



## TAXAS DE DESACELERAÇÃO E TEMPOS DE PERCEPÇÃO E REAÇÃO DOS MOTORISTAS EM INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS

Luiz Afonso Penha de Sousa

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

Orientador: Paulo Cezar Martins Ribeiro

Rio de Janeiro

Junho de 2011

TAXAS DE DESACELERAÇÃO E TEMPOS DE PERCEPÇÃO E REAÇÃO DOS  
MOTORISTAS EM INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS

Luiz Afonso Penha de Sousa

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 TRANSPORTES.

Examinada por:

---

Prof. Paulo Cezar Martins Ribeiro, Ph.D.

---

Prof. Licínio da Silva Portugal, D. Sc.

---

Prof. Maria Alice Prudêncio Jacques, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2011

Sousa, Luiz Afonso Penha de

Taxas de Desaceleração e Tempo de Percepção e Reação dos Motoristas em Interseções Semaforizadas/  
Luiz Afonso Penha de Sousa. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

VIII, 82 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Cezar Martins Ribeiro

Dissertação (Mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 78-82.

1. Taxas de Desaceleração. 2. Tempo de Percepção e Reação. 3. Engenharia de Tráfego. I. Ribeiro, Paulo Cezar Martins. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

## AGRADECIMENTOS

- Agradeço primeiramente a Deus por estar sempre presente em minha vida. Tudo que obtenho é graças a Ele.
- A minha família por sempre ter me incentivado e apoiado nesses anos de mestrado.
- A minha namorada Carla, por ter torcido por mim e entendido todas as minhas ausências.
- Ao meu amigo e orientador, Paulo Cezar Martins Ribeiro, por seus conselhos para que esse trabalho pudesse ser concluído e pela sua calma e paciência na orientação dessa dissertação de mestrado.
- Aos professores Licínio Portugal e Maria Alice por gentilmente aceitarem fazer parte da banca examinadora desse trabalho.
- Ao pessoal do PET/COPPE, professores e administrativos, pelos conhecimentos transmitidos e pela ajuda na solução de problemas que surgiram no decorrer do curso.
- A Companhia de Engenharia de Tráfego da cidade do Rio de Janeiro (CET-RIO), por ter permitido a gravação dos vídeos e o fornecimento dos dados necessários para que essa pesquisa fosse concluída.
- Aos diversos amigos feitos no decorrer do mestrado, entre eles: Bráulio, Emmanuela, Marcos, Rafaela, Renato Arbex e Suellem.

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

## TAXAS DE DESACELERAÇÃO E TEMPOS DE PERCEPÇÃO E REAÇÃO DOS MOTORISTAS EM INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS

Luiz Afonso Penha de Sousa

Junho/2011

Orientador: Paulo Cezar Martins Ribeiro

Programa: Engenharia de Transportes

Este trabalho tem por objetivo calcular as taxas de desaceleração e o tempo de percepção e reação dos motoristas diante do aspecto amarelo em interseções semaforizadas. Essas informações são utilizadas, entre outras aplicações, no cálculo do tempo de amarelo dos semáforos. Esse estudo se faz necessário devido à falta de pesquisas no âmbito nacional, fazendo com que sejam empregados os valores encontrados em pesquisas estrangeiras, que podem não refletir a realidade do país devido à diferença cultural dos condutores, tipos de veículo e condições da pista.

Sendo assim, foram coletados dados de quatro interseções na cidade do Rio de Janeiro e através de *softwares* específicos, os dados foram tratados e comparados com aqueles encontrados na revisão bibliográfica. Os resultados indicaram que tanto às taxas de desaceleração quanto o tempo de percepção e reação apresentaram valores diferentes aos sugeridos em estudos internacionais.

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

DECELERATION RATES AND TIMES OF PERCEPTION AND REACTION OF  
DRIVERS IN SIGNALIZED INTERSECTIONS

Luiz Afonso Penha de Sousa

June/2011

Advisor: Paulo Cezar Martins Ribeiro

Department: Transportation Engineering

This work aims to calculate the rates of deceleration and times of perception and reaction of drivers before the yellow aspect in signalized intersections. This information is used, among other applications, to calculate the time of yellow lights. This study is important because of the lack of research at national level, which forces the use of values obtained in foreign research, which may not reflect the reality of the country due to cultural difference of drivers, vehicle types and track conditions.

Thus, data were collected from four intersections in the city of Rio de Janeiro and through specific software, these data were processed and compared with those found in the literature review. The results indicated that both the rate of deceleration as the perception and reaction times showed different values to those suggested by international studies.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVO .....	1
1.2. JUSTIFICATIVA .....	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
<b>2. CONCEITUAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>5</b>
2.1. VELOCIDADE.....	5
2.2. DESACELERAÇÃO .....	7
2.3. TEMPO DE PERCEPÇÃO E REAÇÃO (TPR) .....	7
2.4. TEMPO DE AMARELO .....	8
2.5. ZONA DE DILEMA.....	10
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
3.1. TEMPO DE PERCEPÇÃO E REAÇÃO .....	14
3.1.1. <i>Pesquisas anteriores</i> .....	14
3.1.2. <i>Considerações sobre os TPR encontrados na bibliografia</i> .....	18
3.2. TAXAS DE DESACELERAÇÃO.....	19
3.2.1. <i>Pesquisas anteriores</i> .....	19
3.2.2. <i>Considerações sobre os resultados de taxa de desaceleração encontrados na bibliografia</i> .....	27
3.3. COMPORTAMENTO DO MOTORISTA NAS ZONAS DE DILEMA E OPÇÃO.....	28
3.3.1. <i>Pesquisas anteriores</i> .....	28
3.3.2. <i>Considerações sobre os resultados encontrados na bibliografia</i> .....	34
3.4. MÉTODOS DE COLETA DE DADOS .....	36
3.4.1. <i>Filmagens</i> .....	36
3.4.2. <i>Simuladores</i> .....	39
3.4.3. <i>Veículos Instrumentados</i> .....	40
3.4.4. <i>Considerações sobre os métodos de coleta de dados</i> .....	42
<b>4. OBTENÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS.....</b>	<b>43</b>
4.1. METODOLOGIA UTILIZADA .....	43

4.1.1. Escolha das Interseções.....	43
4.1.2. Gravação dos Vídeos.....	47
4.1.3. Cálculo da Velocidade Inicial.....	49
4.1.4. Cálculo das Taxas de Desaceleração.....	51
4.1.5. Levantamento dos Tempos de Percepção e Reação.....	52
4.2. CÁLCULO DO TAMANHO DA AMOSTRA.....	53
4.2.1. Tamanho da amostra para o cálculo das taxas de desaceleração.....	54
4.2.2. Tamanho da amostra para o cálculo dos tempos de percepção e reação.....	55
4.3. TEMPO DE PERCEPÇÃO E REAÇÃO.....	55
4.3.1. Apresentação dos resultados do tempo de percepção e reação.....	55
4.3.2. Tempo de Percepção e reação em outros veículos.....	61
4.3.3. Análise dos Resultados do Tempo de Percepção e Reação.....	62
4.4. TAXAS DE DESACELERAÇÃO.....	63
4.4.1. Apresentação dos Resultados das Taxas de Desaceleração.....	63
4.4.2. Velocidade de Aproximação x Taxas de Desaceleração.....	69
4.4.3. Zonas de Dilema e Opção x Taxas de Desaceleração.....	71
4.4.4. Análise dos Resultados das Taxas de Desaceleração.....	72
<b>5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>75</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>78</b>



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. OBJETIVO

Este trabalho possui dois objetivos gerais: determinar valores típicos das taxas de desaceleração do primeiro veículo a iniciar o processo de frenagem em interseções semaforizadas e registrar o tempo de percepção e reação (TPR) necessário para o motorista acionar o freio após o surgimento da luz amarela. O estudo tem ainda os seguintes objetivos específicos:

- Verificar a influência da distância da linha de retenção e da velocidade de aproximação na taxa de desaceleração e no tempo de percepção e reação (TPR);
- Caracterizar as situações em que a taxa de desaceleração e o TPR apresentam as maiores médias;
- Observar se há diferença entre os valores encontrados para a desaceleração e tempo de percepção e reação entre os diversos tipos de veículos (motos, automóveis e ônibus);
- Comparar os resultados desse estudo com os de outros autores, onde vai ser possível notar se há similaridade no comportamento do motorista brasileiro com o de outros países.

Para realização desse estudo, foi obtido junto com a CET-RIO (Companhia de Engenharia de Tráfego da Cidade do Rio de Janeiro) gravações de quatro interseções, onde foi possível extrair um total de 146 veículos. Posteriormente, as filmagens foram tratadas e analisadas em programas de computador, conforme será descrito no Capítulo 4.

## 1.2. JUSTIFICATIVA

De acordo com COLELLA (2008), caracterizar o comportamento dos motoristas ao dirigir um automóvel é uma atividade complexa e envolve diversas variáveis, e por isso costuma-se selecionar uma quantidade restrita dessas, tais como: TPR, taxas de aceleração/desaceleração e velocidade. Além disso, condições como gênero, idade e condições da via podem influenciar na tomada de decisão dos condutores.

A linha de pesquisa escolhida visa fazer um registro real de algumas variáveis que caracterizam o comportamento dos motoristas no Brasil, uma vez que não foram encontrados estudos na literatura nacional que coletassem os dados em campo para posteriormente determinar a desaceleração e o TPR. A maioria utiliza informações obtidas através das pesquisas de autores estrangeiros, podendo assim não refletir uma situação real, tendo em vista que o comportamento dos condutores sofre influência de fatores como cultura, educação, tipo de veículos, combustível utilizado e condições de circulações oferecidas pelas vias.

Conforme será mostrado no Capítulo 3, esse estudo faz-se necessário devido aos diferentes resultados encontrado pelos autores, onde pesquisas com metodologias similares encontram resultados significativamente diferentes, dificultando assim a escolha do valor a ser utilizado para a taxa de desaceleração pelos diversos órgãos de engenharia de tráfego e técnicos da área.

É importante registrar que nesse estudo, os motoristas não sabem que estão sendo monitorados e os veículos não são instrumentados. Esse tipo de coleta de dados é chamado de naturalístico e costuma gerar valores mais reais se comparados aos casos em que o motorista tem consciência de estar sendo analisado (GREEN, 2000 *apud* COLELLA, 2008).

Observa-se que a taxa de desaceleração e o TPR têm aplicabilidade direta em micro simulações de tráfego, na estimativa do consumo de combustível do automóvel, no dimensionamento do tempo de amarelo, cálculo de distâncias de parada, cálculo da extensão da zona de dilema e ainda no projeto de linhas de desaceleração (WANG *et al.* 2005).

### 1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho consta de cinco capítulos, a saber:

**O Capítulo 1** trata da introdução, onde são apresentados os objetivos, a justificativa e a estrutura do trabalho.

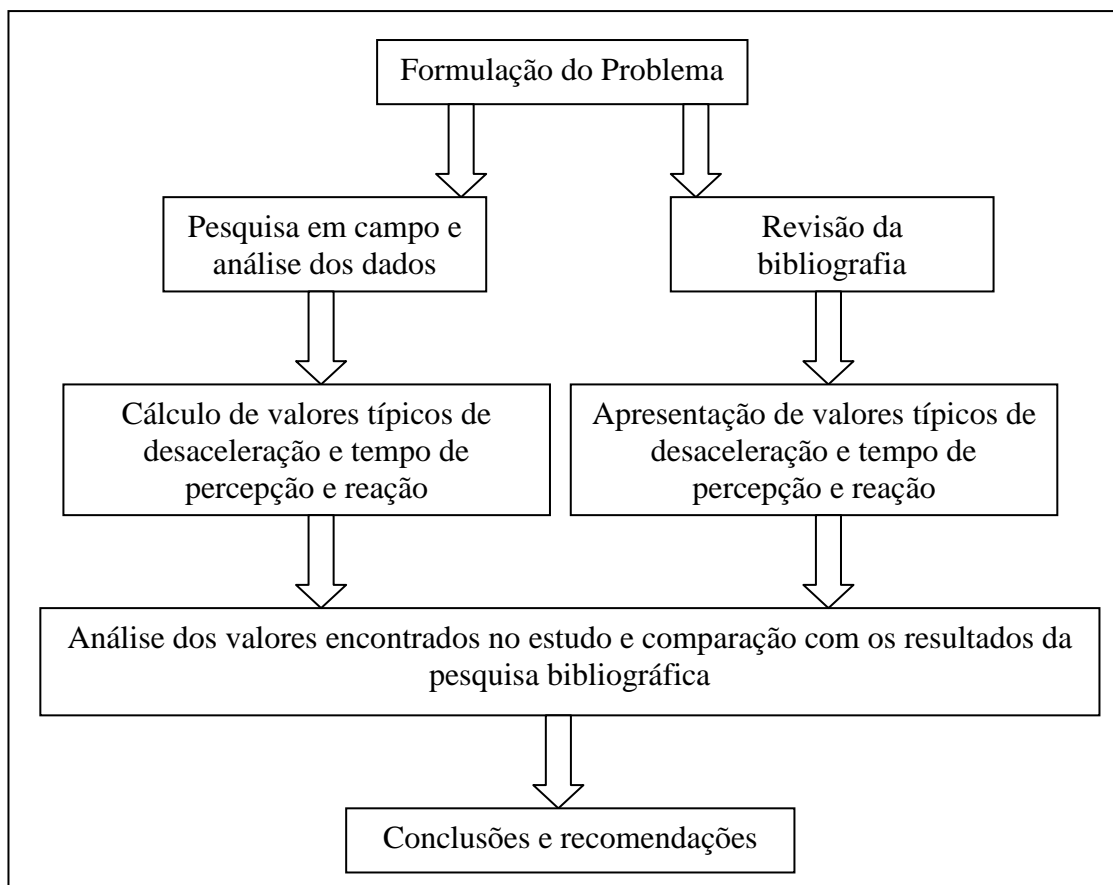
**No Capítulo 2** é feita uma conceituação teórica sobre as principais variáveis a serem utilizados no trabalho, tais como velocidade, desaceleração, tempo de percepção e reação, cálculo do tempo de amarelo e cálculo da zona de dilema.

**O Capítulo 3** apresenta a revisão bibliográfica, abordando as metodologias utilizadas em outras pesquisas na obtenção dos dados para o cálculo das taxas de desaceleração e do tempo de percepção e reação, além de apresentar os valores encontrados nos estudos de outros autores. No mesmo capítulo é feita uma revisão bibliográfica sobre o comportamento do motorista na zona de dilema.

A metodologia aplicada para obtenção de dados, a apresentação e análise dos resultados estão descritos **no Capítulo 4**.

Por fim, no **Capítulo 5** são feitas as conclusões e recomendações.

Apresenta-se a seguir, um fluxograma (Figura 1.1) com as atividades que compõem o estudo.



**Figura 1.1** – Síntese do Plano de Trabalho.

## 2. CONCEITUAÇÃO TEÓRICA

Para compreender esse estudo, é necessário conhecer as variáveis que ele abrange e também algumas características do cenário onde ocorre. São descritos nesse capítulo alguns aspectos sobre: velocidade, desaceleração, tempo de percepção e reação (TPR), cálculo do tempo de duração do tempo de amarelo e os parâmetros necessários para determinar a extensão das zonas do dilema e opção.

### 2.1. VELOCIDADE

O Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006) descreve os diversos tipos de velocidade existentes. O próprio Manual sugere que a velocidade é, dentre as características essenciais do tráfego, uma das variáveis mais complexas para se definir. No decorrer desse estudo será comumente citado o termo velocidade de aproximação, que pode ser considerada como a velocidade pontual, descrita no Manual da seguinte forma:

- *Velocidade pontual*: É a velocidade de um veículo quando passa por um determinado ponto ou seção da via. É também conhecida como velocidade de aproximação e será calculada no presente trabalho para o cálculo das taxas de desaceleração.

O mesmo Manual do DNIT (2006) também sugere que o cálculo da velocidade pontual deve ser calculado para ser utilizado em alguma das seguintes situações:

- Estudos de locais críticos ou de altos índices de acidentes, para comparar as velocidades “reais” com as “ideais” (em termos de segurança) e tentar relacioná-las com os acidentes.
- Determinação da velocidade de segurança nas aproximações de interseções e nas curvas.
- Determinação de elementos para o projeto geométrico de vias, como curvaturas, superelevação etc.

- Estudos da efetividade de projetos de controle de tráfego ou da implantação de dispositivos de sinalização (estudos antes/depois).
- Determinação de locais de ocorrência de velocidade excessiva, para fins de implantação de fiscalização seletiva.
- Verificação de tendências nas velocidades de vários tipos de veículos através de levantamentos periódicos em locais selecionados.
- Dimensionamento dos dispositivos de sinalização (altura de letras, setas etc.) e escolha do seu posicionamento.
- Cálculo do tempo de limpeza da área dos semáforos (amarelo).
- Determinação das distâncias de visibilidade e das zonas de não ultrapassagem.

Ainda segundo o Manual, há cinco fatores que podem influenciar a velocidade pontual do motorista. São eles:

1º *Motorista*: Características pessoais (sexo, idade, coordenação motora, personalidade), condições gerais da viagem (extensão, número de passageiros que transporta) etc;

2º *Veículo*: Peso, potência, ano e outras características.

3º *Via*: localização, uso do solo lindeiro, topografia local, grau de curvatura, largura e distância de visibilidade.

4º *Tráfego*: volume, densidade, existência ou não de tráfego oposto, entradas e saídas laterais e sinalização (semáforos, regulamentação de velocidade máxima, faixa dupla amarela).

5º *Ambiente*: condições do tempo, hora do dia, dia da semana etc.

## 2.2. DESACELERAÇÃO

Quando o motorista decide parar, ele deve adotar uma taxa de desaceleração compatível com a distância disponível para executar o processo de frenagem. No cenário desse estudo, o valor dessa taxa depende da distância do veículo até a faixa de retenção e da velocidade que o carro se encontra no instante em que o freio é acionado. A razão entre a variação da velocidade e o tempo necessário para esse evento é definido como desaceleração média. Através da cinemática, obtém-se a fórmula que é utilizada para o seu cálculo e será a mesma empregada nesse estudo:

$$d = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad [2.1]$$

Onde:

$d$  = desaceleração [m/s<sup>2</sup>];

$\Delta v$  = variação da velocidade no período [m/s];

$\Delta t$  = duração do período [s].

A variação da velocidade é a diferença entre a velocidade final e a inicial do veículo. Nessa pesquisa, a velocidade final considerada é zero, pois o veículo estará parado na linha de retenção. A partir das gravações dos vídeos das interseções, é determinada a velocidade inicial do automóvel e também registrado o tempo transcorrido entre acionamento do freio pelo motorista no início do amarelo até a sua parada na linha de retenção.

## 2.3. TEMPO DE PERCEPÇÃO E REAÇÃO (TPR)

Em seu livro, HOMBURGER (2003), descreveu o processo no qual o condutor avalia e reage a uma ação em 4 etapas:

*1º Percepção:* quando o motorista visualiza um objeto na rodovia ou um sinal de alerta;

*2º Identificação:* etapa onde é identificado o objeto percebido na etapa 1;

3º *Emoção*: o condutor decide que reação irá ser tomada; por exemplo, pisar nos freios, mudar de faixa, desviar do objeto ou ainda passar;

4º *Reação*: é a etapa na qual o motorista executa a ação decidida durante a etapa de emoção.

O tempo entre o início da etapa de percepção e o fim da reação é referido como PIEV ou, como é mais conhecido, tempo de percepção e reação (TPR). Pode-se dizer que o tempo de percepção e reação é aquele que o condutor necessitou para, a partir do momento em que visualiza uma situação que exigirá uma ação, gerar uma reação. Nesse estudo, a situação é a indicação no semáforo da luz amarela e a reação é o surgimento da luz de freio através do acionamento dos freios pelo motorista. O intervalo de tempo entre esses dois eventos é o tempo de percepção e reação.

GREEN (2000) *apud* RAKHA *et al* (2007) classificou as metodologias usadas para determinar os valores do TPR em 3 tipos: através de simulação, vias monitoradas e naturalisticamente. De acordo com RAKHA *et al* (2007), na primeira, costuma-se encontrar médias baixas, pois o motorista possui um menor campo de visão, imagens simplificadas e cenário limitado. Em vias monitoradas também são produzidos valores menores, pois o condutor costuma estar mais alerta comparado com as vias em condições normais. Nas observações naturalísticas, como é o caso desse estudo, os resultados encontrados possuem maior validade, porém nesse método ocorrem limitações, uma vez que não é possível avaliar a influência de variáveis específicas como o gênero e a idade dos condutores.

Na Engenharia de Tráfego, o tempo de percepção e reação é utilizado no cálculo do comprimento da zona de dilema, distâncias de frenagem e também no dimensionamento do tempo de amarelo (CAIRD *et al*, 2005), conforme será descrito nos itens 2.4 e 2.5.

## **2.4. TEMPO DE AMARELO**

O tempo de amarelo é o período transcorrido entre o final da indicação da luz verde do semáforo e o início da luz vermelha deste mesmo semáforo. Ele deve ser suficiente para permitir a frenagem a partir da velocidade máxima permitida da via e também suficiente



para que o condutor possa atravessar toda a extensão do cruzamento no caso da parada do veículo junto à linha de retenção não ser possível. Essa definição considera que o tempo de entreverdes é formado somente pelo tempo de amarelo.

Além disso, o tempo de amarelo tem a função de alertar ao motorista que a luz vermelha irá ser acionada, e antes que isso ocorra, ele deverá optar entre parar na linha de retenção ou atravessar a interseção (SANTOS, 2007).

A duração do tempo de amarelo pode ser dimensionada através das equações [2.2] e [2.3], elaboradas por GAZIS *et al* (1960) e que ainda são utilizadas por muitos autores. A primeira calcula o tempo necessário para que o veículo consiga parar com segurança na linha de retenção e a segunda procura garantir aos veículos que entraram no cruzamento, o tempo necessário para sair dele antes de aparecer o sinal verde na via transversal.

$$T_{am} = TPR + \frac{v}{2d} \quad [2.2]$$

$$T_{am} = TPR + \frac{v}{2d} + \frac{w+L}{v} \quad [2.3]$$

Onde:

$T_{am}$  = Tempo de amarelo [s];

**TPR = Tempo de percepção e reação [s];**

$v$  = velocidade de aproximação da via [m/s];

**$d$  = desaceleração do veículo durante a frenagem [m/s<sup>2</sup>];**

$w$  = largura da interseção [m];

$L$  = comprimento do veículo [m].

Os valores adotados para o tempo de amarelo variam em cada país. No Brasil, o Manual de Semáforos (DENATRAN, 1984) sugere que o tempo de duração deve ser de 3 segundos para vias com velocidade entre 30/40 km/h. Para velocidades maiores, o manual recomenda tempos maiores de amarelo. Na Inglaterra, o órgão de pesquisa desse país (TRL) chegou à conclusão que deve ser mantido o tempo de 3,0 segundos para a duração do amarelo e que o tempo de vermelho total seja ajustado para permitir uma

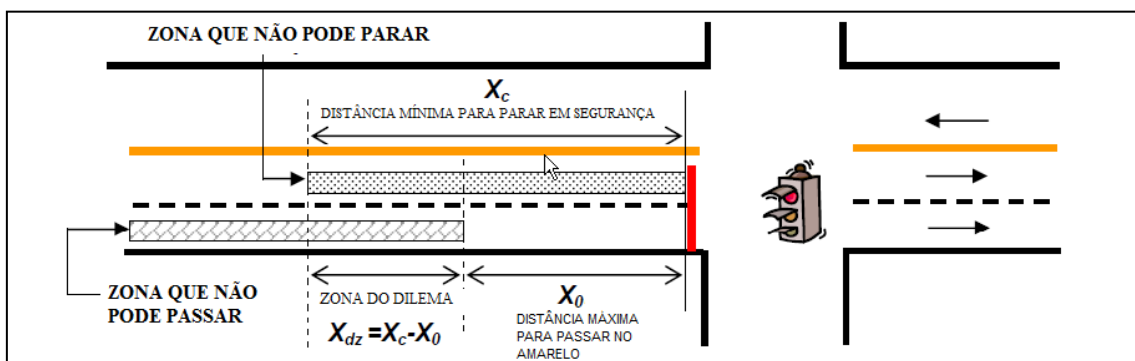
transição da interseção de forma segura. De uma forma geral, o tempo varia de 3 a 6 segundos.

Caso o tempo de amarelo esteja superdimensionado em determinada via, poderá ocasionar ciclos semaforicos longos, aumento da intolerância dos condutores ao amarelo, pois eles o enxergarão como uma extensão do verde. Em contra partida, o tempo de amarelo insuficiente poderá acarretar em freadas bruscas, avanço do sinal vermelho, colisões traseiras, transversais e ainda o surgimento da zona de dilema que poderá potencializar as situações descritas anteriormente. STRONG *et al.* (2003) sugerem que o tempo de amarelo insuficiente é a principal razão que leva os motoristas a avançarem o sinal vermelho e, conseqüentemente, estarem mais sujeitos a acidentes de trânsito.

É importante registrar a importância de um correto dimensionamento do tempo de amarelo e para isso, o TPR e os valores de desaceleração precisam representar o mais próximo possível a realidade do comportamento dos motoristas.

## 2.5. ZONA DE DILEMA

Um dos objetivos da fórmula para o cálculo do tempo de amarelo é a diminuição da chamada zona de dilema. Ela é definida como um espaço da via dentro do qual um veículo que se aproxima do cruzamento e avista o aspecto amarelo, não consegue parar na linha de retenção e nem transpor a interseção antes do término do tempo de amarelo ou vermelho geral em segurança (GAZIS *et al.*, 1960 *apud* LIU *et al.*, 1995), conforme ilustra a Figura 2.1.



**Figura 2.1** Formação da zona do dilema.

Fonte: Adaptado de Wei (2008)

O comprimento da distância na qual o veículo não consegue frear com segurança está representado na Figura 1 através de  $X_C$ , enquanto  $X_O$  é a distância máxima que o veículo deve estar da linha de retenção no início do amarelo para que consiga atravessar toda a interseção antes do final do tempo de amarelo ou do vermelho total. A diferença entre  $X_C$  e  $X_O$ , quando  $X_C > X_O$ , é o comprimento da zona de dilema. As equações [2.4] e [2.5] foram propostas por GAZIS *et al.* (1960) e calculam o comprimento de cada trecho mencionado.

$$X_C = V_0 \delta_2 + \frac{V_0^2}{2a_2} \quad [2.4]$$

$$X_O = V_0 \tau - W + \frac{1}{2} a_1 (\tau - \delta_1)^2 \quad [2.5]$$

Onde:

$V_0$  = velocidade de aproximação do veículo [m/s];

$\delta_2$  = **tempo de percepção e reação para parar [s];**

$a_2$  = **desaceleração máxima [m/s<sup>2</sup>];**

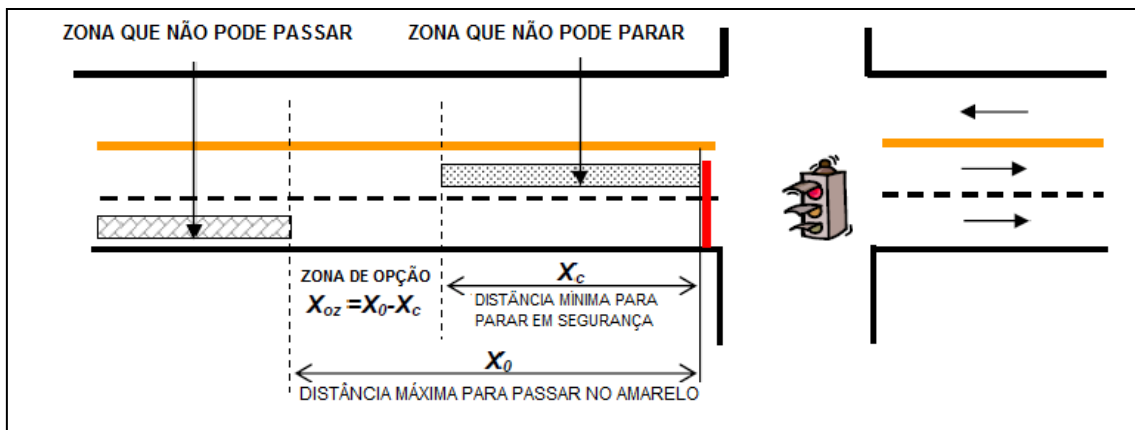
$\delta_1$  = tempo de percepção e reação para acelerar [s];

$a_1$  = aceleração máxima [m/s<sup>2</sup>];

$\tau$  = tempo de duração do amarelo [s];

$W$  = somatório do comprimento da largura do veículo e da interseção [m].

Quando  $X_C < X_O$ , ou seja, quando a distância máxima para passar no amarelo é maior que a distância mínima para frear com segurança, surge uma área chamada de zona de opção (WEI, 2008). O veículo que se encontra nesse trecho, pode com segurança tanto frear antes da linha de retenção como atravessar a interseção antes do término do amarelo. De acordo com WEI (2008), poucos estudos foram feitos abordando a zona de opção e muitas vezes os autores a consideram como zona de dilema. A ilustração dessa situação está na Figura 2.2.



**Figura 2.2.** Formação da zona de opção.

Adaptado de Wei (2008)

Numa zona de dilema, se o motorista resolver parar, pode ocorrer uma colisão traseira (caso algum veículo o siga muito próximo e não consiga aplicar uma taxa de desaceleração similar ou superior à aplicada pelo primeiro veículo) ou uma colisão transversal, pois o motorista que decide frear frequentemente invade a interseção. Se optar por prosseguir, pode ocorrer uma colisão transversal, pois não é possível sair da interseção antes do início do vermelho (COLELLA, 2008).

Para minimizar os efeitos da zona de dilema ou até mesmo eliminá-la, diversos autores propõem medidas que vão desde a extensão do tempo de verde (TARKO *et al.* 2006), utilização de flashes luminosos antes do aparecimento do amarelo e implantação de sensores no pavimento (MCCOY e PESTI, 2003), aumento do tempo de amarelo (URBANIK e COONCE, 2007) e o emprego de luzes amarelas à beira da via que alertam para uma interseção semafORIZADA adiante, conhecido como “Advanced Warning Systems” (HURWITZ, 2009).

Conforme expresso nas Equações [2.4] e [2.5], o tempo de percepção e reação e as taxas de desaceleração são variáveis presentes no cálculo do comprimento da zona de dilema, reforçando assim a necessidade desses valores estarem atualizados e representarem o máximo possível a reação do condutor.

No Brasil, tanto no meio acadêmico como nos órgãos gestores de trânsito, não foram encontrados estudos sobre o tema zona de dilema, fazendo com que muitas técnicas existentes em outros países para diminuir o espaço provocado por ela não sejam

aplicadas no país. No próximo capítulo são apresentados os estudos de outros autores sobre a zona de dilema, além do tempo de percepção e reação, taxas de desaceleração e ainda as metodologias para coleta de dados dos veículos próximos à linha de retenção.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem por objetivo registrar os resultados dos estudos encontrados na literatura acerca dos seguintes temas: tempo de percepção e reação, desaceleração, comportamento do motorista nas zonas de dilema e os métodos de coleta de dados dos veículos em interseções semaforizadas.

#### 3.1. TEMPO DE PERCEPÇÃO E REAÇÃO

##### 3.1.1. Pesquisas anteriores

Um dos primeiros estudos que tiveram como objetivo medir o TPR dos motoristas foi realizado por GAZIS *et al.* (1960). A pesquisa observou 87 condutores que se aproximavam de uma interseção semaforizada e foi medido o intervalo de tempo entre o acionamento da luz amarela e a luz de freio do veículo. Em todos os casos, o automóvel estava a menos de 61 metros da linha de retenção quando as luzes de freio foram ativadas e a média dos valores encontrados foi de 1,14 segundos. Sua distribuição está representada na figura 3.1.

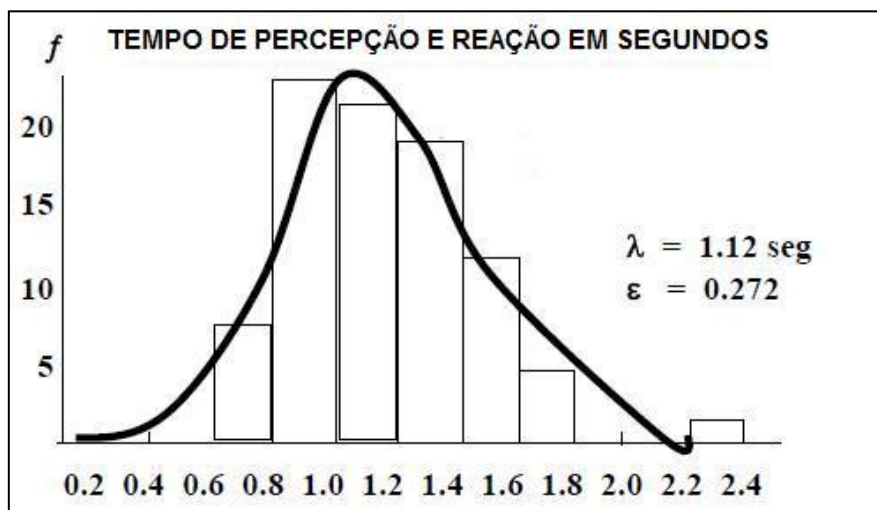


Figura 3.1 Distribuição TPR encontrados por Gazis.

Outro estudo para identificar o TPR foi realizado por WORTMAN e MATTHIAS (1983), que testaram 839 motoristas e descobriram um tempo de reação médio de

aproximadamente 1,3 segundos, com um desvio padrão de aproximadamente 0,6 segundos. O tempo de reação do 85º percentil foi 1,8 segundo.

As medidas foram registradas em seis diferentes cruzamentos e em cada local produziram diferentes valores para os parâmetros estatísticos. O TPR variou de 1,09 a 1,55 segundos, o desvio padrão entre 0,44 a 0,82 segundos e os valores de 85º percentil, variaram entre 1,5 e 2,1 segundos, em diferentes locais geográficos.

CHANG *et al.* (1985) realizaram observações em campo de 579 motoristas em 13 cruzamentos diferentes e determinaram o valor médio do TPR de 1,30 segundos. O 85º percentil de tempo de reação foi estimado em 1,9 segundo, enquanto o 95º percentil tem o valor em 2,5 segundos. Um aspecto encontrado nesse estudo é que os veículos que se aproximavam da linha de retenção com velocidade superior a 64 Km/h possuíam TPR menor que nos outros exemplos.

Os autores sugerem a existência de lapso de tempo não identificado em seus dados, cujo valor médio foi estimado em aproximadamente 0,1 segundo. Indicaram que, o que parece ser o 85º percentil no valor da resposta em suas medidas, pode estar mais perto do 90º ou 95º percentil do valor do verdadeiro tempo de reação para frear, se o efeito do lapso de tempo de resposta for abandonado.

CAIRD *et al.* (2005) realizaram pesquisa no intuito de verificar se o TPR em 1,0 segundo sugerido pelo ITE (1994) é suficiente para diferentes faixas etárias. Para isso, separou 77 motoristas (41 homens e 36 mulheres) em 4 grupos (18–24, 25–35, 55–64 e maiores de 65 anos), onde todos possuíam mais de 3 anos de carteira de habilitação e dirigiam no mínimo 5000 km/ano, conforme a Tabela 3.1.

**Tabela 3.1.** Dados sobre amostra utilizada por Caird *et al.* (2005).

<b>Faixa Etária</b>	<b>N</b>	<b>Média idade</b>	<b>Km/ano</b>
18 - 24	20	20.60	25500
25 – 35	20	27.70	24482
55 – 64	20	58.10	21677
Maiores 65	17	70.00	21677
Total/Média	77	43.10	23494

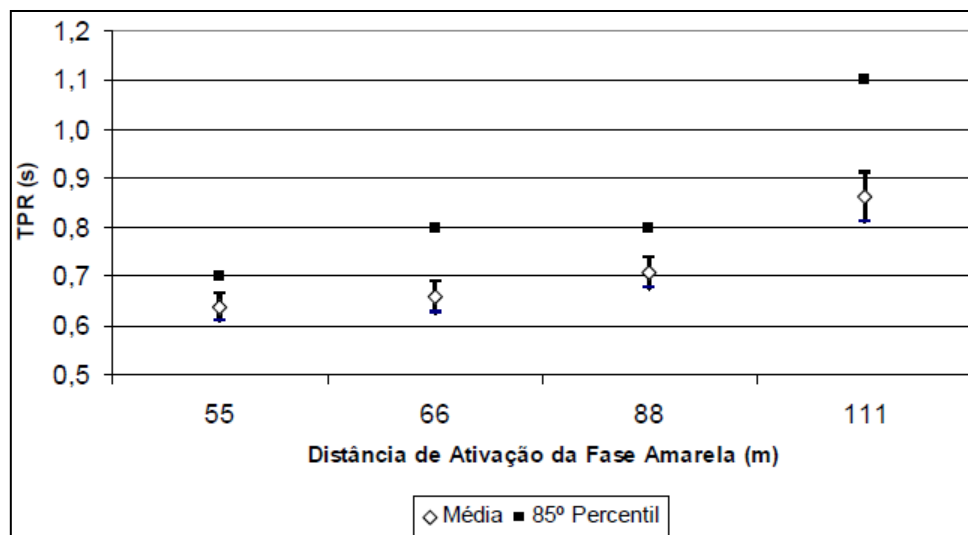
Fonte: Caird (2005).

Todos os condutores realizaram o teste em um simulador configurado para representar vias de 2 e 4 faixas, 6 tempos de amarelos diferentes e velocidade média de 70km/h. Durante a simulação, o motorista estava sujeito a 36 interseções diferentes, onde de forma aleatória o sinal poderia estar aberto, fechado ou com a luz de indicação amarela sendo ativada. Os resultados encontrados indicam que o TPR de 1,0 segundo é suficiente e não foram registradas diferenças significativas entre as diferentes faixas etárias analisadas.

CAIRD *et al.* (2007) elaboraram estudo similar ao realizado em 2005, com a diferença que os condutores seriam avisados com antecedência sobre a existência do semáforo. Esse estudo teve por objetivo testar a influência dos sistemas inteligentes de transportes no comportamento do motorista nas interseções. Os resultados encontrados indicaram que não houve diferenças significativas dos valores de TPR entre os grupos de idades diferentes (jovens x adultos), mesmo resultado encontrado no seu estudo anterior. Entretanto, devido ao fato dos condutores já estarem cientes da chegada do semáforo, ocorreu aumento da média do TPR.

COLELLA (2008) estudou o comportamento do motorista em interseções semaforizadas utilizando dados obtidos através da pesquisa de RAKHA *et al.* (2007). As simulações foram feitas em uma pista de testes no *Virginia Tech Transportation Institute*, nos EUA. A amostra foi composta por 60 motoristas voluntários igualmente divididos em função do gênero, dos quais 32 tinham idade inferior a 65 anos. A fase amarela se iniciava quando o veículo estava a 55, 66,88 ou 111 metros da linha de retenção. Sobre o TPR, concluiu que fatores como gênero e idade não influenciaram nos TPR encontrados, diferentemente das situações onde as simulações eram feitas em aclive e declive; para estes casos constatou que o resultado encontrado para o segundo tende a ser inferior ao primeiro, sugerindo que tal fato pode ocorrer devido à dificuldade em parar o automóvel em declive, gerada pela componente peso do veículo. Os resultados encontrados estão expressos na Figura 3.2 e Tabela 3.3.





Fonte: Colella (2008)

**Figura 3.2.** TPR médio (com intervalo de confiança) e 85º percentil para cada distância na desaceleração.

**Tabela 3.2.** Principais valores obtidos para o TPR na desaceleração.

DAA (m)	Amostras	Mínimo (s)	IC - Lim. Inferior (s)	Desvio Padrão (s)	Média (s)	IC - Lim. Superior (s)	85º Percentil (s)	Máximo (s)
55	72	0,40	0,61	0,12	0,64	0,67	0,70	1,00
66	92	0,30	0,62	0,16	0,66	0,69	0,80	1,30
88	104	0,20	0,67	0,17	0,71	0,74	0,80	1,40
111	103	0,40	0,81	0,25	0,86	0,91	1,10	1,80

Fonte: Colella (2008).

A Tabela 3.3 apresenta o resumo dos estudos encontrados na revisão bibliográfica.

**Tabela 3.3.** Resumo revisão bibliográfica sobre TPR.

<b>Estudo</b>	<b>Tipo de Estudo</b>	<b>TPR Médio (s)</b>	<b>Intervalo de Variação (s)</b>	<b>Mediana (s)</b>	<b>85° Percentil</b>
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 (V<64 km/h) 0,9 (V>64 km/h)	0,70 – 1,55	1,10 (V<64 km/h) 0,90 (V>64 km/h)	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	0,64 (55m) 0,86 (111m)	-	-	0,8 (55m) 1,1 (111m)

Fonte: Adaptado de Caird *et al* 2005.

### 3.1.2. Considerações sobre os TPR encontrados na bibliografia

Pode-se concluir que o valor médio encontrado na literatura para o TPR ficou próximo de 1 segundo, o mesmo sugerido pelo ITE (1994) para o dimensionamento do tempo de amarelo. Entretanto é necessário registrar algumas divergências verificadas na bibliografia sobre esse tema, principalmente sobre a influência da idade e gênero do condutor do veículo.

Há de ser observado que em todos os exemplos encontrados na revisão bibliográfica, independente da metodologia aplicada (simulação ou observação), a pesquisa não foi realizada no Brasil. Nesse aspecto, após a conclusão desse trabalho, será possível verificar se há ou não diferenças entre o comportamento do motorista brasileiro e o de outros países.

Sobre os métodos utilizados para obtenção de dados, pode-se observar que quatro são feitos através de simulação (Tabela 3.3) e, conforme já mencionado no Capítulo 2, esse tipo de coleta pode não representar com veracidade a realidade.

## **3.2. TAXAS DE DESACELERAÇÃO**

### **3.2.1. Pesquisas anteriores**

De forma similar ao tempo de percepção e reação, um dos primeiros estudos que calcula a desaceleração dos veículos foi feito por GAZIS *et al.* (1960). Em sua pesquisa, constatou que em aproximações de baixas e médias velocidades as taxas eram inferiores a  $4 \text{ m/s}^2$ , enquanto em aproximações com velocidades elevadas (superiores a  $72 \text{ km/h}$ ) esse valor chegava até  $5,5 \text{ m/s}^2$ .

WILLIAMS (1977) realizou estudo em cruzamento de Connecticut (EUA) com objetivo de fornecer uma compreensão das respostas do condutor durante o intervalo de amarelo em interseções urbanas. O autor observou que  $2,5 \text{ m/s}^2$  foi a média da taxa de desaceleração para velocidades entre  $16,1$  e  $40,2 \text{ km/h}$ .

PARSONSON e SANTIAGO (1980) relataram que  $3,0 \text{ m/s}^2$  é um valor razoável para a taxa de desaceleração após estudo em 54 veículos distribuídos em quatro municípios do sudoeste dos Estados Unidos.

WORTMAN e MATTHIAS (1985) realizaram estudo em um total de seis cruzamentos em áreas metropolitanas de Phoenix e Tucson, no estado de Arizona (EUA). Foi determinada a velocidade de aproximação, as taxas de desaceleração, o tempo de percepção e reação e ainda a distância que o veículo se encontrava da linha de retenção. Todos os dados foram coletados para o primeiro veículo que se aproximava da interseção. Os resultados encontrados para desaceleração variaram de  $2,1$  a  $4,2 \text{ m/s}^2$  e a média foi de  $3,5 \text{ m/s}^2$ , com a velocidade no instante de surgimento do amarelo variando de  $48,3$  a  $80,5 \text{ km/h}$ .

Outro estudo que mediu a desaceleração dos veículos foi realizado por CHANG *et al.* (1985), que em 7 interseções utilizou imagens coletadas através de vídeos e encontrou

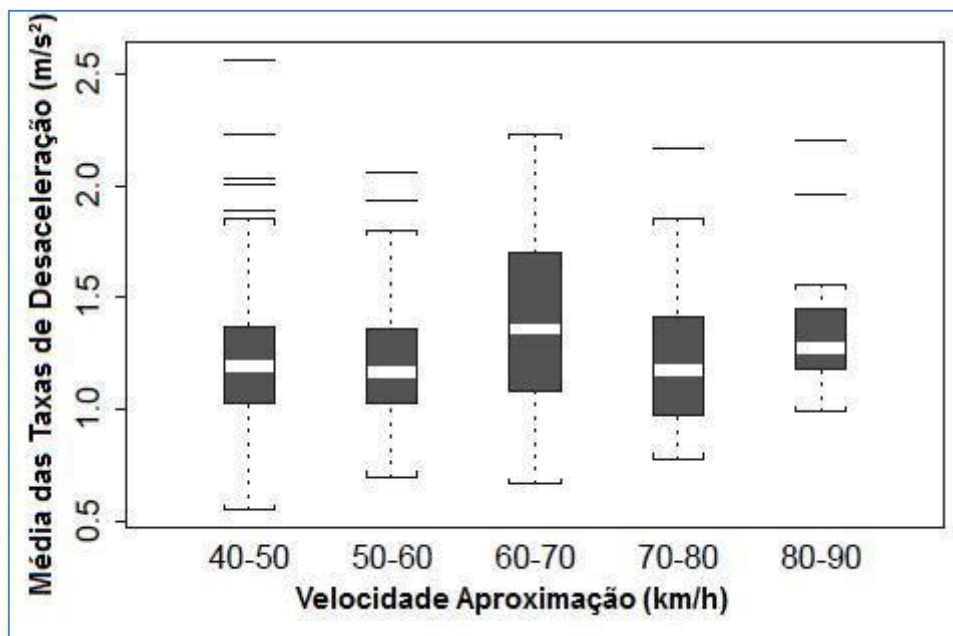
uma média de 2,9 m/s<sup>2</sup> para a desaceleração. Em todos os carros, a velocidade de aproximação era superior a 32 km/h. O estudo concluiu que a velocidade de aproximação e distância até a linha de retenção no início do amarelo foram as variáveis que mais influenciam nas taxas de desaceleração e nos tempos de percepção e reação.

WANG *et al.* (2005) realizaram estudo com objetivo de determinar a desaceleração dos veículos em interseções semaforizadas durante o processo de frenagem e a influência da velocidade de aproximação nesses resultados. Para isso, utilizaram um conjunto de dados obtidos em mais 100 veículos na área urbana de Atlanta (EUA) durante o período de 6 a 12 meses. Todos os carros eram equipados com GPS (*Global Positioning System*), acelerômetros, sensores de freios e diversos outros equipamentos de monitoramento de veículos. As informações eram geradas a cada 1 segundo e periodicamente transferidas para o servidor do projeto para serem analisadas. Os autores destacam que devido à tecnologia aplicada, o nível de precisão dos resultados é maior se comparado aos estudos até então realizados, pois é possível saber a distância praticamente exata percorrida pelo veículo desde o início da frenagem até o instante da parada e ainda a velocidade de aproximação a cada 1 segundo durante esse processo. No final das pesquisas chegaram às seguintes conclusões:

- Não há relação clara entre a média e máxima taxa de desaceleração com a velocidade de aproximação;
- Motoristas em alta velocidade possuem taxas de desaceleração maior no início do processo de frenagem. Em velocidades baixas, as taxas de desaceleração tendem a ser uniformes;
- Motoristas com velocidade de aproximação alta geralmente necessitam de mais tempo e distância no processo de desaceleração;
- Em 70% das viagens observadas, a maior taxa de desaceleração foi obtida em menos de 5 segundos antes da parada total do veículo;

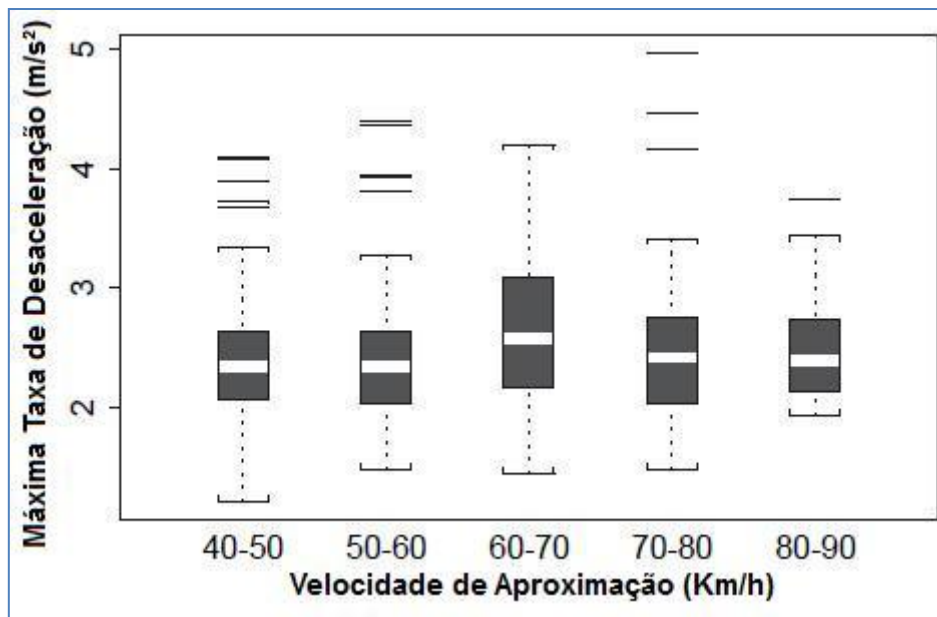
- Em 87,6% da amostra, a taxa de desaceleração máxima registrada foi inferior a 3,0 m/s<sup>2</sup>;
- Existe uma relação polinomial entre as taxas de desaceleração e a velocidade nos casos em que o condutor freia o veículo até parar;
- A velocidade de aproximação possui papel fundamental no comportamento dos motoristas e conseqüentemente nas taxas de desaceleração.

As Figuras 3.3 e 3.4 apresentam um resumo dos valores encontrados para uma determinada velocidade de aproximação:



Fonte: Wang *et al* (2005).

**Figura 3.3.** Valores para desaceleração média encontrado por Wang *et al* (2005).



Fonte: Wang *et al* (2005).

**Figura 3.4.** Valores para desaceleração máxima encontrado por Wang *et al* (2005).

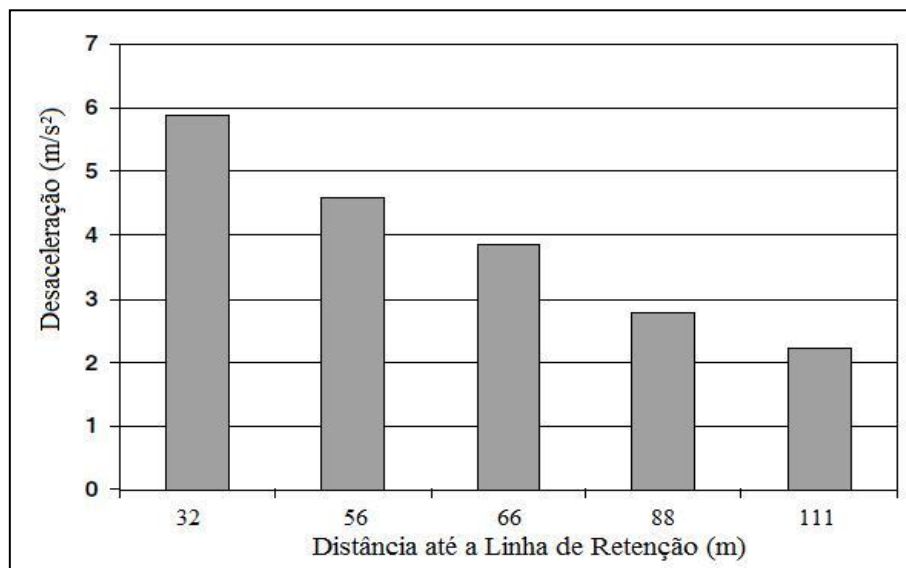
CAIRD *et al* (2005), na mesma pesquisa em que estudou o TPR, mediu a desaceleração dos condutores submetidos ao simulador. O autor registrou que a taxa de desaceleração para pessoas acima de 50 anos foi de 3,7 m/s<sup>2</sup>, enquanto no grupo mais jovem (< 50 anos) a média foi de 4,2 m/s<sup>2</sup>.

EL-SHAWARBY *et al* (2005) realizaram estudo no intuito de determinar as taxas de desaceleração dos veículos no instante em que surge a luz amarela do semáforo. Todos eram equipados com GPS (*Global Positioning System*) em interseções de uma pista teste de 3,5 km da universidade de Virgínia (EUA). Foram selecionados 60 motoristas que deviam trafegar a uma velocidade de 72 Km/h e atravessar a interseção com diferentes tempos de amarelo, o que gerou um total de 851 eventos. Os autores registraram todos os dados dos condutores para verificar posteriormente a influência do sexo e da idade sobre os resultados. Ainda destacaram os seguintes pontos que faz com que a pesquisa possa ser considerada única:

- Não havia veículos à frente e nem atrás do carro de onde se estava medindo a desaceleração, evitando assim a influência do tráfego no comportamento do motorista;

- Os instrumentos que equipavam os veículos detectavam o instante em que o motorista pressionava o pedal do freio ou retirava o pé do acelerador em apenas um décimo de segundo após essas ações;
- Os controladores de tráfego só acionavam a luz amarela do semáforo quando o veículo estava a uma distância pré-selecionada da linha de retenção, facilitando assim a comparação de resultados;

Os resultados indicaram uma média de  $3,27 \text{ m/s}^2$  entre todos os condutores que realizaram o teste. Nos casos em que os veículos começaram o processo de frenagem distante da linha de retenção ( $> 111$  metros) a média da desaceleração foi de  $2,2 \text{ m/s}^2$ , enquanto nos casos em que processo se iniciou próximo ( $< 32$  metros) a média foi de  $5,9 \text{ m/s}^2$ , conforme ilustrado na Figura 3.5. Sobre a influência da idade e do sexo sobre os resultados, foi verificado que os homens apresentam taxas superiores às mulheres e que os condutores com menos de 40 e mais de 60 anos de idade apresentaram taxas maiores de desaceleração comparados a faixa etária entre 40 e 59 anos.



Fonte: El-Shawarby *et al* (2005).

**Figura 3.5.** Valores para desaceleração média encontrado por El-Shawarby *et al* (2005).

GATES *et al.* (2007) realizaram estudo através da filmagem de 6 interseções em Madison, Wisconsin (EUA), durante o período de abril a agosto de 2006. Nesse estudo, foram observados dois grupos de veículos: o primeiro a parar na interseção e o último a

atravessar após início do amarelo. No primeiro caso, foram coletados dados de um total de 463 carros e no segundo 435. Só foram coletados dados de veículos que estavam a uma velocidade entre 40 e 80 km/h e localizados dentro de zona do dilema. O estudo teve como objetivos determinar o tempo de percepção e reação dos motoristas, calcular a desaceleração para o primeiro veículo que vai parar na interseção e caracterizar as situações onde ocorre o avanço do sinal vermelho. Os autores afirmaram que devido à maneira como a pesquisa foi realizada, não foi possível detectar a idade, sexo e o tempo de carteira de habilitação dos motoristas. A Tabela 3.4 apresenta dados sobre a gravação realizada pelos autores.

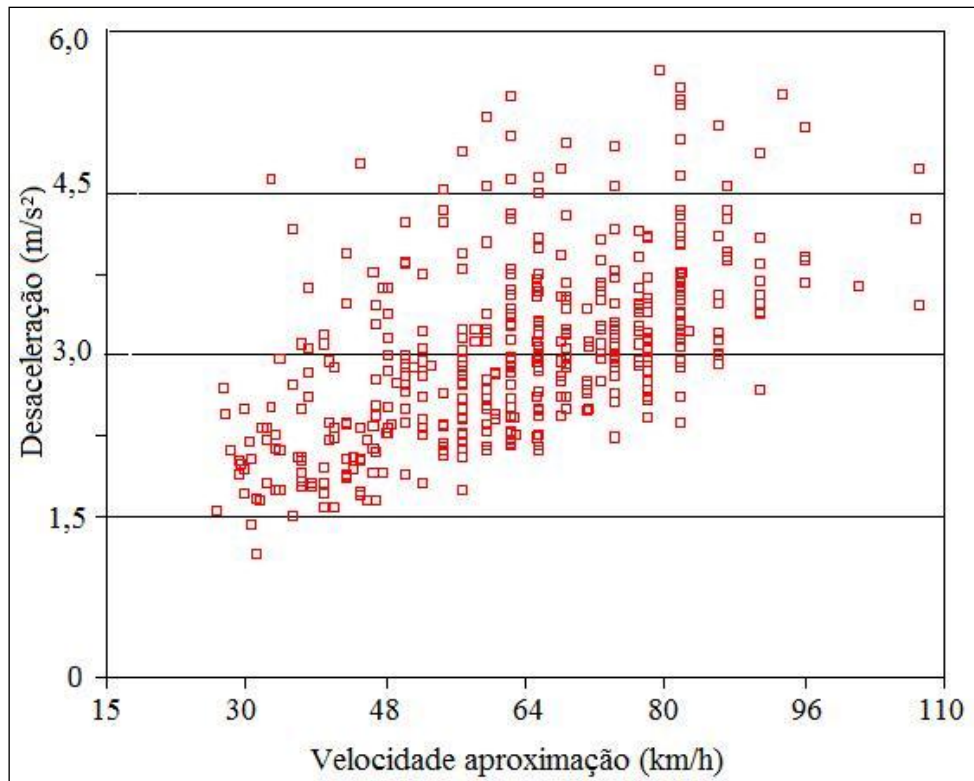
**Tabela 3.4.** Dados dos locais das interseções escolhidas por Gates (2007).

Características	Interseção					
	1	2	3	4	5	6
Dias de Gravação	4	2	3	1	2	1
Total de horas	8	6	14	4	10	4
Número de faixas	4	3	2	3	2	3
Velocidade Regulamentada (km/h)	40	64	80	72	64	56
Tempo de amarelo (s)	3,5	4,5	5,0	4,0	4,0	3,5
Vermelho total (s)	3,0	1,75	2,0	1,5	1,0	1,0
Comprimento interseção (m)	27	27	38	24	27	21
Controle Semáforo	Tempo Fixo	Atuado	Atuado	Atuado	Atuado	Tempo Fixo
Área da Interseção	Urbana	Urbana	Subúrbio	Urbano	Urbano	Subúrbio
Distância interseção anterior (m)	320	1125	Isolada	1287	1125	800

Fonte: Adaptado de Gates (2007).

Os resultados indicaram que os veículos que estavam a uma velocidade superior a 64 km/h apresentaram taxas de desaceleração maiores comparados aos que estavam com velocidades menores. O valor médio encontrado para o 85º percentil da desaceleração nas 6 interseções foi de 3,7 m/s<sup>2</sup> e a Figura 3.6 apresenta a distribuição da desaceleração em função da velocidade de aproximação.





Fonte: Gates *et al* (2007)

**Figura 3.6.** Valores para desaceleração em função da velocidade de aproximação.

A Tabela 3.5 apresenta o resumo dos valores das taxas de desaceleração encontrados.

**Tabela 3.5.** Resumo da revisão bibliográfica sobre as taxas de desaceleração.

<b>Autor</b>	<b>Tipo de Estudo</b>	<b>Desaceleração Média (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Velocidade (km/h)</b>
GAZIS <i>et al.</i> (1960)	Observação	3,2	-
WILLIAMS (1977)	Observação	2,5	-
PARSONSON e SANTIAGO (1980)	Observação	3,0	Entre 25 e 40
WORTMAN e MATIAS (1983)	Observação	3,5	Entre 48 e 80
CHANG (1985)	Observação	2,9	Superior a 32
VILLANOVA (1985)	Observação	2,8	-
ITE (1992)	Recomendação	3,0	-
WANG <i>et al.</i> (2005)	Veículo Instrumentado	2,4 e 2,7	Entre 40 e 60 km/h e 60 e 70 km/h
CAIRD <i>et al.</i> (2005)	Veículo Instrumentado	3,7 (> 50 anos) 4,2 (< 50 anos)	-
EL-SHAWARBY <i>et al</i> (2005)	Veículo Instrumentado	3,27 (média) 2,2 (> 111 metros) 5,9 (< 32 metros)	72
GATES <i>et al.</i> (2007)	Observação (filmagem)	3,7	40 e 80
COLELLA (2008)	Veículo Instrumentado	4,17 (55 metros) 3,71 (66 metros) 2,73 (88 metros) 2,13 (111 metros)	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

### **3.2.2. Considerações sobre os resultados de taxa de desaceleração encontrados na bibliografia**

A maioria dos estudos mencionados que calculam a taxa de desaceleração, além de compararem os resultados encontrados com outros estudos, utilizam como parâmetro o valor sugerido pelo *Traffic Engineering Handbook* (ITE, 1992) para uma desaceleração confortável, que é de aproximadamente 3,0 m/s<sup>2</sup>.

No Brasil, órgãos públicos como a CET-SP utilizam o valor sugerido por VILLANOVA (1985) para a desaceleração de 2,8 m/s<sup>2</sup>. O autor calculou essa taxa em uma única interseção na cidade de São Paulo.

É importante registrar que os valores encontrados por WANG *et al.* (2005) foram relativamente mais baixos se comparado aos outros autores. Isso pode ser justificado pelo fato de não considerarem somente a desaceleração dos veículos iniciada no instante da mudança semafórica de verde para amarelo. Além disso, não foi considerado somente o primeiro veículo que se aproximava da linha de retenção, ou seja, os carros de onde os dados foram coletados podem ter sofrido influência no processo de frenagem de outro veículo que parou à sua frente.

GATES *et al.* (2007) apresentaram estudo cujo objetivo e metodologia utilizados são semelhantes ao presente trabalho, pois coletaram os dados dos veículos através de filmagens, registraram os veículos que estavam dentro da zona do dilema e consideraram somente o primeiro veículo a parar. Como posteriormente os resultados serão comparados, é importante que as variáveis não tenham sofrido muitas alterações. WORTMAN e MATIAS (1985), em estudo complementar ao realizado por eles mesmos em 1983, somente aumentaram o tempo de amarelo e perceberam que a taxa de desaceleração variou significativamente.

### 3.3. COMPORTAMENTO DO MOTORISTA NAS ZONAS DE DILEMA E OPÇÃO

#### 3.3.1. Pesquisas anteriores

PAPAIOANNOU (2007) realizou estudo em uma via localizada no subúrbio da cidade de Tessalônica, Grécia. O autor coletou os seguintes dados de 2452 veículos:

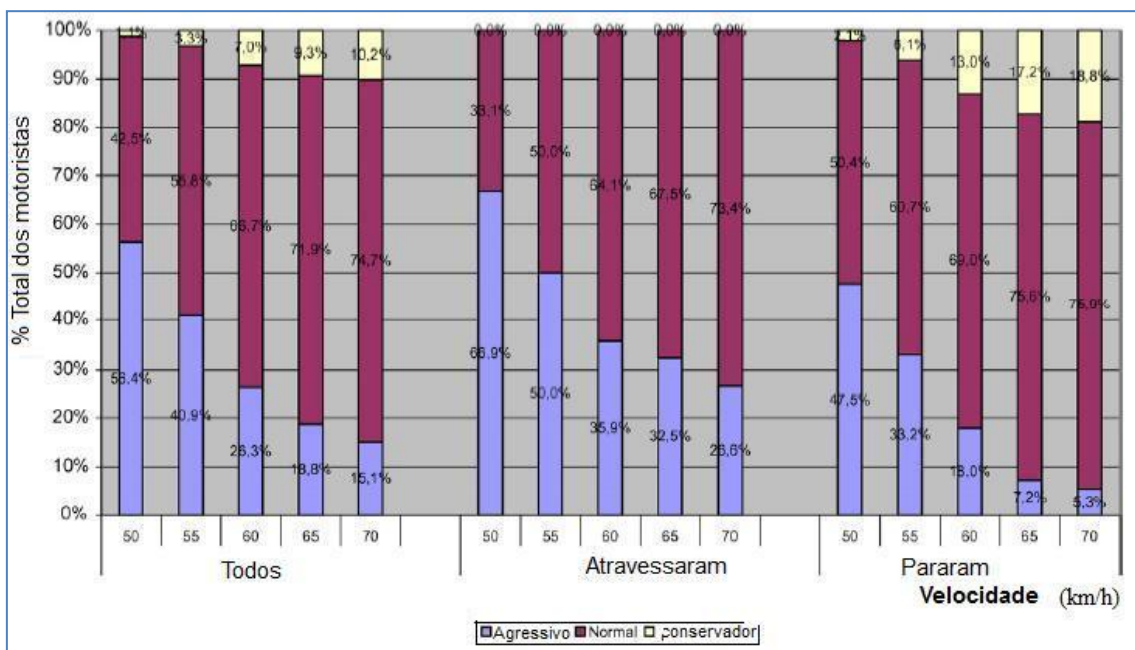
- Velocidade de aproximação de cada veículo;
- Local em que os veículos estavam em relação à linha de retenção no instante em que surge o amarelo;
- Idade e sexo dos condutores. A idade foi subjetivamente atribuída a um dos três grupos: novos, meia idade e idosos.

A coleta dos dados foi realizada através da filmagem da via. Para localizar a distância de cada veículo em relação à linha de retenção, foram feitas marcações na pista a cada 5 metros a partir da interseção. O objetivo do estudo era registrar a atitude do motorista diante o acionamento do amarelo e, dependendo da reação, atribuir ao condutor uma das três categorias:

- Conservadores: Aqueles que no início do amarelo estão a uma distância segura de parada da linha de retenção ( $X_r$ ) menor que a distância crítica ( $X_d$ ) e mesmo tendo condições de prosseguir resolvem parar ao invés de atravessar;
- Normal: Quando o condutor reage de maneira já esperada, ou seja, param na linha de retenção após início do amarelo quando  $X_r > X_d$  ou resolvem passar quando  $X_r < X_d$ ;
- Agressivo: Os condutores que no início do amarelo estavam a uma distância segura de parada maior que a distância crítica ( $X_r > X_d$ ), mas mesmo assim aceleraram para conseguir atravessar no amarelo. BONSALL *et al.* (2005) *apud*

PAPAIOANNOU (2007) sugerem também que os motoristas que realizam freadas e movimentos bruscos, mantêm pouca distância em relação ao veículo à sua frente e andam com velocidade superior a permitida na via, também são considerados agressivos.

As distâncias de parada de segurança e crítica foram calculadas através das equações 2.3 e 2.4, respectivamente. O autor considerou a desaceleração de  $3,5 \text{ m/s}^2$  para todos os veículos e o tempo de percepção e reação de 1,5 segundos. Os resultados encontrados estão na Figura 3.7 e Tabela 3.6.



Fonte: Papaioannou (2007).

**Figura 3.7.** Distribuição (%) do comportamento dos condutores.

**Tabela 3.6.** Distribuição (%) do comportamento dos condutores.

Velocidade (km/h)	Reação	Agressivo	Conservador	Normal
50	Todos	0.564	0.425	0.011
	Atravessou	0.669	0.331	0.000
	Parou	0.475	0.504	0.021
55	Todos	0.409	0.558	0.033
	Atravessou	0.500	0.500	0.000
	Parou	0.332	0.607	0.061
60	Todos	0.263	0.667	0.070
	Atravessou	0.359	0.641	0.000
	Parou	0.180	0.690	0.130
65	Todos	0.188	0.719	0.093
	Atravessou	0.325	0.675	0.000
	Parou	0.072	0.756	0.172
70	Todos	0.151	0.747	0.102
	Atravessou	0.266	0.734	0.000
	Parou	0.053	0.759	0.188

Fonte: Adaptado de Papaioannou (2007).

A conclusão foi que mais de 50% dos condutores que se aproximavam da interseção excederam o limite de velocidade. Desses, o 85º percentil foi de 63 km/h para uma velocidade máxima de 50 km/h. O autor suspeita que a causa seja a familiaridade dos motoristas com a via. Esse fator fez com que aproximadamente 56,4% dos condutores tivessem comportamento agressivo. A taxa de 42,5 e 1,1% corresponde à classificação de normal e conservadores, respectivamente. Quanto à idade, diferentemente de outros estudos, foi observado que motoristas mais velhos possuíam uma velocidade de aproximação maior que os mais novos. No que se referem ao sexo, as mulheres apresentaram menor índice de agressividade em relação aos homens. E por fim, o autor registra que a velocidade de aproximação influi significativamente na caracterização do motorista entre agressivo, conservador e normal.

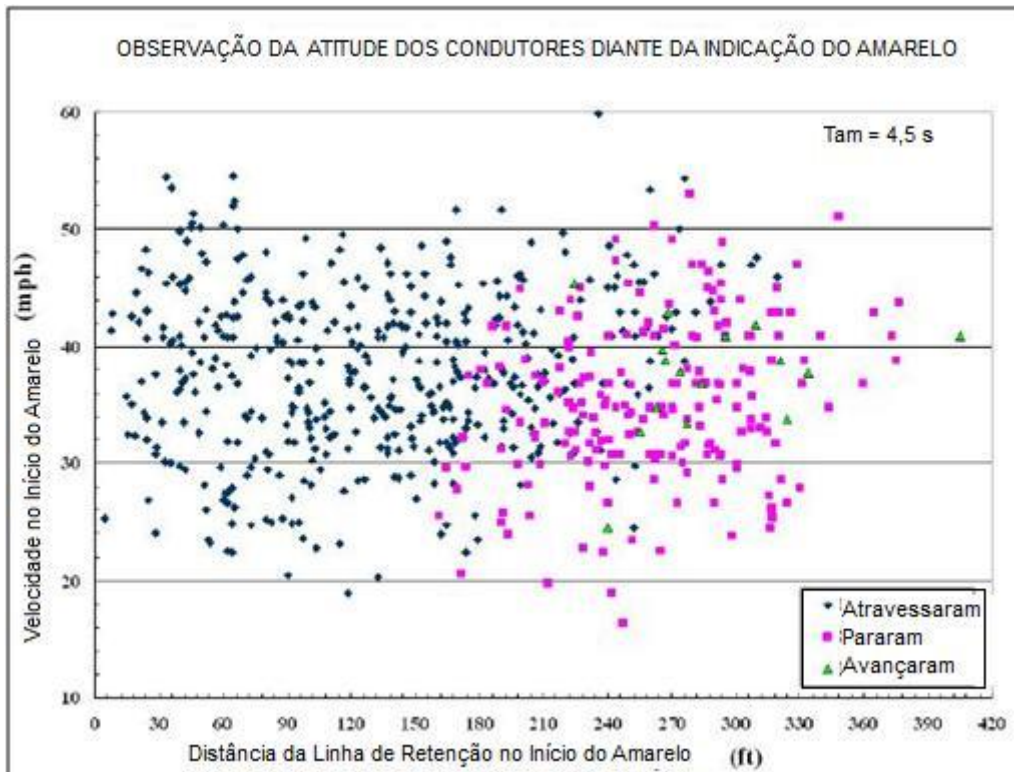
Outro estudo abordando as características dos motoristas na zona de dilema foi realizado por GATES *et al.*(2007). O autor sugeriu que os seguintes fatores aumentam a probabilidade dos motoristas na zona de dilema optar por avançar o sinal vermelho no instante em que surge a luz amarela:

- distâncias elevadas do veículo em relação à linha de retenção no momento do início do amarelo;

- veículos mais pesados como ônibus e caminhões;
- presença de veículos nas faixas laterais;
- ausência de pedestres, bicicletas ou veículos para atravessar a interseção;
- tempo de amarelo curto.

O autor registrou que 56 dos 898 veículos que estavam na zona de dilema avançaram o sinal vermelho, ou seja, 6,2% do total. Desses, 16,1% eram veículos pesados. O tempo transcorrido após o início do vermelho dos veículos que ultrapassaram a linha de retenção foi de 0,84 segundos para o 85º percentil, indicando que os condutores não optaram por avançar propositalmente.

WEI (2008) realizou pesquisa na cidade de OHIO (EUA) no intuito de elaborar um modelo matemático capaz de calcular o comprimento da zona de dilema. Em uma interseção selecionada de velocidade máxima de 80 km/h e tempo de amarelo de 4,5 segundos. Através de filmagem, observou 679 veículos no início da indicação do amarelo e dividiu os veículos em três grupos: os que passam no sinal amarelo; param na linha de retenção e aqueles que avançam no sinal vermelho. Através da coleta de dados, detectou que aproximadamente 90% dos veículos optaram por prosseguir quando estavam dentro da zona de opção. A figura 3.7 apresenta a posição dos veículos em relação à linha de retenção no instante em que surge a indicação amarela.



Fonte: WEI (2008).

**Figura 3.8.** Comportamento do motorista no início da indicação amarela.

LIU *et al.* (2008) realizou estudo em campo e através de filmagem em 6 interseções com alto índice de acidente em Maryland (EUA), onde coletou dados de 1123 condutores no momento em que a luz amarela é acionada. De forma similar a PAPAIOANNOU (2007), dividiu os condutores em três grupos: agressivos, normal e conservadores. O objetivo do seu trabalho foi identificar o impacto dos seguintes fatores na decisão do motorista de prosseguir ou parar:

- velocidade média do tráfego;
- tipo de veículo;
- uso de celular;
- volume do tráfego;
- presença de sincronismo nos semáforos.

As Tabelas 3.7 e 3.8 apresentam algumas características das interseções e os resultados encontrados.



**Tabela 3.7.** Características das interseções

Interseção	T. amarelo (s)	Duração ciclo (s)	Distância Crítica (m)
193@201	4.5	150	72
650@Metzerott	5	150	62
Randolph@Glennian	4	120	82
410@Belcrest	4.5	150	60
410@Adelphi	5	150	54
193@Mission	5.5	150	84

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

**Tabela 3.8.** Reação dos condutores frente à luz amarela do semáforo.

Interseção	Nº amostra	Agressivos (Passaram)	Normal	Conservadores (Pararam)
193@201	292	13	260	19
650@Metzerott	360	28	292	40
Randolph@Glennian	77	6	65	6
410@Belcrest	128	6	115	7
410@Adelphi	150	10	125	15
193@Mission	116	9	97	10
Summary	1123	72	954	97

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

O autor chegou às seguintes conclusões sobre os condutores que se aproximavam da linha de retenção no instante em que o amarelo foi acionado:

- Veículos que apresentavam velocidade de aproximação maior que a velocidade regulamentada pela via se enquadraram na situação de agressivo;
- A maioria dos condutores que apresentou ação agressiva era do sexo masculino;
- As mulheres apresentaram ação conservadora;
- Motoristas que utilizavam celulares apresentaram comportamento conservador;

- Carros do tipo van apresentaram comportamento conservador, enquanto o tipo esportivo agiu de forma agressiva.

### **3.3.2. Considerações sobre os resultados encontrados na bibliografia**

Muitos estudos registraram que as diversas variáveis envolvidas na zona de dilema influenciam a decisão a ser tomada pelo motorista entre parar ou prosseguir diante do sinal amarelo. A indecisão pode gerar colisões traseiras ou ainda abalroamento transversal. Os autores, além de registrarem o comportamento dos condutores, propõem medidas no intuito de minimizar ou eliminar a zona de dilema. HURWITZ (2009) divide em três níveis as ações mitigadoras que os técnicos podem utilizar: mudança dos tempos semaforicos, aviso prévio da luz do semáforo e detecção de veículos se aproximando da interseção.

No primeiro caso, o autor sugere que seja verificado se os tempos de amarelo e de limpeza da interseção estão compatíveis com as características da via. A segunda medida, ilustrada na Figura 3.9, é o aviso prévio do semáforo através de luzes amarelas. Assim, o motorista não é surpreendido com a presença de um semáforo e diminui as chances de ser surpreendido com a mudança de verde para amarelo. A terceira medida é a utilização de um sensor (figura 3.10) capaz de detectar a velocidade e a distância do veículo até a linha de retenção e, caso ele esteja na zona do dilema, o tempo de verde pode ser prolongado até que o condutor possa atravessar a interseção em segurança.



Fonte: Hurwitz (2009).

**Figura 3.9.** Aviso antecipado da luz do semáforo.



Fonte: Hurwitz (2009).

**Figura 3.10.** Sensores para detecção de velocidade e distância de cada veículo.

Foram encontrados muitos estudos na bibliografia internacional abordando o comportamento do motorista na zona de dilema. No Brasil, o único trabalho localizado foi de COLELLA (2008), e mesmo assim os seus dados são de condutores americanos. Além disso, entre as medidas apresentadas para tratar a zona de dilema, somente a primeira é realizada no Brasil, indicando assim a necessidade de mais estudos para coletar os dados dos condutores.

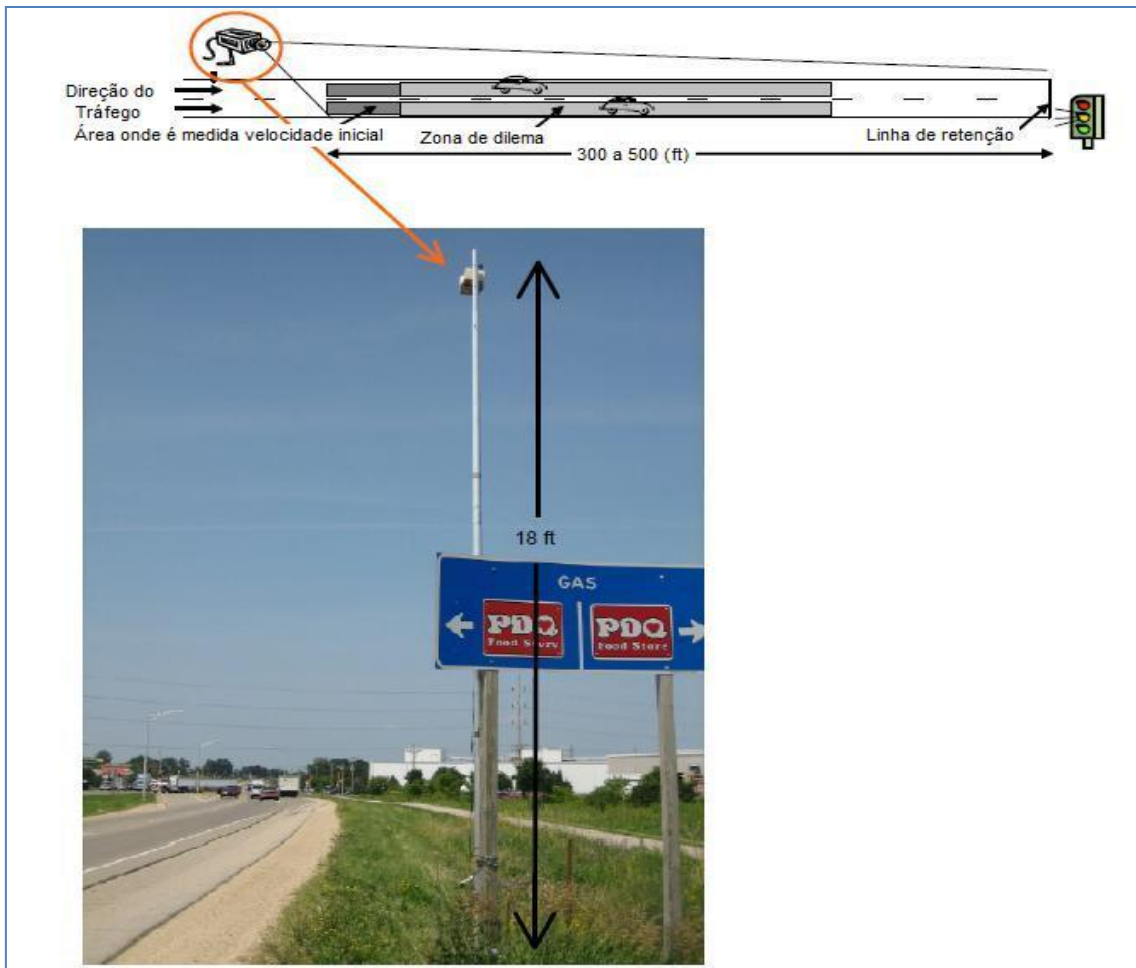
### 3.4. MÉTODOS DE COLETA DE DADOS

Este tópico tem por objetivo apresentar as metodologias mais utilizadas pelos autores para a coleta de dados dos veículos que se aproximavam de uma interseção semaforizada. Esses métodos devem ser capazes de fornecer informações como a velocidade de aproximação do veículo, distância em relação à linha de retenção e tempo de percepção e reação dos condutores. Durante a revisão bibliográfica, foi observado que os procedimentos mais empregados ocorrem através de filmagens, simuladores e veículos instrumentados.

#### 3.4.1. Filmagens

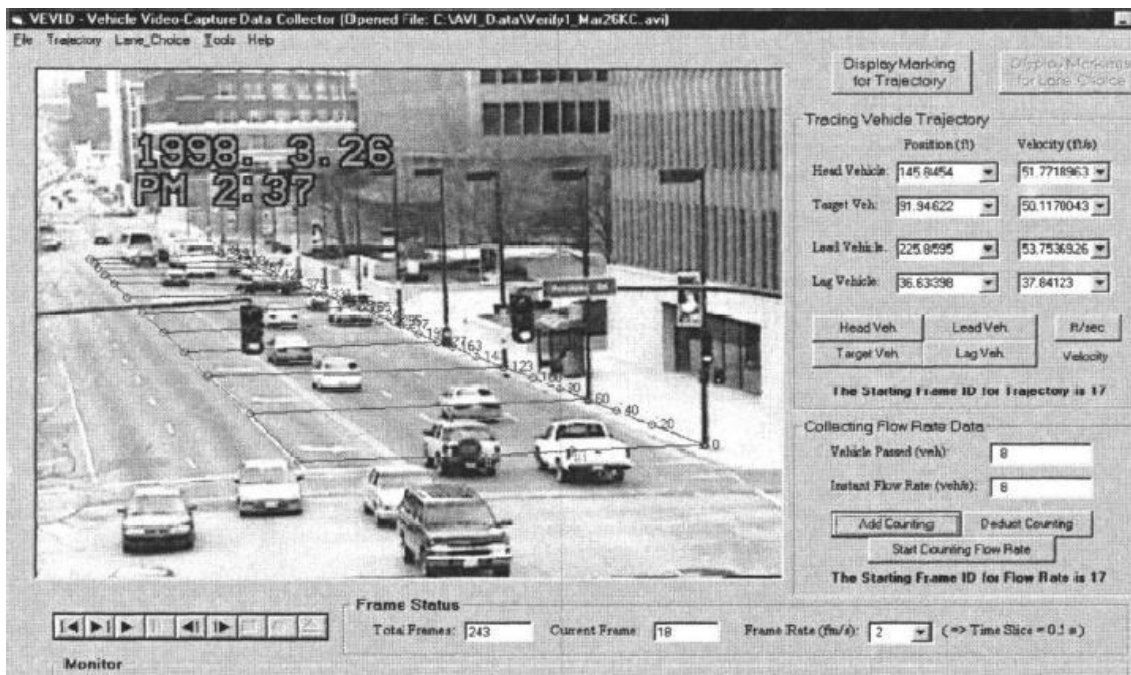
WEI (2008) descreve as etapas utilizadas para a coleta de dados dos veículos localizados na zona de dilema. Na primeira delas explica que a câmera deve ser posicionada em um ponto onde é possível observar a linha de retenção, o sinal semafórico e ainda um trecho considerável da via. Geralmente, para que todos esses requisitos sejam atendidos, a câmera deverá estar em uma posição elevada (Figura 3.11). Entretanto, devido ao ângulo existente entre a linha de visão da câmera e a superfície do pavimento, a medida no vídeo pode não representar a distância real em campo. Portanto, devem existir pontos de referência na via para possibilitar que a medida real seja calculada no vídeo. Desde que a distância à linha de retenção seja conhecida, podem ser utilizados cones, as linhas demarcadoras de tráfego ou ainda qualquer pintura realizada na via.

A segunda etapa deve ser a conversão de um trecho do vídeo correspondente a 5 segundos antes e após início do amarelo de todos os ciclos para um formato compatível com *Windows*, como o *AVI (Audio Video Interleave)*, por exemplo. A taxa recomendada é de 30 quadros por segundos, para que seja possível observar o início exato do tempo de amarelo. O terceiro passo é exportar o vídeo convertido para o programa *VEVID (Vehicle Video-Capture Data Collector)*, onde é possível saber a distância do veículo em relação à linha de retenção apenas clicando no pneu do veículo e no pavimento (Figura 3.12). A velocidade e a desaceleração em cada ponto são fornecidas na tela de saída programa.



Fonte: Gates (2007).

Figura 3.11. Posição da câmera para coleta de dados.



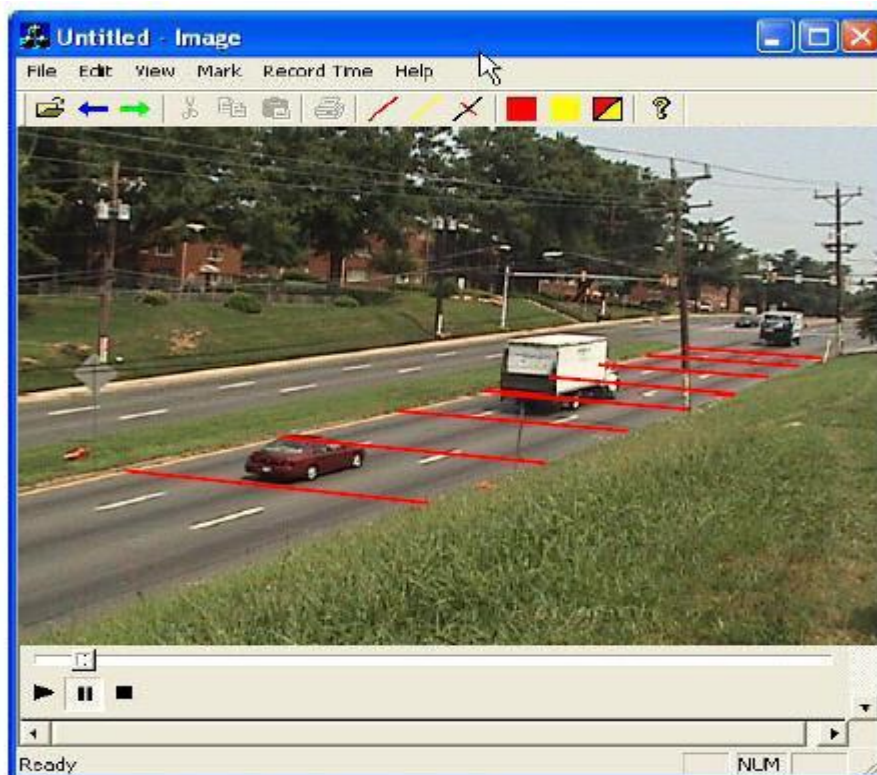
Fonte: Wei (2005).

Figura 3.12. Dados de saída do programa VEVID.

Outro autor a utilizar o método de filmagem foi GATES (2007). Diferentemente de WEI (2008), não foi utilizado o programa *VEVID* para fornecer os dados dos veículos e sim o Sony Vegas Vídeo 6.0. O vídeo gravado a uma taxa de 30 quadros por segundo pode ser executado a uma velocidade mínima de 0,033 segundos. Devido à regularidade entre as linhas demarcadoras de tráfego (cujo tamanho aproximado em sua pesquisa foi de 3 metros espaçados a cada 9 metros) elas foram utilizadas como referência para a distância até a linha de retenção. Essa distância percorrida entre duas linhas demarcadoras, com um erro aproximado de 1,5 metros, dividido pelo tempo transcorrido para o veículo percorrê-las forneceu a velocidade de aproximação do veículo. Essas informações foram retiradas imediatamente antes do início do amarelo e somente para o primeiro veículo a se aproximar.

LIU *et al.* (2007) descreve os equipamentos necessários para realizar a coleta de dados de veículos próximos a uma interseção, que são:

- Uma câmera que grave a uma taxa de 30 quadros por segundos;
- Utilização de cones nas duas laterais e ao longo da via para criar pontos de referência;
- Um programa que seja capaz de executar vídeos “quadro a quadro” e editá-los com a colocação de linhas transversais conectando os pontos de referência e registre o tempo transcorrido entre dois segmentos paralelos (Figura 3.13).



Fonte: Liu *et al* (2007)

**Figura 3.13.** Vídeo com linhas transversais.

Para verificar se os dados obtidos através desse método estavam de acordo com a realidade, foi utilizado no trecho filmado um veículo Nissan modelo Q45 instrumentado com o *Controller Area Network (CAN)*, que é capaz de fornecer a velocidade real do veículo a uma precisão de 0,0001 *mph*. Após a comparação dos valores encontrados, o autor recomenda o método através de filmagem, pois registrou uma diferença de velocidade de aproximadamente 1,61 km/h em relação à velocidade real.

### 3.4.2. Simuladores

YAN *et al.* (2005) realizaram sua pesquisa em um simulador para verificar o comportamento dos motoristas quando estavam submetidos a zona de dilema. O aparelho representava com fidelidade a movimentação dos condutores no volante e nos pedais, além de possuir uma tela para visão frontal, duas laterais, duas traseiras, áudio e vibração caso o condutor passasse por alguma área que pudesse movimentar o veículo. A cabine interna é equipada com ar condicionado, transmissão automática e retrovisores. Toda a reação do condutor era registrada em programa próprio do simulador que fornecia a velocidade em qualquer posição na via, tempo de percepção e reação e posição do veículo em relação à linha de retenção após surgimento do amarelo

e a taxa de desaceleração. Simulador similar foi utilizado por CAIRD *et al.* (2007) para calcular o tempo de percepção e reação. As Figuras 3.14 e 3.15 apresentam os simuladores descritos.



Fonte: Yan *et al.* (2005).

**Figura 3.14.** Vista do simulador utilizado por Yan *et al.*



Fonte: Caird *et al.* (2005).

**Figura 3.15.** Visão do condutor através do simulador utilizado por Caird *et al.* (2007).

### 3.4.3. Veículos Instrumentados

Esse método foi utilizado por WANG *et al.* (2005) e RAKHA *et al.* (2007) como forma de coleta de dados dos veículos. RAKHA *et al.* (2007) instrumentou, além do veículo, a via em que eram realizados os testes, implantando um sensor na linha de retenção capaz de informar o instante em que o veículo passa por ela. A via é privada e pertence ao Departamento de Transportes de Virgínia (EUA), que utiliza seus 3,5 km para



realização de testes em diversas áreas de engenharia. O autor não informou aos condutores o objetivo do trabalho e nem que os veículos e vias estavam monitorados.

O veículo utilizado foi um Impala 2004 e continha no seu porta malas um dispositivo chamado de *DAS (Data Acquisition System)* e um *GPS (Global Positioning System)*. O primeiro foi elaborado pelo *Center for Technology Development at the Virginia Tech Transportation Institute (VTTI)* para coletar todos os dados dos experimentos, como tempo de percepção e reação, velocidade de aproximação a cada 0,1 segundo, condição semaforica após atravessar a linha de retenção e todas as demais ações do motorista realizadas no interior do veículo. Um computador portátil conectado ao *DAS* programava a sequência dos eventos. O segundo tinha a função de informar a posição do veículo ao sensor localizado na linha de retenção para que o amarelo fosse acionado assim que atingisse a distância previamente determinada. A Figura 3.16 apresenta o carro, o *DAS* no porta malas, a via em que foram realizados os testes e o dispositivo instalado na linha de retenção.



Fonte: Rakha *et al* (2007).

**Figura 3.16.** Instrumentos utilizados por RAKHA *et al* (2007).

#### **3.4.4. Considerações sobre os métodos de coleta de dados**

A medida da velocidade através de filmagens é considerada uma maneira indireta (STONG *et al.* 2003). Entretanto, há diversas alternativas de se obter a velocidade de forma direta, através de *GPS (Global Positioning System)*, *DMI (Distance Measuring Instrument)*, radares, sensores infravermelhos e ondas de rádio (LIU *et al.* 2007). Entretanto, os autores consideram como uma vantagem a utilização de câmeras por gerar custos menores em relação aos outros métodos e ainda os resultados são próximos à realidade.

O uso de simulação é criticado por muitos autores que argumentam que o comportamento do motorista é influenciado pelo equipamento. A utilização de veículos instrumentados vem sendo cada vez mais recomendada principalmente devido à capacidade de armazenar com precisão as informações geradas (velocidade, distâncias, tempo de percepção e reação e outras informações que o pesquisador considerar necessárias).

Por fim, é importante registrar que não foi encontrada na bibliografia uma normatização de coleta de dados para nenhuma das metodologias apresentadas. Cada autor adaptou o processo em função das características do local e da disponibilidade de instrumentos.

## **4. OBTENÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS**

Este capítulo tem por objetivo apresentar as etapas realizadas para a coleta de dados dos veículos observados. Com esse propósito, apresenta-se a seguir a metodologia utilizada, o cálculo do tamanho da amostra e a apresentação e posterior análise dos resultados encontrados.

### **4.1. METODOLOGIA UTILIZADA**

Foi utilizada a filmagem como método para obtenção dos dados utilizados na pesquisa. As câmeras pertencem a Companhia de Engenharia de Tráfego do Rio de Janeiro (CET-RIO) e o procedimento seguiu as seguintes etapas:

- 1º Escolha das interseções;
- 2º Gravação e formatação dos vídeos;
- 3º Cálculo da velocidade de aproximação;
- 4º Cálculo da desaceleração;
- 5º Levantamento do tempo de percepção e reação.

#### **4.1.1. Escolha das Interseções**

Para a escolha das interseções semaforizadas, foram seguidos os critérios sugeridos por BONNESON (2002) *apud* GATES (2007):

- Vias com diferentes tipos de velocidade de aproximação;
- Ciclos semafóricos variados;
- Tempos de amarelo distintos;

- Locais onde não haja congestionamentos;

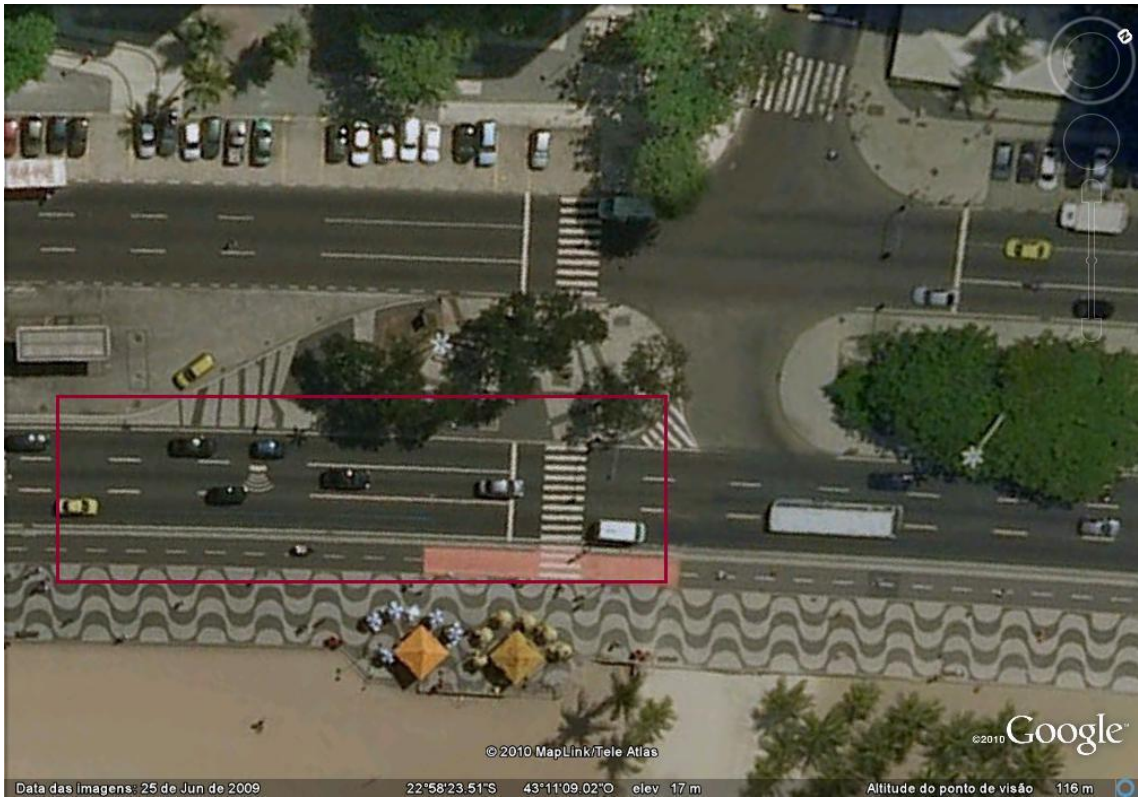
- Locais com diferentes volumes de tráfego;

Além desses fatores, para evitar que o comportamento do motorista sofresse influência de alguma característica do local, foram evitadas as interseções que apresentavam paradas de ônibus ou vans, pavimentação deficiente, presença de medidas moderadoras de tráfego, entrada e saída de veículos, uma única faixa de tráfego e dispositivos de fiscalização de avanço de sinal vermelho. Assim sendo, foram selecionadas quatro interseções dentro da cidade do Rio de Janeiro e as suas características e a imagem aérea do local estão na Tabela 4.1 e Figuras 4.1 a 4.4, respectivamente.

**Tabela 4.1.** Características das interseções.

Características	Interseção			
	1	2	3	4
Nomes das vias	Av. Atlântica X Rua Santa Clara	Av. 24 de Maio X Rua Silva Freire	Av. Presidente Vargas X Rua Uruguaiana	Av. D. Hélder Câmara X Rua Piauí
Via usada para coleta de dados	Av. Atlântica	Av. 24 de Maio	Av. Presidente Vargas	Av. D. Hélder Câmara
Número de faixas*	3	3	4	3
Largura da Pista *[m]	9,90	9,60	12,60	9,60
Tempo de amarelo* [seg]	4	3	4	4
Tempo de ciclo [seg]	150	120	140	110
Velocidade regulamentada *[km/h]	70	60	60	60

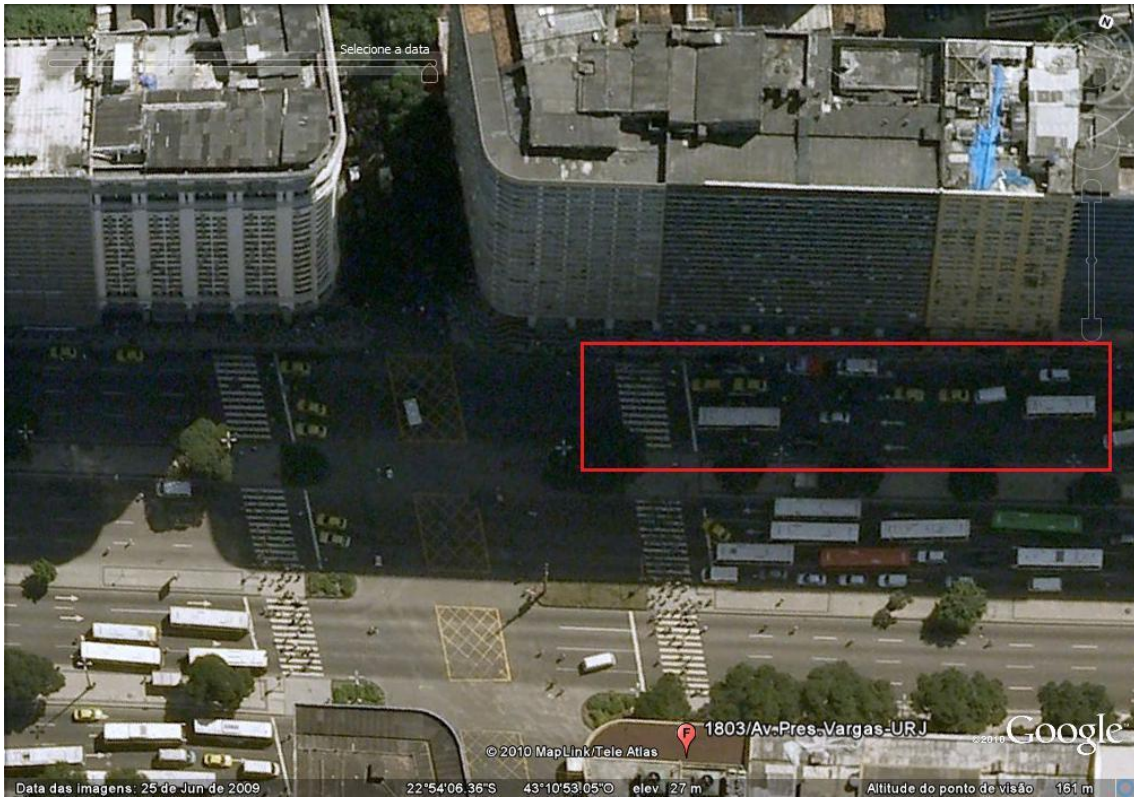
\*Dados referentes à via onde foram coletados os dados.



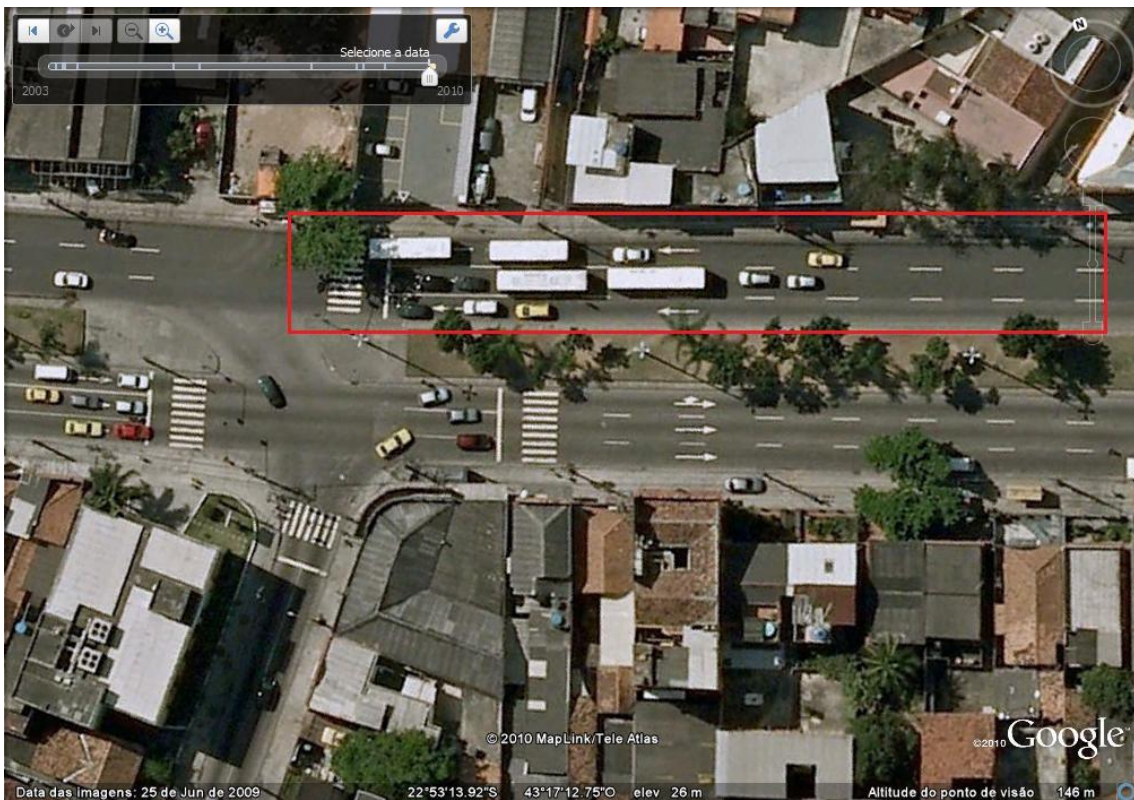
**Figura 4.1.** Interseção 1 – Av. Atlântica x Rua Santa Clara.



**Figura 4.2.** Interseção 2 – Av. 24 de Maio x Rua Silva Freire.



**Figura 4.3.** Interseção 3 – Av. Presidente Vargas x Rua Uruguiana.



**Figura 4.4.** Interseção 4 – Av. Dom Hélder Câmara x Rua Piauí.

### 4.1.2. Gravação dos Vídeos

A Prefeitura do Rio de Janeiro possui implantado o sistema de controle de tráfego por área (CTA) que tem por função monitorar e controlar em tempo real alguns semáforos da cidade a partir de computadores localizados no centro de controle (Figura 4.5). Além desse sistema, há um circuito fechado de câmeras de televisão onde são exibidas as imagens de 92 câmeras espalhadas em pontos estratégicos, todas podendo ser controladas a partir do CTA.



**Figura 4.5.** Centro de controle por área (CTA) da Prefeitura do Rio de Janeiro.

Após selecionar as interseções, as câmeras foram focadas de forma onde era possível visualizar o semáforo e um trecho da via, conforme Figura 4.6. Nesse instante elas eram travadas para o período de gravação, ou seja, nenhum outro operador poderia movimentá-la sem inserir o código de desbloqueio. Isso foi necessário para que não houvesse movimentos no vídeo gravado, o que prejudicaria posteriormente o cálculo da desaceleração.



**Figura 4.6.** Imagem gerada pela câmera utilizada nas gravações.

Os vídeos foram gravados a uma taxa de 30 *frames* por segundo e o arquivo gerado possui um formato específico que só é possível ser executado através de programa próprio fornecido pela empresa responsável pela instalação das câmeras. Entretanto, através do software *Videopad*, os arquivos foram convertidos para o formato *AVI (Audio Video Interleave)*, tornado compatível com a maioria dos programas existentes que reproduzem arquivos de vídeo.

Só foram analisados os veículos que estavam a uma distância máxima de 125 metros a partir da linha de retenção. WEI (2008) e GATES (2007) relatam que no caso dos veículos localizados a distâncias consideravelmente longas no início do amarelo, o condutor do veículo pode optar pela frenagem sem o acionamento dos freios, utilizando apenas o freio motor. Assim sendo, para maior precisão na coleta de dados foi estabelecido o limite de 125 metros a partir da linha de retenção.

A Tabela 4.2 apresenta o resumo das informações referentes à gravação dos vídeos.



**Tabela 4.2.** Dados referentes à gravação.

Dados	Interseção			
	1	2	3	4
Aproximação	Av. Atlântica	Av. 24 de Maio	Av. Presidente Vargas	Av. D. Hélder Câmara
Condição clima	Sol	Sol	Sol	Sol
Dias de gravação	3	3	2	2
Período de gravação	Tarde	Tarde	Tarde	Tarde
Tempo total de gravação (min)	330	330	150	150

#### 4.1.3. Cálculo da Velocidade Inicial

A velocidade inicial utilizada para o cálculo das taxas de desaceleração foi considerada como àquela em que o veículo se encontrava imediatamente antes do início do acionamento do freio pelo condutor, verificado em vídeo através do surgimento da luz vermelha na lanterna traseira dos veículos.

GARCÍA (2002) sugere que o ideal para medição da velocidade pontual é a utilização de radares a laser, semelhante aos equipamentos móveis que detectam excesso de velocidade nas vias, pois possuem maior precisão, versatilidade e capacidade de armazenar uma grande quantidade de dados. Entretanto, não foi possível adquirir esse equipamento com nenhuma empresa pública ou privada na cidade do Rio de Janeiro.

Outro método sugerido pelo autor é o Método de Bases Longas, que consiste na medição do tempo que um veículo demora em transpor uma distância determinada. O processo consiste em utilizar a trena para marcar um comprimento sobre a via, geralmente entre 30 e 100 metros. O dispositivo para marcar o tempo é o cronômetro, de operação e transporte simplificado. A obtenção da velocidade decorre da confrontação da distância percorrida pelo tempo registrado (CET-SP *apud* GARCÍA, 2002). Embora haja diversos estudos na literatura destacando a eficácia desse método, ele não pôde ser utilizado nessa pesquisa devido aos seguintes fatores:

1º - Não se conhece a posição do veículo no instante em que surge a luz amarela;

2º - O método das bases longas permite calcular a velocidade de aproximação de apenas um veículo por vez;

3º - Próximo a interseções semaforizadas, no intervalo de 30 metros, pode ocorrer variação significativa na velocidade dos veículos.

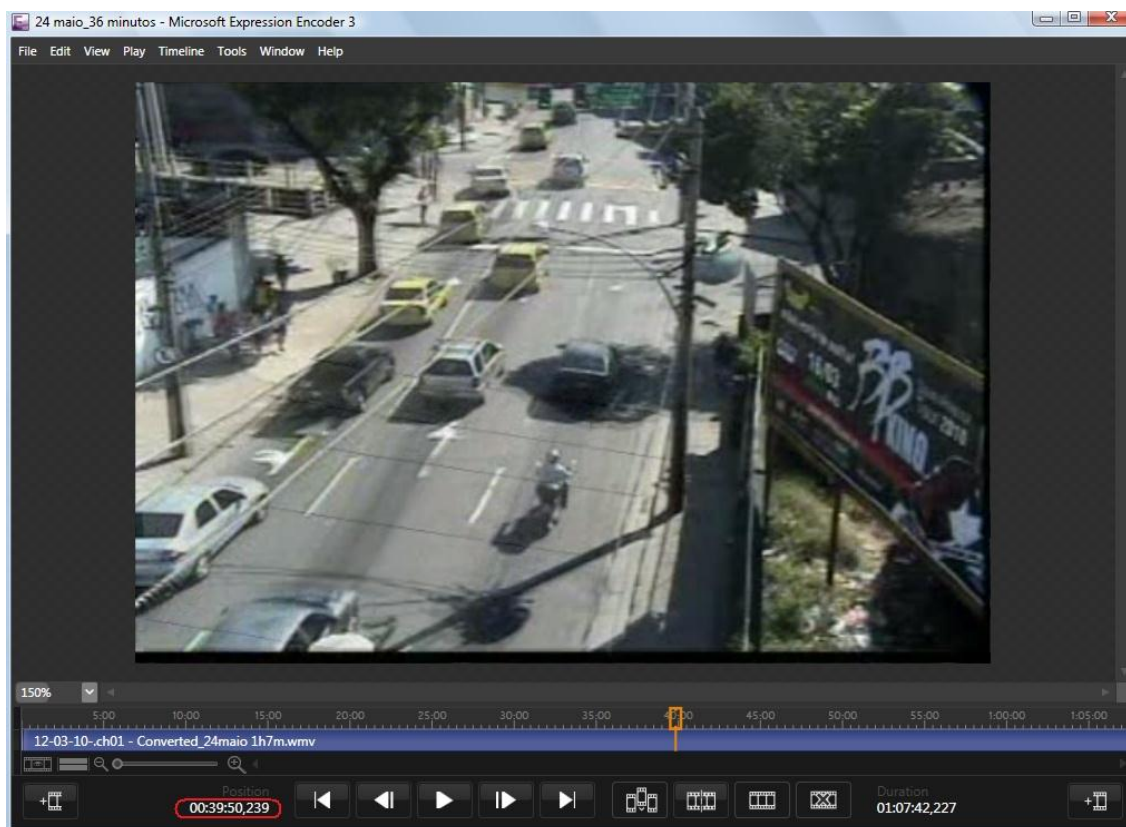
Assim sendo, foi utilizada metodologia similar a GATES (2007), onde foram escolhidas as linhas demarcadoras de tráfego como pontos de referência, pois o comprimento de cada uma e a distância entre elas se mantém a mesma, conforme verificado em visita às interseções. Esses pontos de referência são necessários para que sejam traçadas linhas perpendiculares a via no início e fim de cada faixa. Esse processo foi realizado retirando *print screen* do vídeo gravado no instante em que não há nenhum veículo na interseção e através do programa *AutoCad 2010* as linhas transversais foram feitas sendo possível gerar um arquivo imagem semelhante a Figura 4.7.



**Figura 4.7.** Trecho da via com linhas perpendiculares.

A etapa seguinte consistiu de utilizar o programa Microsoft Expression Encoder 3.0 para anexar o arquivo imagem com as linhas transversais no vídeo e assim ser possível registrar o tempo que o automóvel necessitou para percorrer o trecho entre essas duas

linhas. A Figura 4.8 apresenta o layout do programa, com a área destacada em vermelho o local onde armazena o tempo atual do vídeo. Com o tempo registrado que o veículo necessitou para percorrer duas linhas e como já se conhece a distância entre elas através da visita em campo, é obtido então o valor da velocidade pontual necessária para o cálculo da desaceleração.



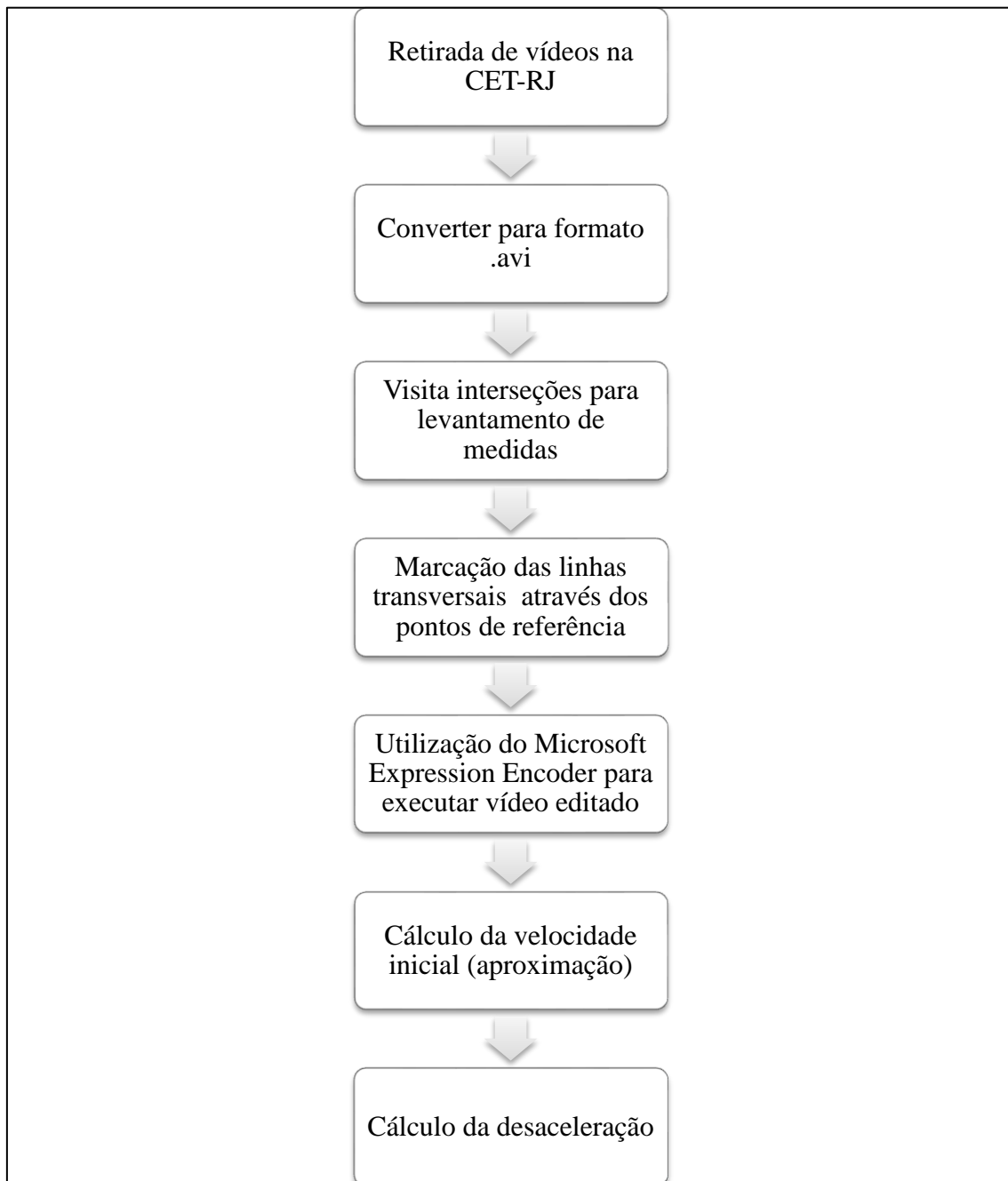
**Figura 4.7.** Layout do programa Microsoft Expression Encoder 3.0.

#### **4.1.4. Cálculo das Taxas de Desaceleração**

Para o cálculo das taxas de desaceleração foi considerado apenas o primeiro veículo a parar na linha de retenção após o surgimento do aspecto amarelo, pois de acordo com WEI (2008), a manobra deste influencia o comportamento dos condutores que vem logo em seguida, ou seja, somente a taxa de desaceleração do primeiro veículo a parar em cada faixa de tráfego não sofreria interferência externa.

Uma vez conhecida a velocidade pontual e registrado o tempo que o veículo precisou para parar na linha de retenção, se obtém as variáveis necessárias para determinar o

valor das taxas de desaceleração através da Equação 2.1. A Figura 4.8 apresenta as etapas realizadas para o cálculo das taxas de desaceleração.



**Figura 4.8.** Etapas para o cálculo das taxas de desaceleração.

#### **4.1.5. Levantamento dos Tempos de Percepção e Reação**

Os tempos de percepção e reação foram registrados a partir do momento em que surge o aspecto amarelo até o acionamento do freio pelo motorista. Essa verificação foi realizada através do programa *Microsoft Expression Encoder 3.0*, pois no mesmo é

possível executar o vídeo “quadro a quadro”, permitindo assim perceber o momento exato que surge tanto a luz amarela como a luz de freio na lanterna traseira do veículo que se aproxima da linha de retenção.

Diferenciando apenas do programa utilizado para executar o vídeo, foi realizada a metodologia de filmagem semelhantemente a LIU *et al.* (2006), GATES *et al.* (2007) e LI (2009), e nesse tipo de procedimento não é possível saber a idade e gênero dos condutores. Entretanto, em pesquisas anteriores (COLELLA, 2008), não foram observadas diferenças significativas entre o tempo de percepção e reação nos grupos mencionados. Os seguintes dados foram levantados a partir do vídeo:

- 1° - Tempo no vídeo no instante em que surge o sinal amarelo;
- 2° - Tempo no vídeo no instante em que surge a luz de freio;
- 3° - Distância da linha de retenção no instante em que surge o aspecto amarelo;
- 4° - Velocidade de aproximação no instante em que surge o aspecto amarelo;
- 5° - Tipo de veículo observado (moto, automóvel, ônibus e caminhão).

Conforme será apresentado nos próximos tópicos, não foram considerados os tempos de percepção e reação dos veículos que estavam, no instante do surgimento do amarelo, mais de 120 metros da linha de retenção, pois uma grande parcela dos condutores desses veículos opta para iniciar o processo de frenagem através da retirada do pedal do acelerador (CAIRD *et al.*, 2007), utilizando muitas vezes o freio - motor do veículo para executar a ação de frenagem, acionando o freio somente em um momento posterior.

#### **4.2.CÁLCULO DO TAMANHO DA AMOSTRA**

O Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006) sugere o seguinte roteiro para determinar o tamanho da amostra:

1º Estabelecer o erro admissível (E) na estimativa da média (depende da pesquisa, dos recursos, do técnico, do objetivo do projeto etc. – ver cada caso específico).

2º Estabelecer o desvio padrão da população, em função de outras experiências ou de pesquisa piloto.

3º Estabelecer o nível de confiança desejado (k); normalmente, de 90 ou 95%, embora dependa também dos objetivos, dos recursos etc.

4º O cálculo da amostra através da seguinte equação 4.1.

$$N = \frac{(t_{n'-1, \frac{\alpha}{2}} \times K)^2}{E^2} \quad [4.1]$$

Onde:

N = Tamanho mínimo da amostra;

S = Desvio padrão da amostra [m/s<sup>2</sup>] ou [seg];

t = Distribuição t-Student;

E = Erro permitido na estimativa da desaceleração ou tempo de percepção e reação [m/s<sup>2</sup>] ou [seg].

O erro máximo tolerado (E) foi adotado em função da precisão esperada do estudo. Como não se conhece o valor do desvio padrão da população, o mesmo obtido através de um estudo piloto com os dados coletados para calcular as taxas de desaceleração e tempo de percepção e reação em 20 veículos. O nível de confiança adotado é de 95%.

#### **4.2.1. Tamanho da amostra para o cálculo das taxas de desaceleração**

Foram considerados os seguintes valores para o cálculo do tamanho mínimo da amostra:

- Desvio padrão obtido através do estudo piloto (S) = 0,6 m/s<sup>2</sup>
- Distribuição t-Student: como n' = 20 → t<sub>n'-1; 0,025</sub> = 2,093
- Erro permitido (E): 0,2 m/s<sup>2</sup>.

$$N = \frac{(0,6 \times 2,093)^2}{0,2^2}$$

$$N = 39,4 \sim 40 \text{ Veículos}$$

#### **4.2.2. Tamanho da amostra para o cálculo dos tempos de percepção e reação**

Os seguintes valores foram utilizados no cálculo do tempo de percepção e reação:

- Desvio padrão obtido através do estudo piloto (S) = 0,2 s
- Distribuição t-Student: 2,093
- Erro permitido (E): 0,1 s.

$$N = \frac{(0,2 \times 2,093)^2}{0,1^2}$$

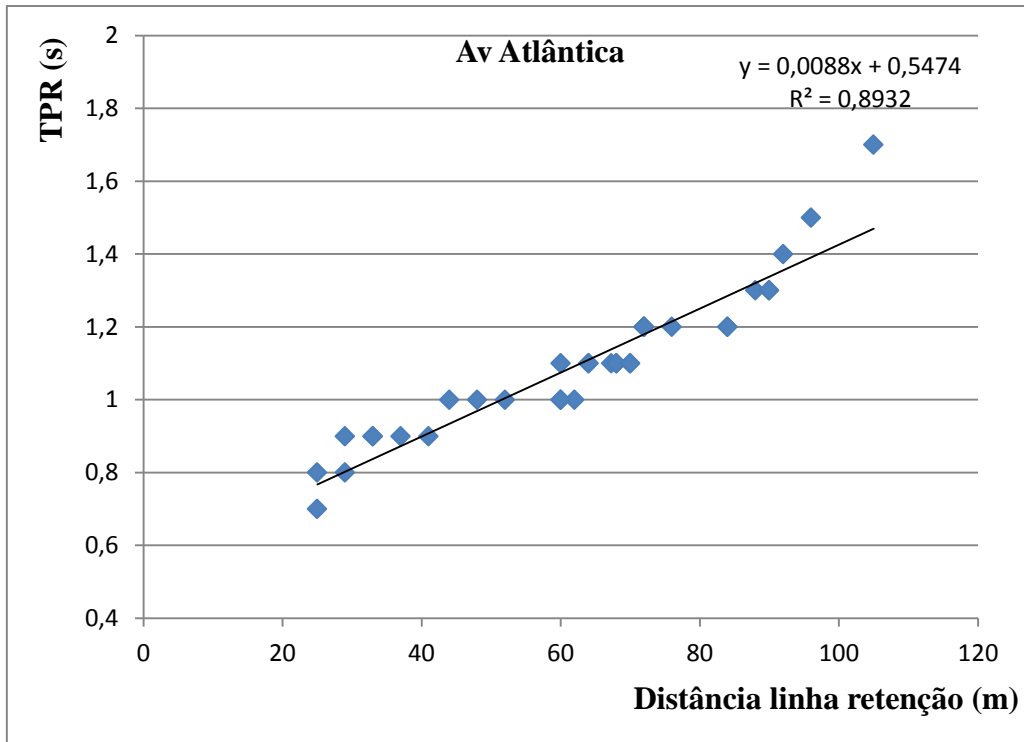
$$N = 17,5 \sim 18 \text{ veículos.}$$

No entanto, foram coletadas em cada ponto de estudo no mínimo 30 medições do tempo de percepção e reação, conforme será demonstrado no tópico seguinte.

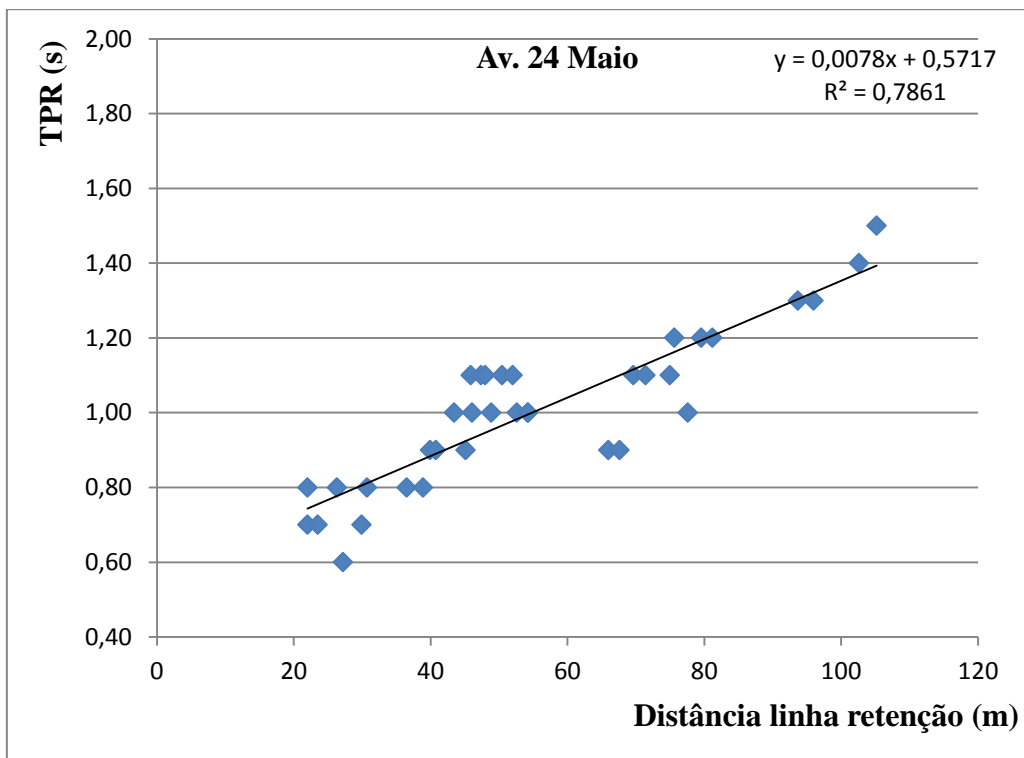
### **4.3. TEMPO DE PERCEPÇÃO E REAÇÃO**

#### **4.3.1. Apresentação dos resultados do tempo de percepção e reação**

Para os valores do tempo de percepção e reação (TPR), não foram considerados os veículos que já apresentavam a luz de freio acessa no instante em que a luz amarela era acionada. Foram coletados dados apenas do primeiro veículo a parar na linha de retenção. Os resultados estão apresentados nas Figuras 4.9 a 4.13 e representam os valores somente para veículos do tipo automóveis, distribuídos em função da distância da linha de retenção no momento que surge a luz amarela. Foi observado um total de 146 automóveis nas quatro interseções.

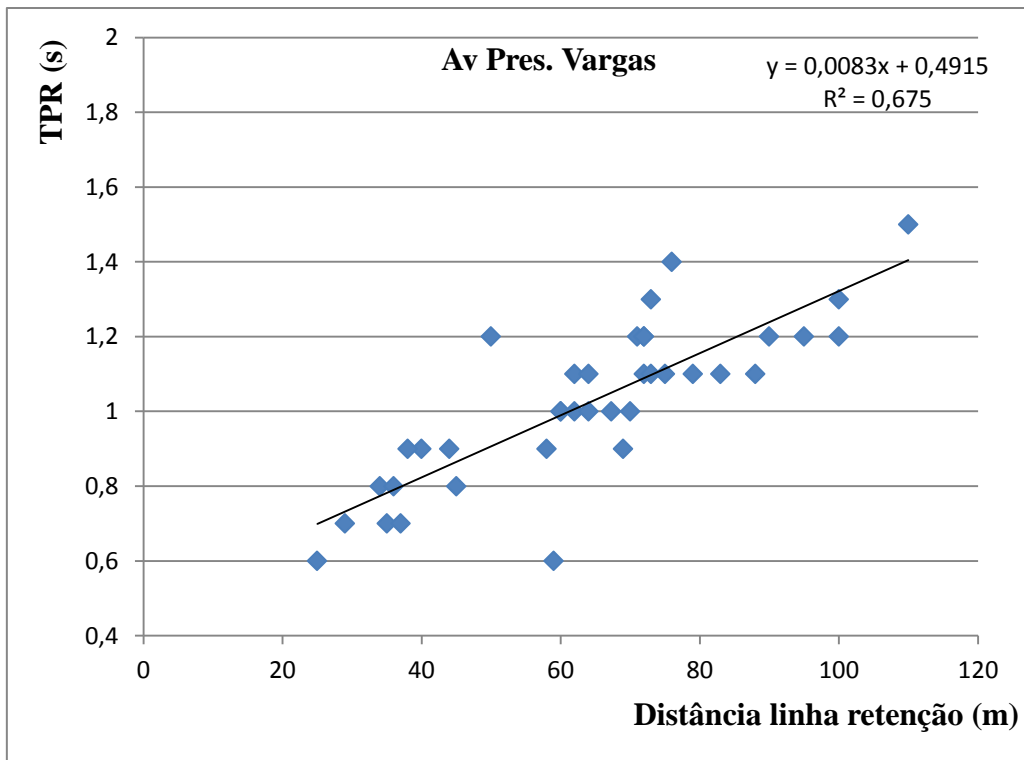


**Figura 4.9.** Distribuição do TPR na interseção 1 (n = 35).

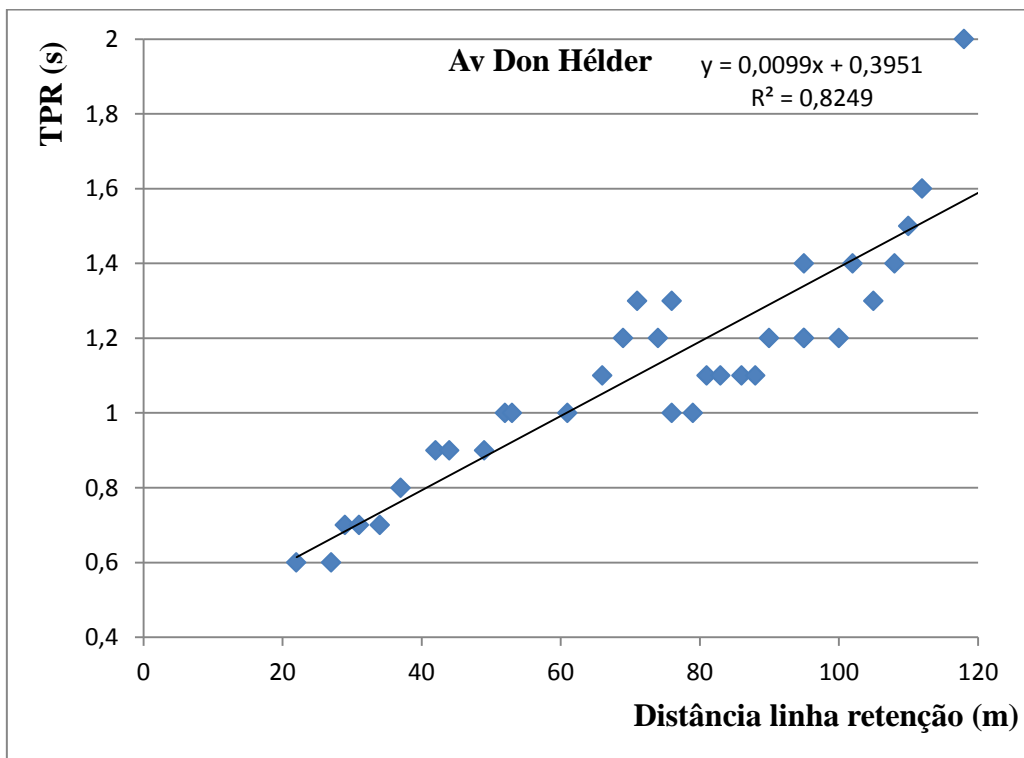


**Figura 4.10.** Distribuição do TPR na interseção 2 (n = 36).

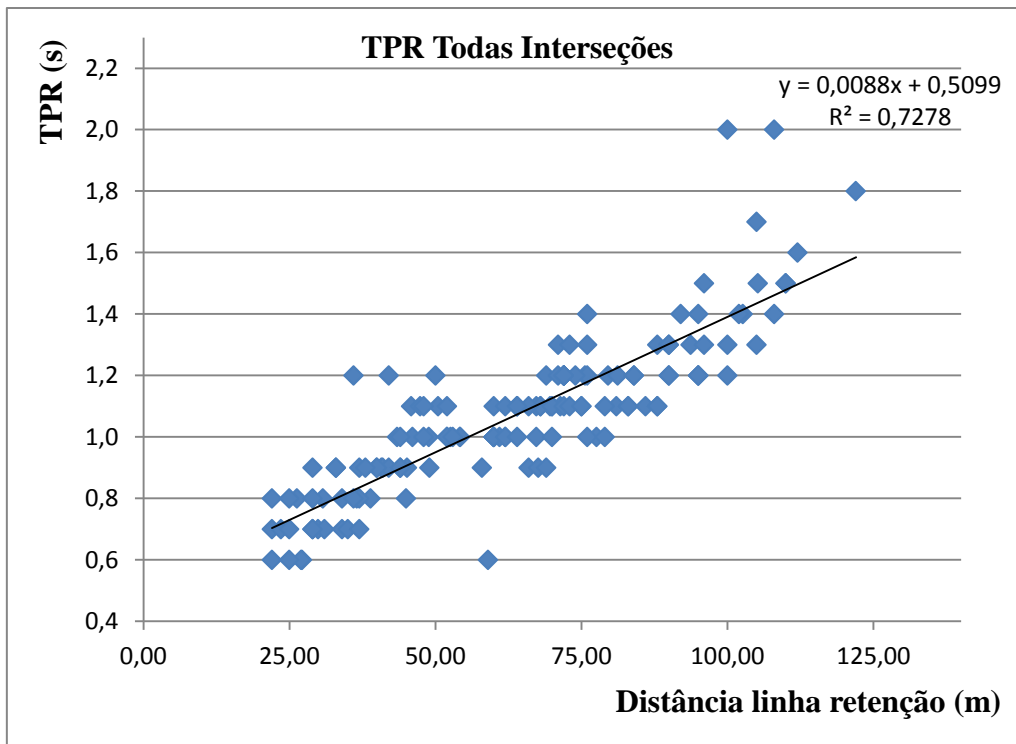




**Figura 4.11.** Distribuição do TPR na interseção 3 (n = 38).

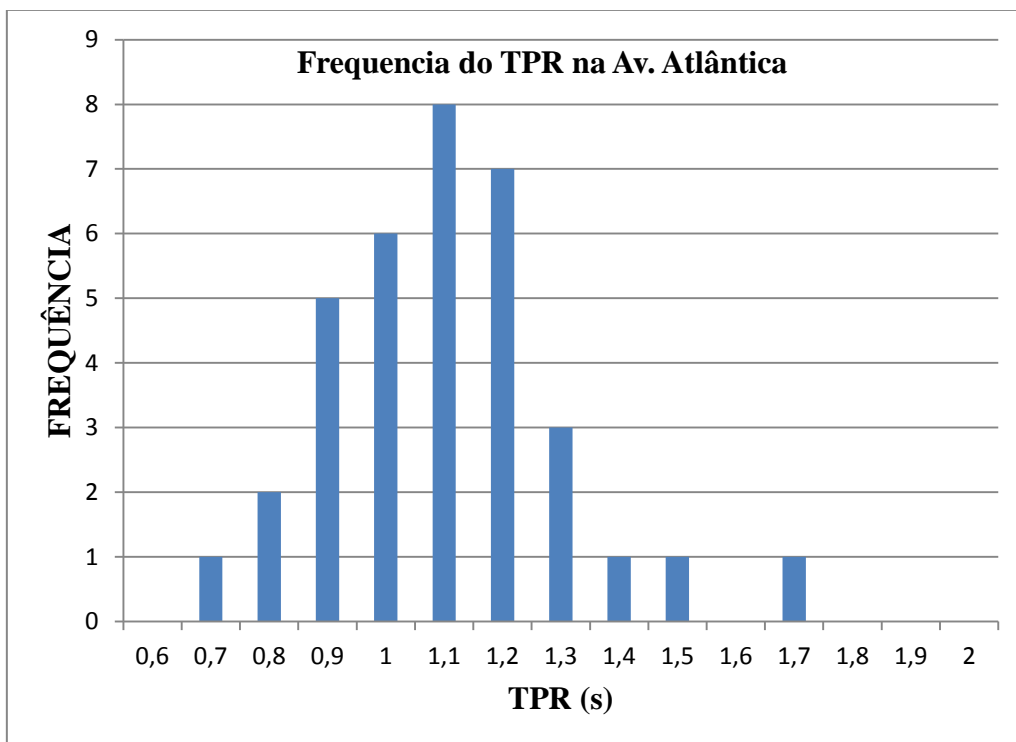


**Figura 4.12.** Distribuição do TPR na interseção 4 (n = 37).

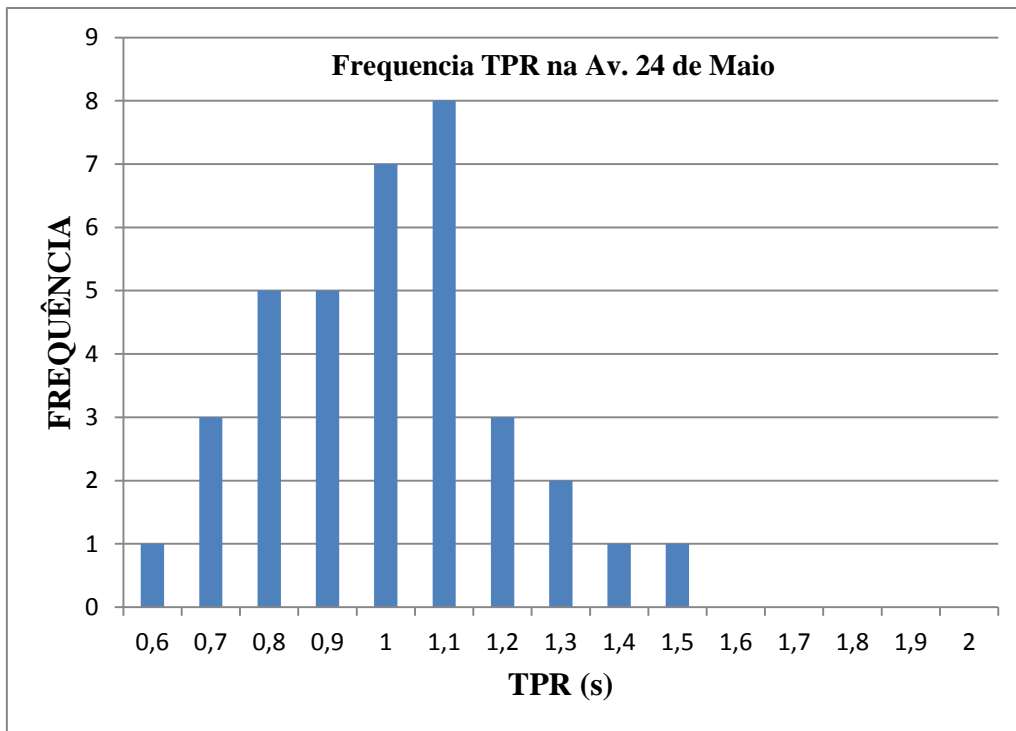


**Figura 4.13.** Distribuição do TPR em todas as interseções (n = 146).

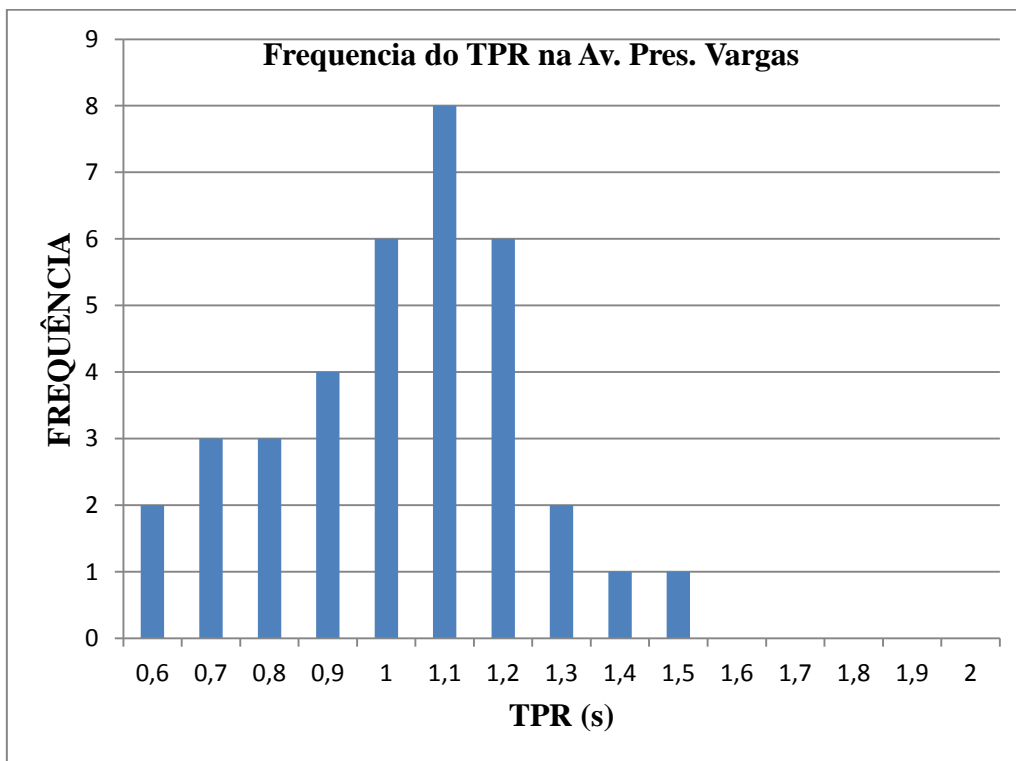
As Figuras 4.14 a 4.18 apresentam o número de observações encontrado para cada tempo de percepção e reação por interseção e a quantidade total, enquanto a Figura 4.19 apresenta a frequência acumulada de todas as quatro interseções.



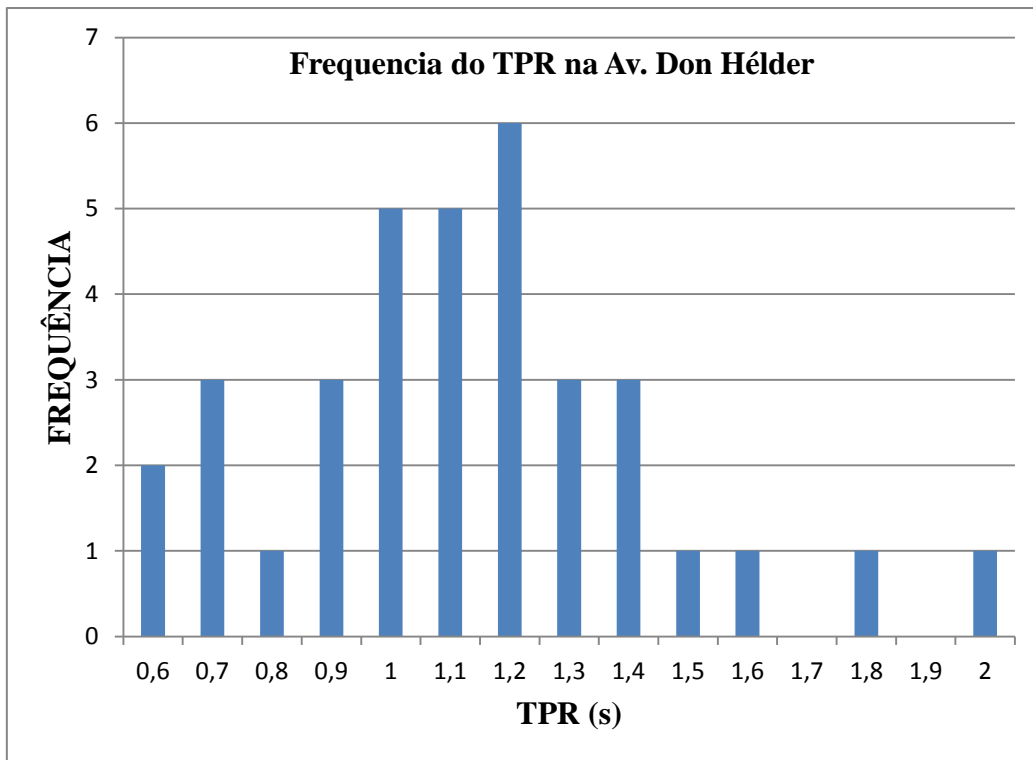
**Figura 4.14.** Frequência do TPR na interseção 1 (n = 35).



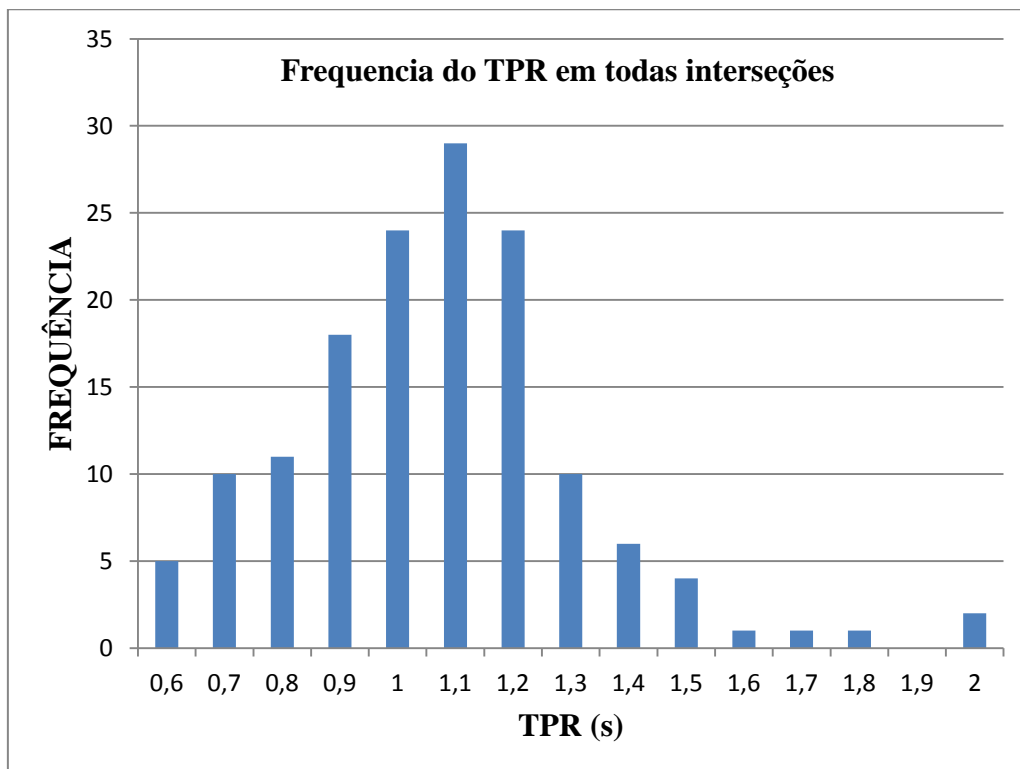
**Figura 4.15.** Frequência do TPR na interseção 2 (n = 36).



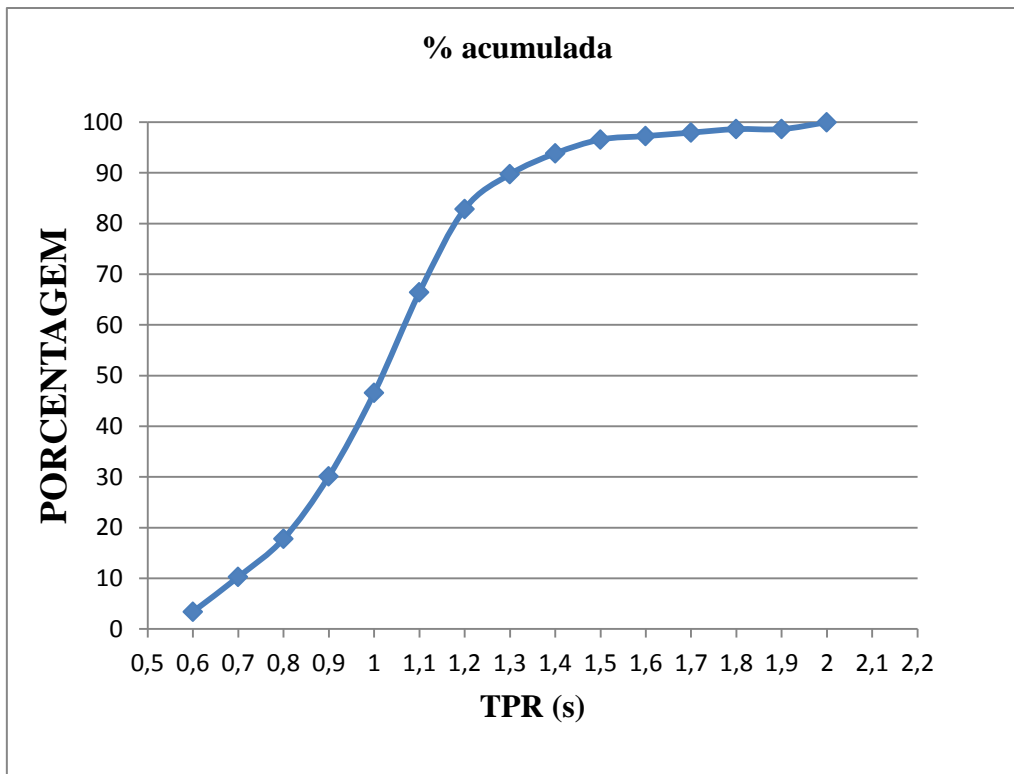
**Figura 4.16.** Frequência do TPR na interseção 3 (n = 38).



**Figura 4.17.** Frequência do TPR na interseção 4 (n = 37).



**Figura 4.18.** Frequência do TPR em todas as interseções (n = 146).



**Figura 4.19.** Frequência acumulada do TPR em todas as interseções (n = 146).

Os principais valores obtidos para o tempo de percepção e reação estão apresentados na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3.** Principais resultados encontrados para o TPR dos automóveis.

<b>Aproximação</b>	<b>Amostra</b>	<b>Média</b>	<b>85º Percentil</b>	<b>Desvio Padrão</b>
1 - Av. Atlântica	35	1,1	1,2	0,17
2 - Av. 24 de maio	36	1,0	1,2	0,20
3 - Av. Pres. Vargas	38	1,0	1,2	0,21
4 - 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>

#### 4.3.2. Tempo de Percepção e reação em outros veículos

Além da amostra de 146 automóveis, foram coletados os dados de 36 motos e 32 ônibus, onde apresentaram tempo de percepção e reação média de 1,5 e 1,3 segundos respectivamente.

### 4.3.3. Análise dos Resultados do Tempo de Percepção e Reação

Como era de se esperar, a distribuição dos resultados demonstra que conforme mais próximo o condutor estiver da linha de retenção menor é o tempo de percepção e reação para iniciar o processo de frenagem. A análise global de todos os veículos observados mostrou uma relação linear satisfatória entre o TPR e a distância do veículo à linha de retenção no momento em que surge a indicação do amarelo. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) dessa regressão linear foi de 0,727 (ver Figura 4.13) . Entre as interseções, sob o ponto de vista da engenharia de tráfego, não houve diferenças significativas dos resultados encontrados, apenas a média dos tempos de percepção e reação das interseções dois e três foram relativamente inferiores. Uma hipótese para esse fato pode ser o maior fluxo de veículos nessas vias.

O menor valor encontrado foi de 0,6 segundos, encontrado cinco vezes, e o maior de 2 segundos com apenas uma ocorrência. Não foram encontrados valores maiores para o TPR provavelmente devido à limitação imposta para selecionar a amostra (somente veículos a menos de 120 m da linha de retenção). Foi observado que o valor de 1,3 segundos representa o 85º percentil da amostra.

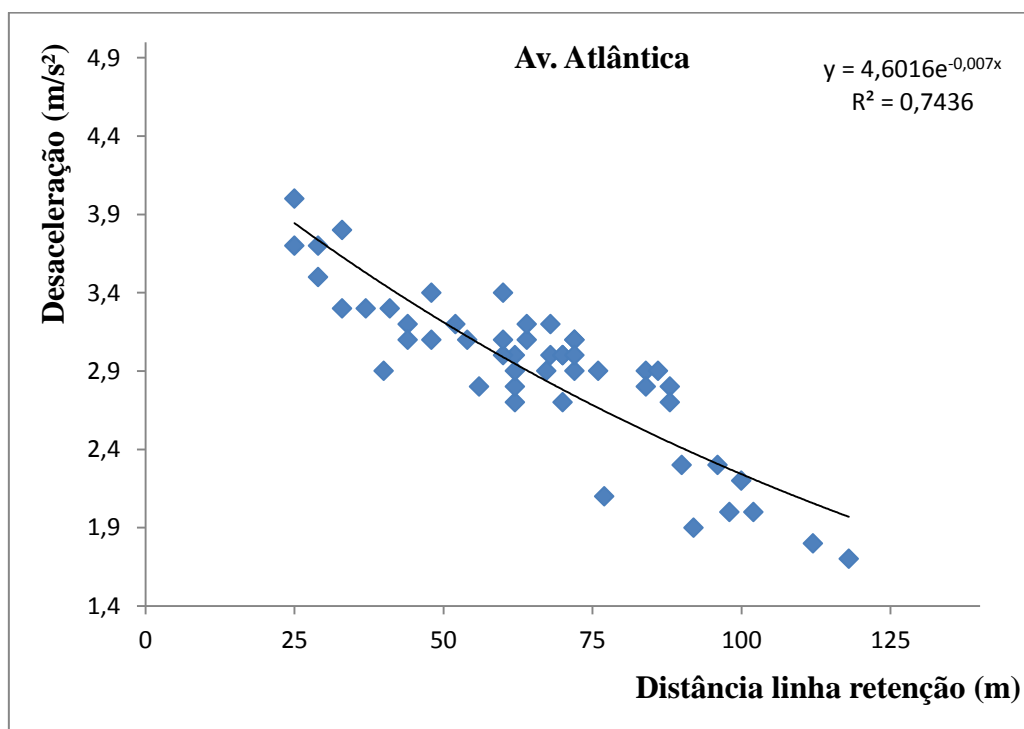
É necessário registrar que os valores encontrados nesse trabalho, considerando o conjunto das interseções, para o tempo de percepção e reação foram superiores ao sugerido pelo ITE (1992), que é de 1,0 segundo para automóveis. No caso do valor médio, o valor encontrado (1,1 s) foi 10% superior e o 85% Percentil (1,3s) foi 30% superior.

Comparando o resultado encontrado para o TPR médio dos automóveis com valores correspondentes obtidos para os ônibus e motos, observa-se que os ônibus possuem TPR somente um pouco superior aos automóveis, enquanto as motos apresentam valores mais elevados.

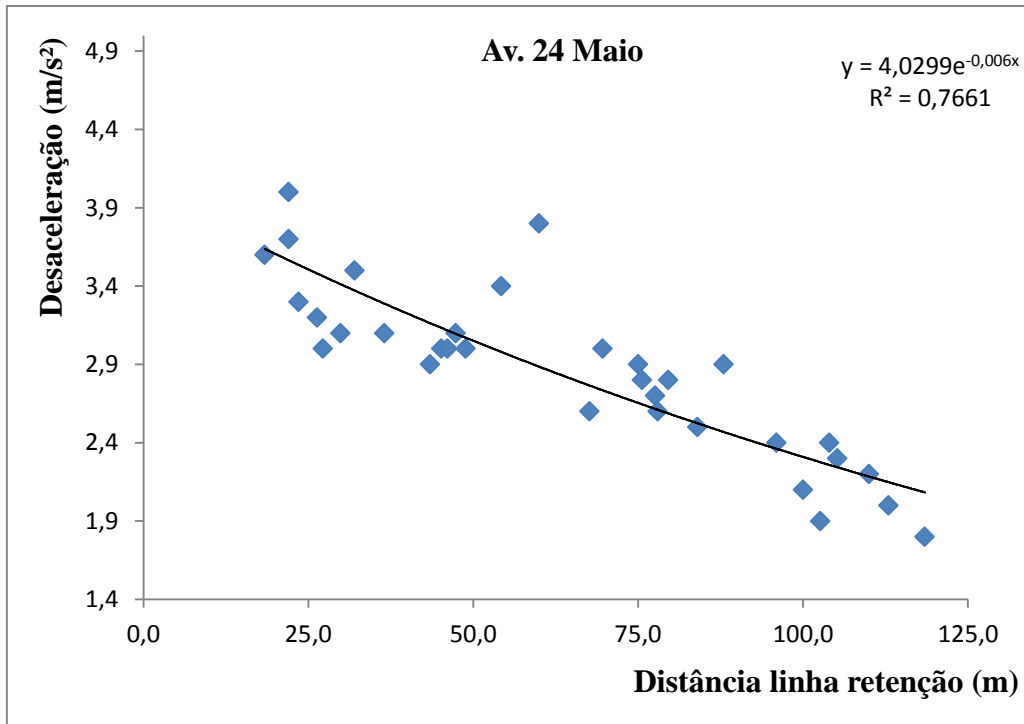
## 4.4. TAXAS DE DESACELERAÇÃO

### 4.4.1. Apresentação dos Resultados das Taxas de Desaceleração

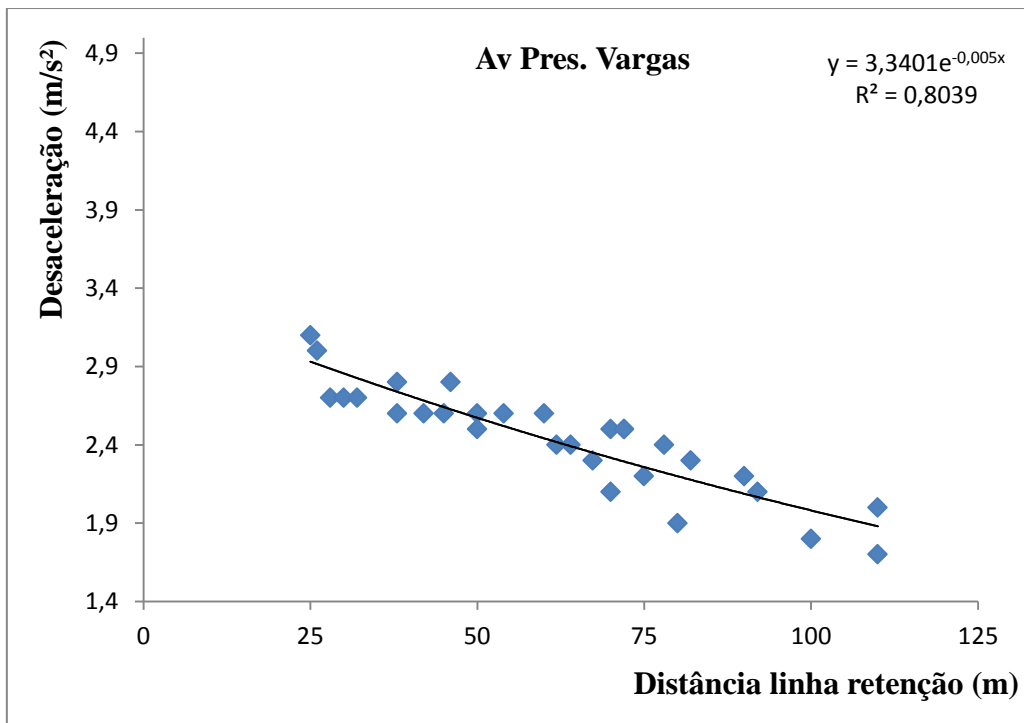
Conforme mencionado anteriormente, os valores das taxas de desaceleração foram obtidos através da razão entre a variação da velocidade no instante em que surge a luz amarela até o momento em que o veículo pára na linha de retenção e o tempo necessário para que esse evento ocorra. Foram calculadas as taxas de 146 automóveis nas quatro interseções selecionadas e a distribuição dos resultados em função da distância do veículo em relação à linha de retenção no instante em que surge o amarelo, é por interseção, mostrada nas Figuras 4.20 a 4.24.



**Figura 4.20.** Distribuição das taxas de desaceleração da interseção 1 (n = 35).

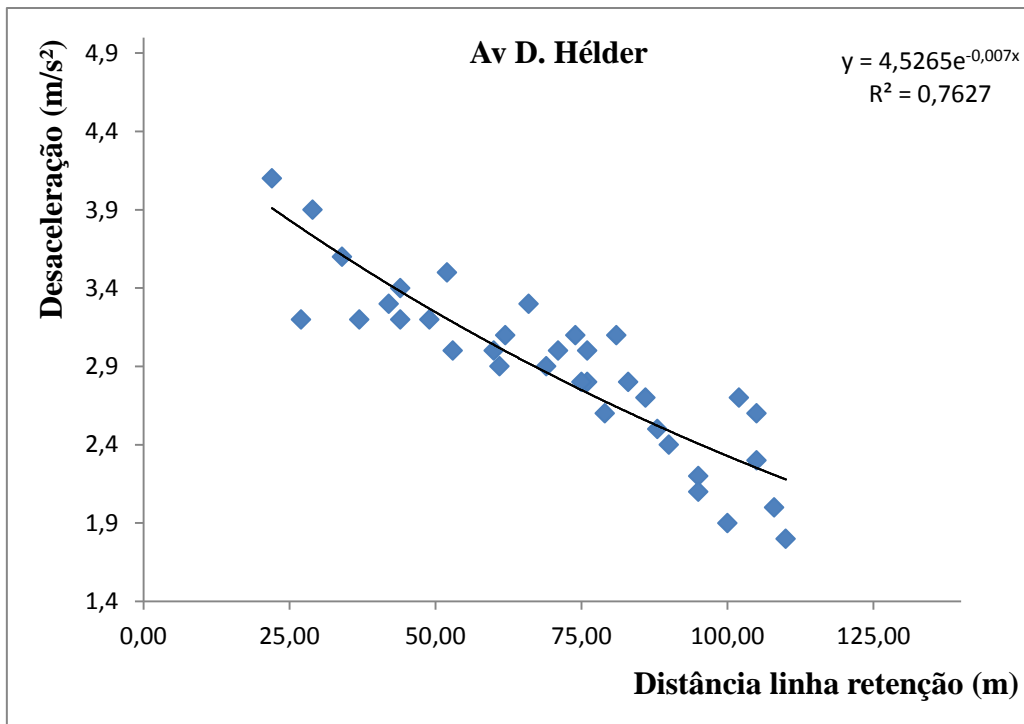


**Figura 4.21.** Distribuição das taxas de desaceleração da interseção 2 (n = 36).

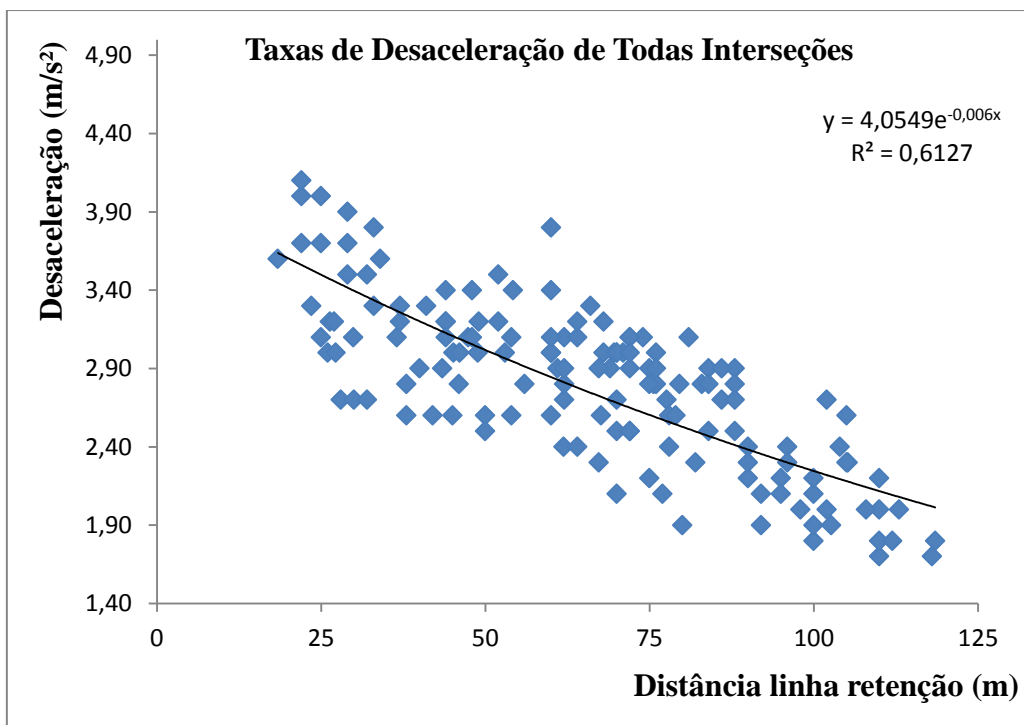


**Figura 4.22.** Distribuição das taxas de desaceleração da interseção 3 (n = 38).



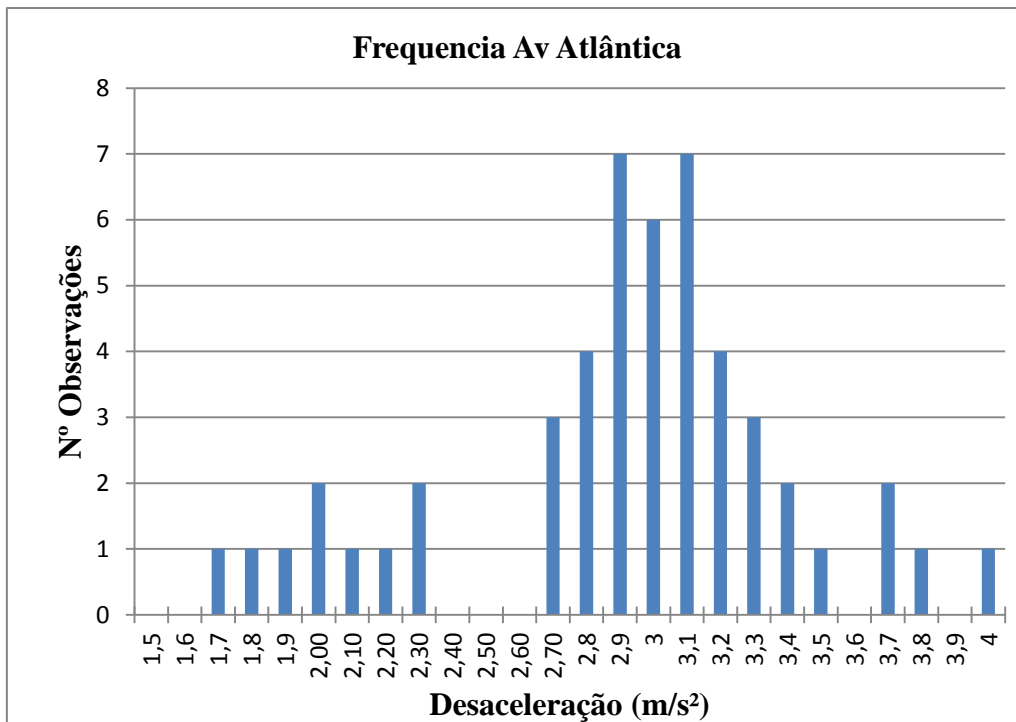


**Figura 4.23.** Distribuição das taxas de desaceleração da interseção 4 (n = 37).

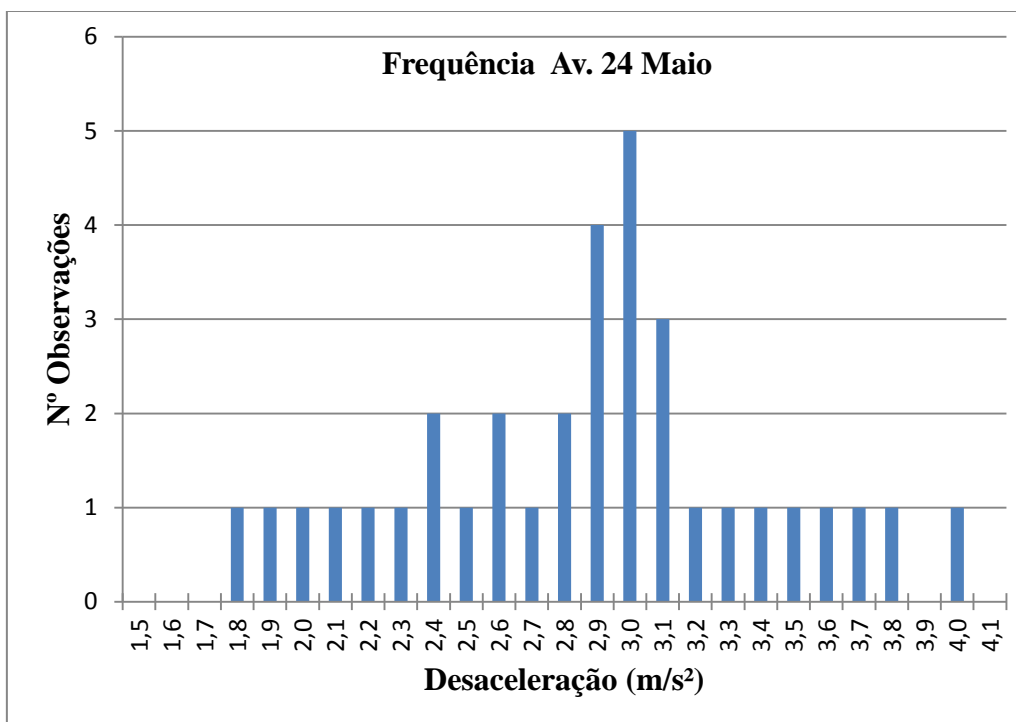


**Figura 4.24.** Distribuição das taxas de desaceleração todas as interseções (n = 37).

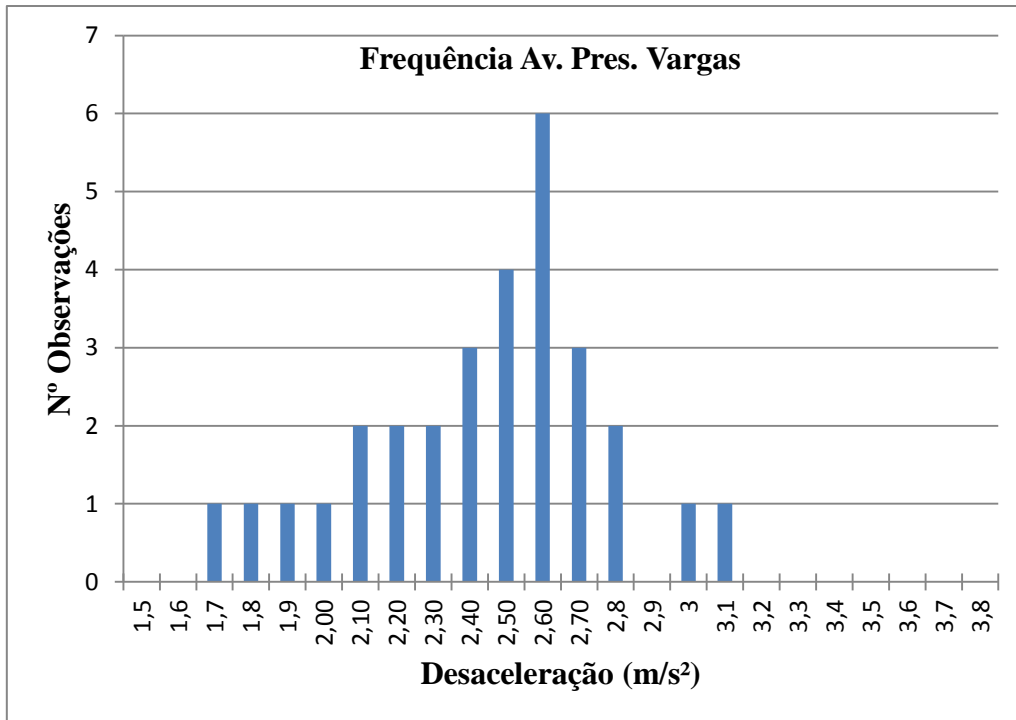
As Figuras 4.25 a 4.29 apresentam o número de observações encontrado para cada taxa de desaceleração em cada interseção e a quantidade total, enquanto a Figura 4.30 apresenta a frequência acumulada de todas as quatro interseções.



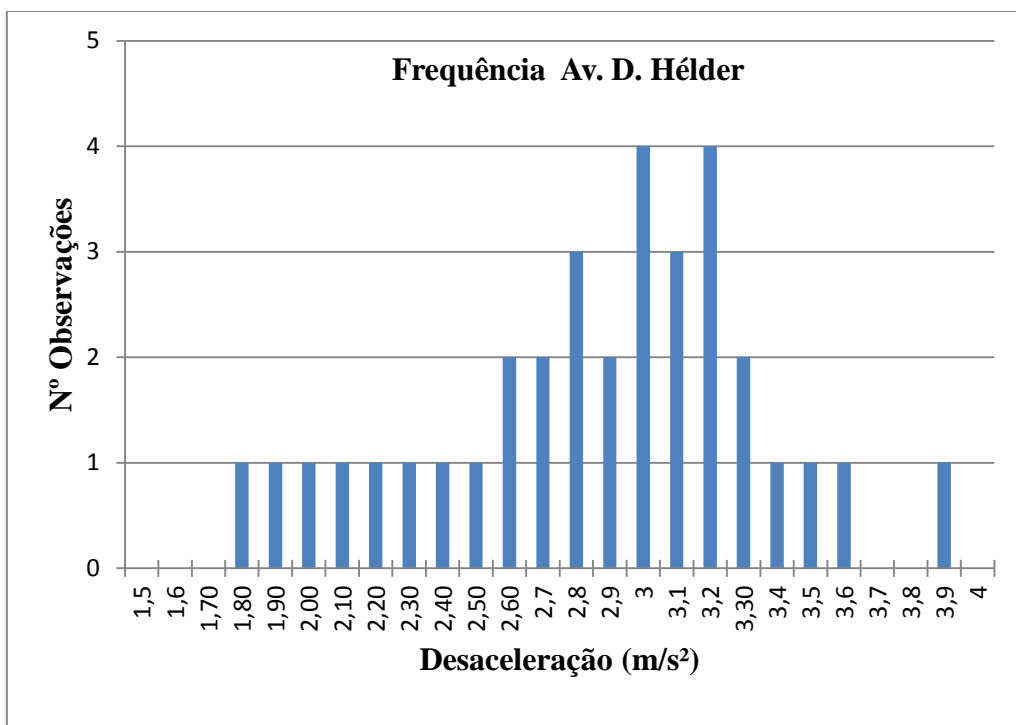
**Figura 4.25.** Frequência das taxas de desaceleração na interseção 1 (n = 35).



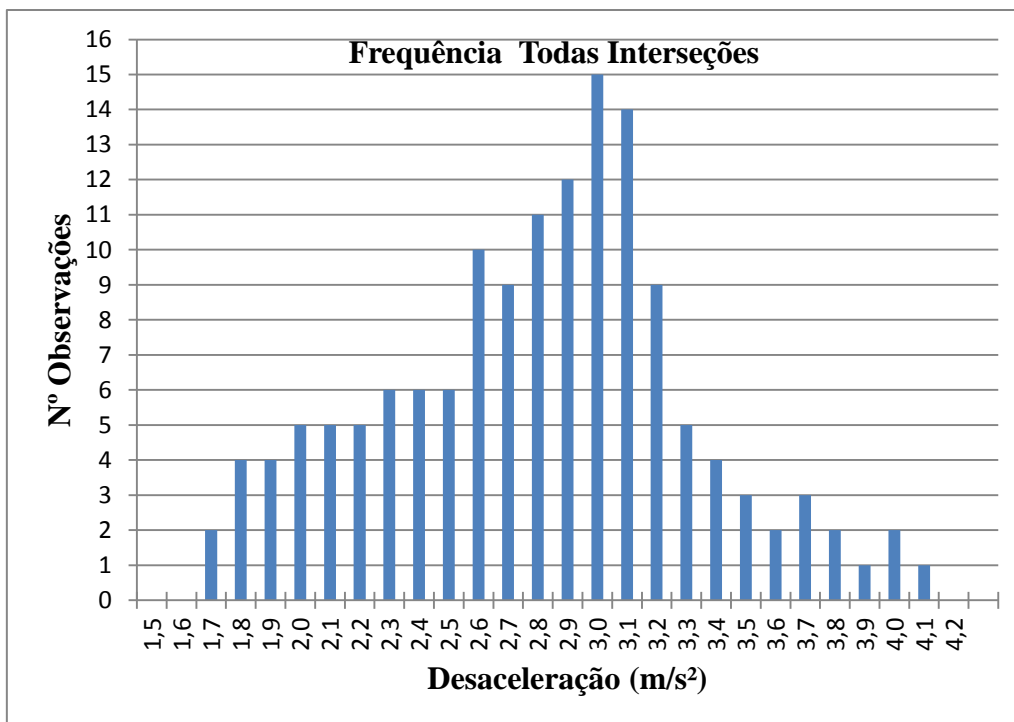
**Figura 4.26.** Frequência das taxas de desaceleração na interseção 2 (n = 35).



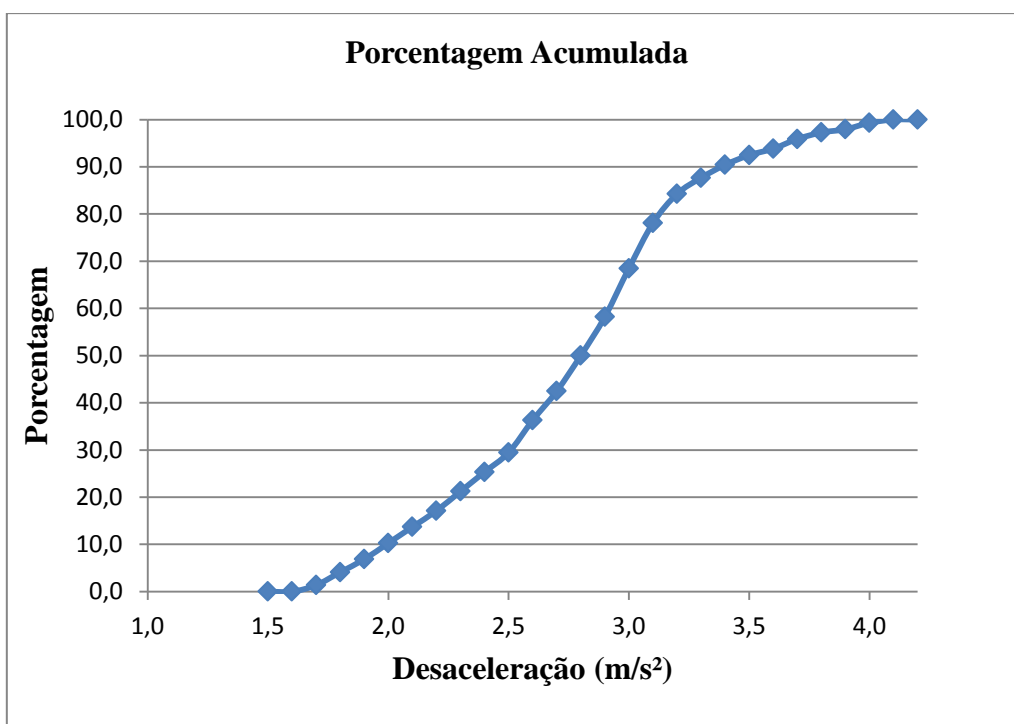
**Figura 4.27.** Frequência das taxas de desaceleração na interseção 3 (n = 38).



**Figura 4.28.** Frequência das taxas de desaceleração na interseção 4 (n = 38).



**Figura 4.29.** Frequência das taxas de desaceleração em todas as interseções (n = 146).



**Figura 4.30.** Frequência acumulada das taxas de desaceleração em todas as interseções (n = 146).

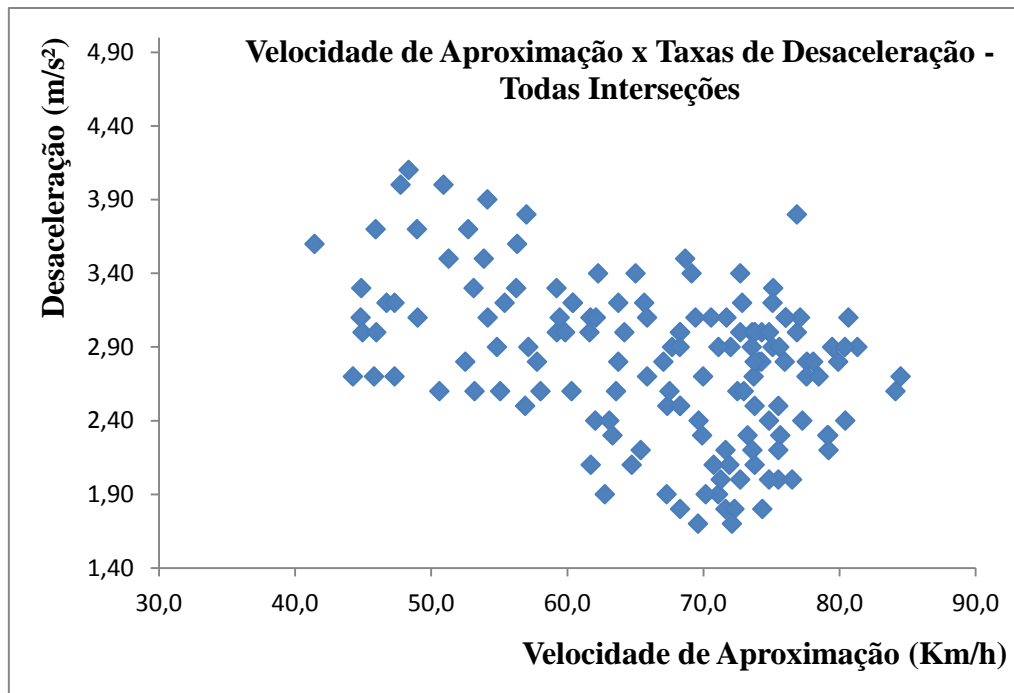
A Tabela 4.4 apresenta o resumo dos valores encontrados para as taxas de desaceleração do estudo.

**Tabela 4.4.** Valores encontrados para as taxas de desaceleração dos automóveis.

<b>Aproximação</b>	<b>Nº de Veículos</b>	<b>Média das Taxas de Desaceleração (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>85º Percentil</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Velocidade Aproximação (km/h)</b>
1 - Av. Atlântica	49	2,91	3,30	0,51	68,1
2 – Av. 24 de maio	33	2,87	3,42	0,55	65,3
3 – Av. Pres. Vargas	30	2,44	2,70	0,33	60,4
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>

#### **4.4.2. Velocidade de Aproximação x Taxas de Desaceleração**

Como o objetivo do estudo também é verificar se há alguma relação entre as taxas de desaceleração e a velocidade de aproximação do veículo no instante em que surge a luz amarela, foi elaborada a Figura 4.31, onde aparece a velocidade de aproximação para todos os veículos nas quatro interseções.

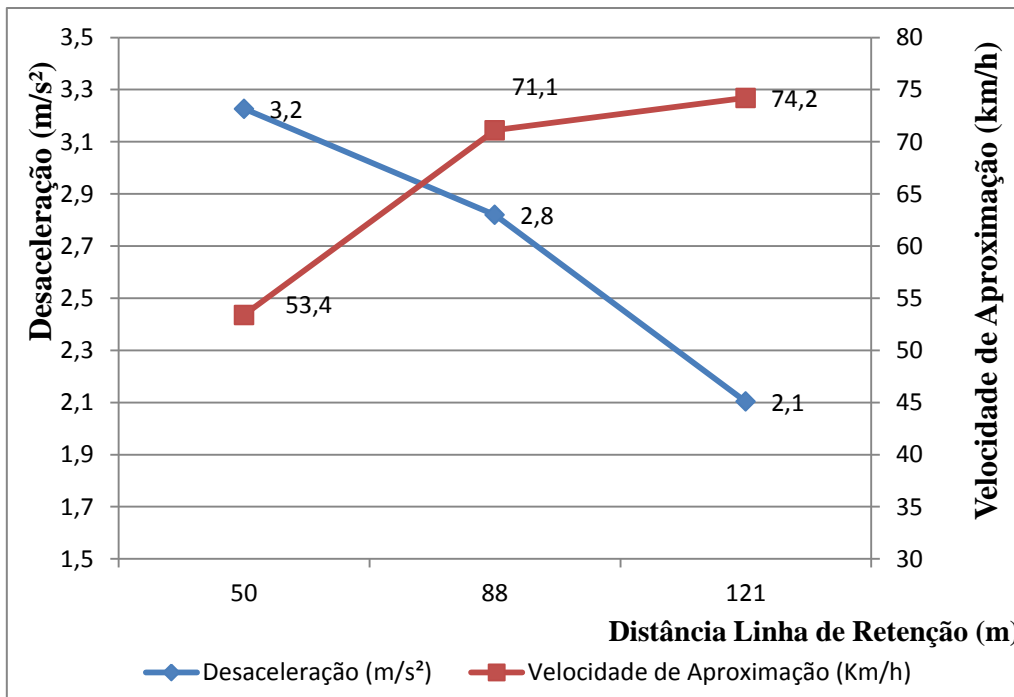


**Figura 4.31.** Distribuição da velocidade de aproximação em função das taxas de desaceleração em todas as interseções (n = 146).

Para verificar a variação das taxas de desaceleração no trecho observado, foram divididos os resultados encontrados em três segmentos: até 50 metros da linha de retenção, entre 50,1 a 88 metros e por último de 88,1 a 125 metros. Foram escolhidas essas distâncias por serem as mesmas adotadas nas pesquisas de outros autores, conforme demonstrado no capítulo anterior. Para cada trecho foi apresentado o número de veículos encontrados, a média das taxas de desaceleração e velocidade de aproximação, conforme mostram a Tabela 4.5 e a Figura 4.32.

**Tabela 4.5.** Valores encontrados por cada trecho.

Distância da Linha de Retenção	Nº de Veículos	Média das Taxas de Desaceleração (m/s <sup>2</sup> )	85º Percentil	Média da Velocidade de Aproximação (km/h)
Até 50 m	45	3,2	3,7	53,4
50,1 e 88 m	67	2,8	3,1	71,1
88,1 a 125 m	34	2,1	2,4	74,2
<b>Total</b>	<b>146</b>	<b>2,8</b>	<b>3,3</b>	<b>66,3</b>



**Figura 4.32.** Média das velocidades de aproximação e das taxas de desaceleração em cada trecho considerado a partir da linha de retenção.

Caso não sejam considerados os veículos que estejam a menos de 50 metros da linha de retenção no início do amarelo, a média da taxa de desaceleração encontrada é de 2,6 m/s<sup>2</sup> e o 85º percentil 3,1 m/s<sup>2</sup>.

Para os outros tipos de veículos observados, 32 ônibus e 36 motos, as taxas de desaceleração encontradas foram respectivamente de 2,5 m/s<sup>2</sup> e 4,0 m/s<sup>2</sup>.

#### 4.4.3. Zonas de Dilema e Opção x Taxas de Desaceleração

A extensão da zona de dilema foi calculada através das Equações 2.4 e 2.5, considerando a aceleração nula (veículo pára na linha de retenção) e a taxa de desaceleração média do automóvel. Essa adaptação se faz necessária pela dificuldade em registrar a taxa máxima de desaceleração e por não considerar que o veículo irá atravessar a interseção. Dentro dessa adaptação da zona de dilema foram registrados 27 automóveis com taxa de desaceleração média de 2,6 m/s<sup>2</sup> a uma distância média de 89 metros da linha de retenção no início do amarelo.

Como só foram registrados os veículos que pararam na linha de retenção, aqueles localizados na zona de opção foram os que optaram pela parada. Um total de 16 veículos parou e apresentou média de desaceleração de 3,1 m/s<sup>2</sup>; localizados a uma distância média de 42 metros da linha de retenção.

#### **4.4.4. Análise dos Resultados das Taxas de Desaceleração**

A média geral registrada das taxas de desaceleração dos automóveis foi de 2,80 m/s<sup>2</sup> e o 85º percentil 3,3 m/s<sup>2</sup>. Entretanto, os resultados indicam que os valores encontrados variaram em função da interseção analisada e da posição do veículo em relação à linha de retenção no instante em que surge o amarelo. Com exceção da interseção número 3 (Av. Presidente Vargas), as médias das taxas de desaceleração das demais apresentaram valores próximos entre si (sob o ponto de vista da engenharia de tráfego), conforme mostra a Tabela 4.4. O fato de a interseção citada apresentar média significativamente inferior às demais pode ser justificado pelas características específicas do tráfego no local, com elevado número de ônibus parando na faixa à direita e ainda a interseção possuir a menor velocidade de aproximação entre as quatro estudadas.

Quanto à posição do veículo no instante em que surge o amarelo, a análise das Figuras 4.20 a 4.24 demonstraram que conforme mais próximo o veículo se encontra da linha de retenção, maior é a sua taxa de desaceleração. Na Tabela 4.5, é possível identificar que para distâncias até 50 metros, a média da taxa de desaceleração é 3,2 m/s<sup>2</sup>, reduzindo em 2,8 m/s<sup>2</sup> a distâncias entre 51 e 88 metros e por fim atingindo média de 2,1 m/s<sup>2</sup> nos veículos que no início do amarelo se encontravam entre 88 e 125 metros da linha de retenção. Conforme já foi mencionado anteriormente, esse limite de 125 metros foi necessário devido às limitações das câmeras de gravação. O tempo médio para parada total dos veículos foi respectivamente de 4,6, 7,0 e 9,7 segundos para cada distância da linha de retenção estudada.

Ainda analisando as Figuras de 4.20 a 4.24, não são encontrados veículos que pararam e estavam a uma distância inferior a 23 metros da linha de retenção no instante em que surge o amarelo. Possivelmente nesses casos, pela proximidade à linha de retenção, no instante em que o aspecto amarelo é acionado, o condutor possui tempo suficiente para atravessar a interseção antes do surgimento do aspecto vermelho.



Semelhante à média das taxas de desaceleração, os valores obtidos para a máxima taxa de desaceleração ocorreram a distâncias próximas da linha de retenção, sendo registrado para interseção 1 (Av. Atlântica) 4,0 m/s<sup>2</sup> a 26 metros da linha de retenção; interseção 2 (Av. 24 maio) 4,0 m/s<sup>2</sup> a 23 metros; interseção 3 (Av. Presidente Vargas) 3,1 m/s<sup>2</sup> a 27 metros e por fim 3,9 m/s<sup>2</sup> a 24 metros da linha de retenção na última interseção (Av. Don Hélder). A Figura 4.29 apresenta a frequência dos resultados encontrados em todas as interseções e o esse gráfico sugere uma distribuição normal dos dados, verificado através do teste de Kolmogorov-Smirnov ( $d=0,07$ ;  $d_{crít} = 0,12$ ).

A média da velocidade de aproximação de todos os automóveis no instante em que surge o amarelo é de 66,3 km/h em todas as interseções. Semelhantemente às taxas de desaceleração, a interseção três (Av. Presidente Vargas) apresentou a menor média, 60,4 km/h. Na Figura 4.31, não foi encontrada uma relação clara entre a velocidade de aproximação e a taxa de desaceleração, ou seja, de acordo com esse estudo a velocidade de aproximação não necessariamente irá influenciar a taxa de desaceleração que o motorista vai aplicar no processo de frenagem do veículo.

A Figura 4.32 indica que a média da velocidade de aproximação para os veículos que estavam a menos de 50 metros da linha de retenção no instante em que surge o amarelo foi de 53,4 km/h; 71,1 km/h para aqueles que estavam entre 50 e 88 metros e 74,2 km/h para os veículos com distâncias superiores a 88 metros. A baixa velocidade de aproximação para os veículos que estavam próximos a linha de retenção pode ser explicada devido à impossibilidade dos condutores estarem a velocidades altas pararem na linha de retenção antes do surgimento do aspecto vermelho, ocorrendo assim o registro apenas daqueles com velocidades compatíveis para a parada. Além disso, a proximidade com o semáforo e a interseção pode ter influenciado o comportamento do motorista, levando-o a adotar velocidades mais seguras. A opção desses veículos já estarem em processo de frenagem deve ser descartada, pois só foram registrados os casos em que a luz de freio era acionada pelo condutor após o início do amarelo e o ainda assim o veículo tenha parado na linha de retenção.

As taxas de desaceleração não apresentaram variações significativas para a interseção que continha o menor tempo de duração do amarelo. Apesar de alguns autores, WORTMAN e MATIAS (1985), indicarem a relação inversamente proporcional entre

duração do amarelo e taxas de desaceleração, a interseção 2 (Avenida 24 de maio) com tempo de amarelo de 3 segundos apresentou média das taxas de desaceleração semelhante a outras interseções analisadas, não confirmando assim a hipótese sugerida em outros estudos.

Além dos 146 automóveis, foram calculadas as taxas de desaceleração de 36 motos e 32 ônibus. A média das taxas de desaceleração do primeiro foi de 4,0 m/s<sup>2</sup>, enquanto a do segundo foi de 2,5 m/s<sup>2</sup>. A média encontrada para as motos foi consideravelmente maior que a dos automóveis, provavelmente devido às características peculiares a esse meio de transporte, enquanto os ônibus apresentaram média similar aos automóveis, inferior em apenas 0,3 m/s<sup>2</sup>.

Sobre os veículos que durante a mudança da fase amarela para a vermelha se encontrava na zona do dilema, um total de 27 veículos apresentou média de desaceleração de 2,6 m/s<sup>2</sup>. Essa média baixa pode ser explicada pelo fato do início da zona do dilema estar localizada distante da linha de retenção, mas ainda assim é mais alta que a média encontrada na Tabela 4.5 para os veículos a mais de 88 metros da linha de retenção. WEI (2008) concluiu que a zona do dilema é mais comum quando a velocidade de aproximação do veículo costuma ser maior comparada à velocidade regulamentada da via, o que aconteceu nas interseções analisadas. A interseção 2 (Avenida 24 de Maio) foi a que apresentou o maior número de veículos que estavam dentro da zona do dilema no início da fase amarela, coincidentemente é a única em que o tempo de duração do amarelo é de 3 segundos.

Sobre os veículos localizados na zona de opção, eles poderiam tanto atravessar ou parar na linha de retenção em segurança. Um total de 16 veículos parou e apresentou média das taxas de desaceleração de 3,1 m/s<sup>2</sup>. Como a média da distância dos veículos estava próxima a linha de retenção (42 metros), os motoristas aplicaram uma taxa de desaceleração similar à de outros condutores que estavam à mesma distância e não estavam na zona de opção.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo geral foi alcançado através da análise de 146 automóveis, 32 ônibus e 36 motos em quatro interseções na cidade do Rio de Janeiro, onde foram obtidas as médias das taxas de desaceleração e do tempo de percepção e reação para acionamento dos freios no instante em que surge a indicação amarela. A necessidade dessa pesquisa ocorreu devido à falta de referência nacional sobre o tema, levando muitas vezes os técnicos em engenharia de tráfego a consultarem as pesquisas de autores estrangeiros ou ainda seguirem as recomendações dos órgãos de engenharia de transportes de outros países, sem saberem se refletia a realidade dos motoristas brasileiros.

Sobre o tempo de percepção e reação, a média encontrada de 1,1 segundos para os automóveis foi próxima aos valores encontrados na literatura estrangeira, apresentada na Tabela 3.3. Os resultados indicaram na Figura 4.13 que há uma relação linear entre o tempo de percepção e reação e a posição do veículo até a linha de retenção, onde conforme mais próximo da mesma menor é o tempo de reação do motorista. Para os motociclistas, o tempo de percepção e reação foi de 1,5 segundos, muito provavelmente devido à particularidade desse meio de transporte.

É recomendável que sejam feitas novas pesquisas para verificar se há diferenças entre o tempo de percepção e reação em função da idade (jovem x adulto), sexo (homens x mulheres) e declividade da pista (aclive x declive), pois há estudos que relatam diferenças (COLELLA, 2008), enquanto outros sugerem não haver (CAIRD *et al.* 2007). Devido à metodologia aplicada nesse trabalho não foi possível registrar essas divergências.

A média das taxas de desaceleração de todas as interseções foi de 2,8 m/s<sup>2</sup> e se mostrou relativamente inferior aos demais estudos encontrados na bibliografia e demonstrados na Tabela 3.5; com exceção de VILLANOVA (1985) que recomendou o mesmo valor encontrado nessa pesquisa.

Foi possível constatar nesse estudo a influência da posição do veículo em relação à linha de retenção no instante em que surge a fase amarela na taxa de desaceleração aplicada

pelo motorista. A Figura 4.24 indicou que conforme mais próximo o mesmo se encontra da linha de retenção, maior é a taxa de desaceleração exercida pelo condutor. O mesmo não acontece com a velocidade de aproximação, após análise da figura 4.31, não é possível constatar uma relação com a taxa de desaceleração a ser aplicada.

Entre os tipos de veículos, a moto apresentou a maior média de desaceleração, de 4,0 m/s<sup>2</sup>. Não foi encontrado na bibliografia pesquisas para comparar esse valor encontrado. Os resultados indicaram que não há diferença significativa entre a taxa de desaceleração de ônibus e automóveis.

O presente trabalho chegou ainda às seguintes conclusões:

- A taxa de desaceleração de 3,3 m/s<sup>2</sup> representa o 85º percentil dos 146 automóveis analisados;
- A taxa média de desaceleração de todos os automóveis foi de 2,8 m/s<sup>2</sup>;
- Interseção com menor tempo de amarelo não apresentou diferença na taxa de desaceleração comparada às demais interseções com maior duração do tempo de amarelo;
- A posição do veículo em relação à linha de retenção influenciou na taxa de desaceleração aplicada pelo motorista;
- A interseção com tempo de amarelo de 3 segundos registrou um número maior de condutores dentro da zona do dilema comparando com as interseções cujo tempo de amarelo são 4 segundos
- As maiores taxas de desaceleração são aplicadas para os veículos que no instante do acionamento do amarelo estão mais próximas da linha de retenção;
- Não foram encontradas relação entre a velocidade de aproximação dos veículos e a taxa de desaceleração aplicada;

- Os estudos indicaram que em vias com fluxo alto de veículos a média da taxa de desaceleração é menor;
- Veículos leves (motos) apresentaram taxas de desaceleração altas enquanto veículos mais pesados (ônibus) taxas menores;

Esse trabalho também contribuiu para realizar um registro dos valores encontrados na literatura para as taxas de desaceleração e ainda das metodologias utilizadas para obtenção dos dados necessários para o seu cálculo.

Como recomendações, são necessários mais estudos para analisar o comportamento do motorista brasileiro em interseções semaforizadas, com uma normatização para a coleta de dados dos veículos e a utilização de equipamentos modernos para a medição dos dados a serem coletados, tais como velocidade de aproximação, distância até linha de retenção e tempo transcorrido até a parada. Dessa forma, é possível contemplar um maior número de veículos e propor modelos matemáticos que expressem a taxa de desaceleração em função da distância do veículo até a posição de parada. É necessário também analisar a influência de fatores como a idade, sexo e declividade da pista na taxa de desaceleração.

O presente estudo sugere um valor fixo para a taxa de desaceleração, o que é muito útil para o dimensionamento semaforico, cálculo da zona do dilema e ainda na micro simulação. Entretanto, os veículos não apresentam uma taxa de desaceleração fixa durante todo o processo de frenagem, ou seja, outras pesquisas são necessárias para demonstrarem a variação da desaceleração em relação à posição do veículo até a linha de retenção.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAIRD, J. K., CHISHOLM, S. L., EDWARDS, C. J. e CREASER, J. I. (2005) “The Effect of Amber Light Onset Time on Older and Younger Drivers Perception Response Time (PRT) and Intersection Behavior”. In: **Transportation Research Board, 84th Annual Meeting**, Washington DC, EUA.
- CAIRD, J. K., CHISHOLM, S. L., EDWARDS, C. J. e CREASER, J. I. (2007) “Do In-Vehicle Advanced Signs Enhance Older and Younger Drivers Intersection Performance? Driving Simulation and Eye Movement Results”. In: **Transportation Research Part F 10 Traffic Psychology and Behaviour**, v.10. p. 383-396.
- CHANG, M. S.; MESSER, C. J.; SANTIAGO, A. J., (1985) “Timing Traffic Signal Change Intervals Based on Driver Behavior”. In: **Transportation Research Record 1027, TRB**, National Research Council, Washington, D.C., pp. 20–30.
- COLELLA, D.A.T. (2008). **Comportamento dos Motoristas em Interseções Semaforizadas**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Transportes. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, Brasil.
- DENATRAN (1984). **Manual de Semáforos, 2ª ed.**, Brasília, D.F., Departamento Nacional de Trânsito, Ministério da Justiça.
- DNIT (2006). **Manual de Estudos de Tráfego**, Brasília, D.F., Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, Ministério dos Transportes.
- EL-SHAWARBY, I; RAKHA, H.; INMAN, V. W. e DAVIS, G. (2005). “Evaluation of Driver Deceleration Behavior at Signalized Intersections”. In: **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, nº. 2018**, Transportation Research Board of the National Academies, Washington.
- GARCÍA, D.S.P. (2002). **Elaboração de Modelo de Previsão da Velocidade Operacional e Classificação de Rodovias do Estado do Rio Grande do Sul**

**Quanto a Sua Consistência Geométrica.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GATES, T.J., NOYCE, D.A., LARACUENTE,L., e NORDHEIM, E.V., (2007). "Analysis of Driver Behavior in Dilemma Zones at Signalized Intersections". In: **Transportation Research Record No. 2030**, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C. 29- 39.

GAZIS, D., R. HERMAN, e A. MARADUDIN., (1960) “The Problem of the Amber Signal Light in Traffic Flow”. **Operations Research**, Vol. 8, pp. 112–132.

HOMBURGER, W. S., (2003). **Fundamentals of Traffic Engineering**. University of California. Berkeley, EUA.

HURWITZ, D, C., (2009). **Application of Driver Behavior and Comprehension to Dilemma Zone Definition and Evaluation**. Tese de doutorado. University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts, EUA.

ITE (1992). **Traffic Engineering Handbook**. Institute of Transportation Engineers. 4<sup>a</sup> edição. Editor: PLINE, J. Cap. 2 – “Traffic and Vehicle Operating Characteristics”. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, EUA.

ITE (1994). **Determining Vehicle Signal Change and Clearance Intervals**. An Informational Report of the ITE. ITE, Washington, DC.

LI, Z., (2009). “Modeling Dynamic Dilemma Zones using Observed Yellow-Onset Trajectories”. In: **ITE Journal - Institute of Transportation Engineers**, vol.79 no.11, pp. 29-35. EUA.

LIU, C., GAZIS, D., R. HERMAN., (1995). **A Review of the Yellow Interval Dilemma**. Watson Research Center. Yorktown Heights, New York, U.S.A.

LIU, G.; CHANG, L.; TAO, R.; TABACEK, R. and HICKS, T. (2006) “Measuring the Response of Drivers to a Yellow Phase With a Video Based Approach”. In: **Proc. of**

**the 9th International Conf. on Applications of Advanced Technologies in Transportation**, pp. 578-583, Chicago, EUA.

LIU, Y., CHANG, G., HICKS, T., TABACEK, E., e TAO, R., (2007). “Empirical Observations of Dynamic Dilemma Zones at Signalized Intersections”. In: **Transportation Research Record**, n° 2035, pp 122-133, Chicago, EUA.

LIU, Y., CHANG, G., HICKS, T., TABACEK, E., e TAO, R., (2008). “Empirical investigation of critical factors affecting driver responses during the yellow phase: a case study at six maryland intersections”, In: Annual Meeting, **Transportation Research Record**, **Transportation Research Board**, 2008, 1-29.

MCCOY, P. e PESTI, G., (2003). “Dilemma Zone Protection on High-Speed Signalized Intersection Approaches: Advance Detection Versus Advance Warning Flashers and Advance Detection”. In: **82<sup>nd</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board, TRB**. Washington, D. C., EUA.

PAPAIOANNOU, P., (2007). “Driver Behaviour, Dillema Zone and Safety Effects at Urban Signalized Intersections in Greece”. In: **Accident Analysis & Preventions**, v. 39. pp. 147-158.

PARSONSON, P. S. e SANTIAGO. A., (1980). **Traffic Signal Change Interval Must Be Improved**. Public Works.

RAKHA, H; EL-SHAWARBY, I; SETTI, J. R., (2007). “Characterizing Driver Behavior on Signalized Intersection Approaches at the Onset of a Yellow-Phase Trigger”. In: **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, vol. 8, No. 4, pp. 630-640.

SANTOS, L. C., (2007). **Fluxo de Saturação de Interseções Complexas Controladas por Semáforos**. Tese Msc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.



- STRONG, C.; LOWRY, S.; MCCARTHY, P., (2003). “Collection of Vehicle Speed Data Using Time-Lapse Video Recording Equipment”. In: **82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board**. Washington, DC. EUA.
- TARKO, A.; LI, W.; LARACUENTE, L., (2006). “A Behavioral Approach to Risk Estimation of Rear-End Collisions at Signalized Intersections”. In: **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1973**, EUA, pp. 55-63.
- URBANIK, P. e COONCE, T., (2007). **ITE District 6 Annual Meeting 2007**, Portland, Oregon.
- VILANOVA, L. M., (1985). **Dimensionamento do Tempo de Amarelo**. Notas Técnicas 108. Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo. São Paulo, Brasil.
- WANG, J.; DIXON, K.; LI, H.; OGLE, J., (2005). “Normal Acceleration Behavior of Passenger Vehicles Starting from Rest at All-Way Stop-Controlled Intersections”. In: **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1883**, pp. 158-166.
- WEI, H., MEYER, E., LEE, J., FENG, C.E., (2005). “Video-Capture-Based Approach to Extract Multiple Vehicular Trajectory Data for Traffic Modeling”. **ASCE Journal of Transportation Engineering, Vol. 131**, No. 7 pp. 496–505.
- WEI, H. (2008). **Characterize Dynamic Dilemma Zone and Minimize its Effect at Signalized Intersections**. Research Project Report. Ohio Transportation Consortium (OTC).University of Akron, Akron, OH, EUA.
- WILLIAMS, W. L., (1977). “Driver Behavior During the Yellow Interval”. In **Transportation Research Record 644**, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 75–78.

WORTMAN, R. H., e MATTHIAS, J. S. (1985). "Evaluation of Driver Behavior at Signalized Intersections". In: **Transportation Research Record 904, TRB**, National Research Council, Washington, D.C., pp. 10–20.

YAN, X., RADWAN, E. (2005). **Driver Behavior During Yellow Change Interval**. Center of Advanced Transportation Systems Simulation. University of Central Florida. Orlando, Florida.