempo de percepção e reação de 1,2 s e desaceleração de 3,3 m/s<sup>2</sup>.

#### 5.4.2 Zona do Dilema na Rua Siqueira Campos

Com base nas medidas da sinalização horizontal da Rua Siqueira Campos, relacionadas na tabela 5.7 e também considerando o comprimento do veículo como 4,00 m, é possível calcular o comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo para a aproximação pela Rua Siqueira Campos, como detalhado na tabela 5.11.

A figura 5.30 apresenta o comprimento da zona do dilema na Rua Siqueira Campos no cruzamento com a Rua Barata Ribeiro em função da velocidade de aproximação. Verifica-se que o comprimento da zona do dilema é superior a 17,4 m para a maioria das velocidades de aproximação. Mesmo considerando o tempo de vermelho geral de 1 s, a zona do dilema ainda existe para todas as velocidades de aproximação, gerando a possibilidade de um veículo ainda estar no cruzamento quando o semáforo liberar o trânsito do fluxo conflitante.

A simulação feita considerando os fluxos do cruzamento no horário do *rush* do final da tarde apontaram para um percentual de 1,14% de veículos que estiveram em uma zona do dilema. Um valor pouco maior que o observado na Rua Barata Ribeiro, justamente por causa dos comprimentos maiores da zona do dilema.

Nome	Medida (m)
Cruzamento ( $w$ )	26,30
Largura da Rua Barata Ribeiro	13,60
Distância da faixa para travessia de pedestres para o prolongamento do meio fio da pista transversal	3,50
Extensão da faixa para travessia de pedestres	4,00
Distância da linha de retenção para faixa para travessia de pedestres	4,80
Largura da linha de retenção	0,40
Veículo ( $L$ )	4,00
Cruzamento mais veículo ( $w + L$ )	30,30

Tabela 5.11: Cálculo do comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo para a aproximação pela Rua Barata Ribeiro. As medidas do cruzamento foram baseadas nos valores da tabela 5.7. O comprimento do veículo foi baseado num tamanho comum de automóvel no Brasil, ver subseção 2.1.2

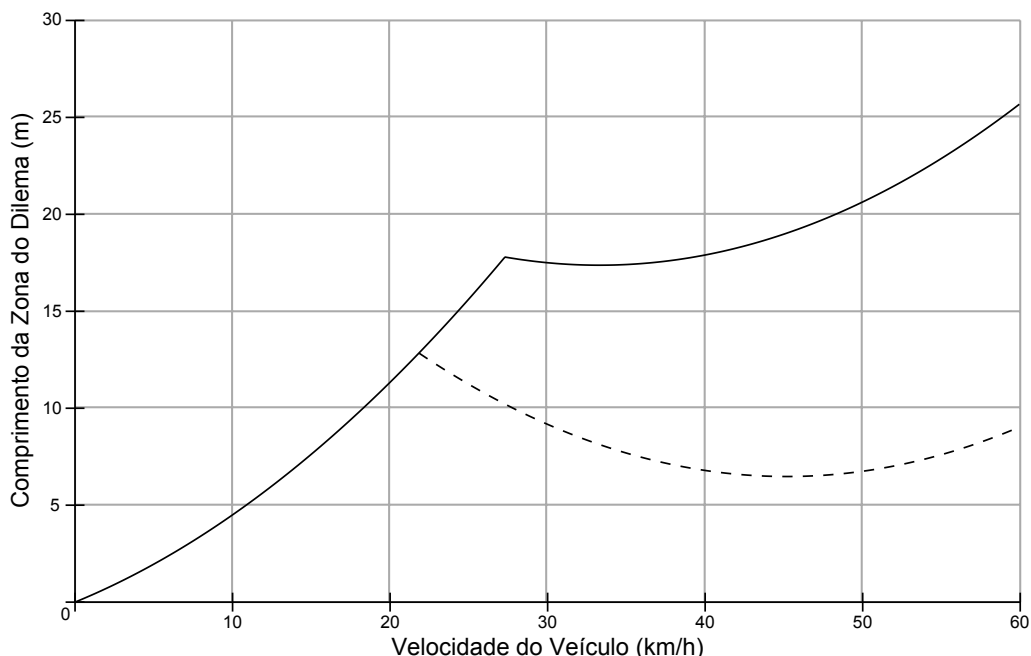


Figura 5.30: Comprimento da zona do dilema na Rua Siqueira Campos no cruzamento com a Rua Barata Ribeiro em função da velocidade de aproximação. A linha contínua considera apenas o tempo de amarelo e a linha tracejada considera o tempo de amarelo mais o tempo de vermelho geral. O comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo é de 30,30 m, calculado na tabela 5.11. O tempo de amarelo é de 4 s e o tempo de vermelho geral é de 1 s, ver tabela 5.9. Foi considerado um tempo de percepção e reação de 1,2 s e desaceleração de 3,3 m/s<sup>2</sup>.

### 5.4.3 Zona de Indecisão

Os resultados relacionados à quantidade de veículos que estiveram na zona de indecisão apontaram para porcentagens de 1,86% na Rua Barata Ribeiro e 1,89% na

Rua Siqueira Campos.

O fluxo da Rua Barata Ribeiro considerado na simulação foi de 1.881 *vph*, mas como a via tem quatro faixas, o fluxo por faixa foi de 470 *vph*. Analogamente, o fluxo simulado para Rua Siqueira Campos foi de 631 *vph* e como ela tem três faixas, seu fluxo por faixa é de 158 *vph*.

Mesmo o fluxo da Rua Barata Ribeiro sendo quase três vezes maior que o fluxo da Rua Siqueira Campos, é interessante observar que os percentuais foram quase iguais.

#### **5.4.4 Avanço de Sinal Vermelho do Semáforo**

A porcentagem de avanços de sinal vermelho do semáforo tanto na Rua Barata Ribeiro, quanto na Rua Siqueira Campos, foi de 0,11%. O tempo de perdão configurado para os detectores posicionados nas duas vias foi de 1 s.

Na Rua Barata Ribeiro, 19% dos veículos que avançaram o sinal estiveram em uma zona do dilema e 60% deles estiveram em uma zona de indecisão. Na Rua Siqueira Campos, 24% dos veículos que avançaram o sinal estiveram em uma zona do dilema e 63% deles estiveram em uma zona de indecisão.

Novamente, mesmo com os fluxos substancialmente distintos, todos os percentuais foram bastante próximos. A Rua Siqueira Campos tem comprimentos da zona do dilema maiores, logo, contabilizou mais avanços de sinal por veículos que estiveram em uma.

#### **5.4.5 Parada sobre a Faixa para Travessia de Pedestres**

O percentual de paradas sobre a faixa para travessia de pedestres tanto na Rua Barata Ribeiro, quanto na Rua Siqueira Campos, foi de 0,05%. O tempo de permanência configurado para os detectores posicionados nas duas vias foi de 5 s.

Todos os veículos que pararam sobre a faixa de pedestres na Rua Barata Ribeiro e na Rua Siqueira Campos estiveram em uma zona do dilema. Na Rua Barata Ribeiro, todos os veículos que pararam sobre a faixa de pedestres estiveram em uma zona de indecisão e na Rua Siqueira Campos 99,5% estiveram.

O espaço que existe entre a linha de retenção e o começo do detector de parada sobre a faixa de pedestres em ambas as vias é o suficiente para que um carro possa ficar parado durante o intervalo vermelho do semáforo sem que seja detectado. Deste modo, o registro deste tipo de infração é relaxado. Ver figura 5.28.

## 5.5 Cruzamento da Rua Barão da Torre com a Rua Maria Quitéria

O cruzamento da Rua Barão da Torre com a Rua Maria Quitéria fica localizado no bairro de Ipanema, na cidade do Rio de Janeiro. A Rua Barão da Torre é uma via arterial que cruza o bairro de ponta a ponta. A Rua Maria Quitéria é uma via arterial importante que serve de entrada para o bairro. O cruzamento está ilustrado na figura 5.31.

Medidas em campo foram necessárias para uma representação fiel da sinalização horizontal do cruzamento e para o posicionamento dos sistemas automáticos de fiscalização. As medidas da marcação de área de conflito estão enumeradas na tabela 5.12. As medidas da sinalização horizontal de cada via estão relacionadas nas tabelas 5.13 e 5.16. As medidas do posicionamento dos sistemas de fiscalização estão listadas nas tabelas 5.14 e 5.17.

Para medir a temporização dos semáforos e os fluxos das vias na hora do *rush* do final da tarde, foram feitas filmagens com duração de 15 minutos enquadrando todo o cruzamento e o grupo focal dos semáforos. As temporizações aferidas estão listadas nas tabelas 5.15 e 5.18. Os fluxos contabilizados foram de 412 *vph* na Rua Barão da Torre e 871 *vph* na Rua Maria Quitéria.

A representação deste cruzamento no MicroLAM, seguindo todas as medidas tomadas, está ilustrada na figura 5.32. O modelo de motorista utilizado nas simulações é o StDM, descrito na seção 4.1. Os valores adotados para as suas constantes são os indicados no final da mesma seção. Todas as simulações têm uma duração de 240 horas, de modo que as medidas de interesse convirjam seguindo a Lei dos Grandes Números.

Nome	Medida (m)
Largura da linha de borda externa	0,40
Largura das linhas internas	0,10
Espaçamento entre os eixos das linhas internas	1,00
Distância de cada linha de borda externa para o prolongamento do seu respectivo meio fio	0,80

Tabela 5.12: Medidas da marcação de área de conflito no cruzamento da Rua Barão da Torre com a Rua Maria Quitéria.

<b>Nome</b>	<b>Medida (m)</b>
Linha simples contínua	
Comprimento	19,50
Largura	0,10
Linha simples seccionada	
Largura	0,10
Traço	3,00
Espaçamento	6,00
Linha de retenção	
Largura	0,40
Distância para a faixa de travessia de pedestres	4,35
Faixa para travessia de pedestres	
Largura	0,40
Distância entre faixas	0,60
Extensão	4,00
Distância para o prolongamento do meio fio da pista transversal	6,50

Tabela 5.13: Medidas da sinalização horizontal da Rua Barão da Torre no cruzamento com a Rua Maria Quitéria.

<b>Nome</b>	<b>Medida (m)</b>
Detector de avanço de sinal vermelho	
Comprimento	1,30
Distância para o início da linha de retenção	0,05
Detector de parada sobre a faixa de pedestres	
Comprimento	1,30
Distância para o início da faixa para travessia de pedestres	0,90

Tabela 5.14: Medidas dos sistemas automáticos de fiscalização da Rua Barão da Torre no cruzamento com a Rua Maria Quitéria.

<b>Intervalo</b>	<b>Tempo (s)</b>
Verde	20
Amarelo	4
Vermelho Geral	2

Tabela 5.15: Temporização do semáforo da Rua Barão da Torre no cruzamento com a Rua Maria Quitéria no horário do *rush* do final da tarde.

<b>Nome</b>	<b>Medida (m)</b>
Linha simples contínua	
Comprimento	20,00
Largura	0,10
Linha simples seccionada	
Largura	0,10
Traço	3,00
Espaçamento	6,00
Linha de retenção	
Largura	0,40
Distância para a faixa de travessia de pedestres	4,80
Faixa para travessia de pedestres	
Largura	0,40
Distância entre faixas	0,60
Extensão	4,10
Distância para o prolongamento do meio fio da pista transversal	6,70

Tabela 5.16: Medidas da sinalização horizontal da Rua Maria Quitéria no cruzamento com a Rua Barão da Torre.

<b>Nome</b>	<b>Medida (m)</b>
Detector de avanço de sinal vermelho	
Comprimento	1,30
Distância para o início da linha de retenção	0,05
Detector de parada sobre a faixa de pedestres	
Comprimento	1,30
Distância para o início da faixa para travessia de pedestres	1,50

Tabela 5.17: Medidas dos sistemas automáticos de fiscalização da Rua Maria Quitéria no cruzamento com a Rua Barão da Torre.

<b>Intervalo</b>	<b>Tempo (s)</b>
Verde	33
Amarelo	4
Vermelho Geral	2

Tabela 5.18: Temporização do semáforo da Rua Maria Quitéria no cruzamento com a Rua Barão da Torre no horário do *rush* do final da tarde.



Figura 5.31: Foto do cruzamento da Rua Barão da Torre com a Rua Maria Quitéria. A Rua Barão da Torre segue do lado direito para o lado esquerdo e a Rua Maria Quitéria segue de cima para baixo.

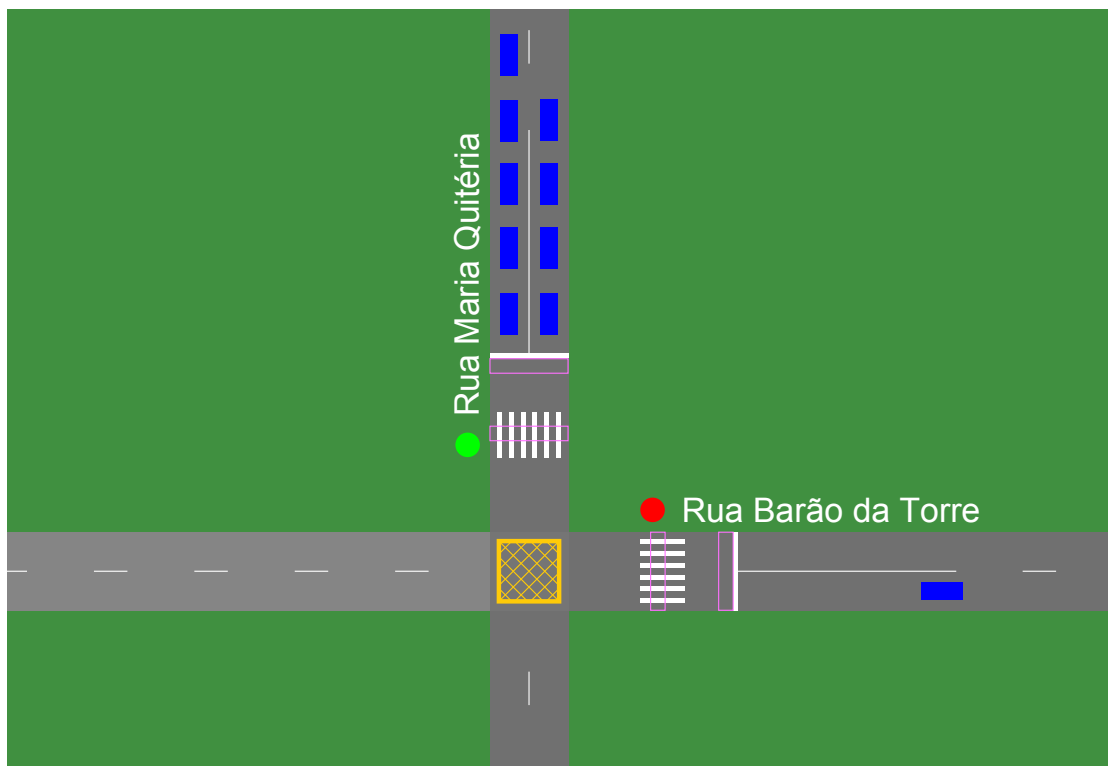


Figura 5.32: Desenho do cruzamento da Rua Barão da Torre com a Rua Maria Quitéria no MicroLAM.



### 5.5.1 Zona do Dilema na Rua Barão da Torre

Com base nas medidas da sinalização horizontal da Rua Barão da Torre, relacionadas na tabela 5.13, e assumindo o comprimento do veículo como  $4,00\text{ m}$ , que é o tamanho comum de um automóvel no Brasil, ver subseção 2.1.2, é possível calcular o comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo para a aproximação pela Rua Barão da Torre, como detalhado na tabela 5.19.

Nome	Medida (m)
Cruzamento ( $w$ )	21,85
Largura da Rua Maria Quitéria	6,60
Distância da faixa para travessia de pedestres para o prolongamento do meio fio da pista transversal	6,50
Extensão da faixa para travessia de pedestres	4,00
Distância da linha de retenção para faixa para travessia de pedestres	4,35
Largura da linha de retenção	0,40
Veículo ( $L$ )	4,00
Cruzamento mais veículo ( $w + L$ )	25,85

Tabela 5.19: Cálculo do comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo para a aproximação pela Rua Barão da Torre. As medidas do cruzamento foram baseadas nos valores da tabela 5.13. O comprimento do veículo foi baseado num tamanho comum de automóvel no Brasil, ver subseção 2.1.2

A figura 5.33 ilustra o comprimento da zona do dilema na Rua Barão da Torre no cruzamento com a Rua Maria Quitéria em função da velocidade de aproximação. Observa-se que na maioria das velocidades de aproximação, o comprimento da zona do dilema supera  $8,9\text{ m}$ . Quando é considerado o tempo de vermelho geral como um tempo adicional para liberar o cruzamento, a zona do dilema é eliminada para velocidades de aproximação a partir de  $19,8\text{ km/h}$ .

A simulação feita considerando os fluxos do cruzamento no horário do *rush* do final da tarde apontaram para uma porcentagem de  $3,16\%$  de veículos que estiveram em uma zona do dilema.

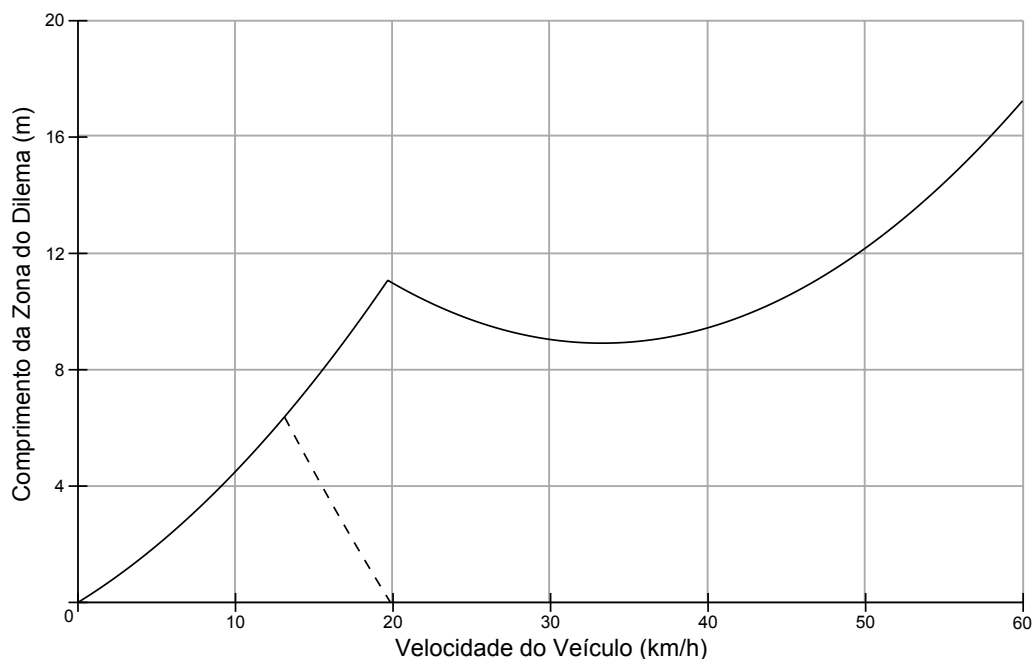


Figura 5.33: Comprimento da zona do dilema na Rua Barão da Torre no cruzamento com a Rua Maria Quitéria em função da velocidade de aproximação. A linha contínua considera apenas o tempo de amarelo e a linha tracejada considera o tempo de amarelo mais o tempo de vermelho geral. O comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo é de  $21,85\text{ m}$ , calculado na tabela 5.19. O tempo de amarelo é de  $4\text{ s}$  e o tempo de vermelho geral é de  $2\text{ s}$ , ver tabela 5.15. Foi considerado um tempo de percepção e reação de  $1,2\text{ s}$  e desaceleração de  $3,3\text{ m/s}^2$ .

### 5.5.2 Zona do Dilema na Rua Maria Quitéria

Com base nas medidas da sinalização horizontal da Rua Maria Quitéria, relacionadas na tabela 5.16 e também considerando o comprimento do veículo como  $4,00\text{ m}$ , é possível calcular o comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo para a aproximação pela Rua Maria Quitéria, como detalhado na tabela 5.20.

A figura 5.34 apresenta o comprimento da zona do dilema na Rua Maria Quitéria no cruzamento com a Rua Barão da Torre em função da velocidade de aproximação. Verifica-se que o comprimento da zona do dilema é superior a  $14,7\text{ m}$  para a maioria das velocidades de aproximação. Quando é considerado o tempo de vermelho geral, a zona do dilema é eliminada para velocidades de aproximação a partir de  $27,2\text{ km/h}$ .

A simulação feita considerando os fluxos do cruzamento no horário do *rush* do final da tarde apontaram para uma porcentagem de  $2,43\%$  de veículos que estiveram em uma zona do dilema. É interessante notar que mesmo a Rua Maria Quitéria tendo comprimentos maiores da zona do dilema do que a Rua Barão da Torre, ela teve menos veículos nesta zona.

Nome	Medida (m)
Cruzamento ( $w$ )	23,60
Largura da Rua Barão da Torre	7,60
Distância da faixa para travessia de pedestres para o prolongamento do meio fio da pista transversal	6,70
Extensão da faixa para travessia de pedestres	4,10
Distância da linha de retenção para faixa para travessia de pedestres	4,80
Largura da linha de retenção	0,40
Veículo ( $L$ )	4,00
Cruzamento mais veículo ( $w + L$ )	27,60

Tabela 5.20: Cálculo do comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo para a aproximação pela Rua Maria Quitéria. As medidas do cruzamento foram baseadas nos valores da tabela 5.16. O comprimento do veículo foi baseado num tamanho comum de automóvel no Brasil, ver subseção 2.1.2

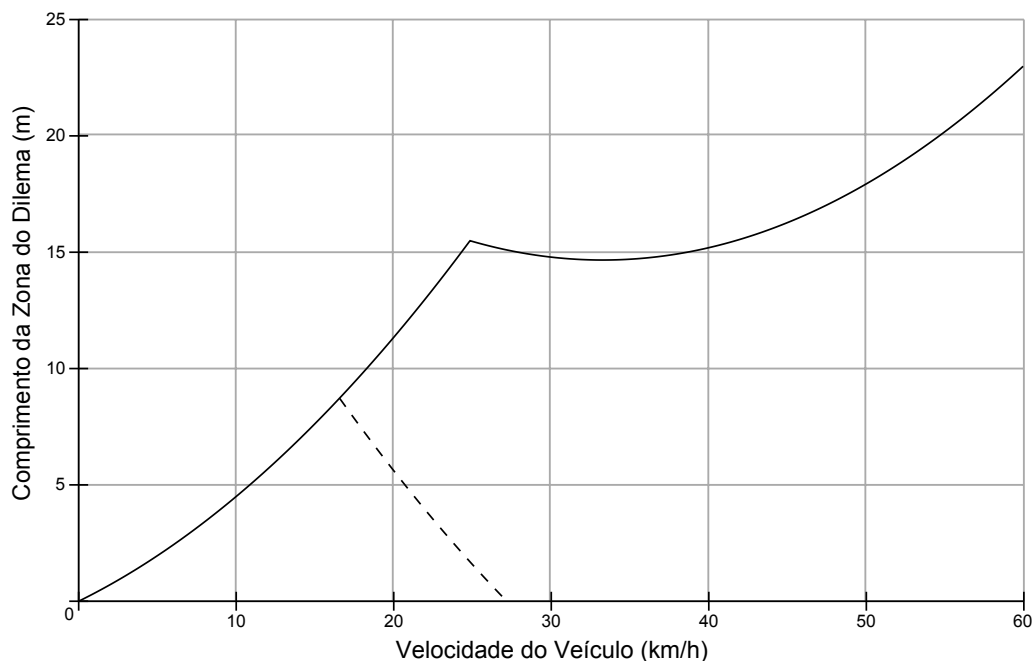


Figura 5.34: Comprimento da zona do dilema na Rua Maria Quitéria no cruzamento com a Rua Barão da Torre em função da velocidade de aproximação. A linha contínua considera apenas o tempo de amarelo e a linha tracejada considera o tempo de amarelo mais o tempo de vermelho geral. O comprimento do cruzamento mais comprimento do veículo é de 23,60 m, calculado na tabela 5.20. O tempo de amarelo é de 4 s e o tempo de vermelho geral é de 2 s, ver tabela 5.18. Foi considerado um tempo de percepção e reação de 1,2 s e desaceleração de 3,3 m/s<sup>2</sup>.

### 5.5.3 Zona de Indecisão

Os resultados relacionados à quantidade de veículos que estiveram na zona de indecisão apontaram para porcentagens de 4,87% na Rua Barão da Torre e 4,33% na

Rua Maria Quitéria.

O fluxo da Rua Maria Quitéria considerado na simulação é 111% maior que o fluxo da Rua Barão da Torre, mesmo assim, os percentuais foram bastante próximos.

#### **5.5.4 Avanço de Sinal Vermelho do Semáforo**

A porcentagem de avanços de sinal vermelho do semáforo na Rua Barão da Torre foi de 0,26%, enquanto que na Rua Maria Quitéria foi de 0,22%. O tempo de perdão configurado para os detectores posicionados nas duas vias foi de 1 s.

Na Rua Barão da Torre, 17% dos veículos que avançaram o sinal estiveram em uma zona do dilema e 63% deles estiveram em uma zona de indecisão. Na Rua Maria Quitéria, 17% dos veículos que avançaram o sinal estiveram em uma zona do dilema e 62% deles estiveram em uma zona de indecisão.

#### **5.5.5 Parada sobre a Faixa para Travessia de Pedestres**

O percentual de paradas sobre a faixa para travessia de pedestres tanto na Rua Barão da Torre, quanto na Rua Maria Quitéria, foi de 0,13%. O tempo de permanência configurado para os detectores posicionados nas duas vias foi de 5 s.

Na Rua Barão da Torre, todos os veículos que pararam sobre a faixa de pedestres estiveram em uma zona do dilema e 87% estiveram em uma zona de indecisão. Na Rua Maria Quitéria, 98,5% dos veículos que pararam sobre a faixa de pedestres estiveram em uma zona do dilema e 90% estiveram em uma zona de indecisão.

O espaço que existe entre a linha de retenção e o começo do detector de parada sobre a faixa de pedestres em ambas as vias é o suficiente para que um carro possa ficar parado durante o intervalo vermelho do semáforo sem que seja detectado. Deste modo, o registro deste tipo de infração é relaxado. Ver figura 5.32.

# Capítulo 6

## Conclusões

Este capítulo sumariza todo o trabalho exposto nesta dissertação, na seção 6.1, e indica algumas possibilidades de trabalhos futuros, na seção 6.2.

### 6.1 Sumário

Neste trabalho, foram apresentados vários fundamentos e aspectos relacionados à zona do dilema, de forma a consolidar todas as informações necessárias para possibilitar a microssimulação da mesma.

O simulador MicroLAM, desenvolvido por DE PAIVA, foi escolhido para ser estudado com o propósito de criar uma ferramenta que permitisse o estudo da zona do dilema. Sua interface gráfica permitiu que extensões fossem desenvolvidas de modo a visualizar tanto a zona do dilema como também uma previsão da mesma. Algumas melhorias foram feitas para que cenários mais realistas pudessem ser representados no simulador e para facilitar a interação de usuários que não tivessem conhecimentos de codificação de programas de computador. Por fim, sistemas automáticos de fiscalização de avanço de sinal vermelho do semáforo e parada sobre a faixa para travessia de pedestres foram implementados no simulador para avaliar a relação destas infrações com a zona do dilema.

Para que fosse possível simular a zona do dilema, um novo modelo de motorista capaz demonstrar os efeitos dela foi concebido a partir do IDM, o StDM. Baseado neste modelo, outros foram propostos com o intuito de estudar algumas estratégias para evitar que o veículo estivesse na zona do dilema: o DZADM, o IZADM, o DIZADM e o AVDM.

Dinâmicas do veículo em relação a zona do dilema foram apresentadas graficamente, mostrando que veículos que estiveram nesta zona podem ser obrigados a passar por situações de risco de acidente de trânsito e também cometerem as infrações de avanço de sinal vermelho e parada sobre a faixa de pedestres. Resultados de simulações de longa duração confirmaram a relação do tempo de amarelo do

semáforo com a quantidade de veículos na zona do dilema e a ligação da presença de veículos nesta zona com as infrações já mencionadas.

Os testes com os modelos desenvolvidos para evitar a zona do dilema, com exceção do DZADM, tiveram sucesso em manter os veículos fora desta zona e apontaram diminuições substanciais na quantidade de avanços de sinal vermelho e paradas sobre a faixa de pedestres. Desta forma, poderiam ser considerados como uma solução descentralizada para este tipo de situação, ao lado das práticas centralizadas já existentes.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Os novos modelos de motorista aliados às melhorias no MicroLAM criaram uma ferramenta flexível para o estudo da zona do dilema, assim como geraram resultados relacionados a ela. Ainda assim, existem várias funcionalidades que podem ser desenvolvidas no MicroLAM, extensões que podem ser feitas aos modelos e resultados que podem ser extraídos de simulações. Desta forma, algumas ideias para trabalhos futuros serão listadas a seguir.

### 6.2.1 MicroLAM

Neste trabalho, o MicroLAM foi bastante estendido, mas ainda existem algumas funcionalidades que poderiam ser implementadas para contribuir ainda mais para a facilidade do estudo da zona do dilema.

Atualmente, os cenários criados para as simulações têm que ser descritos em um arquivo no formato *eXtensible Markup Language* (XML) através de um trabalho manual. Idealmente, este processo poderia ser feito diretamente em uma interface gráfica, que teria todas as ferramentas necessárias para construção e edição de cenários. Além disso, seria interessante também poder importar mapas reais diretamente de repositórios abertos, como o *Open Street Map* [33].

A visualização da zona do dilema sobreposta à via é muito útil para entender como é a dinâmica de um veículo em relação a ela. Entretanto, um gráfico com a posição da zona do dilema em função das velocidades de aproximação, que apresentasse o posicionamento de todos os veículos que estivessem chegando ao semáforo, poderia dar uma visão mais ampla da situação.

### 6.2.2 Modelo de Motorista

Vários modelos de motorista foram apresentados neste trabalho, mas ainda existe bastante espaço para extendê-los.

Uma limitação que ainda existe em todos os modelos é a impossibilidade do veículo mudar de faixa. Então, esta seria uma contribuição importante para agregar as perturbações deste tipo de manobra ao fluxo da via.

Outro ponto que poderia ser trabalhado é a aplicação de uma variabilidade aos valores das constantes dos modelos, de forma que exista toda uma gama de motoristas que tenham comportamentos desde os mais agressivos até os mais conservadores.

A situação de parada sobre a faixa para travessia de pedestres também é uma questão que pode ser aperfeiçoada. Nos modelos desenvolvidos, quando o veículo para sobre a faixa de pedestres, o motorista não tenta se movimentar para um possível espaço à frente ou atrás dela, de modo a liberá-la, como acontece em casos reais.

### **6.2.3 Simulações**

Muitas simulações ainda podem ser feitas para explorar o assunto, então algumas estão listadas a seguir.

Variar a velocidade máxima da via, de modo a estudar os efeitos da zona do dilema em vias locais, coletoras e de trânsito rápido, bem como em rodovias.

Testar outros tipos e tamanhos de veículos, com as constantes do modelo de motorista ajustadas de acordo. Seria interessante também fazer simulações com composições heterogêneas de veículos.

Montar cenários com mais de um semáforo, de modo a investigar os efeitos de um congestionamento na zona do dilema. Neste tipo de situação, as velocidades de circulação são baixas e existe a possibilidade de que veículos bloqueiem a área de conflito da interseção.

# Referências Bibliográficas

- [1] DE PAIVA, L. M. *Controle Distribuído de Tráfego com Fluxos Heterogêneos*. Tese de Mestrado, COPPE-UFRJ, 2012.
- [2] GAZIS, D., HERMAN, R., MARADUDIN, A. “The problem of the amber signal light in traffic flow”, *Operations Research*, v. 8, n. 1, pp. 112–132, 1960.
- [3] LIU, C., HERMAN, R., GAZIS, D. C. “A review of the yellow interval dilemma”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 30, n. 5, pp. 333–348, 1996.
- [4] ZEGEER, C. V. *Effectiveness of Green Extension Systems at High Speed Intersections*. Relatório técnico, Kentucky Department of Transportation, Bureau of Highways, 1977.
- [5] CHANG, M.-S., MESSER, C. J., SANTIAGO, A. J. *Timing traffic signal change intervals based on driver behavior*. Relatório técnico, Transportation Research Board, 1985.
- [6] PTVGROUP. “VISSIM”. Disponível em: <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-uk/products/ptv-vissim/>. Acesso em 10 de agosto de 2013.
- [7] BEHRISCH, M., BIEKER, L., ERDMANN, J., et al. “SUMO - Simulation of Urban MObility: An Overview”. In: *SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*, pp. 63–68, Barcelona, Spain, October 2011.
- [8] TREIBER, M., HENNECKE, A., HELBING, D. “Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations”, *Physical Review E*, v. 62, n. 2, pp. 1805, 2000.
- [9] ROESS, R. P., PRASSAS, E. S., MCSHANE, W. R. *Traffic Engineering*. Prentice Hall, 2004.



- [10] DE SOUSA, L. A. P. *Taxas de Desaceleração e Tempos de Percepção e Reação dos Motoristas em Interseções Semaforizadas*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- [11] DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO (DENATRAN). “Frota de veículos, por tipo e com placa, segundo as Grandes Regiões e Unidades da Federação - ABR/2013”. 2013. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/frota.htm>>. Acesso em 29 de maio de 2013.
- [12] FEDERAÇÃO NACIONAL DA DISTRIBUIÇÃO DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (FENABRAVE). “Informativo FENABRAVE - Resumo Mensal Dezembro 2012”. 2012. Disponível em: <<http://www.fenabrave.com.br>>. Acesso em 11 de junho de 2013.
- [13] CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). “Resolução N° 210, de 13 de Novembro de 2006 (com as alterações das Resoluções n° 284/08 e n° 373/11)”. 2011.
- [14] KRAFT, W. H., HOMBURGER, W. S., PLINE, J. L. *Traffic Engineering Handbook*. 1099 14th Street, NW, Suite 300 West, Washington, DC 20005 USA, Institute of Transportation Engineers, 2009.
- [15] CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). *Código Brasileiro de Trânsito e Legislação Complementar em Vigor*. 2008.
- [16] CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). *Sinalização Horizontal*, v. IV, *Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito*. 2007.
- [17] DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO (DENATRAN). *Manual de Semáforos*, v. 4, *Coleção Serviços de Engenharia*. 1984.
- [18] CONSELHO ESTADUAL DE TRÂNSITO DE SANTA CATARINA (CETRA-SC). “Parecer n° 151/2011”. 2011.
- [19] CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). *Sinalização Semaforica*, v. V, *Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito*. Minuta.
- [20] CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). “Resolução N° 165, de 10 de Setembro de 2004 (com as alterações da Resolução n° 174/05)”. 2005.
- [21] CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). “Portaria N° 16, de 21 de Setembro de 2004”. 2004.

- [22] URBANIK, T., KOONCE, P. “The dilemma with dilemma zones”, *Proceedings, ITE District*, v. 6, 2007.
- [23] PAPACOSTAS, C., KASAMOTO, N. *Intergreen Interval Controversy: Toward a Common Framework (with Discussion and Closure)*. N. 1324. 1991.
- [24] GATES, T. J., NOYCE, D. A., LARACUENTE, L. “Analysis of dilemma zone driver behavior at signalized intersections”. In: *Transportation Research Board 86th Annual Meeting, Washington, DC*, 2007.
- [25] KNODLER JR, M. A., HURWITZ, D. S. “Final Report: An Evaluation of Dilemma Zone Protection Practices for Signalized Intersection Control”, 2009.
- [26] ZIMMERMAN, K., BONNESON, J. A., MIDDLETON, D., et al. “Improved detection and control system for isolated high-speed signalized intersections”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1856, n. 1, pp. 212–219, 2003.
- [27] BONNESON, J. A., MIDDLETON, D., ZIMMERMAN, K., et al. *Intelligent detection-control system for rural signalized intersections*. Relatório técnico, Texas Transportation Institute, Texas A&M University System, 2002.
- [28] MAHALEL, D., ZAIDEL, D., KLEIN, T. “Driver’s decision process on termination of the green light”, *Accident Analysis & Prevention*, v. 17, n. 5, pp. 373–380, 1985.
- [29] NEWTON, C., MUSSA, R. N., SADALLA, E. K., et al. “Evaluation of an alternative traffic light change anticipation system”, *Accident Analysis & Prevention*, v. 29, n. 2, pp. 201–209, 1997.
- [30] CHIOU, Y.-C., CHANG, C.-H. “Driver responses to green and red vehicular signal countdown displays: Safety and efficiency aspects”, *Accident Analysis & Prevention*, v. 42, n. 4, pp. 1057–1065, 2010.
- [31] LUM, K., HALIM, H. “A before-and-after study on green signal countdown device installation”, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, v. 9, n. 1, pp. 29–41, 2006.
- [32] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD COMMITTEE ON HIGHWAY CAPACITY AND QUALITY OF SERVICE. “Highway Capacity Manual”. 2000.

- [33] HAKLAY, M. M., WEBER, P. “OpenStreetMap: User-Generated Street Maps”, *IEEE Pervasive Computing*, v. 7, n. 4, pp. 12–18, out. 2008. ISSN: 1536-1268. doi: 10.1109/MPRV.2008.80. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/MPRV.2008.80>>.