

TAXAS DE DESACELERAÇÃO EM INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS

Luiz Afonso Penha de Sousa

Paulo Cezar Martins Ribeiro

Programa de Engenharia de Transportes - COPPE/UFRJ

RESUMO

Este artigo tem por objetivo calcular as taxas de desaceleração aplicada pelos 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*, os dados foram tratados e comparados com aqueles encontrados na revisão bibliográfica. Os resultados indicaram que as taxas de desaceleração apresentaram valores menores aos sugeridos em estudos internacionais.

ABSTRACT

This article aims to calculate the deceleration rates applied by the drivers before the yellow aspect in signalized intersections. This information is used, among other applications, to calculate the time of yellow interval. 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 the rate of deceleration showed lowers values to those suggested by international studies.

1. INTRODUÇÃO

Quando o motorista decide parar em uma interseção semaforizada, ele deve adotar uma taxa de desaceleração para executar o processo de frenagem em segurança. O valor dessa taxa depende basicamente da distância do veículo até a linha de retenção e da velocidade que o veículo 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. As principais aplicações da taxa de desaceleração, segundo Wang (2005), estão no dimensionamento do tempo de amarelo, na microssimulação de tráfego e no cálculo da zona de dilema.

1.1. Objetivo

Esse trabalho tem como objetivo principal calcular a taxa de desaceleração aplicada pelo condutor do primeiro veículo a iniciar o processo de frenagem em uma interseção semaforizada a partir do momento em que a luz amarela é acionada. O artigo também busca verificar a influência da distância do veículo à linha de retenção no início do processo de frenagem e da velocidade de aproximação nas taxas de desaceleração. Na pesquisa, é possível constatar em quais situações a taxa de desaceleração apresenta as maiores médias.

1.2. Justificativa

Esse estudo é necessário uma vez que não foram encontrados estudos na literatura nacional que coletassem os dados em campo para posteriormente determinar a taxa de desaceleração. 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.

Além disso, os valores encontrados na literatura variam consideravelmente (entre 2,5 e 5,9 m/s^2), conforme a Tabela 1. Diante desse cenário, os técnicos da área de engenharia de tráfego se encontram em um impasse, pois caso utilizem um valor que superestime o tempo de amarelo em uma interseção, acarretará em ciclos semaforicos longos e conseqüentemente aumento da intolerância dos condutores ao amarelo. Em contra partida, o tempo de amarelo insuficiente pode acarretar em freadas bruscas, avanço do sinal vermelho, colisões traseiras e transversais.

2. TAXAS DE DESACELERAÇÃO

A maioria dos estudos que calcularam as taxas de desaceleração, além de compararem os resultados encontrados com os de outras pesquisas, indica como parâmetro o valor sugerido pelo *Traffic Engineering Handbook* (ITE, 1992) para uma desaceleração confortável, que é de aproximadamente 3,0 m/s^2 .

Tabela 1: Resumo das Taxas de desaceleração encontradas na literatura

Autor/Ano	Metodologia	Desaceleração Média (m/s^2)	Velocidade (km/h)
Gazis (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: Sousa (2011).

Em todos os casos, as taxas de desaceleração foram calculadas em função 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 a parada do veículo é definido como desaceleração média. Através da cinemática, obtém-se a Equação 1 que é utilizada para o seu cálculo e será a mesma empregada nesse estudo:

$$d = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1)$$

Onde: d = desaceleração [m/s^2];

Δv = variação da velocidade no período [m/s];

Δt = 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.

3. OBTENÇÃO DOS DADOS

A metodologia adotada para obtenção dos dados é baseada na análise de vídeos gravados de quatro interseções semaforizadas na cidade do Rio de Janeiro. A partir de programas de computador específicos, os vídeos foram formatados e foram extraídas informações (velocidade e tempo) que são utilizadas no cálculo das taxas de desaceleração. Essa metodologia já foi utilizada anteriormente por Gates *et al.* (2007).

Nesta seção são descritas as etapas para obtenção dos dados, que basicamente inclui a escolha das interseções e a gravação e formatação dos vídeos utilizados.

3.1 Escolha das Interseções

Foi selecionado um total de quatro interseções semaforizadas localizadas em pontos diferentes da cidade. Todas as vias podiam ser visualizadas a partir do sistema de câmeras da Companhia de Engenharia de Tráfego. A escolha desses locais para a coleta de dados seguiu a recomendação de Bonneson *apud* Gates *et al.* (2007), que são:

- Vias com diferentes tipos de velocidade de aproximação.
- Ciclos semaforicos 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. A Tabela 2 apresenta as principais características das vias escolhidas.

Tabela 2: Característica das Interseções

Características	Via*			
	1	2	3	4
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 da via principal.

3.2 Gravação dos Vídeos

A Prefeitura da cidade 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. Após selecionar as interseções, as câmeras foram focadas de tal forma onde era 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, conforme mostra a Figura 1.



Figura 1: Visão a partir de uma câmera da Prefeitura do Rio de Janeiro

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,

foram marcados pontos de referência na via para possibilitar a medição real das distâncias 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. Esses pontos de referência são necessários para que sejam traçadas linhas perpendiculares à via que servirão como base para o cálculo da velocidade de aproximação e ainda determinar distância do veículo à linha de retenção no início do processo de frenagem.

As linhas foram traçadas utilizando o recurso *print screen* no vídeo gravado no instante em que não há nenhum veículo se aproximando da interseção. A partir do arquivo imagem gerado, foi utilizado o programa *AutoCad 2010* para traçar as linhas transversais à via. Posteriormente, através do programa *Microsoft Expression Encoder 3.0*, o arquivo imagem é adicionado como “máscara”, sendo possível executar o vídeo gravado e visualizar as linhas simultaneamente, conforme mostra a Figura 2, que apresenta o layout do programa.

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 aproximada do veículo. No programa, é registrado o tempo necessário para o veículo parar totalmente após o acionamento do freio e através da Equação 1 é calculada a taxa de desaceleração média.

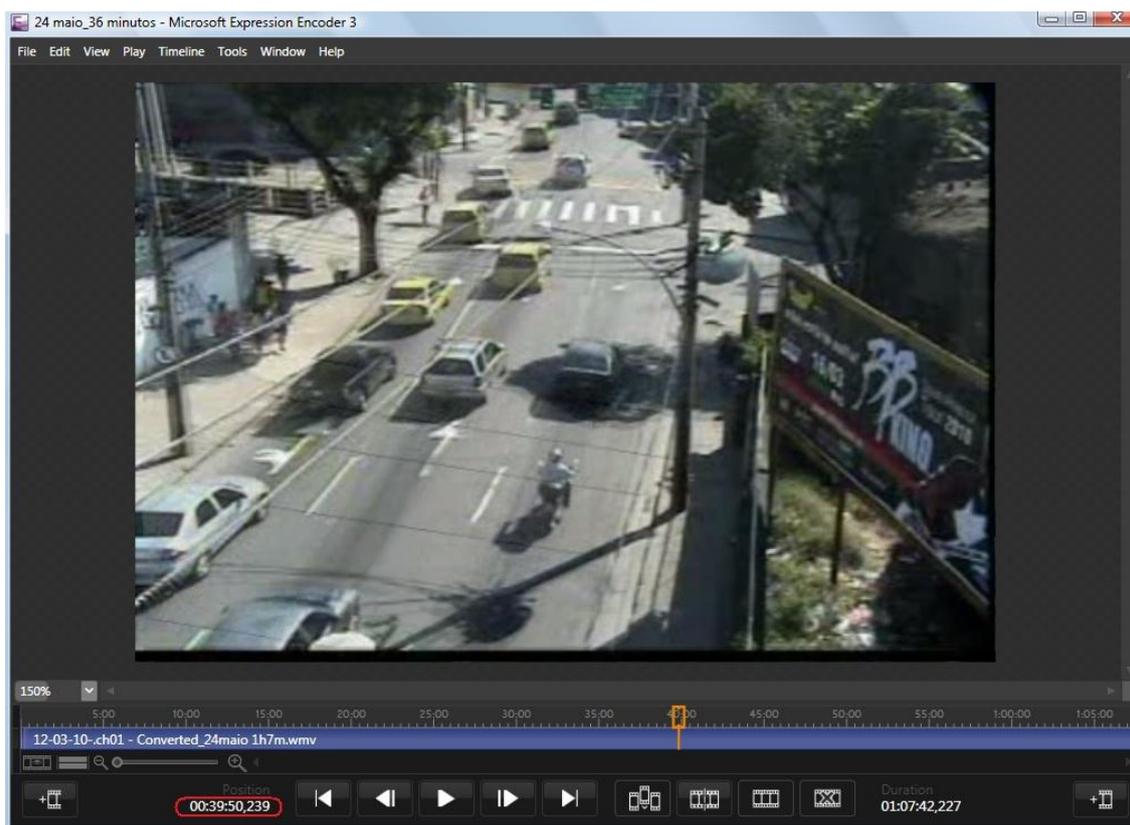


Figura 2: Layout do programa *Microsoft Expression Encoder* com um trecho da via

Só foram analisados os veículos que estavam a uma distância máxima de 125 metros a partir da linha de retenção. Wei (2008) e Gates *et al.* (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.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

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 em todas as interseções estão representados nas Figuras 3 e 4.

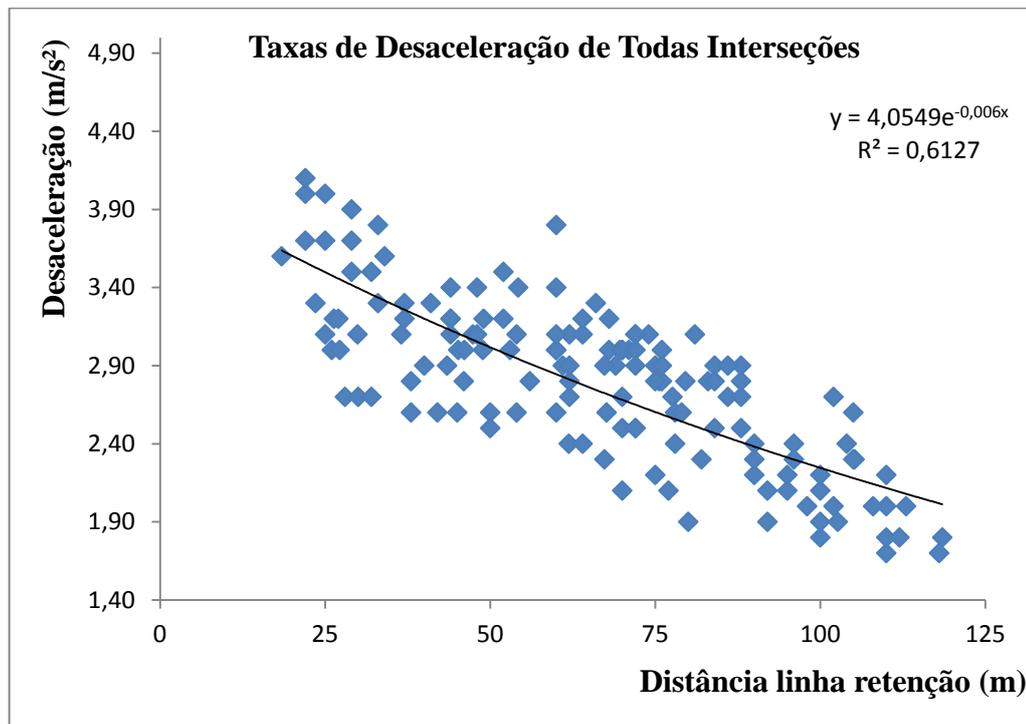


Figura 3: Distribuição das taxas de desaceleração de todas as interseções (n = 146)

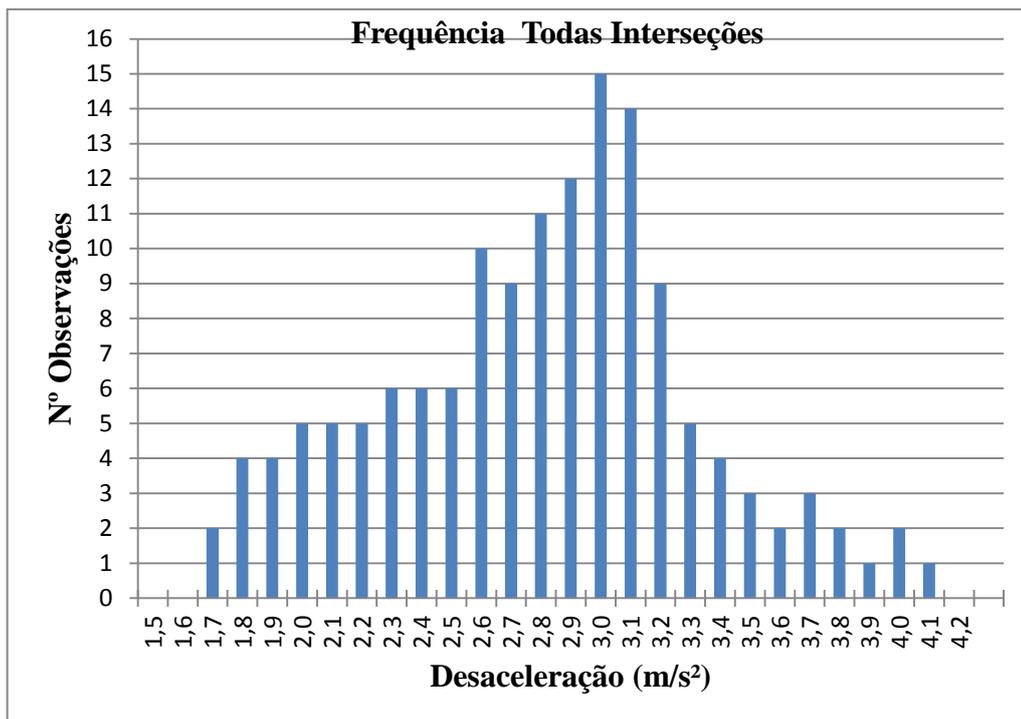


Figura 4: Frequência das taxas de desaceleração em todas as interseções (n = 146)

Quanto à posição do veículo no instante em que surge o amarelo, a análise da Figura 3 demonstra que conforme mais próximo o veículo se encontra da linha de retenção, maior é a sua taxa de desaceleração.

Não foram 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.

Na Figura 4, a frequência dos resultados encontrados em todas as interseções sugere uma distribuição normal dos dados, verificado através do teste de *Kolmogorov-Smirnov* ($d=0,07$; $d_{crít} = 0,12$).

A Tabela 3 apresenta o resumo dos resultados encontrados.

Tabela 3. Valores encontrados para as taxas de desaceleração dos automóveis

Aproximação	Nº de Veículos	Média das Taxas de Desaceleração (m/s ²)	85º Percentil	Desvio Padrão	Velocidade Aproximação (km/h)
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
Total	146	2,8	3,3	0,52	66,3

A média geral registrada das taxas de desaceleração dos automóveis foi de 2,80 m/s² e o 85º percentil 3,3 m/s². Para um nível de significância de 10% e considerando os dados obtidos com o total de 146 veículos observados, estima-se que a desaceleração dos veículos da população encontra-se no intervalo de 2,73 a 2,87 m/s². 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, as médias das taxas de desaceleração das demais apresentaram valores próximos entre si (sob o ponto de vista da engenharia de tráfego), conforme a Tabela 3. O fato de a interseção citada apresentar média significativamente inferior às demais pode ser justificado pelas características específicas do tráfego no local, com número de ônibus superior as demais e ainda a interseção possuir a menor velocidade de aproximação entre as quatro estudadas.

Na Tabela 4, é possível identificar que para distâncias até 50 metros, a média da taxa de desaceleração é 3,2 m/s², reduzindo em 2,8 m/s² a distâncias entre 51 e 88 metros e por fim atingindo média de 2,1 m/s² nos veículos que no início do amarelo se encontravam entre 88 e 125 metros da linha de retenção.

Sobre a velocidade de aproximação no instante em que o freio é acionado, a Tabela 4 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.

Tabela 4: Valores encontrados para cada trecho da via

Distância da Linha de Retenção	Nº de Veículos	Média das Taxas de Desaceleração (m/s ²)	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
Total	146	2,8	3,3	66,3

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.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo geral foi alcançado através da análise de 146 automóveis em quatro interseções semaforizadas na cidade do Rio de Janeiro, onde foram obtidas as médias das taxas de desaceleração a partir do 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.

A média das taxas de desaceleração de todas as interseções foi de 2,8 m/s² e se mostrou relativamente inferior aos demais estudos encontrados na bibliografia e demonstrados na Tabela 1; 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 3 indicou que conforme mais próximo o mesmo se encontra da linha de retenção, maior é a taxa de desaceleração exercida pelo condutor.

O presente trabalho chegou ainda às seguintes conclusões:

- A taxa de desaceleração de 3,3 m/s² representa o 85º percentil dos 146 automóveis analisados;
- A taxa média de desaceleração de todos os automóveis foi de 2,8 m/s²;
- 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;
- 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.

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 microssimulação. 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 D.C.
- Chang, M. S.; Messer, C. J. e 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.
- 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, n.º. 2018*. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, EUA.
- Gazis, D., Herman, R. e Maradudin, A. (1960). The Problem of the Amber Signal Light in Traffic Flow. *Operations Research*, Vol. 8, pp. 112–132.
- Gates, T.J.; Noyce, D.A.; Laracuate, 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.
- ITE (1992) *Traffic Engineering Handbook*. Institute of Transportation Engineers. 4ª edição. Editor: PLINE, J. Cap. 2 – “Traffic and Vehicle Operating Characteristics”. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, EUA.
- Parsonson, P. S. e Santiago. A. (1980) *Traffic Signal Change Interval Must Be Improved*. Public Works.
- Sousa, L. A. P. (2011) *Taxas de Desaceleração e Tempos de Percepção e Reação dos Motoristas em Interseção Semaforizadas*. Dissertação Mestrado. Programa de Engenharia de Transportes. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- 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. e 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. (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.

Luiz Afonso Penha de Sousa (Luiz.afonso@pet.coppe.ufrj.br)
Paulo Cezar Martins Ribeiro (Pribeiro@pet.coppe.ufrj.br)