

Atraso de pedestres em travessias semaforizadas: uma comparação entre as modelagens pelo HCM e pelo microssimulador VISSIM

Lisel Expósito Martín¹, Talyson Pereira Bandeira², Davi Garcia Lopes Pinto³,
Manoel Mendonça de Castro Neto⁴

¹Departamento de Engenharia de Transportes, UFC, liselexposito@yahoo.es

²Departamento de Engenharia de Transportes, UFC, talysonpb@gmail.com

³Departamento de Engenharia de Transportes, UFC, davi.garcia@det.ufc.br

⁴Departamento de Engenharia de Transportes, UFC, manoel@det.ufc.br

Recebido:

3 de fevereiro de 2018

Aceito para publicação:

7 de outubro de 2018

Publicado:

XX de abril de 2019

Editor de área:

José Reynaldo Setti

Palavras-chaves:

Modelagem de pedestres,
Travessias semaforizadas.

Keywords:

Pedestrian modeling,
Signalized pedestrian crossings.

RESUMO

Com o aumento da atenção ao transporte não-motorizado, a modelagem do tráfego de pedestres em travessias urbanas tem sido tema crescente na literatura. Uma das principais medidas de desempenho utilizadas para avaliar o desempenho operacional de travessias é o atraso, que é definido como o tempo de espera dos pedestres para iniciar a travessia. Duas das principais ferramentas de modelagem para estimar o atraso médio dos pedestres são o Highway Capacity Manual - HCM e software de simulação, como o VISSIM. O objetivo principal deste trabalho é comparar essas duas ferramentas para estimação do atraso médio de pedestres em travessias semaforizadas. Para isto, foram analisadas duas travessias de uma interseção localizada na cidade de Fortaleza. Concluiu-se que, quanto maior for a quantidade de brechas aceitas pelos pedestres durante o vermelho, mais realista será a modelagem realizada com o VISSIM em comparação com a proposta pelo HCM, já que a modelagem proposta para o simulador considera este tipo de comportamento dos pedestres.

ABSTRACT

With increasing attention to non-motorized modes of transportation, the modeling of pedestrian traffic on urban crossings has been increasingly investigated in the literature. One of the main measures of effectiveness used to evaluate the operational performance of pedestrian crossings is delay, which is defined as the time that a pedestrian waits before crossing. Two of the major modeling approaches for estimating the average pedestrian delay are those presented by the Highway Capacity Manual – HCM, and those used by simulation software, such as VISSIM. The main objective of this work is to compare these two tools to estimate the average delay per pedestrian in signalized crossings. For this, two crossings of an intersection located in the city of Fortaleza were analyzed. It was concluded that the higher the degree of pedestrian's violation of the red light, the better the estimation by VISSIM in comparison to that performed by HCM.

DOI:10.14295/transportes.v27i1.1581



1. INTRODUÇÃO

A modelagem do tráfego de pedestres em vias urbanas tem atraído a atenção por parte da comunidade científica nos últimos anos (Onelcin e Alver, 2015, 2017; Marisamynathan e Vedagiri, 2013, 2017). Especificamente ao tráfego de pedestres em interseções semaforizadas, destacam-se os trabalhos de Suh *et al.* (2013), Ye *et al.* (2015), Onelcin e Alver (2015; 2017) e Siti *et al.* (2017). Em tais estudos foram analisados os efeitos de um ou mais fatores em medidas de desempenho para avaliar a qualidade da travessia.

Para a análise do desempenho operacional do tráfego em travessias urbanas de pedestres, destacam-se duas ferramentas: o método proposto pelo *Highway Capacity Manual* (HCM) (TRB,

2016), que utiliza uma abordagem macroscópica, e *software* de simulação microscópica do tráfego, como o VISSIM (versão 9) (PTV, 2016). Apesar de essas metodologias apresentarem abordagens fundamentalmente distintas, ambas são alternativas comumente consideradas para se estimar indicadores de desempenho de travessias pedonais, tais como o atraso médio. Como as duas ferramentas podem ser utilizadas para a análise, o próprio HCM dedica dois capítulos para discutir as principais diferenças e cuidados na escolha entre as duas abordagens (TRB, 2016).

O método do HCM é simples, porém exige a adoção de premissas e restrições a cenários específicos que podem impossibilitar a sua aplicação. Por outro lado, a flexibilidade e a capacidade de modelar variados cenários por meio de microssimuladores como o VISSIM podem exigir um esforço de coleta de dados e de calibração de parâmetros que dificultam ou até impossibilitam o uso do *software*.

Considerando o que foi exposto, este artigo tem como objetivo principal realizar uma comparação entre a aplicação do método do HCM e a utilização da modelagem microscópica no VISSIM para estimar o atraso médio de pedestres em travessias semaforizadas, utilizando como exemplo uma interseção localizada na cidade de Fortaleza. O trabalho também tem como objetivo específico propor um método para se estimar, por meio da microssimulação, a proporção de pedestres que buscam brechas mesmo durante o sinal vermelho, variável esta que impacta no atraso médio da travessia.

2. SÍNTESE DA REVISÃO DA LITERATURA

Uma das principais medidas de desempenho utilizadas para se avaliar a qualidade da operação de travessias de pedestres é o atraso médio (s/ped). Ele é definido como o tempo médio que os pedestres esperam para iniciar a travessia (TRB, 2016). Dentre os principais fatores que influenciam o atraso de pedestres em uma travessia semaforizada estão a proporção de tempo de verde efetivo disponível para a travessia e o grau de violação do sinal vermelho por parte dos pedestres, pois quanto mais pedestres violarem, menor será o tempo que eles esperarão para iniciar a travessia, portanto, menor será o atraso médio.

Em muitos estudos tem sido investigado o grau de violação do sinal vermelho pelos pedestres. Guo *et al.* (2011) observaram em sete interseções em Pequim, na China, que 10% dos pedestres violaram o sinal em situações de alto risco e que aproximadamente metade dos pedestres desrespeitaram a sinalização depois de terem esperado 50 segundos para iniciar a travessia. Suh *et al.* (2013) estimaram a proporção de violadores de 90% para uma interseção semaforizada localizada em um campus universitário em Atlanta, EUA. Koh e Wong (2014) avaliaram sete interseções semaforizadas em Singapura e observaram que 35% dos pedestres violaram o sinal semaforizado, dos quais 22% não esperaram que os veículos saíssem completamente da área de conflito para iniciar a travessia. Dommès *et al.* (2015), por sua vez, observaram que 32% dos pedestres avaliados em sete interseções na cidade de Lille, na França, violaram o semáforo, e que as variáveis idade e tamanho de grupo realizando a travessia afetaram o grau de violação. Marisamynathan e Vedagiri (2017) identificaram que 1170 pedestres violaram a sinalização semaforizada em oito interseções em Mumbai, totalizando 55% dos pedestres. Os autores concluíram que a violação foi motivada pelos longos tempos de espera nos sinais e pelo baixo fluxo de tráfego existente. Onelcin e Alver (2017) identificaram em seis interseções semaforizadas em Izmir, na Turquia, que 334 pedestres violaram a sinalização, o que representou 75% do total de pedestres avaliados. Apesar dos altos graus de violação reportados em diversos locais do

mundo e da importância do efeito do grau de violação no atraso, o HCM não considera esse fator em seu método.

Alguns estudos têm utilizado o *software* VISSIM para simulação de pedestres em travessias urbanas. Ishaque e Noland (2009) analisaram o comportamento de violação no sinal semaforizado e concluíram que o comportamento de aceitação de brecha dependia do fluxo veicular. Suh *et al.* (2013) estimaram o atraso médio de pedestres em uma interseção semaforizada utilizando o modelo *priority rules* do VISSIM. Foram comparados os valores obtidos em campo com os simulados e os estimados pelo HCM2010. Os autores concluíram que o atraso estimado pelo VISSIM se aproximou do valor obtido em campo quando se considerou que 90% dos pedestres na simulação não respeitavam o semáforo. Já o atraso estimado pelo HCM2010 apresentou um erro de 107% em relação ao resultado de campo. Outros estudos que utilizaram o VISSIM para modelagem de pedestres foram os de Bönish e Kretz (2009) e Jacobsen e Cybis (2011). Diante do exposto, dada a utilização do VISSIM em trabalhos anteriores e devido à flexibilidade do *software* em representar o comportamento de pedestres em travessias urbanas, decidiu-se utilizar o VISSIM neste trabalho.

2.1. Estimativa do atraso médio pelo HCM

O método proposto pelo HCM para estimar o nível de serviço dos pedestres em interseções semaforizadas tem como etapa fundamental a estimação do atraso médio, obtido a partir da Equação 1, originalmente proposta por Roupail *et al.* (1998). Essa equação parte das seguintes premissas: o atraso médio independe do volume de pedestres que chega na interseção; a chegada dos pedestres é uniforme; todos os pedestres do grupo que esperam pelo sinal verde iniciam simultaneamente a travessia; e os pedestres que chegam no cruzamento durante o restante do intervalo de verde atravessam à medida que chegam. Além disso, Roupail *et al.* (1998) afirmam que alguns pedestres iniciam a travessia durante o vermelho intermitente, aumentando assim o tempo de verde efetivo disponível para os pedestres. Para representar este aumento, o HCM propõe acrescentar o tempo de 4 segundos ao tempo de verde para os casos de semáforo operando em tempo fixo, conforme a Equação 2.

$$dp = (C - g_{walk})^2 / 2C \quad (1)$$

$$g_{walk} = g + 4,0 \quad (2)$$

em que: dp é o atraso médio dos pedestres (s/ped), C é o tempo de ciclo (s), g_{walk} é o tempo de verde efetivo para realizar a travessia (s) e g é o tempo de verde para a fase de pedestre (s).

Verifica-se, portanto, que, pelo método de estimação do HCM, o atraso sofrido pelos pedestres em interseções semaforizadas é função apenas do tempo de ciclo e do tempo de verde efetivo.

2.2. Estimativa do atraso pelo microssimulador VISSIM

A simulação microscópica de pedestres no VISSIM pode ser realizada de duas formas: pelo modelo de Wiedemann 74 (Wiedemann e Reiter, 1992) ou pelo modelo de força social (Helbing e Mölnar, 1995). A principal diferença entre estas abordagens está na forma como os pedestres se deslocam: no modelo de Wiedemann 74, os pedestres só podem se deslocar em uma direção, ao longo de *links* definidos pelo usuário; já no modelo de força social, os pedestres podem se deslocar em mais de uma direção.

O modelo de força social implementado no VISSIM é uma adaptação do modelo original de Helbing e Mölnar (1995). O analista pode criar grupos de pedestres segundo o gênero (homem ou mulher), a faixa etária (criança, jovem, adulto ou idoso) e a dificuldade de locomoção (pessoa em cadeira de rodas, com criança no colo ou com bagagem). Podem ser criadas, também, diferentes categorias dentro de cada um desses grupos, denominadas “classes de pedestres”, que devem ser definidas em função do tipo de análise a ser realizada. O modelo de força social no VISSIM é composto por 20 parâmetros, dos quais 12 são referentes ao modelo original de Helbing e Mölnar (1995) e 8 são parâmetros globais do simulador. Vale ressaltar que não foi encontrado nenhum estudo de calibração desses parâmetros para modelar o atraso médio de pedestres em travessias, e que este também não é objetivo do presente estudo.

A definição de atraso (*delay*) do VISSIM é diferente da adotada pelo HCM. No VISSIM, o atraso é calculado para o deslocamento do pedestre entre dois pontos e é definido pela diferença entre o tempo de travessia caso ela fosse realizada com a velocidade desejada e o tempo de travessia de fato ocorrido. A variável do VISSIM que corresponde ao atraso definido pelo HCM é o tempo parado (*dwell time*), portanto esta será a variável a ser utilizada para se comparar os dois métodos.

Por meio do modelo de aceitação de brechas *priority rules*, o VISSIM permite simular a violação do sinal vermelho pelos pedestres denominados neste estudo de *pedestres livres*. Os pedestres livres são, portanto, aqueles que buscam por oportunidades para atravessar a todo instante, independente da indicação semafórica. Neste trabalho, os pedestres livres que efetivamente conseguem aceitar uma brecha durante o sinal vermelho são chamados de *pedestres violadores*.

Para representar a violação do sinal vermelho no simulador, o analista precisa especificar qual é a proporção de pedestres livres na travessia. Este parâmetro é de difícil coleta em campo, pois nem sempre fica claro se um pedestre que não violou o sinal vermelho o fez porque respeita a sinalização semafórica, ou seja, não é um pedestre livre, ou porque ele é um pedestre livre que não conseguiu achar uma brecha aceitável para a travessia. Uma forma de se estimar este parâmetro é calibrando-o, tendo como medida-alvo uma variável de fácil coleta e que tenha relação com a proporção de pedestres livres. Suh *et al.* (2013) utilizaram as porcentagens de travessias realizadas ao longo de subintervalos do ciclo semafórico e o atraso médio global como medidas-alvo.

Para se modelar o processo de aceitação de brechas dos pedestres livres durante o sinal vermelho, o analista precisa definir o valor do parâmetro brecha crítica (*minimum gap time*) do modelo *priority rules*. Dentre os fatores que influenciam o valor de brecha crítica dos pedestres, destacam-se: faixa etária, gênero, velocidade de caminhada e atraso (Siti *et al.*, 2017); duração das brechas (Guo *et al.*, 2011); número de faixas a serem atravessadas (Kadali *et al.*, 2015); e o número de pedestres realizando a travessia (Siti *et al.*, 2017).

Alguns métodos foram desenvolvidos para se estimar a brecha crítica de pedestres em travessias. Nesse sentido, destaca-se o trabalho de Chandra *et al.* (2014), no qual a brecha crítica é estimada a partir da interseção da curva de frequências acumuladas das brechas aceitas pelos pedestres com a curva complementar de frequências acumuladas dos tempos de travessias, contados a partir do instante em que o pedestre aceita a brecha até o momento em que ele finaliza a travessia. Utilizando esse método, Chandra *et al.* (2014) estimaram valores de brecha crítica para diferentes travessias e tipos de pedestres, obtendo valores que variaram entre 3,4 e 9,7 segundos em travessias semaforizadas de vias com 2 faixas e fluxo veicular unidirecional variando entre 1600 e 2900 veíc/h. Os resultados do estudo também mostraram que as brechas

aceitas pelos homens foram, em média, menores do que as brechas aceitas pelas mulheres: 8,5 segundos para homens e 9,1 segundos para mulheres em travessias com 2 faixas e fluxo unidirecional e 10,2 segundos para homens e 11,6 segundos para mulheres para travessias de 3 faixas e fluxo bidirecional.

3. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS

A análise comparativa realizada neste trabalho foi dividida em quatro etapas: (i) definição da área de estudo e coleta de dados; (ii) estimativa do atraso médio pelo método do HCM; (iii) estimativa do atraso médio pelo VISSIM; e (iv) comparação entre as duas modelagens. Essas etapas são descritas a seguir.

3.1. Área de estudo e coleta de dados

A área selecionada para a análise está localizada na avenida Bezerra de Menezes, na cidade de Fortaleza (Figura 1). As duas travessias analisadas estão localizadas entre duas interseções, com um *shopping center* ao norte, uma agência bancária ao sul, uma parada de ônibus e uma estação de BRT (*Bus Rapid Transit*) no canteiro central. Esse contexto faz com que o fluxo de pedestres na travessia seja relativamente intenso (cerca de 1270 ped/h somando-se ambos os sentidos). Além disso, a avenida na qual ela está situada possui caráter multimodal, dado que a mesma é dotada de faixas exclusivas para transporte público, ciclofaixa e duas faixas de tráfego misto em cada sentido.

A interseção em estudo possui quatro áreas predominantes de origem e destino de pedestres: área 1, na calçada sul, onde localiza-se uma agência bancária; área 2, na calçada norte, área de circulação na entrada do *shopping center*; área 3, localizada no canteiro central, onde encontra-se o ponto de parada de ônibus urbano e intermunicipal; e área 4, também no canteiro central, onde está localizada uma estação de BRT.

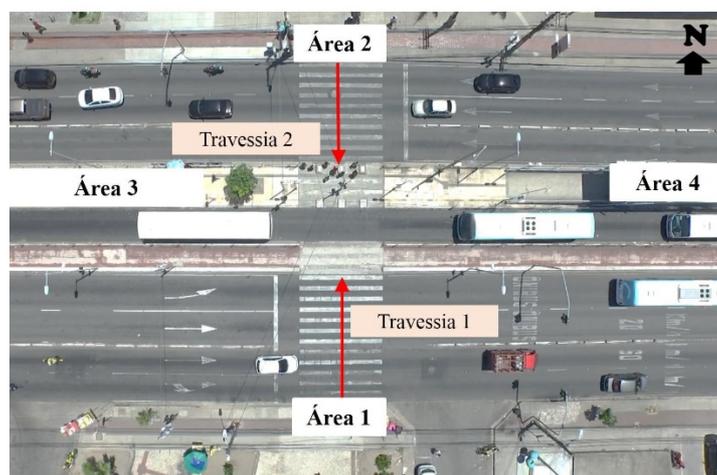


Figura 1: Travessias analisadas

Os dados foram coletados no dia 5 de setembro de 2017, entre 10:30h e 12:00h. Foram observados diretamente em campo os fluxos de automóveis veiculares e de transporte público em ambos os sentidos, em intervalos de 15 minutos, e a programação semafórica a cada ciclo. Foram utilizados vídeos de fiscalização eletrônica, do mesmo dia e horário, para coletar os dados relativos aos pedestres, descritos nos parágrafos a seguir.

Dos quatro sentidos de travessias existentes no local, neste trabalho foram selecionadas dois: a *travessia 1*, que tem origem na área 1 e destino no canteiro central e a *travessia 2*, com origem na área 2 e destino no canteiro central, como indicado na Figura 1. Essas duas travessias foram escolhidas por terem características físicas e operacionais distintas, como apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características físicas e operacionais nas travessias de análise

Travessia	Demanda de pedestre (ped/h)	Grau de violação (%)	Número de faixas	Fluxo horário de automóveis veiculares (veic/h)	Fluxo horário de transporte público (veic/h)	Atraso médio pedestre violador (s/ped)	Atraso médio pedestre não-violador (s/ped)
1	440	59	4	1052	135	27	53
2	590	10	3	1303	30	25	53

O grau de violação e o atraso médio dos pedestres violadores e não-violadores foram coletados utilizando os vídeos das câmeras de fiscalização eletrônica localizadas em ambas as travessias, fornecidos pelo Centro de Controle de Tráfego de Fortaleza (CTAFOR). O atraso de cada pedestre foi observado como o intervalo de tempo entre a sua chegada e o momento em que ele inicia a travessia. A violação do semáforo consistiu na ocorrência de travessia durante o sinal vermelho para o pedestre.

Foram definidos quatro tipos de pedestres: homens (com idade entre 18 e 60 anos), mulheres (com idade entre 18 e 60 anos), jovens (indivíduos de ambos os gêneros com menos de 18 anos) e idosos (indivíduos de ambos os gêneros com mais de 60 anos). Devido à dificuldade de se observar as características individuais de todos os pedestres, decidiu-se realizar a classificação por meio de amostragem aleatória, em cada travessia. As proporções de cada tipo de pedestre foram estimadas por meio de intervalos de confiança de 95%, utilizando uma amostra com tamanho $n=203$ pedestres para a travessia 1 e $n=100$ pedestres para a travessia 2. As estimativas são mostradas na Figura 2.

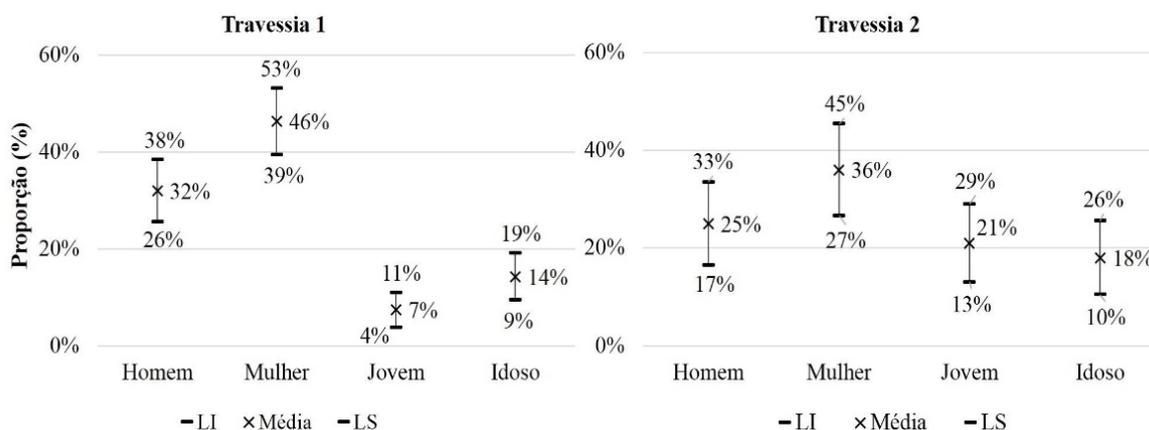


Figura 2: Intervalos de confiança das proporções dos tipos de pedestre.

A velocidade desejada de cada tipo de pedestre foi estimada dividindo-se o tempo de travessia pela distância percorrida. Esse tempo foi medido a partir do momento em que o pedestre atinge velocidade constante até o momento da finalização da travessia. Os tamanhos das amostras foram os seguintes: 322 homens, 401 mulheres, 108 jovens e 130 idosos, totalizando 961 pedestres. Para testar a hipótese de normalidade da distribuição da variável, foram aplicados

testes de aderência qui-quadrado (χ^2) com nível de significância de 5% para cada tipo de pedestre. Em nenhum dos testes a hipótese nula de normalidade pôde ser rejeitada. A Figura 3 apresenta as distribuições de probabilidade normal acumuladas resultantes, as quais foram inseridas como dados de entrada no VISSIM.

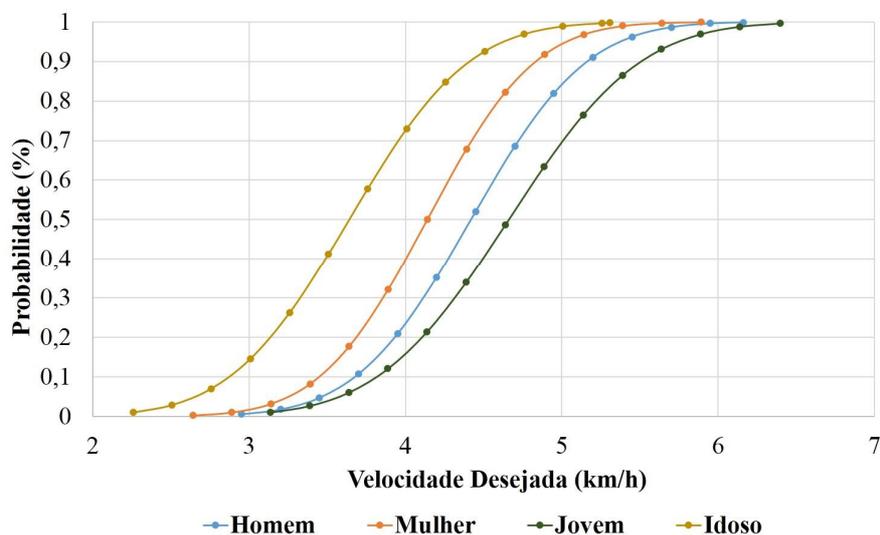


Figura 3: Curva normal acumulada da velocidade desejada

Conforme esperado, observou-se que os pedestres do tipo idoso foram os que apresentaram menores valores de velocidade desejada, com média igual a 3,6 km/h (IC95% [3,5–3,8] km/h). Já a maior velocidade desejada foi observada para os jovens, com média igual a 4,7 km/h (IC95% [4,5–4,8] km/h). As velocidades desejadas de homens e mulheres foram intermediárias em relação às outras duas, com média de 4,4 km/h (IC95% [4,3–4,5] km/h) e 4,1 km/h (IC95% [4,0–4,2] km/h), respectivamente.

Para cada tipo de pedestre, foram coletados os atrasos, os tempos de travessia em fluxo livre, os tamanhos das brechas aceitas e o tempo de travessia dos pedestres violadores.

3.2 Estimativa do atraso pelo HCM

A estimativa do atraso pelo HCM foi feita pela Equação 1. A interseção analisada possui ciclo de 160 segundos e dois estágios, sendo 44 segundos de verde para o estágio de pedestres. A aplicação das equações 1 e 2 resulta em uma estimativa de atraso médio de 39 s/ped para ambas as travessias analisadas. Isso representa uma superestimação do valor observado em campo de 35% para a travessia 1 (29 s/ped) e de 22% para a travessia 2 (32 s/ped).

3.3 Estimativa do atraso pelo VISSIM

As características geométricas e operacionais da via, bem como as características físicas dos pedestres e veículos na interseção foram utilizadas para a codificação da rede no VISSIM (Figura 4). Na simulação, foram utilizados os seguintes dados de entrada: a demanda horária de pedestres e de veículos nas faixas de tráfego misto e de transporte público, distribuição da velocidade desejada e brecha crítica para cada tipo de pedestre. Os valores dos parâmetros do modelo de força social foram mantidos em *default*.

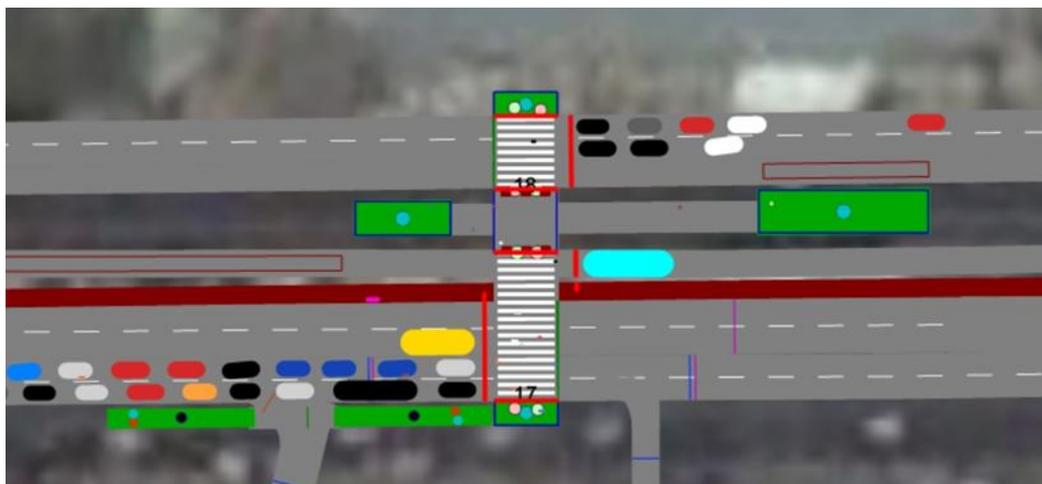


Figura 4: Rede codificada no VISSIM

O parâmetro brecha crítica de cada tipo de pedestre foi estimado de acordo com o método proposto por Chandra *et al.* (2014), anteriormente descrito. Os resultados da aplicação estão expostos na Tabela 2 e na Figura 5, sendo que nesta figura são mostrados os resultados para os tipos jovem e idoso, para mostrar o contraste entre estes dois tipos de pedestres. Vale ressaltar que a possibilidade de se atribuir valores de brecha crítica por tipo de pedestre e também a capacidade de representar pedestres livres foram os principais motivos para a escolha do modelo de aceitação de brechas *priority rules*, e não o *conflict areas*, do VISSIM.

A travessia 1 apresentou valores de brecha crítica maiores do que a travessia 2. Isto ocorreu pelo fato de a travessia 1 possuir um maior número de faixas. Outro motivo que pode explicar essa diferença é que o volume de tráfego na travessia 2 é mais intenso, o que aumenta o tempo de espera, que, por sua vez, pode causar uma redução na brecha crítica. Em ambas as travessias, os pedestres idosos foram os que apresentaram maior valor de brecha crítica, como esperado.

Tabela 2: Brechas aceitas e crítica por tipo de pedestre

Tipo de Pedestre	Brechas Aceitas (s)					Brecha Crítica (s)
	# observações	Mínima	Máxima	Média	Desvio Padrão	
Travessia 1						
Homem	68	1,9	18,6	9,4	5,0	4,9
Mulher	92	3,4	22,1	12,0	5,2	5,6
Jovem	36	4,6	18,6	10,0	4,2	4,8
Idoso	55	3,6	22,1	12,9	6,5	6,1
Travessia 2						
Homem	81	2,0	19,8	6,6	1,6	4,3
Mulher	50	3,3	19,8	8,5	3,5	4,9
Jovem	28	2,2	14,0	6,8	2,6	4,4
Idoso	13	4,2	8,1	6,9	1,1	5,7

Em seguida passou-se à estimação da proporção de pedestres livres. Dada a dificuldade já relatada em se observar a proporção de pedestres livres em campo, visto que nem sempre é possível determinar se o pedestre está ou não buscando brechas para realizar a travessia no sinal vermelho, utilizou-se o VISSIM para calibrar essa proporção utilizando três alvos de calibração: os atrasos médios desagregados por tipo de pedestres (violadores e não violadores); a

distribuição de frequência do atraso individual dos pedestres; e a proporção de pedestres violadores. A escolha destes alvos de calibração se baseou na premissa de que eles possuem forte relação com o grau de violação do sinal vermelho, que por sua vez está fortemente relacionado com a proporção de pedestres livres.

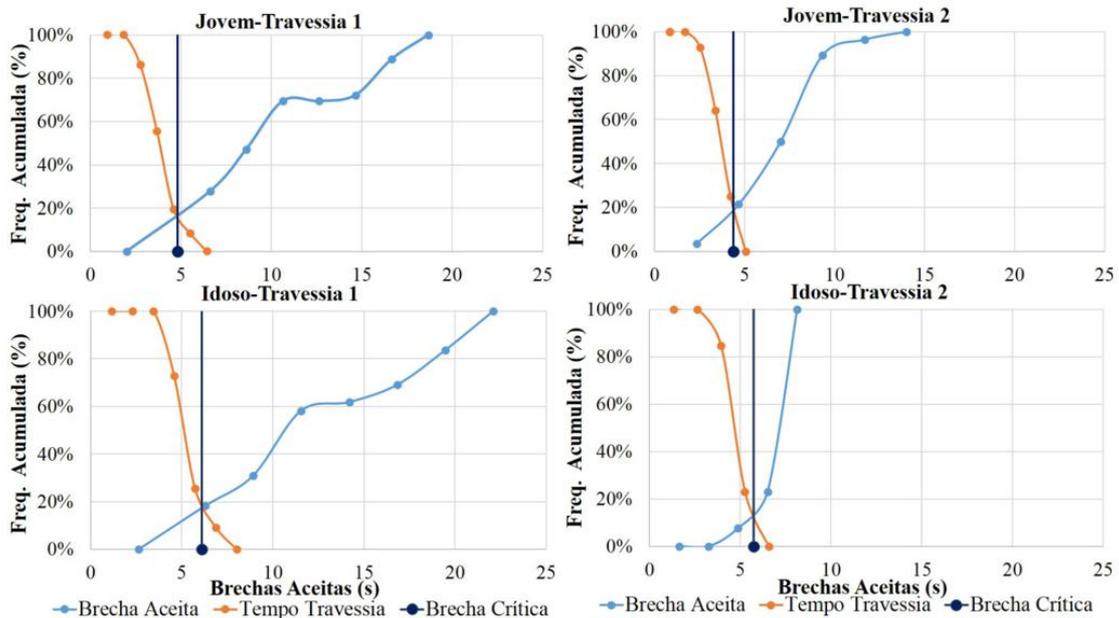


Figura 5: Estimação da brecha crítica

Para a calibração desse parâmetro foram criados cinco cenários de simulação, cada cenário representando uma proporção de pedestres livres, sendo o primeiro cenário (C1) com 0% de pedestres livres e o quinto cenário (C5) com 100%, tendo os cenários intermediários incrementos de 25%. Para cada cenário, foram executadas 10 replicações, resultando em aproximadamente 6500 observações de atraso individual para a travessia 1 e 8600 observações para a travessia 2. Esses tamanhos de amostras permitiram gerar intervalos de 95% confiança de atraso médio com precisão de 0,8s. Em cada caso foram obtidos resultados de atraso médio dos pedestres violadores e dos não-violadores. Esses valores foram comparados com os atrasos médios de campo para a travessia 1 (53 s para não-violador e 27 s para violador) e para a travessia 2 (53 s para não-violador e 25 segundos para violador), como mostra a Figura 6.

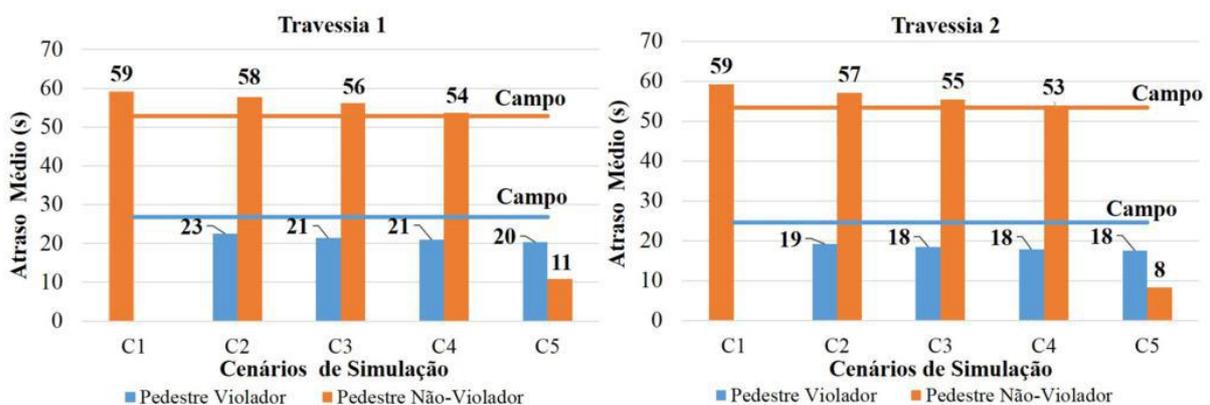


Figura 6: Comparação dos atrasos médios simulados e observados

Para cada cenário de cada travessia analisada, foi aplicado um teste de hipóteses para comparar o atraso médio dos pedestres violadores simulados e observados em campo – o teste não foi feito para C1, já que neste cenário não há pedestres violadores. A hipótese nula de igualdade dos atrasos médios não foi rejeitada em nenhum dos cenários, indicando que independente da proporção de pedestres livres inserida, o modelo conseguiu estimar bem o atraso médio dos pedestres violadores.

Quanto ao atraso médio sofrido pelos pedestres não-violadores, nota-se que o mesmo decresceu com o aumento da proporção de pedestres livres. Isso explica-se pelo fato de que, com o aumento de pedestres livres, os pedestres desse tipo que chegam no início do vermelho têm maior probabilidade de conseguir violar o sinal, em comparação àqueles que chegam no final. Logo, a maior parcela de pedestres não-violadores é composta por aqueles que chegam mais próximo ao final do ciclo, fazendo com que o atraso médio seja menor.

Para a travessia 1, os cenários C3 e C4 foram os que apresentaram valores mais próximos dos valores observados em campo. Ao se comparar o atraso sofrido pelos pedestres violadores, esses cenários apresentaram erro (erro percentual absoluto médio - EPAM) de 20%, e 22%, respectivamente. Para os pedestres não-violadores, os erros foram de 6% e 2%, respectivamente. Para a travessia 2, os menores erros foram os dos cenários C2 e C3, apresentando valores de EPAM de 22% e 25% para violadores e 7% e 4% para os não-violadores.

Para que a escolha do melhor cenário não se baseie apenas em valores médio de atraso, comparou-se a distribuição de frequência dos atrasos coletados em campo com as distribuições dos atrasos obtidos nos cenários de simulação C3 e C4 para travessia 1 e C2 e C3 para a travessia 2 (Figura 7). Nota-se que, para ambas travessias, os cenários comparados oferecem um bom ajuste aos dados de campo, principalmente para os valores de atraso mais altos (maiores de 30 s), que são de maior importância e preocupação para a qualidade da operação. Nessas classes, a maior diferença entre as frequências foi de 4%. Apesar da boa aderência, testes de aderência χ^2 e de Kolmogorov-Smirnov, com nível de significância de 5% rejeitaram a hipótese nula de que os dados de campo podem ter vindo da distribuição de probabilidade representada pelo modelo de simulação. A significância estatística encontrada pode ser explicada pelo elevado número de observações das amostras.

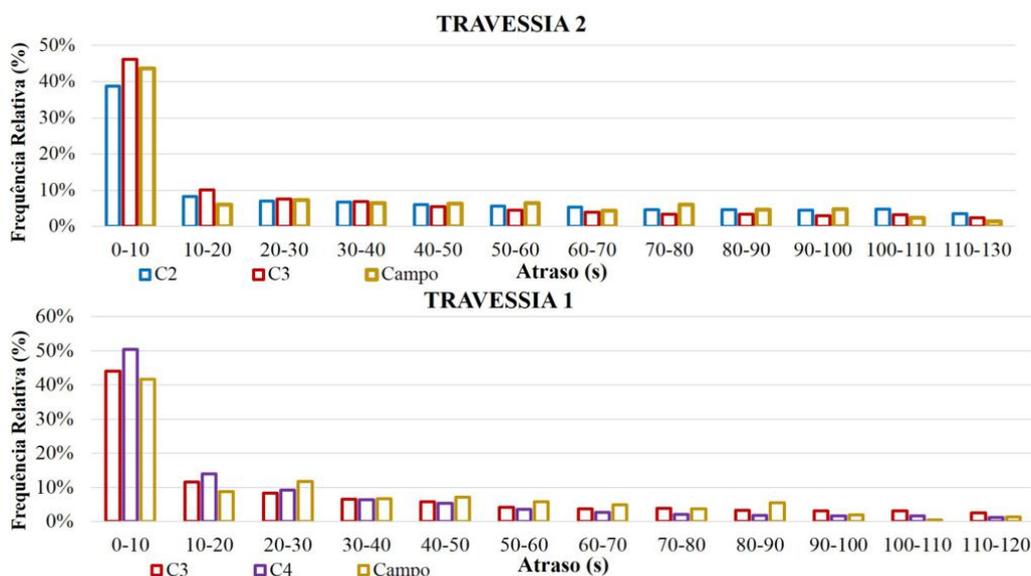


Figura 7: Distribuição de frequência dos atrasos de campo e de cenários de calibração.

O terceiro critério para se escolher o valor mais adequado para a proporção de pedestres livres foi a similaridade das proporções de pedestres violadores simulados e observados. Na travessia 1, o C3, que resultou em 48% de pedestres *violadores* (IC95% [46-49] %), foi o que mais se aproximou da proporção observada em campo, de 59% (IC95% [55-64] %). Já a simulação utilizando o cenário C4 resultou em um total de 73% de pedestres *violadores* (IC95% [72-75] %). Na travessia 2, o C2 resultou em 22% de pedestres *violadores* (IC95% [21-23] %), sendo mais próximo da proporção observada em campo de 10% (IC95% [7-12] %) do que o cenário C3, o qual apresentou um total de 46% de pedestres *violadores* (IC95% [45-47] %).

Com base nos resultados encontrados com os três alvos de calibração, escolheu-se o cenário C3, que tem 50% de pedestres livres, para a travessia 1, e o cenário C2, que tem 25% de pedestres livres, para a travessia 2.

3.4. Comparação dos métodos

A Figura 8 apresenta os atrasos médios estimados pelo HCM e pelo VISSIM, bem como o observado em campo, considerando todos os pedestres. Isto inclui os violadores e não-violadores, assim como os pedestres que chegaram durante o sinal verde.

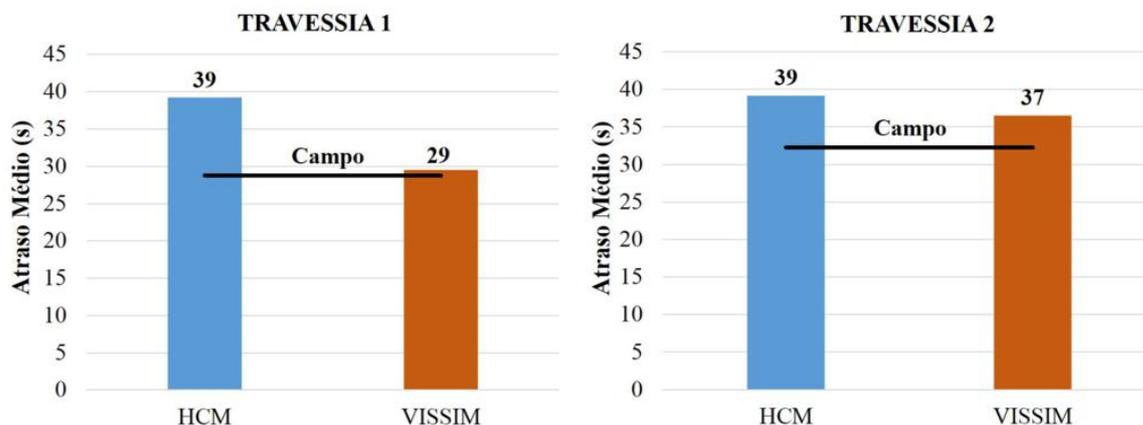


Figura 8: Comparação dos atrasos médios estimados e observado

A superestimação do atraso médio em 10 s/ped pelo HCM (erro de 35%) para a travessia 1 e em 7 s/ped na travessia 2 (EPAM 22%), pode ser explicada, em grande parte, pela não consideração de pedestres que violam o sinal vermelho no modelo. Outros fatores contribuintes, hipoteticamente menos relevantes, são a inadequação da premissa de chegada determinística e do cálculo de verde efetivo. Neste trabalho não foram realizadas verificações da adequabilidade de tais premissas. Pode-se classificar o erro de estimação de 10 s/ped como expressivo quando se considera a afirmação do HCM de que atrasos abaixo de 10 s/ped implicam em alta probabilidade dos pedestres respeitarem a sinalização semafórica e que atrasos maiores de 30 s/ped tendem a ocasionar impaciência nos pedestres e, conseqüentemente, violações do vermelho (TRB, 2016).

A estimação pelo VISSIM, na travessia 1 foi 10 s/ped (11%) menor do que a estimação realizada pelo HCM. A diferença entre a estimação do VISSIM e a de campo foi de 0,0 s/ped (IC95% [-1,9-3,3] s/ped). Portanto, não houve diferença estatisticamente significativa entre as médias de atraso simuladas e observadas.

Com relação à travessia 2, o VISSIM resultou numa estimação de 2 s/ped (5%) menor do que a estimação pelo HCM. Quanto ao atraso coletado em campo, o VISSIM apresentou uma diferença de 5 s/ped (IC95% [1,9–6,6] s/ped). Apesar do intervalo de confiança apresentar significância estatística entre as médias, percebe-se que o valor inferior do limite é relativamente próximo de zero.

O fato de o HCM ter superestimado mais o atraso da travessia 1, que tem maior grau de violação, pode ser explicado pela não representação de pedestres violadores pelo modelo.

Outra hipótese para a superestimação do atraso pelo HCM pode ser a de que o valor *default* de 4 segundos de acréscimo ao tempo de verde para compor o verde efetivo seja baixo para a travessia em estudo. Foi realizada uma análise de sensibilidade deste fator, variando-o de 0 a 10 segundos, em incrementos de 1 segundo. Para o fator igual a 0 segundos, a estimativa de atraso médio foi de 42 s/ped. Para o fator igual a 10 segundos, a estimativa de atraso diminuiu para 35 s/ped. Para que a estimativa do HCM ficasse igual ao valor de atraso de campo, o fator precisaria ser igual 20 segundos para a travessia 1 e 15 segundos para a travessia 2, valores esses bastante altos.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Para as travessias analisadas, o método do HCM superestimou o atraso médio devido a não consideração da violação do semáforo pelos pedestres. O VISSIM apresentou uma estimativa mais próxima do valor de campo, e menor do que a estimativa do HCM, já que o simulador permite a modelagem de pedestres violadores. Portanto, para travessias com alto grau de violação do sinal vermelho, sugere-se a utilização do método de microsimulação proposto.

A abordagem macroscópica do HCM resulta em valores médios de atraso sem considerar características dos pedestres, como idade e gênero. Tais características podem influenciar no atraso em locais em que o nível de violação do semáforo for alto, pois elas podem impactar consideravelmente o processo de aceitação de brechas.

A flexibilidade e a possibilidade de modelar cenários mais complexos no VISSIM exigem esforços de coleta de dados e de calibração bem maiores do que os exigidos pelo HCM. Este estudo exigiu a observação individual dos pedestres para se coletar: a idade, o gênero, o tempo de caminhada, o tamanho da brecha aceita e se o pedestre violou o semáforo. Os parâmetros calibrados, ou seja, que tiveram seus valores estimados por tentativa-e-erro com base em um alvo foram brecha crítica e proporção de pedestres livres.

Recomenda-se a calibração da proporção de pedestres livres com base em três alvos: o atraso médio desagregado por tipo de pedestre (violadores e não-violadores); a distribuição de frequência dos atrasos individuais considerando todos os pedestres; e a proporção de pedestres violadores. A proporção de pedestres livres estimada para a travessia 1 foi de 50% e para a travessia 2 foi de 25%. É difícil verificar a validade destas estimativas devido à dificuldade de se observar a variável em campo, porém a utilização de três alvos de calibração fortalece a estimativa.

Como recomendações para trabalhos futuros, recomenda-se verificar o cálculo do tempo de verde efetivo utilizado no método do HCM. Nesse estudo, utilizou-se o acréscimo de 4 segundos ao tempo de verde, como sugerido pelo manual. Entretanto, esse número pode variar de acordo com características da travessia e dos pedestres. Com relação à modelagem utilizando o VISSIM, recomenda-se realizar análises de sensibilidade dos parâmetros do modelo de Força Social para

verificar a necessidade de calibração dos mesmos para a estimação do atraso em travessias semaforizadas. Por fim, sugere-se comparar as duas ferramentas considerando diferentes demandas pedonais e veiculares, graus de violação e tipos de travessias, para melhorar o entendimento da relação entre esses fatores e a qualidade das estimativas das duas ferramentas de análise.

REFERÊNCIAS

- Bönisch, C. e T. Kretz (2009) *Simulation of Pedestrian Crossing Street*. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/0911.2902.pdf>> (acesso em 18/04/2019). DOI: 10.13140/RG.2.1.1843.7842
- Chandra, S.; R. Rastogi e V. Das (2014) Descriptive and parametric analysis of pedestrian gap acceptance in mixed traffic conditions. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 18, n. 1, p. 284–293. DOI: 10.1007/s12205-014-0363-z
- Dommes, A.; M.-A. Granié; M.-S. Cloutier; C. Coquelet e F. H.-Richard (2015) Red light violations by adult pedestrians and other safety-related behaviors at signalized crosswalks. *Accident Analysis and Prevention*, v. 80, p. 67–75. DOI: 10.1016/j.aap.2015.04.002
- Guo, H.; Z. Gao; X. Yang e X. Jiang (2011) Modeling pedestrian violation behavior at signalized crosswalks in China: A hazards-based duration approach. *Traffic Injury Prevention*, v. 12, n. 1, p. 96–103. DOI: 10.1080/15389588.2010.518652
- Helbing, D. e P. Molnár (1995) Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, v. 51, n. 5, p. 4282–4286
- Ishaque, M. M. e R. B. Noland, (2011) Pedestrian and Vehicle Flow Calibration in Multimodal Traffic Microsimulation. *Journal of Transportation Engineering*, v.135, n. 6, p. 338-348. DOI:10.1061/(ASCE)0733-947X(2009)135:6(338)
- Jacobsen, A. e H. B. B. Cybis (2011) Microssimulação da travessia de pedestres : coleta de dados para calibração de modelos. *Transportes*, v. 19, p. 79–86. DOI:10.14295/transportes.v19i2.509
- Kadali, B.; P. Vedagiri e N. Rathi (2015) Models for pedestrian gap acceptance behaviour analysis at unprotected mid-block crosswalks under mixed traffic conditions. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, v. 32, p. 114–126. DOI: 10.1016/j.trf.2015.05.006
- Koh, P. P. e Y. D. Wong (2014) Gap acceptance of violators at signalised pedestrian crossings. *Accident Analysis and Prevention*, v. 62, p. 178–185. DOI: 10.1016/j.aap.2013.09.020
- Marysaminathan, S. e P. Vedagiri (2013) Modeling Pedestrian Delay at Signalized Intersection Crosswalks under Mixed Traffic Condition. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, v. 104, p. 708-717. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.11.165
- Marysaminathan, S. e P. Vedagiri (2017) Modeling Pedestrian Level of Service at Signalized Intersection Under Mixed Traffic Conditions. *Transportation Research Record*, v. 2634, p. 86-94. DOI: 10.3141/2634-13
- Onelcin, P. e Y. Alver (2015) Illegal crossing behavior of pedestrian at signalized intersections: Factors affecting the gap acceptance. *Transportation Research Part F*, v. 31, p. 124-132. DOI:10.1016/j.trf.2015.04.007.
- Onelcin, P. e Y. Alver (2017) The crossing speed and safety margin of pedestrians at signalized intersections. *Transportation Research Procedia*, v. 22, p. 3-12. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.03.002.
- PTV (2016) *Vissim 9 User Manual*. Karlsruhe, Germany.
- Rouphail, N.; J. Hummer; J. Milazzo e D. Allen (1998) *Recommended Procedures Chapter 13, "Pedestrian", of the Highway Capacity Manual*. Report FHWA-RD-98-107. Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Siti, N. N. M.; D. B. Daniel; R. Hamidun; A. Walid; R. Munzilah; P. Joewono; A. M. Yusri e A. Kamarudin (2017) Analysis of Pedestrian Gap Acceptance and Crossing Decision in Kuala Lumpur. *MATEC Web of Conferences*. DOI: 10.1051/mateconf/201710308014
- Suh, W.; D. Henclewood; A. Greenwood; A. Guin; R. Guensler; M. P. Hunter e R. Fujimoto (2013) Modeling pedestrian crossing activities in an urban environment using microscopic traffic simulation. *Simulation*, v. 89, n. 2, pp 213-224. DOI: 10.1177/0037549712469843
- TRB (2016) *Highway Capacity Manual 6th Edition*. Transportation Research Board. Washington, DC.
- Wiedemann, R. e U. Reiter (1992) *Microscopic Traffic Simulation: The Simulation System MISSION*. Project ICARUS (V1052). Final Report, p. 1-53.
- Ye, X.; J. Chen; G. Jiang e X. Yan (2015) Modeling pedestrian level of service at signalized intersection crosswalks under mixed traffic conditions. *TRB 94th Annual Meeting*. Whashington D.C. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.11.165