

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

André Cademartori Jacobsen

**MICROSSIMULAÇÃO DA TRAVESSIA DE  
PEDESTRES**

Porto Alegre

2011

André Cademartori Jacobsen

## **Microsimulação da travessia de pedestres**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Acadêmica, na área de concentração em Sistemas de Transportes.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Helena Beatriz Bettella Cybis, Ph.D.

Porto Alegre

2011

André Cademartori Jacobsen

## **Microsimulação da travessia de pedestres**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pela Orientadora e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

**Prof.<sup>a</sup> Helena Beatriz Bettella Cybis, Ph.D.**

Orientadora PPGEP/UFRGS

---

**Prof.<sup>a</sup> Carla Schwengber ten Caten, Dra.**

Coordenadora PPGEP/UFRGS

### **Banca Examinadora:**

Professor Flávio José Craveiro Cunto, Dr. (DET/UFC)

Professora Christine Tessele Nodari, Dr. (PPGEP/UFRGS)

Paula Ariotti, Dr. (EPTC)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha orientadora no desenvolvimento desta dissertação, a Prof.<sup>a</sup> Helena Cybis, que desempenhou um papel fundamental para o êxito da pesquisa.

Agradeço ao CNPq pela bolsa de auxílio a pesquisa e bolsas de produtividade.

Agradeço aos professores da área de transportes por compartilhar seus conhecimentos e experiências com o entusiasmo que fomenta o interesse sobre os diversos temas da área.

Agradeço a minha família por apoiar a minha formação acadêmica e profissional.

## RESUMO

Esta dissertação apresenta uma análise sobre a modelagem de travessias de pedestres. Os simuladores de tráfego recentemente incorporaram modelos de pedestres, porém, as habilidades e limitações para a representação dos comportamentos em travessias não foram analisadas e apresentadas na literatura. Esta dissertação é composta por três artigos, nos quais são apresentados: (i) caracterizações dos comportamentos de pedestres e motoristas em travessias, (ii) análises dos modelos que representam o comportamento em travessias, (iii) a metodologia desenvolvida para coleta de dados de travessias, (iv) a calibração dos modelos de movimentação de pedestres, aceitação de brechas e da decisão dos pedestres sobre desrespeitar semáforos em travessias semaforizadas de pedestres e (v) uma análise da habilidade e limitações dos modelos para representar os atrasos de pedestres em travessias semaforizadas. Observou-se que a representação dos comportamentos em travessias depende de diversos modelos, que representam a escolha de rotas dos pedestres, movimentação, aceitação de brechas, decisão dos motoristas sobre dar preferência em travessias e decisão dos pedestres sobre obedecer aos semáforos. Os modelos de aceitação de brechas de pedestres utilizados, por exemplo, são baseados nos modelos desenvolvidos para representar interseções não semaforizadas de veículos e simplificam consideravelmente os comportamentos de pedestres e motoristas. As dificuldades para coletar dados de pedestres em travessias é um dos fatores que limitam o desenvolvimento de novos modelos. Nesta dissertação foi desenvolvida uma metodologia semiautomática, na qual os pedestres e veículos são rastreados com softwares livres, que facilita a obtenção de dados. As coletas de dados desenvolvidas permitiram a calibração dos modelos do VISSIM para representar uma travessia semaforizada com múltiplas faixas de tráfego, onde a maioria dos pedestres não obedece ao semáforo. Apesar de que parâmetros como as velocidades desejadas e brechas mínimas aceitas pelos pedestres predefinidas nos modelos foram inadequadas para a simulação da travessia, a calibração da movimentação, aceitação de brechas e decisão sobre desrespeitar os semáforos permitiu que o atraso médio de pedestres fosse representado adequadamente. As principais limitações dos modelos estão associadas à representação do comportamento oportunista, como no caso dos pedestres que desrespeitam os semáforos, analisados nesta dissertação.

Palavras-chave: simulação de pedestres, modelagem de travessias de pedestres, coleta de dados de pedestres

## **ABSTRACT**

This dissertation presents an analysis about pedestrians' crossings modeling. Traffic simulators recently incorporated pedestrians' models, however, the ability and limitations to represent conflicts in pedestrians' crossings have not been analysed and presented on the literature. This dissertation is composed by three articles that present: (i) characterizations of pedestrians as motorist behaviors on crossings, (ii) analysis of models that represent the behavior on crossings, (iii) a methodology developed for collecting data from crossings, (iv) a calibration of pedestrian movement, gap acceptance and the decision about disrespecting signalization on signalized pedestrian crossings and (v) an analysis of the ability and limitations of the models in representing pedestrian's delays. It is observed that the representations of the behaviors on pedestrian crossings depend on several models that represent the route choice, movement, gap acceptance, motorist yielding and the decision of pedestrians about obeying the signalization. The models used on simulation correspond, generally, for deterministic models that simplify pedestrians and motorists' behavior. Pedestrians' gap acceptance models, for example, were based on models developed to represent vehicle's unsignalized intersections. Difficulties in pedestrians' data collection are one factor that limits the development of new models. On this dissertation, a semi-automatic methodology was developed, on which pedestrians and vehicles are tracked with free software that facilitates data obtainment. The collected data allowed the calibration of VISSIM models to represent a signalized pedestrian crossing with multiple traffic lanes where most pedestrians do not obey the signalization. Although default parameters as desired speed and minimum rear gap accepted by pedestrians were inadequate for the crossing simulation, the calibration of movement, gap acceptance and the decision about disrespecting the signalization allowed the representation of adequate average delays. The main limitations of the models are associated to the representation of opportunistic behavior, as pedestrians disrespecting signalizations, analyzed on this dissertation.

Keywords: pedestrian simulation, pedestrian crossing modeling, pedestrian data collection

## LISTA DE FIGURAS

### *Artigo 1*

**Figura 1:** Estrutura das atividades de pedestres - adaptado de Papadimitriou *et al.* (2009).... 20

### *Artigo 2*

**Figura 1:** Parâmetros da aceitação de brechas do VISSIM ..... 36

**Figura 2:** Local da filmagem e a área de estudo..... 38

**Figura 3:** Imagens original (a), transformada (b) e sobreposta com a imagem de referência (c) ..... 39

**Figura 4:** Elementos da área de estudo (a) e um exemplo de rastreamento com o MTrackJ (b) ..... 41

**Figura 5:** Distribuição de frequências de brechas frontais e ajuste com a distribuição Log-logística..... 43

**Figura 6:** Distribuição de frequências de brechas traseiras e ajuste com a distribuição Gama ..... 44

### *Artigo 3*

**Figura 1:** Parâmetros da aceitação de brechas em áreas de conflito ..... 49

**Figura 2:** Imagens da travessia obtidas da filmagem (a) e de satélite (b) ..... 51

**Figura 3:** Distribuição acumulada da velocidade de pedestres ..... 53

**Figura 4:** Velocidade média por fluxo de pedestres no tempo de verde. .... 53

**Figura 5:** Trajetórias dos pedestres na travessia ..... 54

**Figura 6:** Distribuição acumulada das brechas traseiras aceitas ..... 55

**Figura 7:** Cenário da travessia de pedestres obedientes simulado no VISSIM..... 56

**Figura 8:** Distribuição acumulada das velocidades simuladas ..... 57

**Figura 10:** Distribuições acumuladas das brechas aceitas nas simulações..... 59

## LISTA DE TABELAS

### *Artigo 1*

**Tabela 1:** Quadro resumo de características e limitações dos modelos utilizados ..... 29

### *Artigo 3*

**Tabela 1:** Diferença relativa entre os tempos médios de travessia simulado e observado ..... 57

**Tabela 2:** Relação entre percentual potencialmente oportunista e os atrasos médios e percentuais de cada tipo de pedestre nas simulações. .... 60

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1. OBJETIVOS .....	14
1.2. JUSTIFICATIVA .....	15
1.3. DELIMITAÇÕES DO ESTUDO .....	15
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	16
<b>2. ARTIGO 1.....</b>	<b>18</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>2. CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO EM TRAVESSIAS .....</b>	<b>20</b>
2.1. ESCOLHA DE ROTAS DOS PEDESTRES .....	21
2.2. MOVIMENTAÇÃO DOS PEDESTRES .....	22
2.3. ACEITAÇÃO DE BRECHAS DE PEDESTRES .....	22
2.4. <i>MOTORIST YIELD</i> .....	23
2.5. DECISÃO SOBRE IGNORAR O SEMÁFORO .....	23
<b>3. MODELOS DE SIMULAÇÃO DE PEDESTRES .....</b>	<b>24</b>
3.1. ESCOLHA DE ROTAS DOS PEDESTRES .....	24
3.2. MODELOS DE MOVIMENTAÇÃO .....	25
3.3. MODELOS DE ACEITAÇÃO DE BRECHAS DE PEDESTRES .....	26
3.4. <i>MOTORIST YIELD</i> .....	27
3.5. DECISÃO SOBRE IGNORAR O SEMÁFORO .....	28
3.6. QUADRO RESUMO DOS MODELOS .....	29
<b>4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>30</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>30</b>
<b>3. ARTIGO 2.....</b>	<b>32</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>33</b>
<b>2. MODELOS DE ACEITAÇÃO DE BRECHAS.....</b>	<b>35</b>
<b>3. PROCESSOS DE COLETA DE DADOS .....</b>	<b>36</b>
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>37</b>
4.1. COLETA DAS IMAGENS .....	38
4.2. TRANSFORMAÇÃO DAS IMAGENS .....	38
4.3. RASTREAMENTO DOS OBJETOS.....	40
4.3.1. Escolha da ferramenta de rastreamento .....	40

4.3.2. Instruções para rastreamento .....	40
4.4. PROCESSAMENTO DOS DADOS .....	42
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>42</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>44</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>44</b>
<b>4. ARTIGO 3.....</b>	<b>46</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>47</b>
<b>2. MODELAGEM DA TRAVESSIA NO VISSIM.....</b>	<b>48</b>
2.1. MOVIMENTAÇÃO DOS PEDESTRES .....	48
2.2. ACEITAÇÃO DE BRECHAS DE PEDESTRES .....	49
2.3. DECISÃO DOS PEDESTRES SOBRE DESRESPEITAR OS SEMÁFOROS ...	50
<b>3. COMPORTAMENTO DOS PEDESTRES NA TRAVESSIA .....</b>	<b>50</b>
3.1. PROCESSO DE COLETA DE DADOS .....	51
3.2. ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS.....	52
3.2.1. Decisão sobre desrespeitar os semáforos.....	52
3.2.2. Velocidade dos pedestres.....	52
3.2.3. Trajetória de travessia.....	53
3.2.4. Aceitação de brechas .....	55
<b>4. CALIBRAÇÃO DOS MODELOS DO VISSIM .....</b>	<b>55</b>
4.1. CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DA MOVIMENTAÇÃO DOS PEDESTRES .....	56
4.2. CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DA ACEITAÇÃO DE BRECHAS DE PEDESTRES .....	58
4.3. CALIBRAÇÃO DO PERCENTUAL DE PEDESTRES POTENCIALMENTE OPORTUNISTAS .....	59
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>60</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>62</b>
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>64</b>
5.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES .....	64
5.2. REVISÃO DOS OBJETIVOS.....	67
5.3. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOSO FUTUROS .....	68
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>71</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A disseminação de congestionamentos em diversas cidades tem gerado críticas aos sistemas de transportes que privilegiam os automóveis. O estímulo ao transporte coletivo e não motorizado é apontado como uma das soluções para congestionamentos e problemas ambientais associados.

As políticas de estímulo ao transporte não motorizado resultam em uma demanda por modelos que permitam a análise dos diferentes modos de transporte com o mesmo nível de detalhamento. Os simuladores de tráfego, que durante anos representaram apenas os veículos, recentemente incorporaram modelos para representar o comportamento de pedestres. Estes modelos multimodais permitem avaliar, por exemplo, qual a solução de gerenciamento de tráfego que minimiza os atrasos de todos os usuários, enquanto historicamente eram avaliados apenas os atrasos dos veículos.

Entre os simuladores de tráfego que incorporaram modelos de pedestres, destacam-se o VISSIM (PTV, 2009), o Aimsun (TSS, 2010) e o Paramics (Paramics, 2011). Os principais modelos incorporados por estes softwares representam as interações entre pedestres e foram desenvolvidos para simular o comportamento em grandes terminais de transportes, eventos que reúnem multidões ou evacuação em situações emergenciais. Estes modelos de movimentação não representam a interação entre pedestres e veículos, tornando necessários outros modelos para representar o comportamento em travessias.

As travessias de pedestres representam os locais onde ocorrem os principais atrasos de pedestres e veículos e os maiores riscos de acidentes decorrentes da interação entre eles. A simulação do comportamento em travessias possui uma importância especial na avaliação dos atrasos de pedestres e veículos e na avaliação da segurança de uma travessia.

Os simuladores de tráfego multimodal geralmente possuem o objetivo de representar os atrasos dos diferentes modos de transportes. Na avaliação dos atrasos, modelos que simplifiquem o comportamento de pedestres e veículos podem fornecer resultados satisfatórios. Por outro lado, na avaliação da segurança das travessias, a intenção é analisar a probabilidade das decisões de pedestres e motoristas resultarem em acidentes. Nestas situações, as decisões dos pedestres sobre aceitar brechas no fluxo de veículos e as decisões de motoristas sobre dar preferência nas faixas de segurança devem ser reproduzidas da forma mais realista possível.

Os modelos utilizados na simulação de veículos são desenvolvidos e calibrados para representar o comportamento do tráfego em diferentes situações, não obstante os de pedestres em travessias encontram-se em um nível de desenvolvimento inferior. As dificuldades na coleta de dados de pedestres é um dos fatores que prejudicam o desenvolvimento e calibração de modelos. Blue e Adler (1999) destacam que, diferentemente dos veículos, os pedestres (i) não andam oficialmente em faixas, (ii) podem acelerar instantaneamente até sua velocidade máxima, (iii) têm menos preocupação com eventuais colisões em outros pedestres e (iv) podem andar em grupos. Outros fatores dificultam a coleta de dados de pedestres, por exemplo, eles não atravessarem apenas sobre as áreas sinalizadas e frequentemente ignorarem os semáforos.

A coleta de dados de pedestres geralmente envolve filmagens e o processamento de vídeos. A literatura reporta o uso crescente de ferramentas que identificam, classificam e rastreiam pedestres e veículos automaticamente nos vídeos, baseadas em algoritmos de visão computacional. No rastreamento de pedestres e veículos em travessias, entretanto, Chae (2005) e Ismail *et al.* (2009) relataram falhas no processamento automático dos vídeos em situações com fluxo elevado e oclusões. Para reduzir problemas desta natureza, estes estudos desenvolveram ferramentas semiautomáticas, que permitem marcar manualmente as posições de pedestres e veículos ao longo do tempo. Estas ferramentas, que poderiam contribuir com a

obtenção de dados para desenvolver e calibrar de modelos dos comportamentos em travessias, não foram disponibilizadas pelos autores.

As travessias de pedestres podem ser classificadas como (i) não sinalizadas, em que os veículos têm preferência e os pedestres aceitam brechas no fluxo, (ii) sinalizadas, nas quais os veículos devem dar preferência aos pedestres (*e.g.* faixas de segurança), e (iii) semaforizadas, onde ambos os modos teoricamente obedecem às orientações dos semáforos e não apresentam interação direta entre eles. Uma ferramenta de simulação de tráfego multimodal deve, idealmente, possuir modelos que representem o comportamento de veículos e pedestres nestas três condições de travessia.

Os modelos utilizados pelos simuladores (*e.g.* VISSIM, Aimsun e Paramics) para representar o comportamento em travessias são modelos de movimentação e modelos de aceitação de brechas. Os modelos de movimentação representam o deslocamento de pedestres e veículos. Os modelos de aceitação de brechas são utilizados para representar o comportamento onde não existem semáforos, em que um grupo de usuários possui preferência e o outro aguarda por uma oportunidade de realizar a travessia (Troutbeck e Brilon, 1992). Estes modelos, desenvolvidos originalmente para representar o comportamento de veículos em interseções, são utilizados também para as travessias de pedestres.

No modelo de aceitação de brechas tradicional, pedestres ou veículos no fluxo secundário atravessam sempre que identificarem um intervalo entre as chegadas no fluxo preferencial (brecha) superior ao valor mínimo aceito (brecha crítica). Troutbeck e Brilon (1992) destacam que, neste modelo, todos aceitam a mesma brecha crítica (homogêneos) e realizam uma travessia sempre que houver uma brecha aceitável (consistentes).

O modelo de aceitação de brechas utilizado pelos simuladores permite a representação de travessias onde a sinalização e a preferência nas travessias é obedecida pelos pedestres e motoristas. Existe dificuldade em representar, no entanto, alguns comportamentos frequentes em travessias brasileiras, como (i) pedestres atravessando durante o sinal vermelho em travessias semaforizadas e (ii) veículos ignorando a preferência de pedestres em faixas de segurança.

Na literatura sobre modelagem de travessias, são encontrados modelos Logit Binomiais que incorporam diversas variáveis que influenciam a aceitação de brechas de pedestres e a decisão dos motoristas sobre dar preferência em travessias sinalizadas (Sun *et al.*, 2003; Schroeder, 2008). Estes modelos foram desenvolvidos com o objetivo de avaliar os principais fatores considerados nas decisões dos pedestres e motoristas, e não foram incorporados nos simuladores, que utilizam principalmente modelos determinísticos. Não foram encontrados na literatura trabalhos que avaliem o impacto das simplificações na modelagem dos comportamentos nas travessias sobre os valores de atrasos obtidos nas simulações.

## 1.1. OBJETIVOS

O objetivo principal desta dissertação é a análise da modelagem de travessias de pedestres.

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- a) analisar os comportamentos de pedestres e motoristas nos diferentes tipos de travessias, com base na literatura e observações de campo;
- b) apresentar os modelos que representam os comportamentos de pedestres e motoristas em travessias encontrados na literatura e nos softwares de simulação de tráfego;
- c) propor uma metodologia para coleta de dados de pedestres e veículos em travessias que permita obter as velocidades, trajetórias e brechas aceitas utilizando softwares disponíveis no mercado e, quando possível, gratuitos;
- d) calibrar os modelos do VISSIM para reproduzir os comportamentos observados em uma travessia semaforizada, incluindo as velocidades, aceitação de brecha e as decisões sobre desrespeitar o semáforo;
- e) analisar os atrasos de pedestres na simulação da travessia semaforizada estudada, comparando-os com os obtidos na coleta de dados;
- f) analisar as principais limitações dos modelos usados na simulação de travessias.

## 1.2. JUSTIFICATIVA

As soluções de gerenciamento de tráfego frequentemente são avaliadas através de simulações. A preocupação crescente com os modos de transporte não motorizados exige que os pedestres sejam considerados nestas avaliações. A representação do comportamento de pedestres e motoristas em travessias, onde ocorrem os principais atrasos decorrentes da interação entre eles, é um aspecto crítico nas simulações.

Os simuladores de tráfego, que tradicionalmente consideravam apenas os veículos, incorporaram modelos que representam os pedestres. Nestes softwares, a interação entre pedestres e motoristas é representada por modelos desenvolvidos inicialmente para interseções não semaforizadas de veículos. Não foram encontrados estudos que avaliem a habilidade dos modelos em reproduzir os atrasos de pedestres e veículos nas travessias. É possível avaliar que estes modelos possuem limitações ao representar o comportamento em situações onde a sinalização não seja obedecida, como ocorre em travessias semaforizadas e faixas de segurança.

O desenvolvimento de estudos apresentando (i) modelos utilizados na simulação de travessias, (ii) metodologias de coleta de dados e calibração dos modelos e (iii) limitações dos modelos podem contribuir para a qualificação da simulação de pedestres. Desta forma, o presente estudo se justifica na medida que aprofunda a discussão sobre a modelagem de travessias de pedestres.

## 1.3. DELIMITAÇÕES DO ESTUDO

A caracterização dos comportamentos de pedestres e motoristas em travessias é baseada na análise da literatura revisada e das travessias onde foram realizadas coletas de dados, situadas no município de Porto Alegre. A literatura revisada inclui artigos científicos, anais de congressos, relatórios técnicos e manuais de usuários dos softwares utilizados.

O simulador de tráfego VISSIM 5.20 foi escolhido para a calibração dos modelos de movimentação dos pedestres e aceitação de brechas. A avaliação dos fatores que influenciam

os atrasos de pedestres na travessia semaforizada são limitados aos cenários simulados e aos parâmetros destes modelos.

#### 1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação contém cinco capítulos. O primeiro capítulo apresentou uma introdução à simulação da travessia de pedestres, destacando os objetivos, delimitações e estrutura desta dissertação. O estudo desenvolvido nesta dissertação é apresentado em forma de artigos científicos, que correspondem aos capítulos 2, 3 e 4.

O capítulo 2 corresponde ao artigo “Microsimulação da travessia de pedestres: uma revisão sobre a modelagem”. Este artigo apresenta uma caracterização do comportamento dos pedestres e motoristas em travessias, baseada em artigos da literatura, e os principais modelos desenvolvidos para representar estes comportamentos. Este artigo será submetido para o XXV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes de 2011.

O capítulo 3 corresponde ao artigo “Microsimulação da travessia de pedestres: coleta de dados para a calibração de modelos”. Neste artigo é apresentada a metodologia de coleta de dados desenvolvida para obter as brechas frontais e traseiras de pedestres em uma faixa de segurança em Porto Alegre. Este artigo foi apresentado no XXIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, realizado em Salvador em 2010, e foi selecionado para publicação na Revista Transportes em 2011.

O capítulo 4 corresponde ao artigo “Microsimulação da travessia de pedestres: simulação de travessias semaforizadas”. Este artigo apresenta (i) uma caracterização dos comportamentos de pedestres em uma travessia semaforizada em que um percentual expressivo de pedestres não obedece ao semáforo, (ii) o processo de calibração dos modelos de movimentação e aceitação de brechas de pedestres no VISSIM 5.20, (iii) uma avaliação dos atrasos obtidos na simulação desta travessia, analisando os fatores que influenciam os resultados e (iv) uma análise das limitações dos modelos de simulação dos pedestres. Este artigo será submetido a periódicos internacionais de transportes em 2011.

O quinto capítulo apresenta conclusões desta dissertação e recomendações para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas na dissertação e nos artigos que a compõe.

## **2. ARTIGO 1**

MICROSSIMULAÇÃO DA TRAVESSIA DE PEDESTRES:  
UMA REVISÃO SOBRE A MODELAGEM

## MICROSSIMULAÇÃO DA TRAVESSIA DE PEDESTRES: UMA REVISÃO SOBRE A MODELAGEM

**André Cademartori Jacobsen**

**Helena Beatriz Bettella Cybis**

Laboratório de Sistemas de Transportes - LASTRAN  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – PPGEP  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

### RESUMO

Os simuladores de tráfego recentemente incorporaram modelos para representação do comportamento de pedestres. Na simulação de travessias, onde ocorrem atrasos e riscos de acidentes importantes, são utilizados diversos modelos para representar as interações entre pedestres e motoristas. Este artigo apresenta uma revisão sobre os comportamentos em travessias e modelos desenvolvidos para representá-los. Nestes ambientes, o comportamento de pedestres é representado por modelos de (i) escolha de rotas, (ii) movimentação, (iii) aceitação de brechas e (iv) decisão sobre ignorar semáforos e, o de motoristas, pelo modelo de (v) *motorist yield*. Apesar de que os simuladores de tráfego incorporaram modelos avançados de movimentação dos pedestres, a interação com os motoristas é representada por modelos determinísticos que simplificam os comportamentos e não permitem representar as situações em a sinalização é ignorada. Os modelos Logit Binomiais, que consideram diversas variáveis nas decisões de ambos os modos, foram desenvolvidos para avaliar os fatores que influenciam os comportamentos, mas não foram incorporados nos simuladores.

### ABSTRACT

Traffic simulators have recently incorporated pedestrian behavior's models. On pedestrian crossings' simulations, where important delays and risks of accident occur, several models represent the interaction between pedestrians and motorists. This article presents a review about crossing behaviors and the models developed to represent them. The behavior of pedestrians is represented by (i) route choice, (ii) movement, (iii) gap acceptance, (iv) decision about ignoring signalization and (v) motorist yield models. Although the traffic simulators incorporated advanced pedestrians' movement models, deterministic models, that simplify their behavior and do not represent situations on which the signalization is ignored, are used to represent the interaction with motorists. Binomial Logit models were developed to evaluate factors that influence the behaviors, but have not been incorporated to the simulators.

## 1. INTRODUÇÃO

As travessias de pedestres representam o local onde ocorrem as principais interações entre veículos e pedestres. Estas interações são responsáveis por atrasos nos deslocamentos e maior exposição ao risco de acidentes. As simulações de travessias de pedestres, por consequência, assumem dois focos: (i) avaliação dos atrasos dos diferentes modos simulados e (ii) avaliação da segurança de travessias.

Existe um interesse crescente sobre a simulação de pedestres em travessias, que repercute no número de publicações recentes sobre o assunto. A disseminação de congestionamentos e o estímulo ao transporte não motorizado em diversas cidades são fatores que contribuem para o avanço nas pesquisas sobre o assunto. O crescimento na demanda por modelos de pedestres no ambiente urbano resultou na incorporação recente de modelos de pedestres em softwares como Aimsun (TSS, 2010), Paramics (Paramics, 2011) e VISSIM (PTV, 2009).

Nos modelos utilizados para avaliar atrasos de pedestres e veículos, o objetivo é representar o comportamento médio dos pedestres. Neste caso, simplificações nos comportamentos simulados podem permitir resultados satisfatórios. Os modelos com ênfase na segurança de pedestres, por outro lado, tentam reproduzir da forma mais realista possível os processos de decisão de pedestres e motoristas em situações complexas. Exemplos de situações complexas incluem pedestres aceitando brechas no fluxo de veículos e veículos dando preferência à travessia de pedestres. Na abordagem voltada para a segurança, frequentemente o objetivo

está em representar o comportamento de grupos específicos de pedestres, tais como crianças, idosos e portadores de deficiências visuais.

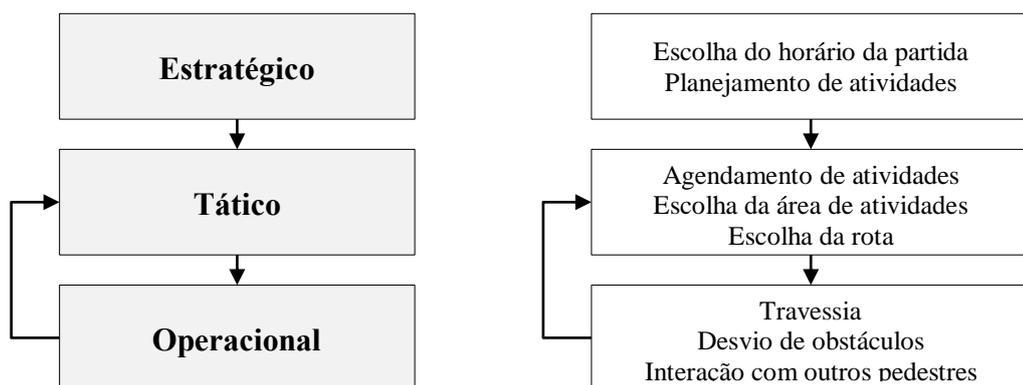
Apesar de modelos de simulação de veículos serem desenvolvidos e calibrados há décadas, para representar o comportamento de motoristas em diferentes situações, os que representam pedestres encontram-se menos desenvolvidos. Entre as principais dificuldades para o desenvolvimento e calibração de modelos de pedestres estão a maior liberdade de movimentação e a dificuldade na coleta de dados.

Os modelos que representam o comportamento de pedestres encontram-se em estágios de desenvolvimento diferentes. Os modelos de movimentação de pedestres, que representam a interação entre eles e com o ambiente, encontram-se em um estágio mais avançado. Estes modelos foram desenvolvidos para simular a evacuação de multidões, especialmente em casos de emergência. Na representação da interação entre pedestres e veículos em travessias, entretanto, os modelos utilizados em ferramentas de simulação não apresentam evoluções em relação aos utilizados na interação entre veículos.

O objetivo deste artigo é apresentar os diferentes tipos de modelos utilizados para representar o comportamentos de pedestres e motoristas em travessias, identificando qualidades e limitações dos modelos pesquisados. Este artigo apresenta (i) uma caracterização dos comportamentos de pedestres e motoristas em diferentes tipos de travessias e (ii) uma revisão dos modelos encontrados na literatura.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO EM TRAVESSIAS

O deslocamento de pedestres é um processo complexo, que envolve desde o planejamento, antes do início do deslocamento, até atividades operacionais. Papadimitriou *et al.* (2009) dividem as atividades de pedestres segundo uma estrutura hierárquica de três níveis, ilustrada pela Figura 1. Nesta estrutura os pedestres possuem atividades no nível (i) estratégico, que correspondem à escolha do horário de partida e o planejamento das atividades que serão realizadas, (ii) tático, que correspondem à escolha da rota, e (iii) operacional, que correspondem aos processos de travessia, desvio de obstáculos e interação com outros pedestres. Os autores ressaltam que as atividades do nível operacional são utilizadas para reavaliar as do nível tático, como a escolha de rotas.



**Figura 1:** Estrutura das atividades de pedestres - adaptado de Papadimitriou *et al.* (2009)

Na estrutura apresentada, a travessia de pedestres corresponde a uma atividade operacional. A simulação da travessia de pedestres, no entanto, depende de outras atividades, como a interação com outros pedestres, desvio de obstáculos e a escolha de rotas.

Em cada tipo de travessia, os pedestres e veículos apresentam comportamentos diferentes. Neste artigo as travessias são classificadas em 3 tipos, de acordo com as interações existentes: (i) não sinalizada, nas quais os veículos têm preferência e pedestres atravessam em brechas no fluxo, (ii) sinalizadas, representadas pelas faixas de segurança, nas quais os veículos devem dar preferência aos pedestres e (iii) semaforizadas, nas quais veículos e pedestres obedecem aos semáforos e não apresentam interação direta.

Em travessias não sinalizadas, os veículos possuem preferência e não são influenciados pela presença de pedestres, mantendo seu comportamento usual. Os pedestres analisam o fluxo, observando intervalos entre as chegadas dos veículos (brechas) que permitam a travessia com segurança. A escolha do momento de travessia é representada nas simulações por modelos de aceitação de brechas.

Em travessias sinalizadas, onde os pedestres possuem preferência, os veículos devem identificar a presença de um pedestre na travessia e parar antes da faixa de segurança. Nestas situações, teoricamente o pedestre não precisaria observar o fluxo de veículos antes de atravessar, mas existe um percentual elevado de veículos que não obedece a sinalização. O comportamento dos motoristas é simulado através de um modelo que representa a decisão sobre dar preferência aos pedestres. Neste artigo, estes modelos são chamados de *motorist yield*, conforme a nomenclatura adotada por Sun *et al.* (2003).

Em travessias semaforizadas, os pedestres e veículos possuem um tempo específico para suas travessias. Nestes casos, não existe o processo de aceitação de brechas e os pedestres atravessam durante o tempo de verde do semáforo. Na prática, quando existem brechas suficientemente longas para que pedestres realizem a travessia, os pedestres não respeitam o semáforo, comportando-se como se estivessem em uma travessia não sinalizada. Neste artigo este comportamento é chamado de oportunista, utilizando a nomenclatura adotada em Liu *et al.* (2000).

A seguir são apresentados aspectos relacionados à (i) escolha de rotas, (ii) movimentação de pedestres, (iii) aceitação de brechas, (iv) *motorist yield* e (v) decisão sobre ignorar o semáforo.

## **2.1. Escolha de rotas dos pedestres**<sup>[a1]</sup>

A escolha de rotas realizada por pedestres não corresponde ao comportamento de pedestres na travessia, mas pode ser um aspecto crítico quando existem múltiplos caminhos e travessias entre a origem e destino do deslocamento, segundo Amos *et al.* (2009). A alocação de pedestres apresenta desafios especialmente porque percorrem áreas sem restrições de direção e sentido, diferentemente das redes utilizadas para a alocação de veículos.

Na escolha de rotas de pedestres existem mais possibilidades de locais de travessia do que na de veículos. Os pedestres podem atravessar em (i) interseções, (ii) travessias de meio de quadra e (iii) locais intermediários, não sinalizados. Nas vias em que existem brechas longas entre os veículos e não existem barreiras físicas, frequentemente os pedestres atravessam nos locais que minimizam a distância até o destino do seu deslocamento, independentemente da sinalização, ampliando o número de rotas possíveis.

Entre os estudos que avaliam a preferência dos pedestres na escolha do local de travessia, Sisiopiku e Akin (2003) realizaram entrevistas para avaliar os fatores que influenciavam as escolhas. O principal fator identificado foi (i) a posição da travessia em relação à origem e destino dos pedestres, seguido da (ii) existência de semáforo e a (iii) existência de barreiras que impedissem a travessia em locais não sinalizados. Nas entrevistas, 41% dos pedestres indicaram que não tinham preferências em relação ao local de travessia, e que atravessavam

em qualquer lugar que fosse conveniente. Em outra pesquisa, apresentada por Chu *et al.* (2004), a escolha do local de travessia foi associada também às características dos pedestres, como idade e renda.

Nas simulações de travessias, características como idade e renda não fazem parte dos atributos dos pedestres. Estas características são estudadas com objetivo de identificar os fatores que influenciam o comportamento dos pedestres. Outros fatores, como a localização das travessias, existência de semáforo e existência de barreiras físicas, poderiam ser incorporados em modelos de escolhas de rotas para pedestres.

## **2.2. Movimentação dos pedestres**

A movimentação dos pedestres corresponde ao comportamento do pedestre durante o deslocamento, incluindo a escolha da velocidade, a interação com outros pedestres e o desvio de obstáculos. Os pedestres apresentam diferentes características em relação à movimentação. A velocidade que cada pedestre deseja manter no seu deslocamento é uma das diferenças mais evidentes, especialmente ao avaliar grupos como crianças, idosos e portadores de necessidades especiais. Estes grupos geralmente apresentam velocidades inferiores à média dos pedestres.

Alguns estudos indicam que as velocidades em travessias são superiores às observadas em calçadas. Shi *et al.* (2007) observaram velocidades entre 0,89 e 1,37 m/s em calçadas, e entre 1,46 e 1,67 m/s em uma travessia não sinalizada em meio de quadra, por exemplo. As velocidades podem depender de fatores relacionados a (i) características dos pedestres, como idade, sexo e motivo do deslocamento, e (ii) características do ambiente, tais como a declividade e a possibilidade de conflito com outros modos em casos de travessias, por exemplo.

Nas travessias de pedestres, frequentemente ocorre a movimentação de pedestres concentrada no tempo e no espaço. Em travessias com fluxo elevado de pedestres, observam-se variações nas velocidades devidas às interações entre os pedestres. Nestes casos, os modelos que representem a interação entre os pedestres de forma realista, reproduzindo fenômenos de auto-organização dos pedestres e velocidades compatíveis com fluxo na travessia, são importantes para garantir resultados realistas.

## **2.3. Aceitação de brechas de pedestres**

A aceitação de brechas representa o processo através do qual o pedestre decide o momento em que inicia a travessia em situações em que os veículos possuem prioridade. Os pedestres analisam o fluxo de veículos, estimam a duração das brechas e atravessam quando consideram a brecha longa o suficiente para garantir a travessia com segurança.

A brecha mínima que cada pedestre aceita depende de diversos fatores, entre os quais Sun *et al.* (2003) identificaram a (i) faixa etária, (ii) sexo, (iii) tempo de espera, (iv) duração da brecha e (v) número de pedestres aguardando a travessia. A velocidade desejada dos pedestres, que teoricamente influenciaria a brecha mínima aceita, neste caso pode ser associada aos fatores faixa etária e sexo.

Observa-se que pedestres geralmente aceitam brechas que permitam atravessar todas as faixas de tráfego em apenas uma etapa de travessia, sem parar entre elas. Brewer *et al.* (2006) destacam que em travessias com múltiplas faixas de tráfego, particularmente em locais com alto volume de tráfego, os pedestres não aguardam a liberação de todas as faixas para iniciar a travessia. Os pedestres identificam situações nas quais, enquanto estiverem na primeira faixa,

a segunda será liberada e terá uma brecha suficiente para sua travessia. Desta forma, os autores consideram que existem brechas defasadas (*rolling gaps*).

#### **2.4. Motorist Yield**

As travessias sinalizadas, onde os pedestres possuem preferência, são representadas no Brasil especialmente por faixas de segurança. Nestes locais, os motoristas identificam a presença de pedestres que se aproximam da travessia e decidem, em função da sua velocidade e distância da travessia, se concedem a preferência de passagem ao pedestre. Apesar de este comportamento ser representado por um modelo de aceitação de brechas em simuladores de tráfego (*e.g.* VISSIM), não foram identificados estudos avaliando os parâmetros deste modelo para representar este comportamento.

Na decisão sobre dar preferência a pedestres, os motoristas avaliam diversos fatores. Entre eles, Sun *et al.* (2003) observaram a influência da (i) idade do motorista, (ii) sexo do motorista, (iii) tipo de veículo, (iv) número de pedestres aguardando na travessia e (v) existência de veículos dando preferência aos pedestres no sentido oposto.

Schroeder (2008) também observa que características dinâmicas dos veículos são importantes, pois a decisão dos motoristas é influenciada pela desaceleração necessária e a distância da travessia. Este autor ainda observa que em alguns locais os pedestres apresentam comportamento assertivo, demonstrando claras intenções de atravessar, que aumentam a probabilidade de veículos darem preferência aos pedestres. Outros fatores citados pelo autor incluem a visibilidade no local, a predisposição dos motoristas em dar preferência e o tráfego em pelotões. No caso de veículos trafegando em pelotões, o primeiro veículo geralmente consegue identificar a presença de pedestres com antecedência e dar preferência, enquanto os veículos seguidores percebem a presença de pedestres quando estão próximos demais para conseguir parar antes da travessia.

Fitzpatrick *et al.* (2006) afirmam que o tratamento da travessia influencia o comportamento dos motoristas, destacando que a existência de um dispositivo de sinalização, como um semáforo com a luz vermelha para os veículos, resulta no comportamento mais obediente. Os autores ainda destacam que além do tratamento, a quantidade de faixas a serem atravessadas e o limite de velocidade influenciam o comportamento dos veículos. O estudo apresenta resultados da observação de 42 travessias com 9 tipos de tratamentos diferentes, indicando as probabilidades dos motoristas darem preferência aos pedestres em cada situação.

#### **2.5. Decisão sobre ignorar o semáforo**

Em travessias semaforizadas, onde veículos e pedestres possuem um tempo específico para realizar seus deslocamentos, identificam-se situações em que os pedestres não respeitam o semáforo e aceitam brechas no fluxo de veículos. Liu *et al.* (2000) classificaram os pedestres em travessias semaforizadas como obedientes, que atravessam durante o tempo de verde do semáforo, ou oportunistas. O comportamento oportunista é mais frequente em situações em que existem brechas longas no fluxo de veículos, que permitem a travessia segura dos pedestres durante o tempo de vermelho.

Yang *et al.* (2006) realizaram entrevistas com estudantes e pedestres em interseções próximas a uma universidade para identificar a probabilidade de atravessarem durante o tempo de vermelho dos pedestres. Os autores constataram que a probabilidade aumenta quando (i) existem outros pedestres atravessando, (ii) o pedestre está com pressa, (iii) o fluxo de veículos é considerado baixo e (iv) tempo de vermelho é muito longo. Neste estudo, o fator presença de policiais não influenciou o comportamento declarado.

Zhuping *et al.* (2011) apresentaram um estudo detalhado sobre o comportamento de pedestres em travessias semaforizadas na China, baseado em entrevistas e levantamentos de campo utilizando filmagens. Os autores analisaram a influência do sexo, idade, tamanho dos grupos de pedestres, distância de travessia, tempo semafórico, volume de pedestres e volume de veículos. Os autores identificaram um aumento no percentual de pedestres que respeitam os semáforos relacionado, por exemplo, com o aumento do tempo de verde para travessia, com a redução do tempo de vermelho e com o aumento no fluxo de pedestres. Nas entrevistas, os pedestres informaram que as principais razões para atravessarem durante o tempo de vermelho são (i) a economia de tempo de viagem, (ii) a inexistência de um fluxo de veículos expressivo, (iii) considerar a sinalização da travessia inadequada e (iv) não permanecer aguardando quando outros pedestres ignoram o semáforo.

### **3. MODELOS DE SIMULAÇÃO DE PEDESTRES**

Conforme discutido no capítulo anterior, motoristas e pedestres possuem consideráveis diferenças de comportamento, que dependem de características individuais, do tipo de travessia, das características do ambiente e de variáveis dinâmicas, como o número de pedestres aguardando para realizar a travessia e a existência de veículos dando preferência aos pedestres no sentido oposto.

A complexidade dos modelos utilizados em simulações de travessias, no entanto, dependem especialmente dos objetivos da simulação. Para avaliar as condições de segurança de travessias e identificar situações em que as decisões de pedestres e veículos representam um risco de acidentes, os modelos de simulação devem reproduzir as decisões de pedestres e veículos com o maior realismo possível. Nas simulações que tem o objetivo de representar os atrasos médios de pedestres e veículos, no entanto, pode ser razoável a utilização de modelos que simplifiquem a representação do comportamento, desde que os modelos permitam um processo de calibração aceitável para os objetivos da análise.

Para avaliar atrasos e medidas de gerenciamento de tráfego em simulações de pedestres e veículos, uma lista dos principais requisitos é apresentada por Liu *et al.* (2000). Estes requisitos incluem: (i) definição de áreas destinadas a pedestres e locais de travessia, (ii) controle do fluxo e padrão de chegada de pedestres, (iii) definição de características dos pedestres e do comportamento em travessias, (iv) aceitação de brechas com diferentes brechas críticas em cada travessia, (v) representação dos diferentes padrões de chegadas de veículos, em relação a chegada uniforme ou em pelotões, (vi) controle semafórico atuado por pedestres e veículos e (vii) cálculo de indicadores do atraso de veículos e pedestres.

A seguir, é apresentada uma revisão sobre os modelos do comportamento de pedestres utilizados na representação das travessias. Os modelos apresentados correspondem a (i) movimentação de pedestres, (ii) aceitação de brechas de pedestres, (iii) aceitação de brechas de veículos, (iv) escolha do local de travessia e (v) decisão sobre ignorar o semáforo.

#### **3.1. Escolha de rotas dos pedestres**

Os modelos de escolha de rotas dos pedestres tem o objetivo de definir a trajetória por onde o pedestre se deslocará até o destino. Nos softwares de simulação de tráfego pesquisados, como VISSIM (PTV, 2009) e Aimsun (TSS, 2010), os pedestres escolhem a rota que minimize a distância entre a origem e o destino do seu deslocamento. Nestes modelos, os pedestres não distinguem travessias semaforizadas, de faixas de segurança e travessias não sinalizadas, como acontece na realidade. No VISSIM 5.30 (PTV, 2011), os pedestres escolhem caminhos mais longos que minimizem conflitos potenciais com outros pedestres, mas ainda não consideram características das travessias.

Airault e Espié (2005) apresentam um modelo que representa a decisão sobre quando e onde atravessar, considerando a posição das travessias e o fluxo de veículos. Os autores simplificam o processo de travessia em 3 procedimentos: (i) identificação e análise dos possíveis locais de travessia, (ii) determinação da densidade do tráfego em pontos intermediários, avaliando a possibilidade de atravessar antes de chegar à travessia escolhida, e (iii) escolha da brecha em que vai atravessar, quando decidir atravessar em um ponto intermediário.

O modelo de Airault e Espié (2005) consegue representar o comportamento observado pelos autores, no qual a probabilidade de utilizar uma faixa de segurança diminui com o aumento da distância até a travessia. No modelo proposto, ao identificar uma densidade de veículos inferior a um determinado valor, o pedestre inicia um processo de aceitação de brechas e atravessa na primeira oportunidade. Por outro lado, se a densidade estiver acima do valor limite, o pedestre obrigatoriamente caminha até uma travessia sinalizada ou semaforizada.

O modelo proposto por Airault e Espié (2005) representam a escolha de rotas de forma mais realista do que os simuladores de tráfego avaliados. Para representar o comportamento de pedestres atravessando em locais intermediários entre as travessias sinalizadas, entretanto, é necessário rever a forma como as áreas de pedestres são codificadas nos modelos. Os modelos de escolha de rotas dos simuladores de tráfego (*e.g.* VISSIM, Aimsun) não permitem a representação do comportamento de pedestres em áreas onde existam múltiplas travessias, ou onde os pedestres atravessem em locais intermediários entre as travessias sinalizadas.

### **3.2. Modelos de movimentação**

Os primeiros modelos de movimentação de pedestres meso e microscópicos foram desenvolvidos através de uma abordagem de autômatos celulares (Papadimitriou *et al.*, 2009). Nestes modelos os pedestres são representados pela ocupação de uma célula, e a sua movimentação depende de um conjunto de regras e do estado das células vizinhas. Autômatos celulares foram utilizados por Blue e Adler (1999) para representar da interação entre os pedestres e obstáculos, permitindo simular o fluxo bidirecional e a formação de filas.

Segundo Teknomo (2006), o estado da arte da simulação de pedestres é a utilização de sistemas multiagente, em que cada pedestre é representado por um agente autônomo, com características individuais, que interage com outros agentes e com o ambiente. Entre os modelos utilizados em ferramentas de microssimulação de tráfego, destacam-se o Modelo de Forças Sociais (Helbing e Molnár, 1995), utilizado pelo VISSIM, e o modelo desenvolvido pela empresa Legion, utilizado pelo Aimsun (TSS, 2010).

No Modelo de Forças Sociais, as intenções de movimento dos pedestres são representadas por forças sociais, análogas a forças newtonianas. A aceleração dos pedestres é definida pelo somatório das forças sociais. Entre elas destacam-se (i) a força que pedestres exercem para manter a velocidade desejada em direção ao destino, (ii) as forças para manter a distância desejada em relação a pedestres e obstáculos e (iii) as forças de atração exercidas pelos outros pedestres (Helbing e Molnár, 1995).

No modelo da Legion, os pedestres tentam minimizar o “custo” do deslocamento, baseado em três componentes: (i) inconveniência, que representa o trabalho adicional para chegar ao destino, (ii) frustração, que representa o custo de não andar na velocidade desejada, e (iii) desconforto, que representa o custo de estar mais próximo de outros pedestres e obstáculos do que o desejado (Berrou *et al.*, 2005). Os pedestres se movem para a posição que minimiza a soma ponderada destas três componentes. Conforme o pedestre se desloca, os pesos atribuídos a cada componente se adaptam às condições do ambiente. Outras habilidades do modelo

incluem distinguir pedestres caminhando na mesma direção e se comunicar com outros pedestres para evitar e resolver bloqueios.

Entre os modelos que representam o comportamento através de escolhas discretas, destaca-se o apresentado por Robin *et al.* (2009). Este modelo diferencia a movimentação dos pedestres em situações (i) irrestritas, quando o comportamento não depende dos pedestres no entorno, ou (ii) restritas, quando existem pedestres líderes e seguidores e um modelo de prevenção de colisões. Este modelo baseia-se no proposto por Antonini *et al.* (2006).

Os modelos de movimentação apresentados foram desenvolvidos para simular pedestres e multidões em terminais de transportes, grandes eventos e na evacuação de edificações. Estes modelos encontram-se em um nível de desenvolvimento superior aos demais modelos utilizados na representação das travessias de pedestres e podem ser calibrados para reproduzir as interações entre os pedestres em travessias.

### **3.3. Modelos de aceitação de brechas de pedestres**

O modelo de aceitação de brechas tradicional é equivalente ao modelo utilizado nos conflitos de veículos em interseções não semaforizadas, apresentado por Troutbeck e Brilon (1992). Este modelo considera que um fluxo principal tem preferência em relação aos secundários em uma interseção. Neste caso, os pedestres (fluxo secundário) analisam as brechas disponíveis no fluxo de veículos (principal), até que encontrem uma brecha maior que a brecha crítica.

O modelo de aceitação de brechas tradicional representa a decisão de forma determinística e é baseado apenas no parâmetro brecha crítica. A decisão não depende explicitamente da velocidade desejada de cada pedestre e da distância a ser atravessada. A brecha crítica é definida como tempo inferior ao qual um pedestre não realiza a travessia (TRB, 2000). As brechas são a medida do tempo entre a chegada de veículos consecutivos, geralmente medida entre os para-choques dianteiros, em um determinado ponto da via (Troutbeck e Brilon, 1992; Brewer *et al.*, 2006; Schroeder, 2008; TRB, 2000).

O valor do parâmetro brecha crítica é específico da travessia simulada e deve ser medido ou estimado em cada situação. Existem diversos métodos para estimar o valor da brecha crítica a partir de dados de campo, sendo os mais comuns o método gráfico, o método de regressão, o método de máxima verossimilhança e o método de Ramsey Routledge (Schroeder, 2008), que se baseiam nos valores das maiores brechas rejeitadas e das brechas aceitas pelos pedestres. O modelo de aceitação de brechas tradicional implica em uma simplificação considerável no comportamento dos pedestres, pois considera-se que todos os pedestres assumem uma mesma brecha crítica e brechas maiores que a crítica sempre são aceitas. O modelo assume um comportamento homogêneo e consistente. Limitações desta abordagem para a simulação de pedestres são discutidas por Sun *et al.* (2003), que reconhecem que este modelo é rígido e específico para as condições de cada travessia, enquanto os modelos probabilísticos, embora ainda simplistas em relação ao processo decisório, capturam melhor a aleatoriedade no comportamento.

Modelos de aceitação de brechas probabilísticos, que incorporam características comportamentais, são apresentados por Sun *et al.* (2003). Os autores analisaram a aceitação de brechas utilizando o método tradicional, um método probabilístico (representando a probabilidade de aceitação de uma brecha por uma distribuição de Erlang) e um método utilizando modelo Logit Binário. O modelo Logit Binário considerou 5 variáveis na decisão do pedestre: (i) faixa etária, (ii) sexo, (iii) tempo de espera, (iv) brecha disponível, (v) número de pedestres aguardando para atravessar.

Na validação dos modelos de Sun *et al.* (2003), o modelo Logit Binomial representou corretamente a decisão dos pedestres em 85,6% dos casos, tendo resultados melhores do que os modelos probabilístico e tradicional, ambos baseados apenas no parâmetro brecha crítica. Os coeficientes do modelo indicam que as variáveis mais importantes são a brecha disponível, o número de pedestres aguardando e a faixa etária dos pedestres.

Um modelo de aceitação de brechas determinístico, diferente do tradicional, foi incorporado no VISSIM (PTV, 2009). Neste modelo são definidas áreas de conflito nas interseções de áreas de pedestres com cada faixa de tráfego. A aceitação de uma brecha depende da velocidade desejada do pedestre e de dois parâmetros medidos em relação às áreas de conflito: brecha frontal e brecha traseira.

PTV (2009) define que a brecha frontal é o intervalo mínimo de tempo entre a saída de um veículo da área de conflito até o início da travessia de um pedestre. A brecha traseira é o intervalo mínimo entre a saída do pedestre da área de conflito e a chegada do próximo veículo. O pedestre estima a velocidade mínima para que, iniciando a travessia após a brecha frontal mínima, a travessia seja concluída antes da brecha traseira mínima. Se a velocidade estimada é menor que a velocidade desejada do pedestre, ele inicia a travessia.

No modelo de áreas de conflitos, mesmo que os parâmetros brecha frontal e brecha traseira sejam fixos, a aceitação da brecha depende da velocidade desejada de cada pedestre. Consequentemente, o modelo é capaz de representar um certo grau de heterogeneidade no comportamento dos pedestres. O modelo se destaca pela habilidade para representar a aceitação de brechas em travessias com múltiplas faixas. Nestes casos, o pedestre atravessa apenas quando existem brechas que permitam a travessia de todas as faixas de tráfego em uma etapa. O modelo permite simular a aceitação de brechas defasadas, estudada por Brewer *et al.* (2006).

No modelo de aceitação de brechas do Aimsun, os pedestres aceitam brechas avaliando a distância dos veículos até a travessia (TSS, 2010). Os pedestres aceitam uma brecha sempre que a distância do veículo até a travessia é maior que um valor mínimo aceito por todos os pedestres na travessia.

A aceitação de brechas em travessias apresenta uma variabilidade considerável. O nível de detalhamento necessário na representação destes comportamentos depende dos objetivos das simulações. Na avaliação dos atrasos dos pedestres, é possível que o comportamento médio seja representado adequadamente pelos modelos determinísticos apresentados. Em travessias onde os atrasos de pedestres aguardando por brechas na travessias sejam expressivos, no entanto, pode ser necessário representar a aceitação de brechas considerando outros parâmetros, além das brechas, como é proposto por Sun *et al.* (2003) através de modelos Logit Binomiais.

### **3.4. Motorist Yield**

Os modelos que representam o comportamento de veículos dando preferência aos pedestres em travessias recebem diferentes nomes na literatura, como *driver yield* (Schroeder, 2008), *motorist yield* (Sun *et al.*, 2003) e *motorist compliance* (Fitzpatrick *et al.*, 2006). Na simulação de travessias onde pedestres têm preferência, observa-se que os simuladores de tráfego (*e.g.* VISSIM 5.20, Aimsun 6) consideram que todos os veículos respeitam essa preferência, e não permitem a simulação do comportamento observado na prática.

No modelo desenvolvido por Liu *et al.* (2000) apenas um percentual predefinido dos veículos dava preferência a pedestres na simulação. Sun *et al.* (2003) estimaram um modelo Logit

Binário que incorporou as seguintes variáveis: (i) faixa etária do motorista, (ii) sexo do motorista, (iii) tipo de veículo, (iv) número de pedestres aguardando na travessia e (v) existência de veículos dando preferência no sentido oposto. Destas variáveis, as três últimas apresentaram maior influência sobre o comportamento dos motoristas.

Em modelos Logit Binários estimados por Schroeder (2008), os principais fatores influenciando a probabilidade dos motoristas darem preferência aos pedestres foram (i) a existência de veículos dando preferência, (ii) a existência de pedestres aguardando a travessia no mesmo lado do veículo, (iii) a existência de pedestres com comportamento assertivo, que indicam a intenção de atravessar aguardando na via, (iv) a presença de pedestres sobre a travessia e (v) a existência de tratamentos com luzes piscantes na travessia. O autor identificou que a probabilidade de um pedestre receber preferência era inferior quando o veículo estava em um pelotão, e o veículo anterior não havia dado preferência, ou quando a taxa de desaceleração necessária era elevada.

A simulação de travessias onde todos os veículos respeitam a preferência dos pedestres, apesar de representar o comportamento ideal, não corresponde ao comportamento observado em diversas travessias. Nas situações ideais, os modelos utilizados nos simuladores de tráfego (e.g. VISSIM 5.20, Aimsun 6) provavelmente representem adequadamente o comportamento observado. Em outras situações, os modelos probabilísticos provavelmente sejam os mais adequados para representar o comportamento.

### **3.5. Decisão sobre ignorar o semáforo**

Existem diversos fatores que influenciam a decisão do pedestre sobre atravessar durante o tempo de vermelho, apresentando comportamento oportunista, conforme apresentado no capítulo anterior. No modelo de Liu *et al.* (2000) o percentual de pedestres que ignora o semáforo é predefinido na simulação. No modelo do VISSIM 5.20 (PTV, 2009), o comportamento oportunista é representado definindo-se um tipo de pedestres que não obedece aos semáforos. Nestes casos, a decisão sobre ignorar o semáforo é predefinida no software, e não depende de características do fluxo de veículos como é observado na realidade.

O único modelo que representa a decisão de pedestres condicionadas a fatores locais da travessia foi apresentado por Yang *et al.* (2006). Os pedestres entrevistados indicaram a probabilidade de apresentarem comportamento oportunista em (i) situações normais e (ii) quando existem outros pedestres oportunistas. A partir destas probabilidades, os autores definiram um percentual de pedestres chamados de seguidores de oportunistas. Na simulação, os seguidores de oportunistas atravessam durante o tempo de vermelho somente quando identificam pedestres oportunistas na travessia. Este modelo desconsidera, no entanto, a influência de fatores investigados nas entrevistas, como o fluxo de veículos.

Apesar da literatura relatar estudos desenvolvidos através de observações e entrevistas, que avaliam os fatores que influenciam a decisão dos pedestres sobre ignorar os semáforos (Yang *et al.*, 2006; Zhuping *et al.*, 2011), são encontrados poucos modelos para representar este comportamento em simulações. A modelagem da decisão dos pedestres provavelmente envolva variáveis como as brechas disponíveis, a predisposição a ignorar os semáforos e o tempo de espera pelo tempo de verde do semáforo. Os estudos que analisam os comportamentos avaliam outras variáveis, como o sexo, idade e a existência de grupos de pedestres, que não são considerados explicitamente nas simulações.

### 3.6. Quadro resumo dos modelos

A Tabela 1 apresenta um resumo das características e limitações dos modelos encontrados na literatura e em softwares de microssimulação para representar o comportamento em travessias de pedestres.

**Tabela 1:** Quadro resumo de características e limitações dos modelos utilizados

Modelo	Características	Limitações
Escolha de rotas dos pedestres	<p>Pedestres seguem o caminho mínimo entre a origem e o destino do deslocamento.</p> <p><b>VISSIM:</b> pedestres utilizam o caminho mínimo, mas na versão 5.30 consideram o potencial de conflito com outros pedestres (PTV, 2011)</p> <p><b>Aimsun:</b> pedestres utilizam o caminho mínimo.</p>	<p>As características das travessias não são consideradas na escolha da rota, de forma que se existem múltiplas travessias possíveis na rota entre a origem e destino, a rota escolhida é sempre a mais curta. Este pode ser um aspecto crítico nas simulações de pedestres (Amos <i>et al.</i>, 2009)</p>
Movimentação dos pedestres	<p>Foram desenvolvidos para representar dinâmica de multidões adaptados para os simuladores de tráfego.</p> <p><b>Aimsun:</b> modelo desenvolvido pela Legion minimiza o “custo” de deslocamento e possui mecanismos para evitar bloqueios.</p> <p><b>VISSIM:</b> utiliza o Modelo de Forças Sociais para representar a movimentação dos pedestres.</p>	<p>A velocidade de desejo dos pedestres é atribuída a partir de uma distribuição fixa definida no modelo. Os pedestres não podem assumir velocidades superiores para concluir uma travessia em segurança, por exemplo.</p>
Aceitação de brechas dos pedestres	<p>São baseados em modelos de aceitação de brechas desenvolvidos para representar veículos em interseções não semaforizadas. Os modelos consideram os pedestres homogêneos, pois todos aceitam a mesma brecha crítica ou brecha traseira mínima, e consistentes, pois sempre aceitam uma brecha superior à crítica.</p> <p><b>VISSIM:</b> o modelo de aceitação de brechas em áreas de conflitos avalia as brechas em cada faixa de tráfego independentemente e a aceitação depende da velocidade desejada de cada pedestre.</p> <p><b>Aimsun:</b> o modelo de aceitação de brechas considera que os pedestres atravessam quando a distância dos veículos até a travessia é maior que um determinado valor mínimo.</p>	<p>Na prática, os pedestres não são necessariamente homogêneos, ou seja, não aceitam o mesmo valor mínimo de brecha. Os modelos não consideram a influência de diversos fatores considerados relevantes em pesquisas, como o tempo de espera, velocidade dos veículos, tipos de veículos e a existência de outras pessoas aceitando brechas.</p> <p>A aceitação de brechas nas simulações é influenciada pela distribuição de brechas disponíveis no fluxo de veículos, que devem reproduzir as condições reais da travessia.</p>
<i>Motorist Yield</i>	<p>Veículos sempre respeitam a preferência de pedestres nas travessias sinalizadas, como faixas de segurança.</p> <p><b>VISSIM/Aimsun:</b> veículos sempre respeitam a preferência na travessia, independentemente de outros fatores locais.</p>	<p>Estudos indicam que diversos fatores influenciam a decisão dos motoristas sobre dar preferência, como a idade e sexo do motorista, o tipo de veículo, a existência de outros veículos dando preferência na travessia e a posição do veículo em um pelotão. Em situações reais, a preferência não é sempre respeitada.</p>
Decisão sobre ignorar o semáforo	<p>Pedestres sempre obedecem a sinalização do semáforo.</p> <p><b>VISSIM:</b> permite configurar semáforos que são obedecidos apenas por um grupo de pedestres predefinido, de forma que é possível representar um percentual de pedestres que ignora os semáforos definindo-se grupos de pedestres obedientes e oportunistas.</p>	<p>Na prática, a decisão dos pedestres sobre ignorar semáforos é influenciada pelas condições da travessia. Ao considerar que a sinalização é ignorada por um percentual fixo dos pedestres, em vez de modelar os fatores que influenciam esta decisão, o comportamento simulado pode ser adequado para condições específicas, mas produzir erros expressivos com a alteração nas condições de tráfego.</p>

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O comportamento em travessias é complexo, pois depende de características físicas, comportamentais e da percepção de pedestres e motoristas. Na literatura sobre travessias, é possível identificar diversos modelos desenvolvidos independentemente para representar os comportamentos observados. Foram identificados dois tipos de modelos na revisão apresentada: (i) analíticos, desenvolvidos para representar detalhadamente o comportamento de pedestres e veículos em alguma situação específica, e (ii) de simulação, desenvolvidos para representar os comportamentos em situações mais genéricas, mas que frequentemente incorrem em simplificações.

Os modelos Logit Binomiais desenvolvidos para representar a aceitação de brechas dos pedestres e veículos dando preferência em faixas de segurança incorporam variáveis como faixa etária e sexo, que geralmente não são consideradas explicitamente nas simulações. Outras variáveis dos modelos, no entanto, podem ser facilmente avaliadas nas simulações, como o número de pedestres aguardando na travessia e a existência de veículos dando preferência. Estes modelos não foram incorporados nos simuladores de tráfego, que representam o comportamento de pedestres e veículos utilizando modelos determinísticos e simplificados.

Dentre os modelos avaliados, os simuladores de tráfego incorporam os de escolha de rotas, movimentação de pedestres e aceitação de brechas. Os modelos de escolha de rotas simplificam o comportamento de pedestres considerando que eles utilizam os caminhos mínimos e não consideram as características das travessias. Os modelos de aceitação de brechas utilizados são determinísticos e consideram os pedestres e veículos como homogêneos e consistentes. Estes modelos permitem simular o comportamento dos pedestres em diversas travessias, mas as simplificações podem limitar a sua utilização.

Os simuladores de tráfego possuem restrições quanto à representação das (i) decisões de pedestres sobre ignorar os semáforos, (ii) decisões dos veículos sobre dar preferência nas travessias sinalizadas e (iii) escolha de rotas dos pedestres considerando as características das travessias. Apesar da utilização de modelos avançados da movimentação dos pedestres, os modelos que representam as decisões de pedestres e veículos em travessias ainda são limitados. Os modelos probabilísticos aparecem na literatura como alternativa, pois permitem considerar diversos fatores na decisão de pedestres e motoristas.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Airault, V. e S. Espié (2005) Behavioral model of the pedestrian interaction with road traffic. In: *Proceedings of the 2005 European Transport Conference*. Association for European Transport. Strasbourg.
- Amos, J. B. Kohn, V. Zachariadis (2009) Microsimulation approaches to pedestrian route assignment modeling. In: *Proceedings of the 2010 European Transport Conference*. Association for European Transport. Glasgow, Scotland, UK.
- Antonini, G., Bierlaire, M., & Weber, M. (2006). Discrete choice models of pedestrian walking behavior. *Transportation Research Part B*, 40, 667–687.
- Berrou, J. et al. (2005) Calibration and validation of the Legion simulation model using empirical data. In: Waldau, N. et al. (eds.) *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005*. Springer Berlin Heidelberg, 2005. p. 167-181. DOI: 10.1007/978-3-540-47064-9\_15.
- Blue, V., e J. Adler (1999) Cellular automata microsimulation of bidirectional pedestrian flows, *Research Board 78<sup>th</sup> Annual Meeting*, Washington D.C., CD-ROM.
- Brewer, A., K. Fitzpatrick, J. Whitacre e D. Lord (2006) Exploration of Pedestrian Gap-Acceptance Behavior at Selected Locations *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1982. Whashington, D.C.

- Chu, X., M. Guttenplan e M. Baltes (2004) Why people cross where they do: the role of the street environment. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1878, Whashington, D.C.
- Fitzpatrick, K. *et al.* (2006) *Improving Pedestrian Safety at Unsignalized Crossings*. NCHRP Report. 562. Transportation Research Board. National Research Council, Washington, DC.
- Helbing, D. e P. Molnár (1995). Social force model for pedestrian dynamics. In *Physical Review E* 51(5), p. 4282-4286.
- Liu, R., Cruz da Silva, J. P., & da Maia Seco, A. J. (2000). A bi-modal micro-simulation tool for the assessment of pedestrian delays and traffic management. In: *Proceedings of the nineth international association of travel behaviour research conference*, Gold Coast, Australia, 2000.
- Papadimitriou, E., G. Yannis, J. Golias (2009) A critical assessment of pedestrian behaviour models. *Transportation Research Part F*, 12, 242–255.
- Paramics (2011) *Urban Analytics Framework Brochure*. Disponível em: <<http://www.pedestrian-simulation.com/>>. Acessado em: 8 mar. 2011.
- PTV (2009) *VISSIM 5.20 User Manual*. Planung Transport Verkehr AG. Karlsruhe, Alemanha.
- PTV (2011) *VISSIM 5.30 Technical details*. Disponível em: <<http://www.ptvag.com/software/transportation-planning-traffic-engineering/software-system-solutions/vissim/vissim-530-highlights/vissim-530-technical-details/>>. Acesso em: 8 mar. 2011.
- Robin, T., Antonini, G., Bierlaire, M., & Cruz, J. (2009). Specification, estimation and validation of a pedestrian walking behavior model. *Transportation Research Part B*, 43, 36–56.
- Schroeder, B.J. (2008) *A Behavior-Based Methodology for Evaluating Pedestrian-Vehicle Interaction at Crosswalks*. Tese (Doutorado), North Carolina State University, Raleigh, NC, Estados Unidos.
- Shi, J., Chen, Y., Ren, F. & Rong, J. (2007). Research on pedestrian behaviors and traffic characteristics at unsignalized midblock crosswalk: a case study in Beijing. In: *TRB 86th Annual Meeting Compendium of Papers CD-ROM: Transportation Research Board Annual Meeting 2007*. Washington, DC: TRB.
- Sisiopiku, V.P.,D. Akin (2003) Pedestrian behaviors at and perceptions towards various pedestrian facilities: an examination based on observation and survey data. *Transportation Research Part F*, v. 6, p. 249–274.
- Sun, D., S.V. Ukkusuri, R.F. Benekohal, S.T. Waller (2003) Modeling of motorist-pedestrian interaction at uncontrolled mid-block crosswalks. In: *TRB 82th Annual Meeting Compendium of Papers CD-ROM: Transportation Research Board Annual Meeting 2003*. Washington, DC: TRB.
- Teknomo, K. (2006). Application of microscopic pedestrian simulation model. *Transportation Research Part F*, 9, 15–27.
- TRB (2000) *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board. Special Report 209. National Research Council, Washington, DC, EUA, 4<sup>a</sup> ed.
- Troutbeck, R. e W. Brilon. (1992) *Unsignalized Intersection Theory*, Revised Monograph on Traffic Flow Theory. Turner-Fairbank Highway Research Center.
- TSS (2010) *Aimsun 6.1 User's Manual*. Transport Simulation Systems.
- Yang, J., W. Deng, J. Wang, Q. Li, Z. Wang (2006) Modeling pedestrians' road crossing behavior in traffic system micro-simulation in China. *Transportation Research Part A*, v. 40, p. 280–290.
- Zhuping, Z. *et al.* (2011) Pedestrian Crossing Behaviors at Signalized Intersections: Observational Study and Survey in China. In: *TRB 90th Annual Meeting Compendium of Papers CD-ROM: Transportation Research Board Annual Meeting 2011*. Washington, DC: TRB.

### **3. ARTIGO 2**

MICROSSIMULAÇÃO DA TRAVESSIA DE PEDESTRES:  
COLETA DE DADOS PARA CALIBRAÇÃO DE MODELOS

## MICROSSIMULAÇÃO DA TRAVESSIA DE PEDESTRES: COLETA DE DADOS PARA CALIBRAÇÃO DE MODELOS

André Cademartori Jacobsen

Helena Beatriz Bettella Cybis

Laboratório de Sistemas de Transportes - LASTRAN

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – PPGEP

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

### RESUMO

A microssimulação de tráfego tem incorporado, cada vez mais, modelos que representam os pedestres e suas interações com veículos. A simulação de travessias de pedestres classicamente utiliza um modelo de aceitação de brechas, cujos parâmetros devem ser calibrados para cada situação. Este artigo apresenta a metodologia de coleta de dados desenvolvida para obtenção de valores de brechas frontais e traseiras com o objetivo de calibrar um modelo de travessias de pedestres codificado através do software VISSIM. O método utilizado permite a consideração de particularidades do processo de travessia de pedestres como, por exemplo, situações em que os pedestres atravessam fora da área sinalizada, ou iniciam a travessia enquanto o veículo ainda não liberou a faixa de rolamento. O processo de coleta é baseado em análise de imagens, que são transformadas e utilizadas para rastrear pedestres e veículos. Os parâmetros do modelo são obtidos através da análise das rotas. A metodologia apresentada é aplicável a outros processos de coleta que envolvam análises de conflitos de tráfego.

### ABSTRACT

The microsimulation of traffic is incorporating models to represent pedestrians and their interactions with vehicles. The pedestrian crossing simulation is typically based on gap acceptance models, whose parameters should be calibrated for each specific situation. This paper presents a data collection methodology developed to acquire values of front and rear gaps with the objective of calibrating a pedestrian crossing model coded in the VISSIM software. This method allows the analysis of important particularities of the pedestrian crossing process, as for instance, pedestrians crossing at unsignalized areas, or starting to cross before vehicles live the traffic lane. The data collection process is based on the analysis of images, which are transformed and used to track the pedestrians and vehicles. The model's parameters are obtained through the analysis of the routes. This methodology is applicable to other data collection processes that require traffic conflicts analysis.

## 1. INTRODUÇÃO

As interações entre pedestres e veículos são aspectos críticos em relação à segurança e atrasos. Os problemas de segurança são evidenciados pela severidade dos acidentes que envolvem os dois modos, frequentemente resultando em ferimentos graves e óbitos. Os atrasos são, muitas vezes, decorrentes de travessias mal projetadas que aumentam a variabilidade e tempo de viagem.

Estas interações têm recebido atenção especial de técnicos e desenvolvedores de softwares de simulação de tráfego. A engenharia de tráfego, que historicamente concentra maior atenção aos veículos motorizados, passou a considerar também os modos não motorizados. Neste cenário, surge uma demanda por modelos que representem o comportamento de pedestres e veículos com um nível de detalhamento compatível com os simuladores de tráfego.

Na modelagem de tráfego multimodal, o deslocamento dos veículos é simulado tradicionalmente por modelos de *car-following* e *lane-changing*, e os pedestres por um modelo de movimentação, como o de Forças Sociais utilizado pelo VISSIM (PTV, 2009), que é baseado em forças de atração e repulsão entre pedestres e os elementos do ambiente. As interações, que ocorrem nas travessias, geralmente são representadas por um modelo de aceitação de brechas.

Este artigo apresenta a metodologia de coleta de dados desenvolvida para obter parâmetros para calibração do modelo de aceitação de brechas do VISSIM. Este software foi escolhido, dentre outros, por utilizar uma abordagem mais elaborada da interação entre veículos e

pedestres. Neste modelo, as brechas são medidas em relação à área de conflito da travessia, e não entre veículos, como no caso tradicional, apresentado posteriormente neste artigo.

De maneira geral, assume-se que pedestres e veículos adotam comportamentos diferenciados, de acordo com o tipo de travessia: (i) semaforizadas, (ii) sinalizadas e (iii) não sinalizadas. Nas travessias semaforizadas, considera-se que não existe aceitação de brechas porque não ocorre interação entre veículos e pedestres. Nas travessias sinalizadas (*e.g.* faixas de segurança) a preferência é dos pedestres, e os veículos aceitam brechas entre eles. Nestes casos, a calibração dos parâmetros de aceitação de brechas requer uma coleta de dados, pois as brechas aceitas podem depender de fatores locais como fiscalização, número de faixas de tráfego, número de pedestres e faixa etária, etc. As situações em que veículos não obedecem à sinalização não serão analisadas, pois nos softwares de simulação pesquisados a sinalização da travessia é sempre obedecida.

Nas travessias não sinalizadas, os pedestres aceitam brechas no fluxo de veículos. A modelagem deste caso apresenta dificuldades adicionais, pois as características dos seus deslocamentos são diferentes. Blue e Adler (1999) destacam que pedestres não andam oficialmente em faixas, podem acelerar instantaneamente até sua velocidade máxima, tem menos preocupação com eventuais colisões em outros pedestres e podem andar em grupos, dentre outras diferenças. Isto implica, no caso de travessias, que eles podem iniciar a travessia repentinamente, mesmo que haja conflitos entre pedestres durante o percurso. Estas características implicam em uma maior complexidade na coleta de dados, especialmente nos casos em que os pedestres não aguardam o final da passagem do veículo para atravessar.

A metodologia para coleta de dados, independentemente do tipo de travessia, geralmente envolve coletas de imagens. As principais diferenças encontradas na literatura, portanto, são as variáveis e o método de extração de dados a partir das imagens. No método manual, a extração dos dados é feita por pesquisadores, que observam o vídeo, repetidamente, e anotam os tempos em que ocorrem eventos (*e.g.* chegada de veículos, início da travessia, etc.). No método semiautomático, são efetuadas marcações de posições dos objetos manualmente no vídeo, as coordenadas reais e os tempos são registrados automaticamente. No método automático, utilizam-se ferramentas de processamento de imagens e vídeos para identificar, classificar e rastrear objetos nos vídeos.

A metodologia proposta, classificada como semiautomática, foi desenvolvida para coletar dados de uma travessia não sinalizada. O procedimento consiste em (i) coletar as imagens, (ii) transformar as imagens, para identificar as posições reais dos objetos, (iii) rastrear os objetos (veículos e pedestres), marcando suas posições conforme instruções predefinidas, para obter uma rota, e (iv) processar os dados para obter os parâmetros desejados, que neste caso foram as brechas frontais e traseiras. Utilizar recursos do laboratório onde foi desenvolvido o estudo ou gratuitos foi um objetivo secundário da metodologia, que resultou no uso de uma filmadora convencional, softwares de domínio público (*e.g.* ImageJ) e softwares comerciais (Matlab).

Este artigo apresenta uma revisão dos modelos de aceitação de brechas tradicional e o do VISSIM (seção 2), os processos de coleta de dados utilizados na literatura (seção 3), a metodologia proposta (seção 4), resultados e discussão (seção 5) e considerações finais (seção 6).

## 2. MODELOS DE ACEITAÇÃO DE BRECHAS

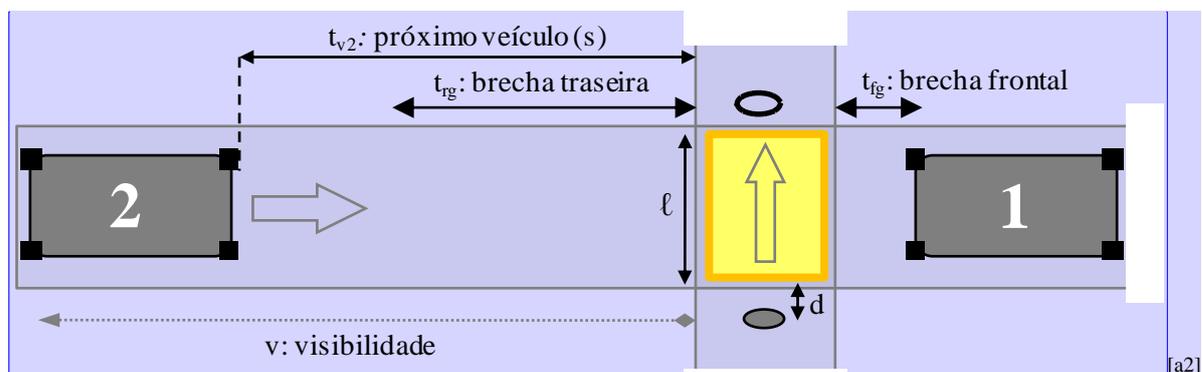
A metodologia de coleta de dados proposta foi desenvolvida para calibrar o modelo de aceitação de brechas utilizado pelo VISSIM. Em uma revisão da literatura sobre travessias, no entanto, identifica-se que geralmente é utilizado o modelo tradicional. Neste caso, ambos os modelos são apresentados, com intuito de facilitar a compreensão dos processos de coleta de dados apresentados nos capítulos seguintes e justificar a escolha do modelo do VISSIM. Neste capítulo, os exemplos utilizados se referem às travessias não sinalizadas, em que os pedestres aceitam brechas.

Na aceitação de brechas tradicional, a brecha é o intervalo de tempo entre a passagem do para-choque dianteiro de um veículo e o do veículo seguinte, por um ponto de referência (TRB, 2000). A brecha crítica é o parâmetro único da travessia, que pode ser interpretado como o tempo mínimo aceito pelos pedestres para atravessar com segurança (Fitzpatrick, 2006). Na prática, existem diferentes formas de estimar o valor da brecha crítica, sendo comum adotar o valor para o qual a probabilidade da brecha ser aceita ou rejeitada é igual. Analisando resultados de uma coleta de dados, este valor pode ser obtido graficamente, a partir das curvas de frequências acumuladas de brechas aceitas e brechas rejeitadas, correspondendo ao ponto onde elas se cruzam. No entanto, o valor definido é uma média para todos pedestres, e características individuais (*e.g.* velocidade de caminhada) não são consideradas.

Nos modelos de simulação, em uma travessia não sinalizada, por exemplo, um pedestre aguardando na calçada estima brechas entre os sucessivos veículos, até que o valor seja maior que a brecha crítica, quando inicia a travessia. Neste caso, todos pedestres iniciam a travessia, pois o modelo é determinístico e a brecha crítica é comum a todos.

Na aceitação de brechas do VISSIM, os parâmetros utilizados são a brecha frontal, brecha traseira, visibilidade e a distância de parada adicional (PTV, 2009). A interação ocorre na área de conflitos, destacada na Figura 1, formada pela interseção das faixas de veículos e de pedestres. A brecha frontal é o intervalo mínimo entre a saída do veículo 1 da área de conflitos e o início da travessia. A brecha traseira é o intervalo mínimo aceitável entre a saída do pedestre, após concluir a travessia, e a chegada do próximo veículo. Adicionalmente, a visibilidade ( $v$ ) é a distância a partir da qual o pedestre identifica o veículo e a distância adicional de parada ( $d$ ) é a distância entre a área de espera e a área de conflito.

No VISSIM, ao chegar à travessia, o pedestre identifica se os veículos 1 e 2 (ilustrados na Figura 1) estão no intervalo visível. O pedestre realiza sucessivas estimativas da velocidade mínima necessária para conseguir realizar a travessia respeitando as brechas mínimas, até que seja inferior à sua velocidade de caminhada (máxima), quando a travessia é iniciada (PTV, 2009).



### **Figura 1:** Parâmetros da aceitação de brechas do VISSIM

No modelo do VISSIM, com a decisão na travessia dependendo da velocidade individual do pedestre, o nível de detalhe está mais próximo do modelo de veículos. PTV (2009) destaca que, nas áreas de conflitos, eles são mutuamente conscientes da presença um do outro. Caso um pedestre erre a estimativa da velocidade ou um veículo fora do intervalo visível chegue à área de conflito antes de o pedestre concluir a travessia, os veículos reduzem a velocidade para evitar um acidente. Nos casos com múltiplas faixas, os pedestres aguardam brechas que permitam atravessar todas as faixas simultaneamente. Neste caso, quando o veículo chega à área de conflito durante a travessia, os pedestres param entre as faixas e aguardam uma nova brecha.

O processo de coleta de dados para calibração do modelo do VISSIM deve obter valores de brechas frontais e traseiras. Estas brechas são medidas, diferentemente das brechas tradicionais, nos instantes em que o pedestre entra ou sai da área de conflito. Existem dois casos especiais em que a coleta de dados é dificultada: (i) em faixas de tráfego largas, em que os pedestres aguardam a brecha dentro da área de conflito e (ii) em vias com múltiplas faixas, em que as brechas devem ser medidas individualmente para cada faixa. Não é claro se, no primeiro caso, as brechas medidas devem ser consideradas em algum dos modelos, já que o comportamento pode não ser adequado para a segurança. No segundo caso, quantidade de dados extraídos pode exigir mais tempo de processamento, mas a validade do modelo de aceitação de brechas tradicional para simular a travessia de múltiplas faixas em nível microscópico deve ser analisada com cuidado. A necessidade de avaliar faixas de tráfego e as posições dos veículos e pedestres no processo de coleta das brechas é uma das justificativas para a utilização de um método de coleta semiautomático, como o proposto neste artigo.

### **3. PROCESSOS DE COLETA DE DADOS**

A coleta de dados em pesquisas sobre a travessia de pedestres geralmente envolve coleta de imagens. Exceções são o estudo de aceitação de brechas apresentando vídeos aos pedestres, de Schmidt e Färber (2009), e o desenvolvimento de modelos de escolha do local de travessia, não apresentados neste artigo, que utilizam entrevistas, como o de Chu *et al.* (2004). Esse capítulo apresenta uma revisão dos processos de coleta de dados relatados na literatura, em que a extração de dados que foi feita de forma automática, semiautomática e manual. Outras etapas da coleta de dados, como a coleta de imagens, são comuns a diversos trabalhos e não são apresentados neste estudo.

Existe um esforço pelo desenvolvimento de tecnologias de visão computacional, e ferramentas de processamento de vídeos e imagens, que permitam detectar e rastrear veículos e pedestres automaticamente nas filmagens. Para isso, são necessários algoritmos capazes de identificar, classificar e rastrear os objetos, mesmo em situações com oclusões e sombras. Uma das principais vantagens do processamento automático é a possibilidade de coletar dados por períodos mais extensos, já que manualmente esta tarefa pode ser considerada demorada e monótona.

Chae (2005) desenvolveu uma ferramenta (ITRE-mv) para processar os vídeos de travessias automaticamente, que detecta objetos rígidos (veículos) e não rígidos (pedestres). No processo de coleta de dados, em travessias nos acessos a rotatórias, o autor identificou limitações que tornam necessário rastrear manualmente alguns objetos. Recentemente, Ismail *et al.* (2009) desenvolveram uma ferramenta automática para rastrear pedestres e veículos e detectar eventos que possam conduzir a colisões, calculando indicadores de severidade dos conflitos.

Os autores destacam que para utilizar a ferramenta em ambientes com fluxos maiores, no entanto, são necessários aperfeiçoamentos. O processo de coleta de dados, conforme observado nas ilustrações do artigo, associou as posições dos objetos ao seu centro geométrico nas imagens identificadas. Esta simplificação não é adequada para a calibração de modelos, que necessitam de uma precisão superior.

Em alguns casos, foram utilizadas ferramentas para obter o tempo e a posição de pedestres e veículos marcados manualmente por um observador. Estes métodos foram denominados semiautomáticos. Entre as principais vantagens deste método estão visualizar e corrigir os eventos marcados e identificar a posição precisa dos objetos. Chae (2005) desenvolveu uma ferramenta semiautomática (ITRE semi-tracker), utilizada nos casos em que os objetos não puderam ser processados automaticamente. Esta ferramenta permitiu ao observador identificar um objeto, medir seu comprimento e marcar sua posição nas sucessivas imagens, extraindo dados no mesmo formato que a ferramenta principal.

Yang *et al.* (2006) desenvolveram uma ferramenta semiautomática mais simples. A medida de cada brecha, aceita ou rejeitada, foi obtida marcando 4 pontos na sequência de imagens: (i) a posição do pedestre, (ii) a posição de interseção das rotas do pedestre e do veículo, (iii) a posição do veículo e (iv) a posição do veículo depois de 0,25 segundos. Cada medição foi feita quando o veículo passou em frente ao pedestre. A filmagem, feita a partir do 27º andar de um edifício, facilitou a identificação das posições, observadas praticamente do topo.

Uma parcela significativa dos estudos, no entanto, analisou vídeos sem auxílio de ferramentas de processamento de imagens. Entre eles, podemos destacar Lee e Lam (2008), Das *et al.* (2005), Sun *et al.* (2003), Schroeder (2008), Fitzpatrick *et al.* (2006) e Sisiopiku e Akin (2003). Em alguns casos especiais, autores utilizaram coletas complementares. Como exemplos, destacam-se Fitzpatrick *et al.* (2006), que utilizaram computadores de mão para coletar dados qualitativos sobre os pedestres e as travessias, e Schroeder (2008), que coletou a velocidade e posição dos veículos utilizando um radar laser (LIDAR).

Exemplificando a metodologia de trabalhos que extraíram dados manualmente, Lee e Lam (2008) transformaram vídeos em sequências de imagens, incluindo uma legenda com o tempo, e identificaram as imagens em que os pedestres iniciavam e terminavam a travessia. Das *et al.* (2005) extraíram um conjunto de informações mais amplo, com dois pesquisadores analisando os vídeos. Os pedestres foram caracterizados por sexo, faixa etária, situação (*e.g.* carregando bagagem), os tempos na chegada, início e conclusão da travessia e o sentido do deslocamento. Os veículos foram caracterizados pela posição do pedestre conflitante, se o veículo passa antes ou depois do pedestre, tipo de veículo, sentido de deslocamento, faixa de tráfego e os tempos da entrada e saída da travessia. A coleta foi utilizada para analisar as brechas aceitas por diferentes grupos de usuários e estimar modelos.

Na revisão dos processos de coleta de dados, foram identificadas diferentes metodologias que, geralmente, extraíram valores de brechas tradicionais ou variáveis para desenvolver novos modelos. A coleta de dados dos parâmetros brecha frontal e traseira, utilizados no VISSIM, não foi relatada.

#### **4. METODOLOGIA**

Esta metodologia foi desenvolvida para obter valores de brechas frontais e traseiras de uma travessia não sinalizada. Esta seção descreve suas 4 etapas: (i) coleta das imagens, (ii) transformação das imagens, (iii) rastreamento dos objetos e (iv) processamento dos dados.

O uso de ferramentas para a extração semiautomática de dados das imagens foi adequado para a situação, especialmente porque (i) pedestres atravessavam fora do espaço reservado, apesar da existência de sinalização horizontal, (ii) aguardavam no espaço do veículo por uma brecha para atravessar e (iii) a faixa de tráfego do veículos era larga suficiente para a passagem de dois veículos, e os pedestres iniciavam a travessia antes da passagem de veículos que trafegavam no lado oposto. Para permitir a coleta de dados nestas situações, a área de conflito não foi associada à posição da sinalização horizontal. Foi considerada uma área de conflito ao longo da rota de cada pedestre, com a largura do veículo. Neste caso, brechas frontais e traseiras representam os valores mínimos aceitos pelo pedestre para qualquer travessia, e as brechas das três situações citadas são aproveitadas.

#### 4.1. Coleta das imagens

A escolha do local de travessia é um aspecto crítico para obter maior precisão na posição dos pedestres e veículos. A coleta de dados foi realizada na interseção da Av. Getúlio Vargas com a Av. Ganzo, em Porto Alegre, no horário entre 11h00 e 11h30. A câmera foi posicionada no 9º andar de um edifício próximo à interseção. A Figura 2 apresenta uma ilustração do local de travessia, onde pode-se observar a existência de um canteiro central e faixas de travessia de pedestres. A câmera foi posicionada a aproximadamente 30 metros de altura, a 25 metros da extremidade mais próxima da área de estudo.



**Figura 2:** Local da filmagem e a área de estudo

Entre os principais critérios na escolha do local, destacam-se: existência de eventos de travessia suficientes para a análise, inexistência de congestionamentos, possibilidade de visualizar (sem barreiras visuais) o trajeto completo de pedestres e veículos, desde a aproximação até o final da travessia, e a possibilidade de filmar a travessia vista de topo.

#### 4.2. Transformação das imagens

As imagens capturadas são uma projeção perspectiva da área de estudos em um plano, que possui um sistema de coordenadas próprio, no qual as medidas e ângulos reais não são preservados. O objetivo desta etapa é aplicar uma transformação geométrica para obter a

projeção das imagens no plano da área de estudos, possibilitando seu uso para o rastreamento. Neste estudo, com filmagens realizadas a partir uma sala comercial fechada, não houve necessidade de uma etapa de estabilização das imagens no processamento.

Existem casos em que a transformação é feita apenas nas coordenadas extraídas, após o rastreamento. Na metodologia proposta, as imagens são transformadas por dois motivos principais: (i) as posições, distâncias e velocidades reais dos objetos podem ser analisadas durante o rastreamento e (ii) os objetos mais distantes da posição da câmera, cujas dimensões são ampliadas com a transformação, são rastreados e têm seu contorno marcado com maior precisão.

A Figura 3 apresenta uma imagem original do vídeo (a), uma imagem após a transformação perspectiva (b) e uma resultante da sobreposição com uma imagem de satélite utilizada como referência das posições reais (c). A sobreposição das imagens permite identificar que a posição das sombras do caule das árvores do canteiro central (horizontais na imagem de referência) se encontra com a posição dos caules na imagem transformada, indicando uma transformação satisfatória. As faixas de pedestres sobrepostas corretamente e o alinhamento do meio-fio do canteiro central na parte inferior das imagens reforçam esta constatação.



**Figura 3:** Imagens original (a), transformada (b) e sobreposta com a imagem de referência (c)

Diversas ferramentas foram consideradas para fazer a transformação de imagens. Dentre as qualificadas, destacam-se as extensões (*plug-ins*) do software de domínio público chamado ImageJ, desenvolvido pelo *National Institutes of Health* (NIH, 2010). Algumas dificuldades em verificar a qualidade do ajuste e processar arquivos em lote, no entanto, resultaram no uso do software Matlab (Mathworks, 2010).

A transformação das imagens requer uma matriz que relacione as coordenadas das imagens e as reais. A ferramenta de seleção de pontos de controle do Matlab foi utilizada para selecionar pontos na imagem original e nas posições correspondentes na imagem de satélite, usada como referência. Os pontos selecionados incluíram árvores, sinalização horizontal, postes, canteiros e esquinas. Foram necessários 4 pares de pontos para definir coeficientes da matriz, no

entanto, foram selecionados mais pontos para reduzir o erro relacionado à precisão da marcação. As imagens foram transformadas com o próprio Matlab.

### **4.3. Rastreamento dos objetos**

Esta etapa da metodologia é denominada rastreamento dos objetos porque os objetos (pedestres e veículos) são marcados ao longo da sequência de imagens de forma que resulte em uma rota. O rastreamento é feito por um observador, utilizando ferramentas específicas, que obedece a um conjunto de instruções para padronizar a coleta e facilitar o processamento. Apesar de o rastreamento ser uma tarefa simples, o tempo necessário para marcar a rota de cada objeto reforça a importância de uma ferramenta eficiente. O resultado desta etapa é uma tabela contendo o código do objeto, tempo (*frame*) e as coordenadas X e Y.

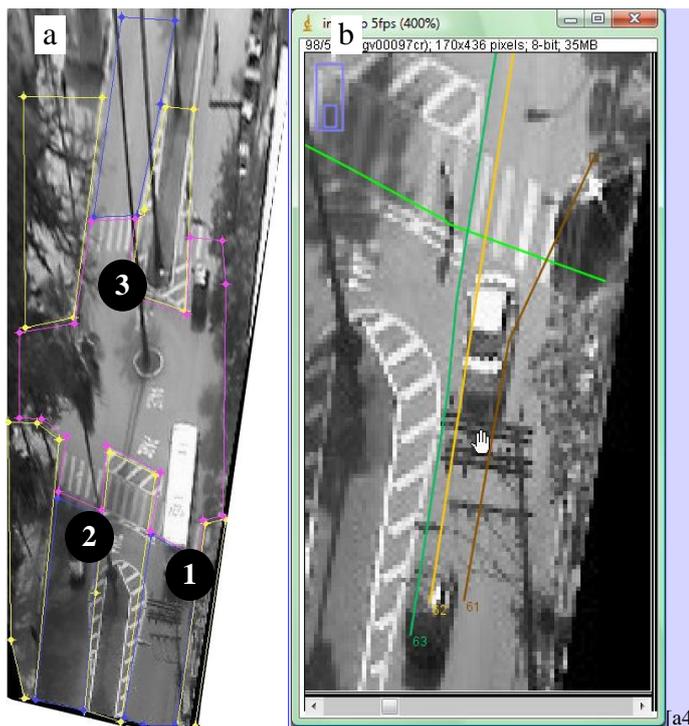
#### **4.3.1. Escolha da ferramenta de rastreamento**

As ferramentas desenvolvidas para coleta de dados de travessias em outros estudos não foram disponibilizadas. Como alternativa, foram identificadas ferramentas desenvolvidas para outras finalidades. Entre as extensões do programa ImageJ, as desenvolvidas para rastrear partículas manualmente em sequências de imagens puderam ser utilizadas diretamente. Neste artigo, foi selecionado o MTrackJ desenvolvido por Meijering (2010), do Biomedical Imaging Group Rotterdam. Esta ferramenta não permitiu marcar a dimensão dos veículos, portanto, neste procedimento foi usado o Matlab para desenhar um polígono no contorno de cada objeto.

As principais facilidades no uso do MTrackJ são a visualização da rota parcial com símbolos nos locais das marcações e a navegação entre as imagens com a roda do mouse (*scroll wheel*) ou atalhos de teclado. O arquivo de saída pode ser exportado como arquivo de texto, compatível com as ferramentas de processamento de dados.

#### **4.3.2. Instruções para rastreamento**

O procedimento de rastreamento dos objetos consiste em abrir uma sequência de imagens no aplicativo e marcar as posições de um objeto por vez. Elementos utilizados para orientar o rastreamento são apresentados na Figura 4a. As travessias foram analisadas separadamente em cada lado do canteiro, e foram identificadas na figura pelos números 1-3, pois barreiras visuais impediram a coleta na quarta travessia. A Figura 4a apresenta também o contorno das áreas de pedestres (amarelo)<sup>[a3]</sup>, veículos (azul) e a interseção (rosa). A visualização do rastreamento no MTrackJ é ilustrado pela Figura 4b, que apresenta 3 rotas de veículos e uma de pedestre.



**Figura 4:** Elementos da área de estudo (a) e um exemplo de rastreamento com o MTrackJ (b)

As instruções adotadas neste estudo foram:

1. as rotas de pedestres devem ter origem e destino em uma área de pedestres;
2. as rotas de veículos devem ter origem em uma área de veículos e destino na interseção
3. os veículos que passam pela travessia quando não existem pedestres aguardando não devem ser marcados, exceto o último veículo antes da chegada de um pedestre;
4. uma rota de pedestre deve ser iniciada quando o pedestre chega ao local da travessia e aguarda uma oportunidade para atravessar, ou no instante anterior a entrar na via, caso não precise aguardar;
5. no caso de pedestres aguardando uma brecha, sua posição deve ser marcada no instante em que ele pára, aguardando a oportunidade de atravessar, e antes de completar o primeiro passo da travessia, de forma a obter precisamente o instante de início da travessia e o tempo de espera;
6. uma rota de pedestre deve ser finalizada quando ele chega à próxima área de pedestres, sendo contabilizado como um novo pedestre caso faça uma nova travessia;
7. a posição dos pedestres deve ser marcada no nível da interseção, sempre que possível no local dos pés, ou na projeção do tronco no chão;
8. uma rota de veículos deve ser iniciada quando o veículo aparecer completamente na imagem;
9. a posição dos objetos não devem ser marcadas em todas imagens da sequência, apenas nos pontos de origem e destino do deslocamento e pontos intermediários sempre que o objeto altera a sua velocidade ou direção;
10. para melhorar a precisão das rotas, posições intermediárias devem ser acrescentadas às rotas de veículos, especialmente nos anteriores e posteriores à travessia de pedestres;
11. a posição das motocicletas deve ser marcada no local referente à roda da frente;
12. a posição dos veículos deve ser marcada no lado esquerdo do para-choque dianteiro no sentido sul-norte (verticalmente para cima), no lado direito no sentido norte-sul.

#### 4.4. Processamento dos dados

Esta etapa corresponde à análise das rotas para obter os valores de brechas frontais e traseiras. O processamento das rotas requer funções de geometria para analisar a relação espacial entre os objetos, que estão disponíveis no software Matlab. Esta seção apresenta as 4 etapas do processamento dos dados.

A primeira etapa corresponde à organização dos dados. Foi criada uma tabela, com uma linha para cada objeto, na qual foram computados o tempo inicial e final do objeto, a área de origem e destino, a distância percorrida, o tipo do objeto (pedestre, moto ou veículo) e uma última célula com valores múltiplos, com a sequência de coordenadas X, Y e o tempo dos pontos rastreados.

A segunda etapa corresponde ao cálculo das rotas de extremidades dos veículos que não foram rastreadas. No caso de veículos que foram rastreados a partir de um ponto localizado no lado esquerdo do para-choque dianteiro, por exemplo, as posições das outras três extremidades são calculadas. Nesta etapa são criadas colunas na célula com valores múltiplos de cada objeto, com as coordenadas X e Y de cada extremidade adicional dos veículos e motocicletas calculadas a partir das dimensões de um polígono ajustado ao contorno de cada objeto.

A terceira etapa corresponde à identificação dos valores das brechas frontais e traseiras. Para cada pedestre, são identificados os veículos e motocicletas que surgiram no intervalo entre 30 segundos antes do pedestre chegar à travessia, até 30 segundos após o pedestre concluir a travessia. Assumiu-se que veículos fora deste intervalo não influenciariam a travessia. A análise dos conflitos entre pedestres e veículos consiste em identificar a posição e o tempo em que ocorre o cruzamento entre suas rotas. Este procedimento utiliza funções do Matlab para identificar a interseção de polígonos, considerando as rotas como polígonos abertos. O tempo em que cada objeto passa pela interseção é obtido pela interpolação do tempo dos pontos anterior e posterior. No caso dos veículos, em que cada extremidade possui uma rota, é calculado um cruzamento para cada extremidade.

Os dados dos cruzamentos são armazenados em uma tabela de conflitos, que possui o código do pedestre e do veículo, um código da extremidade do veículo, o tempo em que o pedestre e veículo passam pelo ponto, as velocidades do pedestre e do veículo, a coordenada do ponto de cruzamento e o intervalo de tempo entre a passagem dos objetos (obtido subtraindo-se o tempo do pedestre do tempo do veículo). A brecha frontal do pedestre é o maior intervalo de tempo negativo (pois o tempo do pedestre é maior que o do veículo) e a brecha traseira é o menor intervalo de tempo positivo.

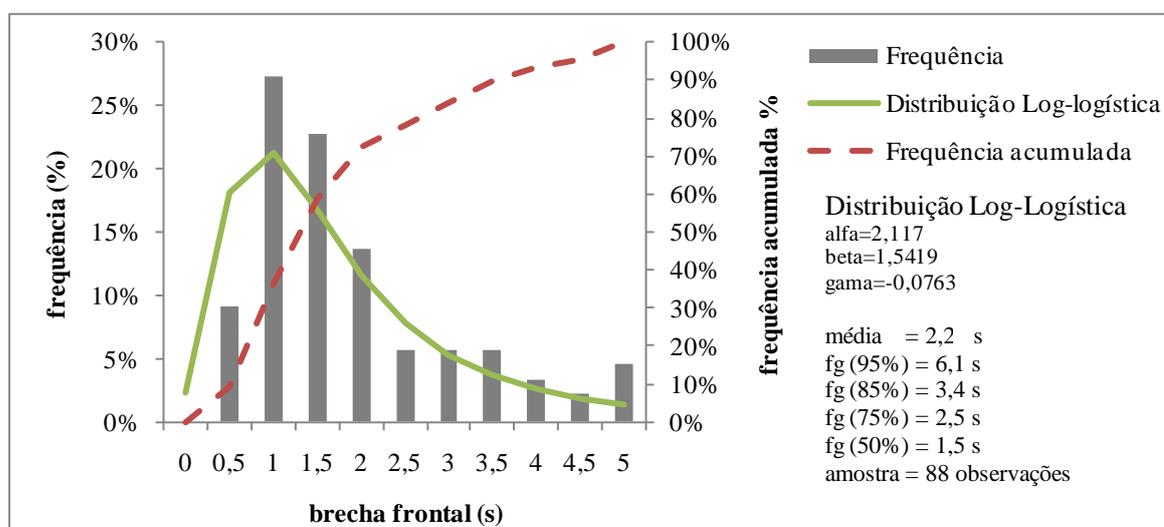
A quarta etapa corresponde à verificação dos resultados e eliminação das inconsistências. Nesta etapa foram verificados e corrigidos os casos em que as velocidades e rotas estavam fora do intervalo esperado. As brechas superiores a 5 segundos foram verificadas e eliminadas, assumindo que a influência do veículo na travessia destes casos não é significativa na análise das brechas mínimas aceitas pelos pedestres. Em alguns destes casos, observou-se que o veículo já não estava no campo de visão do pedestre.

#### 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais resultados da coleta de dados são os valores das brechas frontais e traseiras, apresentados neste capítulo. Foram rastreados 147 pedestres e 508 veículos no total, sendo 17 motocicletas. Os valores de brechas frontais e traseiras são representados por histogramas e distribuições de probabilidade que se ajustam aos dados.

Todos os pedestres tiveram brechas frontais e traseiras medidas, no entanto, foram desconsiderados: (i) 40 casos em que os veículos pararam e deram preferência e (ii) os casos em que as brechas frontais ou traseiras foram superiores a 5 segundos. A amostra apresentada nos resultados, por consequência, é inferior ao número de pedestres rastreados.

Analisando as brechas frontais na distribuição de frequências da Figura 5, identifica-se uma maior concentração de observações entre 0,5 e 2,5 segundos. Usando o software EasyFit (Mathwave, 2010) para ajustar os dados à distribuições de probabilidades, foi verificado que a Log-logística se ajusta razoavelmente bem aos valores observados. Os valores da média e das probabilidades acumuladas em 50, 75, 85 e 95%, são apresentados na Figura 5. A média das brechas frontais é 2,21 segundos e em 75% dos casos observados o valor foi inferior a 2,5 segundos.

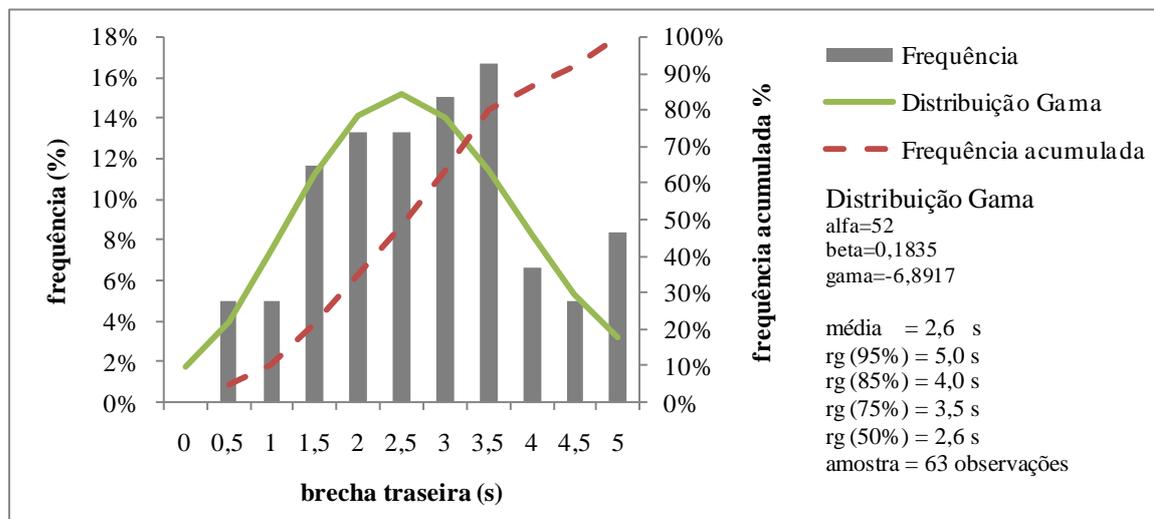


**Figura 5:** Distribuição de frequências de brechas frontais e ajuste com a distribuição Log-logística

A Figura 6 apresenta a distribuição da frequência das brechas traseiras, além da distribuição acumulada e da distribuição de probabilidades Gama, que apresentou um ajuste razoável aos valores observados. A dispersão significativamente maior nos valores de brechas traseiras é decorrente da distribuição da chegada dos veículos e, principalmente, da percepção do pedestre sobre o tempo necessário para atravessar com segurança. A média observada é 2,6 segundos, sendo que em 75% dos casos é inferior a 3,5 segundos.

Os valores médios encontrados são significativamente superiores aos 0,5 segundos recomendados pelo VISSIM (PTV, 2009). Deve-se considerar, entretanto, que neste estudo a área de conflitos virtual tem as dimensões equivalentes às larguras do pedestre e do veículo. Ao comparar estes valores com os de uma área de conflitos maior, deve ser subtraído o tempo de deslocamento de pedestres e veículos entre os limites destas áreas. Caso o comprimento da travessia passasse de 1,8 para 3,8 metros (faixa dos veículos), e a largura de 0,5 para 2,5 metros (faixa de pedestres), as brechas seriam reduzidas para representar as novas dimensões. Neste caso, seriam subtraídos os tempos de caminhada do pedestre entre os limites das áreas, igual à distância em cada lado da área de conflito dividida pela sua velocidade, e o tempo do veículo, igual à distância dividida pela sua velocidade. Considerando as velocidades de 1 m/s para pedestres e 10 m/s para veículos, as brechas seriam reduzidas em 1,1 segundos neste

exemplo e os valores de brechas médias obtidos ainda seriam superiores aos valores *default* sugeridos pelo manual do modelo VISSIM.



**Figura 6:** Distribuição de frequências de brechas traseiras e ajuste com a distribuição Gama

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou a metodologia de coleta de dados utilizada na extração de dados para a calibração do modelo de aceitação de brechas do VISSIM e análise dos resultados. Algumas técnicas propostas, como a transformação das imagens antes da extração dos dados e a análise espacial do conflito entre as rotas não constam na literatura, mas apresentam vantagens em relação aos métodos manuais frequentemente utilizados.

Os parâmetros brecha frontal e traseira são medidos em relação à área de travessia, e não entre os veículos como no caso do modelo de aceitação de brechas tradicional. Neste caso, a metodologia proposta possui flexibilidade para analisar as brechas no local do conflito, mesmo fora da área sinalizada, viabilizando a coleta destas variáveis compatíveis com as observadas frequentemente em cidades brasileiras.

No processamento de dados deste artigo, outras informações poderiam ter sido obtidas a partir das rotas, como as distribuições de chegadas de veículos e pedestres, velocidades e atrasos. Entre outras variáveis, o número de pedestres na área de espera quando o veículo se aproxima, poderia ser utilizado nos modelos em que o veículo não é obrigado a dar preferência em travessias sinalizadas. Considerando as inovações da metodologia proposta, a utilização apenas de ferramentas acessíveis (filmadora, softwares de domínio público e comerciais) e a flexibilidade para ser utilizada em diferentes situações, constata-se que existe potencial para o seu uso em coletas de dados de diversas configurações de travessias e interseções.

### Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio concedido pelo CNPq e CAPES através de bolsas de produtividade de pesquisa e mestrado e apoio financeiro ao projeto.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blue, V., e J. Adler (1999) Cellular automata microsimulation of bidirectional pedestrian flows, *Research Board 78<sup>th</sup> Annual Meeting*, Washington D.C., CD-ROM.
- Chae, K. (2005) *Simulation of pedestrian-vehicle interactions at roundabouts*. Tese (Doutorado), North Carolina State University, Raleigh, NC, Estados Unidos.
- Chu, X., M. Guttenplan e M. Baltes (2004) Why people cross where they do: the role of the street environment. *Transportation Research Record*, v. 1878, p. 3-10.

- Das, S., C.F. Maskie e M.D. Manuszak (2005) Walk or wait? An empirical analysis of street crossing decisions. *Journal of Applied Econometrics*, v. 20, p. 529–548.
- Fitzpatrick, K., S.M. Turner, M.A. Brewer, P.J. Carlson, N. Lalani, B.R. Ullman, N.D. Trout, E. Park, D. Lord, J.A. Whitacre (2006) *Improving Pedestrian Safety at Unsignalized Crossings*. NCHRP Report. 562. Transportation Research Board.
- Ismail, K., T. Sayed, N. Saunier, C. Lim (2009) Automated analysis of pedestrian-vehicle conflicts using video data. *Transportation Research Board 88<sup>nd</sup> Annual Meeting*, Washington D.C., CD-ROM.
- Lee, J.Y.S., W.H.K. Lam (2008) Simulating pedestrian movements at signalized crosswalks in Hong Kong. *Transportation Research Part A*, v. 42, p. 1314–1325.
- Mathwave (2010) *EasyFit Professional Edition*.
- Mathworks (2010) *Matlab v.R2010a*.
- Meijering, E. (2010) MTrackJ: A Java Program for Manual Object Tracking. Disponível em: <<http://www.image-science.org/meijering/software/mtrackj/>>. Acessado em: 24 de outubro de 2010.
- NIH (2010) Image Processing and Analysis in Java. Disponível em: <http://rsbweb.nih.gov/ij/>. Acessado em: 24 de outubro de 2010.
- PTV (2009) VISSIM 5.20 User Manual.
- Schmidt, S., B. Färber (2009) Pedestrians at the kerb – Recognising the action intentions of humans. *Transportation Research Part F*, v. 12, p. 300–310.
- Schroeder, B.J. (2008) *A Behavior-Based Methodology for Evaluating Pedestrian-Vehicle Interaction at Crosswalks*. Tese (Doutorado), North Carolina State University, Raleigh, NC, Estados Unidos.
- Sisiopiku, V.P.,D. Akin (2003) Pedestrian behaviors at and perceptions towards various pedestrian facilities: an examination based on observation and survey data. *Transportation Research Part F*, v. 6, p. 249–274.
- Sun, D., S.V. Ukkusuri, R.F. Benekohal, S.T. Waller (2003) Modeling of motorist-pedestrian interaction at uncontrolled mid-block crosswalks. *Transportation Research Board 82<sup>nd</sup> Annual Meeting*, Washington D.C.
- TRB (2000) *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board. Special Report 209. National Research Council, Washington, DC, EUA, 4<sup>a</sup> ed.
- Yang, J., W. Deng, J. Wang, Q. Li, Z. Wang (2006) Modeling pedestrians' road crossing behavior in traffic system micro-simulation in China. *Transportation Research Part A*, v. 40, p. 280–290.

#### **4. ARTIGO 3**

MICROSSIMULAÇÃO DA TRAVESSIA DE PEDESTRES:  
SIMULAÇÃO DE TRAVESSIAS SEMAFORIZADAS

## MICROSSIMULAÇÃO DA TRAVESSIA DE PEDESTRES: SIMULAÇÃO DE TRAVESSIAS SEMAFORIZADAS

**André Cademartori Jacobsen**

**Helena Beatriz Bettella Cybis**

Laboratório de Sistemas de Transportes - LASTRAN

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – PPGEP

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

### RESUMO

Os simuladores de tráfego recentemente incorporaram modelos de pedestres. Na simulação de travessias, onde ocorrem atrasos e riscos de acidentes importantes, são utilizados diversos modelos para representar as interações entre pedestres e motoristas. Este artigo apresenta uma caracterização do comportamento de pedestres e a calibração dos modelos do VISSIM para representar uma travessia semaforizada, onde a maioria dos pedestres apresenta comportamento oportunista, pois desrespeita o semáforo e aceita brechas no fluxo de veículos. A calibração dos modelos de movimentação dos pedestres, aceitação de brechas em áreas de conflitos e da decisão sobre desrespeitar os semáforos permitiram a representação dos atrasos observados na travessia, entretanto, revelaram limitações dos modelos. Os pedestres oportunistas são representados por um percentual dos pedestres predefinido, fixo nas simulações. Este percentual, obtido através da calibração, representa o comportamento nas condições específicas da travessia, e pode não ser válido em cenários em que as características da travessia sejam alteradas.

### ABSTRACT

Traffic simulators recently incorporated pedestrians' models. The simulation of pedestrian crossings, where important delays and risks of accidents occur, there are several models utilized to represent the interactions between pedestrians and motorists. This article presents a characterization of pedestrians' behavior and a calibration of VISSIM's models to represent a signalized crossing on which most pedestrians have an opportunistic behavior, because they disrespect the signalization and accept gaps on the vehicle flow. The calibration of the pedestrian movement model, gap acceptance model based on conflict areas and the decision about disrespecting the signalization allowed the representation of pedestrians' delays, however, revealed models' limitations. Opportunist pedestrians are represented by predefined percentual of the pedestrians, fixed on the simulations. This value, obtained by the calibration process, represents the behavior on specific conditions, and may not be valid for scenarios on which the crossing characteristics are changed.

## 1. INTRODUÇÃO

Os simuladores de tráfego, que durante anos representaram apenas os veículos, recentemente incorporaram modelos de pedestres. Esta mudança reflete o crescimento da demanda por modelos que permitem a análise dos diferentes modos de transporte com o mesmo nível de detalhamento. Modelos multimodais permitem avaliar, por exemplo, soluções que minimizam os atrasos de todos os usuários, enquanto historicamente eram avaliados apenas os atrasos dos veículos.

Os modelos de movimentação de pedestres incorporados nos simuladores tradicionais representam os deslocamentos, considerando as interações destes, com outros pedestres, e com o ambiente. Dentre os simuladores, destacam-se: (i) VISSIM (PTV, 2009), que incorporou o Modelo de Forças Sociais, (ii) Aimsun (TSS, 2010), que incorporou o modelo da empresa Legion, e (iii) Paramics (Paramics, 2011), que incorporou o modelo da empresa Crowd Dynamics. Estes modelos, desenvolvidos e calibrados para simular terminais de transportes, eventos que reúnem multidões e evacuações emergenciais, no entanto, não representam a interação com o tráfego de veículos.

Nas simulações de pedestres, a representação do comportamento em travessias tem uma importância especial, por serem os locais onde pedestres e veículos sofrem atrasos e porque a interação entre eles pode representar riscos de acidentes. O comportamento nas travessias depende das regras de prioridade estabelecidas, podendo ser classificadas como: (i) não sinalizadas, nas quais os veículos tem preferência e pedestres aceitam brechas no fluxo, (ii)

sinalizadas, em que os veículos devem dar preferência aos pedestres (*e.g.* faixas de segurança), e (iii) semaforizadas, onde ambos os modos teoricamente obedecem às orientações dos semáforos e não apresentam interação direta.

Apesar dos simuladores de tráfego possuírem modelos de movimentação de pedestres avançados, os atrasos dependem das decisões de pedestres e motoristas nas travessias. Na prática existem muitas dificuldades para modelar alguns comportamentos frequentes, como (i) pedestres atravessando durante o sinal vermelho em travessias semaforizadas e (ii) veículos que não respeitam a preferência a pedestres em faixas de segurança. Outros comportamentos, como a aceitação de brechas, são representados simplificadaamente por modelos desenvolvidos originalmente para simular interseções não semaforizadas de veículos. Os artigos científicos sobre travessias de pedestres revisados não avaliaram a influência destas simplificações sobre os atrasos obtidos nas simulações.

Este artigo apresenta os seguintes objetivos:

- i. analisar o comportamento de pedestres em uma travessia semaforizada, com várias faixas de tráfego, na qual a maioria dos pedestres não obedece a sinalização;
- ii. apresentar os modelos utilizados pelo VISSIM na simulação de travessias;
- iii. calibrar os modelos do VISSIM para reproduzir o comportamento observado na travessia, incluindo as velocidades, aceitação de brecha e as decisões sobre desrespeitar o semáforo;
- iv. comparar os atrasos de pedestres nas simulações com os obtidos na coleta de dados;
- v. avaliar as principais limitações do modelo.

A travessia analisada neste artigo foi escolhida por apresentar (i) pedestres que não obedecem a sinalização e (ii) aceitação de brechas de pedestres em 3 faixas de tráfego. A simulação destes comportamentos representa um desafio para os modelos atuais. Para avaliar as principais dificuldades em representar os atrasos desta travessia, os modelos do VISSIM 5.20 (PTV, 2009) foram calibrados com os dados coletados. Este simulador de tráfego foi escolhido por apresentar um modelo de aceitação de brechas baseado em áreas de conflito, que permite avaliar as brechas em cada faixa de tráfego independentemente.

Nas seções seguintes serão apresentados (i) os modelos utilizados pelo VISSIM para representar a movimentação de pedestres e a aceitação de brechas, (ii) uma análise do comportamento dos pedestres na travessia em estudo, incluindo as decisões sobre desrespeitar os semáforos, as velocidades, trajetórias e brechas aceitas, (iii) o processo de calibração dos modelos e os atrasos simulados e (v) as considerações finais.

## 2. MODELAGEM DA TRAVESSIA NO VISSIM

Na modelagem de travessias de pedestres no VISSIM, os principais comportamentos representados correspondem à (i) movimentação de pedestres, com o Modelo de Forças Sociais, (ii) a interação entre pedestres e veículos, com o modelo de aceitação de brechas em áreas de conflitos, e (iii) a decisão sobre desrespeitar os semáforos. Este capítulo apresenta os modelos e os principais parâmetros utilizados para representar as travessias de pedestres no VISSIM.

### 2.1. Movimentação dos pedestres

A movimentação de pedestres no VISSIM é baseada no Modelo de Forças Sociais (Helbing e Molnár, 1995). Neste modelo, as intenções de movimento dos pedestres são representadas por “forças sociais”. As principais forças deste modelo são (i) a força para manter a velocidade desejada em direção ao destino, (ii) a força para manter a distância desejada dos outros

pedestres e obstáculos e (iii) forças de atração exercidas por outros pedestres. PTV (2009) descreve os parâmetros do modelo original e os incorporados no VISSIM.

A distribuição de velocidades desejadas pode ser considerada o principal parâmetro para representar a movimentação. A velocidade desejada representa a velocidade que cada pedestre deseja manter ao longo do deslocamento, que é atribuída a partir de uma distribuição configurada no VISSIM. Existe uma dificuldade em definir esta distribuição, pois as velocidades observadas em uma travessia são as efetivas, resultantes da interação com outros pedestres, e não as que os pedestres desejariam desenvolver.

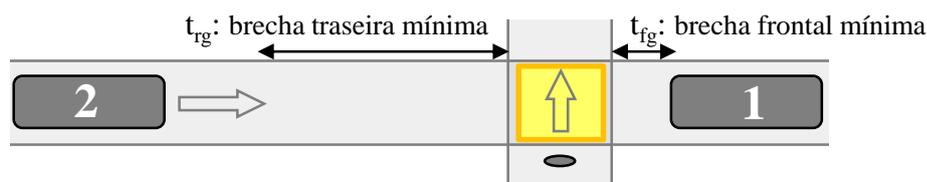
A força social que tem objetivo de manter a velocidade desejada do pedestre em direção ao destino é influenciada pelo parâmetro tau ( $\tau$ ). Este parâmetro, chamado de tempo de relaxamento, é análogo ao tempo de reação do pedestre (PTV, 2009). A força que o pedestre exerce para manter a velocidade desejada é proporcional à diferença entre a velocidade desejada e a velocidade instantânea do pedestre, dividida por tau ( $\tau$ ). O valor padrão de tau no modelo é 0,4. A redução deste parâmetro resulta em acelerações maiores.

As forças sociais que tem o objetivo de manter a distância desejada entre pedestres e objetos são influenciadas por diversos parâmetros no modelo, associadas à intensidade e abrangência destas forças. Uma análise de sensibilidade das velocidades em relação a estes parâmetros indicou que eles possuem uma influência menor sobre as velocidades resultantes do que o parâmetro tau ( $\tau$ ) apresentado. Neste estudo, considerou-se que os valores *default* destes parâmetros no VISSIM representam a movimentação dos pedestres adequadamente, e foram mantidos constantes.

## 2.2. Aceitação de brechas de pedestres

Os modelos de aceitação de brechas são utilizados para representar a escolha do momento de travessia. Nos modelos determinísticos tradicionais, as brechas são o intervalo de tempo entre as chegadas de veículos em um determinado ponto da via, e são aceitas sempre que forem maiores que um tempo mínimo configurado para todos os pedestres (Troutbeck e Brilon, 1992). No modelo de aceitação de brechas utilizado pelos pedestres no VISSIM, as brechas são medidas em relação a áreas de conflito, detalhadas a seguir, e a aceitação depende das velocidades de desejo de cada pedestre (PTV, 2009).

As áreas de conflito são definidas nas interseções das faixas de tráfego com a travessia de pedestres, conforme a ilustração na Figura 1. Os parâmetros utilizados pelo modelo são a brecha frontal mínima ( $t_{fg}$ ), que é o tempo mínimo entre a saída do veículo anterior da área de conflito e a entrada do pedestre, e a brecha traseira mínima ( $t_{rg}$ ), que é o tempo mínimo entre a saída do pedestre área de conflito e a entrada do veículo seguinte. O pedestre atravessa quando a velocidade de travessia necessária para satisfazer a brecha frontal e brecha traseira mínimas, é menor que a velocidade desejada do pedestre. O valor da brecha traseira mínima configurada no VISSIM é desconsiderada nos caso em que os veículos possuem preferência.



**Figura 1:** Parâmetros da aceitação de brechas em áreas de conflito

O modelo de aceitação de brechas com áreas de conflito é especialmente interessante para os casos com múltiplas faixas. Os pedestres iniciam a travessia quando avaliam que, caminhando na velocidade desejada, conseguirão atravessar todas as faixas em uma etapa, satisfazendo as brechas frontais e traseiras mínimas em cada faixa. Os pedestres reavaliam as condições para a aceitação de brechas durante a travessia. Caso a velocidade necessária para concluir a travessia das faixas seguintes não seja satisfeita, os pedestres aguardam uma nova brecha entre as faixas de tráfego.

### **2.3. Decisão dos pedestres sobre desrespeitar os semáforos**

Em travessias semaforizadas, observam-se pedestres que desrespeitam os semáforos e atravessam em brechas no fluxo de veículos. Estes pedestres, classificados como oportunistas por Liu *et al.* (2000), são representados nas simulações por um percentual predefinido dos pedestres. Outros autores, como Schmocker *et al.* (2008), também consideraram que um percentual fixo dos pedestres desrespeita os semáforos.

Na simulação de travessias semaforizadas no VISSIM, os pedestres que respeitam os semáforos, classificados como obedientes, aguardam o tempo de verde para atravessar. Os oportunistas, no entanto, desconsideram os semáforos e iniciam o processo de aceitação de brechas quando chegam a uma travessia. Nas situações em que os oportunistas chegam à travessia durante o tempo de verde para pedestres, ou não encontram uma brecha aceitável, não é possível distingui-los dos obedientes, pois ambos atravessam no mesmo momento. Neste artigo, os pedestres dispostos a desrespeitar os semáforos são chamados de potencialmente oportunistas, para distingui-los dos que efetivamente atravessam durante o tempo de vermelho, chamados de oportunistas.

No VISSIM, o comportamento obediente ou oportunista é uma prerrogativa do semáforo e não é um atributo associado diretamente a cada pedestre. A representação de oportunistas é obtida codificando-se: (i) duas classes de pedestres, obedientes e potencialmente oportunistas, e (ii) semáforos que sejam obedecidos apenas pela classe obediente.

Neste artigo, a proporção entre o fluxo de obedientes e potencialmente oportunistas é considerado um parâmetro do modelo do VISSIM, chamado de percentual potencialmente oportunista. Apesar deste parâmetro ser predefinido e fixo no modelo do VISSIM, estudos indicam que a decisão sobre desrespeitar os semáforos depende de variáveis relacionadas aos pedestres, à travessia e ao fluxo de veículos (Zhuping *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2006). O valor do parâmetro, conseqüentemente, é válido para condições específicas da travessia, e alterações nos fluxos de pedestres, veículos ou nas características da travessia exigem uma reavaliação do valor do parâmetro.

O principal objetivo em representar os pedestres que desrespeitam os semáforos é permitir a representação dos momentos em que os pedestres iniciam as travessias, que influenciam fortemente os atrasos médios nas simulações. Para representar este comportamento, no entanto, além de o percentual de pedestres potencialmente oportunistas, é necessário que as brechas disponíveis e o processo de aceitação de brechas sejam adequadamente representado.

### **3. COMPORTAMENTO DOS PEDESTRES NA TRAVESSIA**

A travessia analisada localiza-se na Avenida Osvaldo Aranha, próxima ao Hospital de Pronto Socorro de Porto Alegre. A Figura 2 apresenta imagens da travessia obtidas (i) no local da filmagem e (ii) em imagem de satélite. A travessia analisada está destacada nas imagens por um retângulo tracejado. As imagens da travessia foram obtidas, a partir do telhado de uma igreja adjacente à travessia, no intervalo entre 12h00 e 13h00 de uma quinta-feira de outubro

de 2011. O fluxo de pedestres na travessia nesta faixa horária é intenso, pois existem escolas e restaurantes no entorno.

No local da travessia existem 3 faixas de tráfego. A travessia possui 8,5 metros de comprimento e 4,0 metros de largura. No lado do corredor de ônibus existem barreiras metálicas que impedem que pedestres atravessem fora da área sinalizada. O controlador semafórico possui tempo de ciclo de 100 segundos. A fase dos veículos é composta pelos sinais verde (76s), amarelo (3s) e vermelho estendido (2s), e a dos pedestres pelo verde (14s), vermelho piscante (3s) e vermelho estendido (2s).



**Figura 2:** Imagens da travessia obtidas da filmagem (a) e de satélite (b)

Os pedestres foram classificados, de acordo com o momento em que iniciam a travessia, como: (i) obedientes, que obedecem ao semáforo e aguardam o tempo de verde para realizar a travessia, (ii) oportunistas moderados, que iniciam a travessia após a passagem do último veículo no tempo de vermelho, e (iii) oportunistas agressivos, que atravessam em brechas no fluxo de veículos durante o tempo de vermelho. A classificação em obedientes e oportunistas foi apresentada por Liu *et al.* (2000). Neste artigo foram identificados pedestres oportunistas moderados, que atravessam em brechas longas (> 20 segundos), causadas pela progressão semafórica da avenida, quando não são observados veículos se aproximando.

No processo de coleta de dados foram identificados 1802 veículos e 1142 pedestres, sendo 45% pedestres obedientes, 25% oportunistas moderados e 30% oportunistas agressivos. Este capítulo apresenta o processo de coleta de dados e uma análise do comportamento dos pedestres na travessia, incluindo a decisão sobre desrespeitar o semáforo, as velocidades, as trajetórias e a aceitação de brechas observadas.

### 3.1. Processo de coleta de dados

A metodologia de coleta de dados utilizada é apresentada em Jacobsen e Cybis (2010). As filmagens da travessia foram convertidas em sequências de imagens com intervalos de 0,23 segundos, e os pedestres foram rastreados na sequência de imagens utilizando o aplicativo MtrackJ (Meijering, 2010) para o software ImageJ (NIH, 2009), ambos gratuitos.

O rastreamento dos pedestres consistiu na identificação do tempo e da posição em 3 eventos: (i) chegada à área de espera, (ii) início da travessia e (iii) conclusão da travessia. A coleta de dados de veículos foi simplificada, identificando a posição e o instante de tempo em que passavam pela faixa de retenção, e a brecha traseira dos pedestres oportunistas foram medidas

diretamente nas imagens. Com estes procedimentos, foi possível obter as informações necessárias para a calibração dos modelos do VISSIM e análise do comportamento dos pedestres.

Após o rastreamento, os dados foram processados para obter: (i) tempo de espera, tempo de travessia e distância percorrida, (ii) trajetória do pedestre, (iii) fase do semáforo no momento da travessia e (iv) distribuição da chegada de veículos na travessia por faixa de tráfego. Na análise das trajetórias dos pedestres, foi utilizado o software Matlab (Mathworks, 2010) para aplicar uma transformação perspectiva nas coordenadas de pedestres identificadas em imagens. As coordenadas reais, obtidas na transformação, possibilitaram o cálculo das distâncias percorridas e das velocidades médias dos pedestres.

## **3.2. Análise dos dados coletados**

### ***3.2.1. Decisão sobre desrespeitar os semáforos***

Em travessias semaforizadas, os pedestres idealmente respeitariam os semáforos e iniciariam a travessia durante o tempo de verde. Observou-se que, embora em número reduzido, existem pedestres com comportamento evidentemente obediente que: (i) chegam à travessia e praticamente ignoram o tráfego de veículos, interagindo apenas com o semáforo e (ii) permanecem aguardando mesmo quando existe uma brecha longa, que é aceita pelo restante dos pedestres. A maioria dos pedestres, no entanto, ignora o semáforo e atravessa ao identificar brechas que possibilitem uma travessia segura.

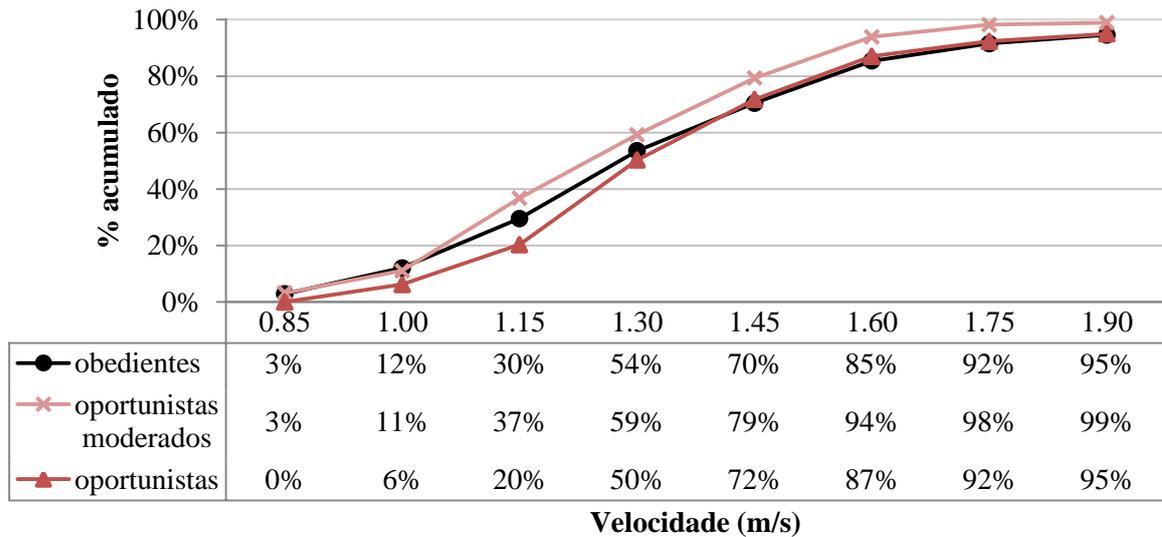
Na coleta de dados, 55% dos pedestres apresentaram comportamento oportunista. Em média, os pedestres oportunistas agressivos possuem atrasos menores do que os oportunistas moderados, que atravessam em brechas próximas do início do tempo de verde. No entanto, ambos os oportunistas possuem atrasos médios menores do que os obedientes.

De forma geral, os pedestres iniciam a travessia durante o tempo de vermelho quando existem brechas longas no fluxo de veículos. A observação do comportamento dos pedestres nos vídeos permitiu avaliar, empiricamente, que quanto maiores as brechas disponíveis, maior a probabilidade dos pedestres desrespeitarem o semáforo. Em situações com brechas superiores a 40 segundos, observou-se que praticamente todos os pedestres realizaram travessias de forma oportunistas. É importante observar, no entanto, que na codificação do modelo do VISSIM, o percentual de pedestres potencialmente oportunistas é fixo, e não depende do tamanho das brechas disponíveis.

### ***3.2.2. Velocidade dos pedestres***

Os pedestres apresentam variabilidade no seu comportamento. A variabilidade na velocidade desejada é uma das mais evidentes. A velocidade do pedestre depende das condições físicas e outros fatores, como carregar algum volume (*e.g.* bagagem), caminhar em um grupo ou estar com pressa. Os idosos e crianças, por exemplo, frequentemente apresentam velocidades desejadas inferiores à média dos pedestres.

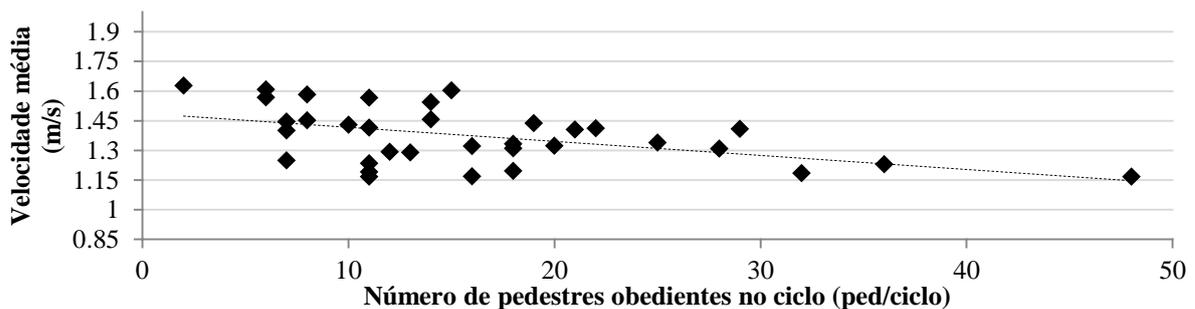
No processo de coleta de dados foram obtidas as velocidades efetivas dos pedestres. Estas velocidades são, geralmente, inferiores às velocidades desejadas, pois os pedestres reduzem suas velocidades ao interagir com outros pedestres, veículos e obstáculos. A velocidade média observada na travessia foi de 1,35 metros por segundo (m/s). Na análise do comportamento em travessias sinalizadas na China, Zhuping *et al.* (2011), a velocidade média dos 6628 pedestres observados foi 1,37 m/s, semelhante à observada neste estudo. As distribuições acumuladas das velocidades medidas são apresentadas na Figura 3.



**Figura 3:** Distribuição acumulada da velocidade de pedestres

Observa-se através da Figura 3 que, pedestres obedientes e oportunistas moderados apresentam maior frequência de velocidades mais baixas, inferiores a 1,15 m/s. Estas velocidades são principalmente observadas em situações nas quais não existem veículos se aproximando da travessia. As velocidades mais elevadas, superiores a 1,60 m/s, são observadas com maior frequência entre oportunistas e obedientes. As velocidades elevadas de oportunistas são observadas em situações em que os pedestres correm para aceitar brechas curtas e, as de obedientes, nas situações em que os pedestres atravessam durante o sinal vermelho piscante, imediatamente antes da aceleração dos veículos.

A influência da variação do fluxo de pedestres sobre a velocidade média de travessia foi analisada considerando-se apenas os pedestres obedientes, que não tem sua velocidade influenciada pelo tráfego de veículos. A Figura 4 apresenta um gráfico relacionando a velocidade média e o número de pedestres obedientes no ciclo semafórico.



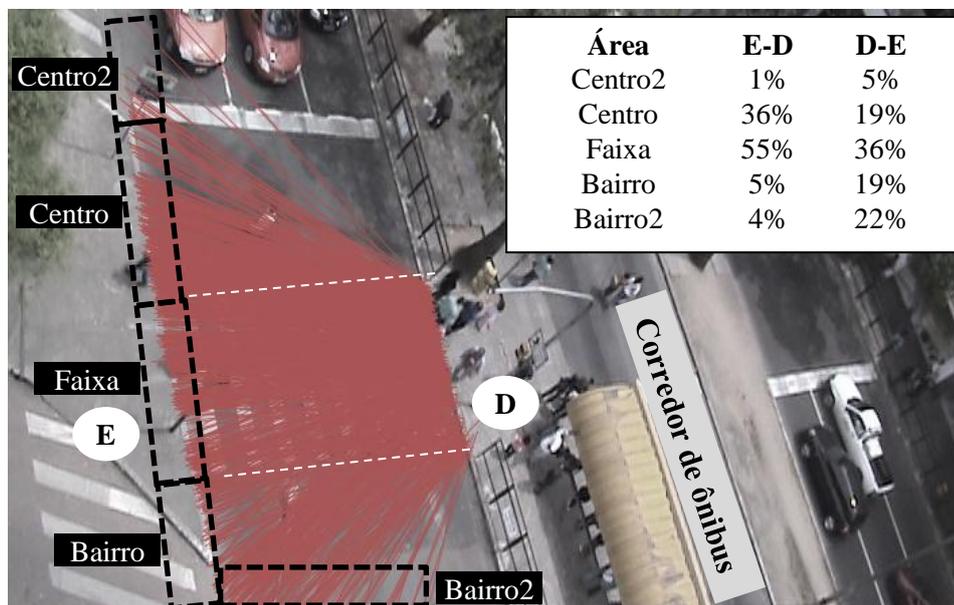
**Figura 4:** Velocidade média por fluxo de pedestres no tempo de verde<sup>[a5]</sup>.

A Figura 4 comprova que existe uma redução da velocidade média com o aumento no número de pedestres. A velocidade média, indicada pela linha de tendência, varia entre 1,15 m/s e 1,45m/s nos ciclos semafóricos observados. A proporção de pedestres atravessando em cada sentido na travessia foi aproximadamente igual.

### 3.2.3. Trajetória de travessia

As trajetórias de travessia dos pedestres são ilustradas por linhas vermelhas<sup>[a6]</sup> na Figura 5. No lado direito (D) da travessia, contíguo ao corredor de ônibus, existem barreiras metálicas junto ao meio fio, que impedem a travessia de pedestres fora da área de sinalizada. No outro lado

(E) não existem barreiras. Apesar de que área de travessia sinalizada, indicada por linhas brancas tracejadas, possui 4 metros de largura, observa-se que a maioria dos pedestres atravessa em uma área com largura equivalente a aproximadamente 8 metros. A Figura 5 apresenta o percentual dos pedestres que inicia ou termina a travessia em cada uma das áreas por sentido.



**Figura 5:** Trajetórias dos pedestres na [travessia](#)<sup>[a7]</sup>

No sentido da esquerda para a direita (E-D) o percentual de pedestres que atravessa sobre a faixa (55%) é expressivamente superior ao do sentido oposto (36%). Neste sentido, os pedestres que chegam durante o tempo de vermelho se aproximam da travessia enquanto aguardam o sinal verde ou uma brecha. O início das travessias está concentrado nas áreas da faixa e na área adjacente, em direção ao Centro. As travessias que iniciam nas outras áreas geralmente correspondem a pedestres que chegam no final do tempo de verde e procuram minimizar a distância e o tempo.

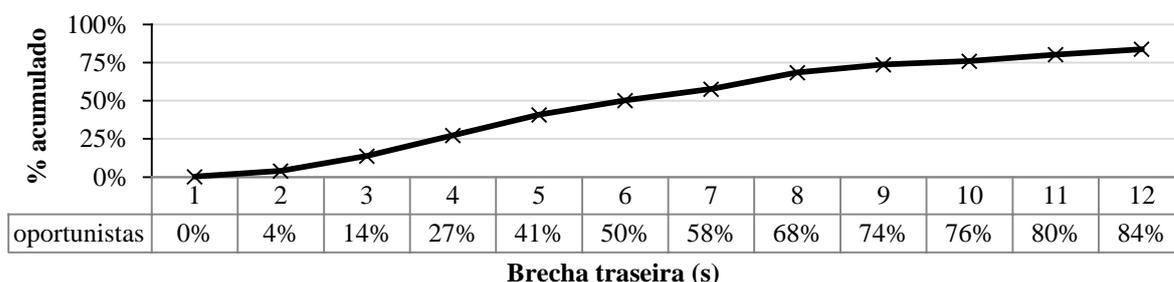
No sentido oposto, da direita para a esquerda (D-E), os pedestres obrigatoriamente se posicionam próximos à área sinalizada porque existem barreiras físicas. Neste sentido, a maioria dos pedestres (64%) termina a travessia fora da área sinalizada. A travessia sobre a faixa sinalizada, apesar de ser mais curta, não necessariamente minimiza a distância até o destino do pedestre. Os pedestres, especialmente os obedientes e oportunistas moderados que atravessam a partir do lado direito, atravessam diretamente em direção ao destino do deslocamento.

A partir da análise detalhada do comportamento dos pedestres, é possível notar que, mesmo em um ambiente tão restrito, existem diferenças nas trajetórias adotadas pelos pedestres. Entre os fatores que influenciam a trajetória de travessia do pedestre é possível destacar (i) a existência de barreiras físicas, (ii) a origem e destino do deslocamento, (iii) o momento em que o pedestre chega à travessia e (iv) às condições de tráfego no momento da travessia. A falha em considerar esta variabilidade nas trajetórias utilizadas por pedestres, pode levar à erros significativos na simulação e na apropriação dos tempos de travessia.

### 3.2.4. Aceitação de brechas

A aceitação de brechas é um processo observado na travessia devido à existência de pedestres oportunistas, que não aguardam o sinal verde para atravessar. Na travessia analisada, muitos pedestres não aguardam uma brecha simultânea nas três faixas de tráfego para iniciar a travessia. Os pedestres aceitam brechas defasadas em cada faixa de tráfego, identificadas também em travessias com fluxo elevado de veículos observadas por Brewer *et al.* (2006). Os pedestres iniciam a travessia da primeira faixa de tráfego, considerando que haverá uma brecha disponível quando chegarem à faixa seguinte. Em alguns casos os pedestres iniciam a travessia e chegam a uma das faixas de tráfego antes do início da brecha que desejavam aceitar, sendo obrigados a aguardar a passagem do veículo seguinte entre as faixas de tráfego. Este comportamento foi observado frequentemente em situações em que havia apenas uma motocicleta se aproximando.

Neste artigo as brechas traseiras medidas correspondem ao valor mínimo observado nas três faixas de tráfego. Estas brechas são a diferença de tempo, em segundos, entre a saída do pedestre e a chegada do veículo seguinte no local onde colidiriam. O parâmetro brecha traseira adotado no VISSIM, no entanto, é medido entre a saída do pedestre e a chegada do veículo aos limites da área de conflito. A medição das brechas em relação ao local onde colidiriam permitiu avaliar as brechas de pedestres que atravessaram fora da área sinalizada da travessia e, conseqüentemente, fora das áreas de conflito do VISSIM. A distribuição acumulada das brechas traseiras mínimas dos 340 pedestres oportunistas é apresentada na Figura 6.



**Figura 6:** Distribuição acumulada das brechas traseiras aceitas

A distribuição apresentada indica que a maioria dos pedestres atravessou em brechas maiores que 5 segundos, que empiricamente podem ser consideradas longas. O valor do parâmetro brecha traseira mínima não pode ser inferido a partir da distribuição apresentada, que é fortemente influenciada pelas brechas disponíveis na travessia. Conseqüentemente, para obter o valor da brecha traseira mínima a partir do levantamento de campo é necessário um processo de calibração do modelo.

## 4. CALIBRAÇÃO [a8] DOS MODELOS DO VISSIM

Para obter resultados realistas na simulação da travessia de pedestres, é necessário que os dados de entrada sejam os mais precisos possíveis. Os parâmetros definidos como padrão nos modelos nem sempre são adequados para representar o comportamento que se deseja simular, tornando necessária a calibração dos modelos. A calibração foi realizada de forma hierárquica, em três etapas: (i) parâmetros da movimentação dos pedestres, (ii) parâmetros da aceitação de brechas e (iii) percentual de pedestres potencialmente oportunistas. A calibração foi realizada nesta sequência porque o momento da travessia dos pedestres depende do comportamento na aceitação de brechas, que é influenciado pelas velocidades dos pedestres.

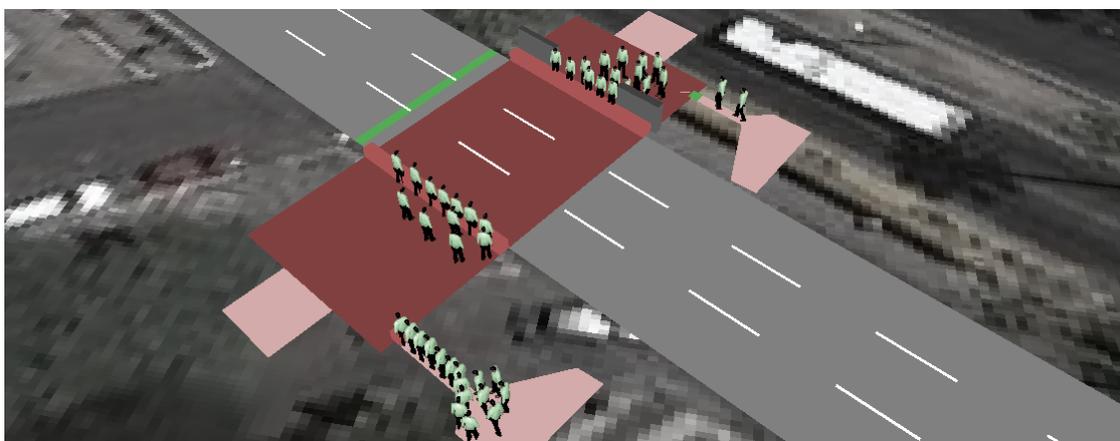
A etapa de calibração dos parâmetros da movimentação tem o objetivo de ajustar o modelo para reproduzir as velocidades e os tempos médios de travessia observados nos diferentes níveis de fluxo de pedestres observados. Os parâmetros calibrados são: (i) distribuição de velocidades desejadas dos pedestres, (ii) largura da área de travessia e (iii) parâmetros específicos do modelo de Forças Sociais, mais especificamente, tau ( $\tau$ ).

A calibração da aceitação de brechas de pedestres teve o objetivo de ajustar o valor da brecha traseira mínima para reproduzir o comportamento dos pedestres na travessia. A definição do valor do parâmetro foi realizada através da comparação da distribuição de brechas aceitas nas simulações com a distribuição observada na coleta de dados.

A calibração da movimentação e aceitação de brechas dos pedestres não é suficiente para representar os atrasos de pedestres em travessias semaforizadas onde existem pedestres oportunistas, pois o momento do início da travessia pode ser o principal fator que influencia os atrasos. A terceira etapa corresponde à calibração do percentual de pedestres potencialmente oportunistas para representar o momento do início da travessia pelos pedestres.

#### 4.1. Calibração dos parâmetros da movimentação dos pedestres

A calibração das velocidades dos pedestres na travessia foi realizada através de um experimento em que foram controlados 4 parâmetros: (i) o número de pedestres que atravessam por ciclo semafórico, (ii) a distribuição de velocidades desejadas dos pedestres, (iii) a largura da área de travessia e (iv) o valor do parâmetro tau ( $\tau$ ) do modelo de Forças Sociais. Os cenários simulados foram codificados de forma que o número de pedestres atravessando em cada sentido era controlado através de semáforos, conforme a Figura 7.

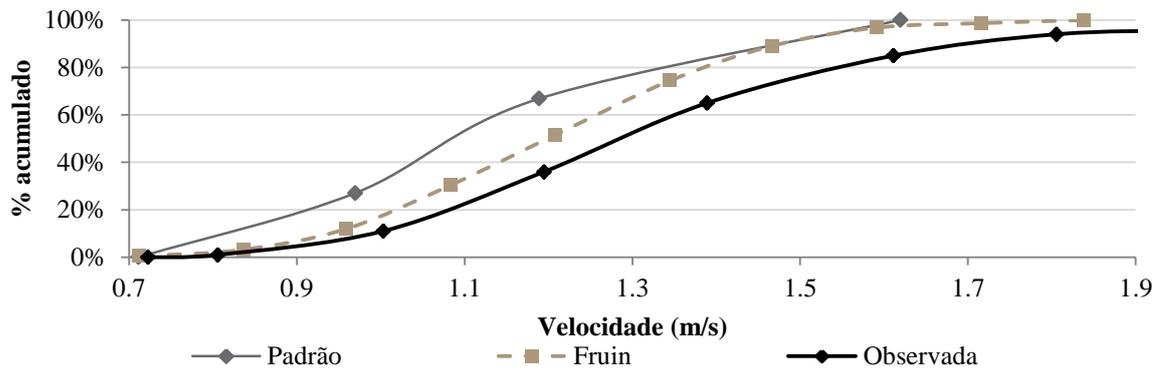


**Figura 7:** Cenário da travessia de pedestres obedientes simulado no VISSIM

A calibração das velocidades na travessia considerou apenas os pedestres obedientes, que atravessaram concentrados durante o tempo de verde do semáforo e não eram influenciados pelos veículos. O número de pedestres obedientes atravessando em cada ciclo semafórico variou entre 5 e 50 no período observado. Na calibração foram adotados 4 níveis de fluxo: 10, 20, 30 e 40 pedestres por ciclo, divididos igualmente entre os dois sentidos de travessia.

A largura da área de travessia foi simulada com 2 níveis: (i) 4 metros, equivalente a largura sinalizada no local, e (ii) 8 metros, equivalente à largura efetivamente utilizada pela maioria dos pedestres. Nos cenários com travessia de 8 metros de largura, a barreira física observada no local foi representada, conforme ilustrado na Figura 7.

No processo de calibração são apresentados os testes realizados com 3 distribuições de velocidades desejadas: (i) a distribuição padrão dos pedestres do VISSIM, (ii) a distribuição de Fruin, ambas predefinidas no software, e (iii) a distribuição de velocidades observadas na coleta de dados. A Figura 8 apresenta as distribuições de velocidades acumuladas testadas no VISSIM. Adicionalmente, foram realizados testes com distribuições construídas artificialmente, que não tiveram resultados satisfatórios. O primeiro teste, que avaliou a hipótese de as velocidades desejadas serem 10% mais altas que as observadas, resultou em velocidades superiores às observadas. Em outro teste, no qual todos os pedestres tinham a velocidade desejada igual a velocidade média observada, a distribuição de velocidades verificada na simulação teve um valor médio adequado, mas o desvio padrão foi expressivamente inferior ao observado.



**Figura 8:** Distribuição acumulada das velocidades simuladas

A calibração das velocidades de travessia utilizando apenas os parâmetros anteriores não representou adequadamente a redução das velocidades com o aumento no fluxo de pedestres. Esta evidência indicou a necessidade de calibrar os parâmetros relacionados à interação entre pedestres do modelo de movimentação. Identificou-se que a redução do valor do parâmetro tau ( $\tau$ ) permitiu que os pedestres acelerassem mais rapidamente para atingir as velocidades desejadas. No processo de calibração, o parâmetro tau ( $\tau$ ) assumiu os valores 0,4 (padrão) e 0,2 (mínimo recomendado).

A qualidade do ajuste dos parâmetros na calibração foi avaliada através da comparação do tempo médio de travessia em cada cenário simulado com o tempo observado para o fluxo correspondente. A Tabela 1 apresenta as diferenças relativas entre o tempo médio de travessia de cada cenário e o esperado para o fluxo correspondente. Nas primeiras colunas são apresentados o fluxo e o tempo de travessia esperado. As linhas do cabeçalho indicam (i) a distribuição de velocidades desejadas adotadas, (ii) a largura da travessia e (iii) o valor do parâmetro tau ( $\tau$ ) de cada cenário simulado.

**Tabela 1:** Diferença relativa entre os tempos médios de travessia simulado e observado

Fluxo (ped/ciclo)		Vel. desejadas Largura Tau ( $\tau$ ) $T_{esp}$		Padrão VISSIM		Fruin				Observada					
				4 m		8 m		4 m		8 m		4 m		8 m	
				0.4	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2
				%	%	%	%	%	%	%	%	%	%		
10	6.5	20%	22%	23%	18%	11%	11%	15%	9%	2%	3%	1%	-1%		
20	6.75	35%	31%	30%	25%	22%	19%	21%	11%	11%	13%	8%	-2%		
30	7	41%	35%	30%	31%	29%	25%	23%	14%	19%	15%	12%	6%		
40	7.25	49%	38%	36%	28%	40%	27%	22%	18%	23%	17%	12%	6%		
Erro médio absoluto		36%	32%	30%	26%	25%	21%	21%	13%	14%	12%	8%	4%		

Observa-se na Tabela 1 que, para o contexto simulado, a adoção da distribuição de velocidades desejada padrão do VISSIM resultou em diferenças médias nos tempos de travessias na ordem de 20% a 49% superiores às observadas. A adoção da distribuição de velocidades desejada de Fruin, opção disponibilizada entre as alternativas implementadas no VISSIM, também superestima o tempo médio de travessia. A utilização de distribuições de velocidades desejadas iguais às medidas na travessia, entretanto, produziu resultados mais próximos a realidade.

A travessia com 4 metros de largura resultou em densidades maiores sobre a área sinalizada e tempos de travessia superiores aos esperados. O modelo apresentou resultados mais adequados com uma faixa de travessias codificada igual a 8 metros. As simulações que adotaram o valor *default* para o parâmetro tau (0,4) levaram a tempos de travessia superiores aos observados, especialmente nos cenários com fluxos maiores. A redução do valor de tau para o valor mínimo sugerido (0,2) resultou em tempos de travessia mais próximos do esperado.

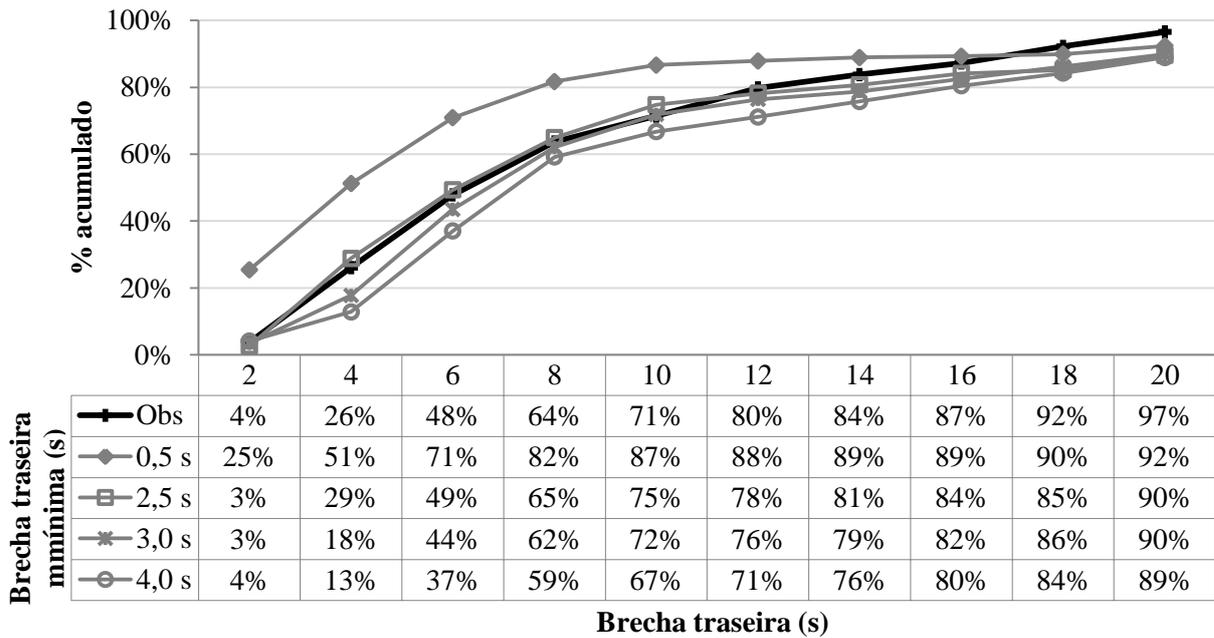
As melhores condições de calibração foram obtidas para (i) a distribuição de velocidades desejadas igual à observada, (ii) área de travessia com 8 metros de largura e, (iii) parâmetro tau reduzido para 0,20.

#### **4.2. Calibração dos parâmetros da aceitação de brechas de pedestres**

A calibração dos parâmetros da aceitação de brechas foi realizada através de um experimento, no qual foi variado o valor da brecha traseira mínima, comparando a distribuição de brechas aceitas em cada simulação com a distribuição observada. O valor adotado para o parâmetro foi o que resultou na distribuição de brechas aceitas mais próxima da observada.

A aceitação de brechas no modelo é influenciada basicamente por três fatores: (i) a brecha traseira mínima, (ii) as velocidades dos pedestres e (iii) as brechas disponíveis no fluxo de veículos. Estes fatores foram controlados no experimento para possibilitar a comparação entre a distribuição das brechas aceitas na simulação com as observadas. O primeiro fator corresponde ao parâmetro calibrado, controlado nas configurações do modelo. As velocidades dos pedestres foram reproduzidas a partir dos parâmetros calibrados de velocidades. As brechas disponíveis para cada pedestre foram reproduzidas através de controle de chegadas dos veículos e pedestres à travessia nos cenários codificados.

No processo de calibração, o parâmetro brecha traseira mínima do modelo de aceitação de brechas foi simulado com os valores 0,5, 2,5, 3,0 e 4,0 segundos. O valor inicial adotado correspondeu a 0,5 segundos, recomendado pelo VISSIM, e utilizado no único artigo encontrado sobre aceitação de brechas de pedestres no software, em que Bönisch e Kretz (2009) analisaram a influência do fluxo de veículos sobre o atraso dos pedestres. A Figura 10 apresenta as distribuições acumuladas de brechas aceitas nas simulações e na coleta de dados.



**Figura 10:** Distribuições acumuladas das brechas aceitas nas simulações

A brecha traseira mínima de 2,5 segundos é recomendada para esta travessia, pois resultou na distribuição de brechas aceitas mais próxima à observada. O valor padrão sugerido pelo VISSIM (0,5) resultou na aceitação de um percentual elevado de brechas traseiras inferiores a 2 segundos. A brecha traseira com 4,0 segundos, no entanto, resultou em um percentual inferior ao observado para a maioria dos valores de brechas.

#### 4.3. Calibração do percentual de pedestres potencialmente oportunistas

Esta etapa de calibração teve o objetivo de identificar os parâmetros que resultam em percentuais de pedestres obedientes, oportunistas moderados e oportunistas agressivos equivalentes aos observados na coleta de dados. A representação correta destes percentuais indica que os momentos das travessias dos pedestres na simulação correspondem aos observados. A representação dos momentos das travessias é um dos principais fatores que influenciam o atraso médio de pedestres na travessia.

O percentual de cada tipo de pedestres resultantes da simulação depende (i) do percentual de pedestres potencialmente oportunista definidos na codificação e (ii) da representação correta da aceitação de brechas dos pedestres. No experimento de calibração, diferentes valores do parâmetro percentual potencialmente oportunista foram testados. O percentual de cada tipo de pedestre nas simulações foi comparado com os obtidos na coleta de dados.

No experimento, os comportamentos dos pedestres foram representados pelos melhores resultados obtidos na calibração da movimentação e da aceitação de brechas. Para que os percentuais de cada tipo de pedestre obtidos nas simulações pudessem ser comparados aos observados, as brechas disponíveis para cada pedestre foram reproduzidas controlando as chegadas à travessia, como na calibração da aceitação de brechas.

A Tabela 2 apresenta, para os diferentes percentuais de potencialmente oportunistas testados, os atrasos médios e os percentuais de cada tipo de pedestre nas simulações. Neste artigo, o atraso é considerado como a diferença entre o tempo de travessia computado e o tempo ideal. O tempo de travessia computado corresponde ao intervalo entre a chegada do pedestre à área

de espera e a conclusão da travessia. O tempo ideal corresponde ao tempo de deslocamento no caminho mínimo com a velocidade desejada média.

**Tabela 2:** Relação entre percentual potencialmente oportunista e os atrasos médios e percentuais de cada tipo de pedestre nas simulações.

% potencialmente oportunista	Obedientes	Oportunistas moderados	Oportunistas agressivos	Atraso médio (s)	Diferença (%)
<b>Observado</b>	<b>45%</b>	<b>25%</b>	<b>30%</b>	<b>28,3</b>	<b>-</b>
0%	100%	0%	0%	38,8	37%
60%	54%	28%	18%	31,0	9%
80%	39%	36%	25%	27,7	-2%
100%	25%	45%	30%	24,8	-13%

Na tabela observa-se que na simulação com 0% de pedestres potencialmente oportunistas o atraso médio é quase 40% superior ao observado, indicando a importância de representar este comportamento. Com todos os pedestres são potencialmente oportunistas, entretanto, o atraso médio foi inferior ao observado em 13%.

O atraso médio mais próximo ao observado foi obtido no cenário com 80% de pedestres potencialmente oportunistas. Neste cenário, o percentual de pedestres oportunistas agressivos (25%) é inferior ao observado, e o de moderados (36%), superior. A proporção entre agressivos e moderados depende da aceitação de brechas dos pedestres, e não do parâmetro calibrado nesta etapa.

A definição do melhor valor do parâmetro para representar o comportamento na travessia depende da análise dos atrasos e dos percentuais de cada tipo de pedestre. Não foi possível calibrar o parâmetro para obter percentuais iguais aos observados para os três tipos de pedestres. Nesta travessia específica, os melhores resultados em termos de atrasos foram obtidos nos cenários com 60 a 80% de pedestres potencialmente oportunistas, em que o percentual de obedientes nas simulações foram mais próximos ao observado.

A utilização de um percentual de pedestres potencialmente oportunista permite uma representação razoável do comportamento médio dos pedestres, porém, o comportamento individual pode não ser representado corretamente. Na análise do comportamento dos pedestres nos vídeos, observou-se que praticamente todos os pedestres observados atravessavam quando existiam brechas longas (>40 s). Nas simulações, mesmo as brechas longas não são aceitas pelos pedestres classificados como obedientes. Esta observação indica que a alteração em características da travessia, como a distribuição de brechas disponíveis, resultam em mudanças no percentual potencialmente oportunista e o valor do parâmetro pode não se manter válido.

A calibração foi realizada em um cenário no qual as brechas disponíveis para cada pedestre foram controladas. As distribuições de chegadas de pedestres e veículos influenciam diretamente os momentos de travessia e os atrasos nas simulações. Na simulação de travessias, é importante verificar se a distribuição de brechas na travessia são representadas adequadamente pelo modelo.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo, os modelos do VISSIM foram calibrados para representar uma travessia semaforizada onde a maioria dos pedestres apresenta comportamento oportunista. A calibração permitiu avaliar as habilidades e limitações para representar os atrasos de pedestres na travessia.

Na calibração do modelo de movimentação dos pedestres, os parâmetros padrão do VISSIM não foram adequados para representar o comportamento na travessia. As distribuições de velocidades desejadas padrão são inferiores às observadas na travessia, sendo provavelmente recomendadas para deslocamentos em calçadas. Em travessias, foi necessário utilizar uma distribuição com velocidades mais elevadas, baseadas nas observadas na coleta de dados.

Na codificação da largura da travessia, é importante observar que os pedestres não atravessam apenas sobre a área sinalizada. Neste artigo, a codificação da travessia com a largura efetivamente utilizada pelos pedestres, medida no processo de coleta de dados, resultou na simulação de velocidades mais próximas às observadas.

Os parâmetros padrão do modelo de Forças Sociais também precisaram ser calibrados para representar o comportamento dos pedestres em travessias. Observou-se que nos cenários com fluxo elevado, e mais conflitos entre os pedestres, a redução das velocidades no modelo era superior à observada. É possível que especialmente em travessias, os pedestres retomem as velocidades desejadas mais rapidamente do que em outras situações, para minimizar o tempo de deslocamento. O parâmetro tau ( $\tau$ ), que influencia as acelerações dos pedestres para manter as velocidades desejadas no modelo, foi reduzido para o valor mínimo recomendado para representar este comportamento.

Na calibração do modelo de aceitação de brechas, observou-se que a brecha traseira mínima padrão do VISSIM (0,50 s) é inadequada para a travessia analisada. Os melhores resultados foram obtidos com uma brecha traseira mínima expressivamente superior à padrão (2,5 s), que resultou em uma distribuição de brechas aceitas próxima da obtida na coleta de dados. O modelo de aceitação de brechas com áreas de conflito representa um avanço em relação ao modelo tradicional, pois apesar da brecha traseira mínima no modelo ser o mesmo para todos os pedestres, o comportamento do pedestre na travessia depende da velocidade desejadas individual e a travessia de múltiplas faixas é representada razoavelmente.

A decisão dos pedestres sobre desrespeitar os semáforos, e aceitar brechas no fluxo de veículos, influencia diretamente o atraso médio na travessia. Neste artigo, o parâmetro que define o percentual de oportunistas foi calibrado com base nos atrasos observados na travessia e permitiu a representação adequada do atraso médio na travessia simulada. É importante observar, no entanto, que o valor obtido é válido apenas para as condições específicas da travessia. O percentual de oportunistas é influenciado fortemente pelas brechas disponíveis, por exemplo, e pode não ser válido para cenários em que as condições sejam alteradas. A dificuldade em definir o percentual de pedestres oportunistas representa uma limitação do modelo.

Não foram encontrados modelos para representar a decisão sobre desrespeitar semáforos. Existem oportunidades para o desenvolvimento de modelos probabilísticos que representem estas decisões nos simuladores, através da incorporação de variáveis que influenciam este comportamento, relatadas por Zhuping *et al.* (2011). No modelo de aceitação de brechas do VISSIM, no entanto, é possível que a utilização de brechas traseiras mínimas diferentes para cada classe de pedestres na simulação resulte em maior controle sobre a decisão dos pedestres e atrasos mais próximos aos observados. Neste caso, a melhor calibração da decisão sobre ignorar os semáforos poderia ser obtida atribuindo uma brecha traseira diferentes para os pedestres oportunistas agressivos, oportunistas moderados e obedientes. Outras vantagens em representar a decisão dos pedestres através de diferentes valores de brechas traseiras mínimas incluem (i) não serem válidas apenas para o cenário calibrado e (ii) permitirem a

representação de classes de pedestres com velocidades desejadas inferiores e brechas traseiras mínimas maiores à média, como no caso dos idosos.

Nas simulações existem duas situações frequentes em que o comportamento simulado não corresponde ao observado na prática: (i) quando pedestres iniciam a travessia e os veículos parados no semáforo iniciam a aceleração, a brecha aceita pelos pedestres deixa de existir e os pedestres aguardam a próxima brecha entre as faixas de tráfego e (ii) quando uma brecha é aceita apenas pelos pedestres em um sentido, eles são bloqueados por pedestres no sentido contrário, que estão parados aguardando uma brecha. No primeiro caso, o que acontece na prática é o pedestre perceber que os veículos vão acelerar e aumentar a velocidade para concluir a travessia, ou negociar visualmente a prioridade com os motoristas. No segundo caso, os pedestres permitem a passagem dos que estão concluindo a travessia. Estes comportamentos, mesmo que não influenciem significativamente a calibração das brechas aceitas, podem corresponder a atrasos consideráveis na simulação.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio concedido pelo CNPq e CAPES através de bolsas de produtividade de pesquisa e mestrado e apoio financeiro ao projeto.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blue, V., e J. Adler (1999) Cellular automata microsimulation of bidirectional pedestrian flows. In: *TRB 78th Annual Meeting Compendium of Papers DVD-ROM: Transportation Research Board Annual Meeting 1999*. Washington, DC: TRB.
- Bönisch C. e T. Kretz (2009) *Simulation of Pedestrians Crossing a Street*. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/0911.2902>>. Acessado em: 8 mar. 2011.
- Brewer, A., K. Fitzpatrick, J. Whitacre e D. Lord (2006) Exploration of Pedestrian Gap-Acceptance Behavior at Selected Locations *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1982. Whashington, D.C.
- Helbing, D. e P. Molnár (1995). Social force model for pedestrian dynamics. In *Physical Review E* 51(5), 4282-4286.
- Jacobsen, A. e H. B. B. Cybis (2010) Microsimulação da travessia de pedestres: coleta de dados para calibração de modelos. In: *XXIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*. Salvador, BA, Brasil.
- Liu, R., Cruz da Silva, J. P., & da Maia Seco, A. J. (2000). A bi-modal micro-simulation tool for the assessment of pedestrian delays and traffic management. In: *Proceedings of the ninth international association of travel behaviour research conference*, Gold Coast, Australia, 2000.
- Mathworks (2010) *Matlab v.R2010a*.
- Meijering, E. (2010) MTrackJ: A Java Program for Manual Object Tracking. Disponível em: <<http://www.imagescience.org/meijering/software/mtrackj/>>. Acessado em: 24 out. 2010.
- NIH (2010) ImageJ: Image Processing and Analysis in Java. Disponível em: <<http://rsbweb.nih.gov/ij/>>. Acessado em: 24 out. 2010.
- Paramics (2011) *Urban Analytics Framework Brochure*. Disponível em: <<http://www.pedestrian-simulation.com/>>. Acessado em: 8 mar. 2011.
- PTV (2009) *VISSIM 5.20 User Manual*. Planung Transport Verkehr AG. Karlsruhe, Alemanha.
- Schmöcker, J., S. Ahuja, M. Bell (2008) Multi-objective signal control of urban junctions – Framework and a London case study. *Transportation Research Part C* 16 (2008) 454-470.
- Troutbeck, R. e W. Brilon. (1992) *Unsignalized Intersection Theory*, Revised Monograph on Traffic Flow Theory. Turner-Fairbank Highway Research Center.
- TSS (2010) *Aimsun 6.1 User's Manual*. Transport Simulation Systems.
- Wang *et al.* (2009) Pedestrian Delay Models at Signalized Intersections Considering Signal Phasing and Pedestrian Treatment Alternatives In: *TRB 88th Annual Meeting Compendium of Papers DVD-ROM: Transportation Research Board Annual Meeting 2009*. Washington, DC: TRB.
- Yang, J., W. Deng, J. Wang, Q. Li, Z. Wang (2006) Modeling pedestrians' road crossing behavior in traffic system micro-simulation in China. *Transportation Research Part A*, v. 40, p. 280-290.
- Zhuping, Z. *et al.* (2011) Pedestrian Crossing Behaviors at Signalized Intersections: Observational Study and Survey in China. In: *TRB 90th Annual Meeting Compendium of Papers DVD-ROM: Transportation Research Board Annual Meeting 2011*. Washington, DC: TRB.



## 5. CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou uma análise sobre a simulação de travessias de pedestres. Este capítulo apresenta as principais conclusões deste estudo, uma revisão dos objetivos e recomendações para trabalhos futuros.

### 5.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Esta dissertação apresenta uma metodologia de coleta de dados flexível e acessível, que contribui para que pesquisadores e engenheiros de tráfego possam coletar informações para a calibração dos modelos. As ferramentas de coleta de dados utilizadas em outros trabalhos não foram disponibilizadas, implicando no desenvolvimento de novas ferramentas para coleta de dados em cada estudo. A metodologia proposta nesta dissertação propõe a coleta de dados de forma semiautomática com a utilização de ferramentas gratuitas no rastreamento de pedestres e veículos. Apesar de não representar o estado da arte na coleta de dados, que corresponde ao uso de algoritmos de visão computacional para rastrear pedestres automaticamente, a metodologia proposta permite maior facilidade e precisão no rastreamento, eliminando possíveis erros no reconhecimento automático das imagens.

Os comportamentos de pedestres e motoristas em travessias não são homogêneos. As velocidades que desejam desenvolver ao longo do deslocamento é uma das diferenças observadas entre eles, que é representada pelos simuladores de tráfego (*e.g.* VISSIM). Na

simulação de travessias não sinalizadas, no entanto, todos aceitam o mesmo valor de brecha traseira mínima, como se tivessem comportamento homogêneos. Outras diferenças entre os pedestres, nas decisões sobre ignorar a sinalização do semáforo, e entre os motoristas, sobre ignorar a preferência em faixas de segurança, não são representadas pelos modelos.

A literatura sobre travessias de pedestres apresenta diversos modelos do comportamento de pedestres e motoristas. Foram identificados modelos Logit Binomiais, probabilísticos, que consideram diversas variáveis na escolha de rotas, aceitação de brechas dos pedestres e na decisão dos motoristas sobre dar preferência em travessias. Estes modelos podem ser utilizados em simulações que necessitem uma representação mais detalhada do comportamento em travessias. Os modelos utilizados nos simuladores de tráfego VISSIM (PTV, 2009) e Aimsun (TSS, 2010), no entanto, são determinísticos.

Os modelos do VISSIM foram calibrados para representar o comportamento em uma travessia semaforizada, utilizando cenários em que as chegadas de pedestres e veículos eram controladas individualmente. O modelo de movimentação dos pedestres conseguiu representar as velocidades médias medidas nos diferentes níveis de fluxo de observados. Os principais parâmetros que influenciaram as velocidades na travessia foram (i) a distribuição de velocidades desejadas, (ii) a largura da área de travessia e (iii) o parâmetro tau ( $\tau$ ) do modelo de movimentação. Os melhores resultados foram obtidos com a distribuição de velocidades desejadas igual à medida na coleta de dados, largura da área de travessia igual a efetivamente utilizada pelos pedestres e parâmetro tau ( $\tau$ ) reduzido. Observou-se que as velocidades padrão do VISSIM resultaram em velocidades inferiores às observadas e a redução do parâmetro tau ( $\tau$ ) permitiu reproduzir as acelerações reais dos pedestres na travessia.

O modelo de aceitação de brechas do VISSIM foi calibrado para que a distribuição das brechas aceitas pelos pedestres fosse reproduzida nas simulações. Na calibração do parâmetro brecha traseira mínima, os melhores resultados foram obtidos com o valor 2,5 segundos. A utilização do valor padrão do VISSIM (0,50) resultou na aceitação de brechas curtas na simulação, que eram rejeitadas pelos pedestres na travessia. O modelo de aceitação de brechas utilizando áreas de conflitos pode ser considerado um avanço em relação ao modelo tradicional, pois a travessia depende da velocidade desejada do pedestre e das brechas em cada faixa de tráfego, além representar satisfatoriamente o comportamento na travessia.

A representação do comportamento de pedestres oportunistas nas simulações foi fundamental para obter atrasos médios de pedestres compatíveis com os observados. Para representar este comportamento, foi necessário codificar uma classe de pedestres com comportamento potencialmente oportunista nas simulações, que iniciavam o processo de aceitação de brechas quando chegavam à travessia. No processo de calibração, identificou-se que os melhores resultados eram obtidos considerando que 80% dos pedestres eram potencialmente oportunistas, mas que a representação deste comportamento através de um percentual fixo e predefinido restringe a utilização do modelo.

No modelo do VISSIM, assim como no modelo de Liu *et al.* (2000), um percentual fixo e predefinido dos pedestres apresenta comportamento oportunista e aceita brechas nas travessias. Na prática, a decisão dos pedestres sobre desrespeitar os semáforos é influenciada por diversas variáveis, relacionadas aos pedestres, à travessia e ao fluxo de veículos (ZHUPING *et al.*, 2011). O parâmetro percentual potencialmente oportunista, utilizado no VISSIM, permite que o comportamento médio em uma travessia seja representado, entretanto, é importante observar que o valor do parâmetro pode não permanecer válido para situações em que as características da travessia sejam alteradas. Este comportamento seria representado mais adequadamente através de modelos probabilísticos, que considerassem mais variáveis na decisão dos pedestres sobre desrespeitar os semáforos, ou através de melhorias no modelo determinístico de aceitação de brechas. Melhorias relativamente simples no modelo de aceitação de brechas como, por exemplo, possibilitar que diferentes classes de pedestres aceitem brechas traseiras mínimas diferentes nas travessias, poderiam qualificar a representação da decisão dos pedestres sobre desrespeitar os semáforos e, conseqüentemente, dos atrasos obtidos na simulação.

Esta dissertação conclui que, apesar dos modelos avançados de movimentação de pedestres incorporados nos simuladores de tráfego, os modelos que representam a interação entre pedestres e motoristas estão menos desenvolvidos. Estes modelos limitam a aplicação da simulação para avaliação de atrasos às travessias onde a sinalização seja obedecida. Existem oportunidades para o desenvolvimento de modelos que representem as decisões de pedestres e motoristas de forma mais realista, que qualifiquem a representação dos atrasos e possam ser utilizadas para avaliação da segurança nas travessias.

## 5.2. REVISÃO DOS OBJETIVOS

- a) *analisar os comportamentos de pedestres e motoristas nos diferentes tipos de travessias, baseado na literatura e observações de campo;*

O primeiro artigo desta dissertação apresentou os principais comportamentos observados nas travessias não sinalizadas, sinalizadas e semaforizadas conforme descritos na literatura, analisando os fatores que influenciam as decisões de pedestres e motoristas. O terceiro artigo apresentou detalhadamente os comportamentos observados em uma travessia semaforizada, detalhando as velocidades, as brechas aceitas e o comportamento oportunista dos pedestres.

- b) *apresentar os modelos que representam os comportamentos de pedestres e motoristas em travessias encontrados na literatura e nos softwares de simulação de tráfego;*

O primeiro artigo desta dissertação apresentou os principais modelos do comportamento de pedestres e motoristas em travessias. Foram identificados os modelos de escolha de rotas, movimentação, aceitação de brechas, *motorist yield* e decisão sobre ignorar os semáforos. Os modelos do software de simulação de tráfego VISSIM foram detalhados no terceiro artigo.

- c) *propor uma metodologia para coleta de dados de pedestres e veículos em travessias que permita obter as velocidades, trajetórias e brechas aceitas utilizando softwares disponíveis no mercado e, quando possível, gratuitos;*

O segundo artigo desta dissertação propôs uma metodologia de coleta de dados que utiliza ferramentas gratuitas no rastreamento de pedestres e veículos. O processamento das rotas para a obtenção das velocidades, trajetórias e brechas aceitas foi realizado no software Matlab (Mathworks, 2010). O rastreamento proposto foi desenvolvido com o objetivo de permitir a extração de outras variáveis, como atraso dos pedestres e tempos de espera na travessia.

- d) *calibrar os modelos do VISSIM para reproduzir os comportamentos observados em uma travessia semaforizada, incluindo as velocidades, aceitação de brecha e as decisões sobre desrespeitar o semáforo;*

O terceiro artigo desta dissertação apresentou a calibração dos modelos do VISSIM com os dados coletados da travessia semaforizada analisada. As velocidades médias dos pedestres foram calibradas através das velocidades desejadas, largura da travessia e parâmetro tau ( $\tau$ ) do modelo de forças sociais. A aceitação de brechas foi calibrada, através do parâmetro brecha traseira mínima, para reproduzir a distribuição de brechas aceitas observada na travessia.

*e) analisar os atrasos de pedestres na simulação da travessia semaforizada estudada, comparando-os com os obtidos na coleta de dados;*

O terceiro artigo desta dissertação analisou os atrasos obtidos na simulação da travessia semaforizada estudada durante o processo de calibração. Identificou-se que os atrasos são fortemente influenciados pelo percentual de pedestres potencialmente oportunistas. Os atrasos da travessia foram representados adequadamente no cenário em que 80% dos pedestres eram potencialmente oportunistas.

*f) analisar as principais limitações dos modelos usados na simulação de travessias;*

O terceiro artigo desta dissertação analisou as limitações dos modelos utilizados no VISSIM para simular a travessia analisada. Foram identificadas limitações relacionadas à (i) deficiências dos modelos, como a existência de pedestres bloqueando a passagem de outros pedestres em situações em que, na prática, isto não ocorreria, e (ii) inexistência de modelos para representar comportamentos específicos, como a decisão de pedestres em ignorar o semáforo e aceitar brechas.

### 5.3. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação, a avaliação das limitações dos modelos foi realizada utilizando o simulador de tráfego VISSIM 5.20. Outros softwares, como Aimsun e Paramics, apresentam modelos de movimentação dos pedestres e aceitação de brechas diferentes. Os modelos de outros softwares poderiam ser igualmente avaliados em trabalhos futuros.

Esta dissertação avaliou os atrasos nas simulações em que a decisão dos pedestres sobre ignorar o semáforo não era representada por um modelo específico. Na simulação de faixas de segurança, em que os veículos devem dar preferência aos pedestres na travessia, o modelo do

VISSIM representa apenas a situação ideal em que todos os veículos respeitam esta preferência. Na prática, se observam motoristas que não respeitam a preferência nestas travessias, e que existem diversos fatores que influenciam este comportamento.. Trabalhos futuros poderiam avaliar o impacto de considerar todos motoristas como obedientes sobre os atrasos e avaliar modelos de simulação que representem a decisão dos motoristas sobre dar preferência em faixas de segurança.

Nos simuladores de tráfego avaliados a escolha de rota dos pedestres corresponde ao caminho mínimo do pedestre, ou ao caminho que minimiza o potencial de conflitos com outros pedestres (no caso do VISSIM 5.30). Na simulação de áreas em que existam múltiplos locais de travessias possíveis entre a origem e o destino dos deslocamentos, considerar as características de cada travessia na escolha de rotas pode resultar em diferenças nos atrasos. Recomenda-se avaliar a influência da escolha de rotas sobre os atrasos na simulação em trabalhos futuros.

Os modelos encontrados na literatura e nos simuladores de tráfego possuem dificuldades em representar alguns comportamentos de pedestres em situações específicas. Estes comportamentos não foram analisados nos artigos apresentados, pois são observados com baixa frequência ou não apresentam uma influência considerável sobre os atrasos. Nos parágrafos seguintes são apresentados 3 comportamentos observados na simulação das travessias ou na coleta de dados que devem ser considerados em cenários onde ocorram com frequência.

Comportamento 1: em travessias semaforizadas, os pedestres que chegam à travessia quando o semáforo apresenta o vermelho piscante, imediatamente antes dos veículos arrancarem, avaliam se existe tempo suficiente para concluir a travessia correndo ou com velocidade acima da desejada. Um percentual importante dos pedestres atravessam nestas situações, mesmo que tenham que realizar contato visual com os motoristas para evitar um acidente. Nas simulações, os pedestres não atravessam após o sinal do tempo de verde do semáforo, o que não corresponde ao comportamento observado.

Comportamento 2: nas simulações, os pedestres que ignoram o semáforo não conseguem prever o momento em que os veículos iniciam a aceleração. No instante anterior à aceleração dos veículos eles avaliam que existe uma brecha aceitável e iniciam a travessia.

Estes pedestres não conseguem concluir a travessia em uma única etapa e permanecem entre as faixas de tráfego aguardando por uma nova brecha.

Comportamento 3: em situações em que existem congestionamentos de veículos na área de travessia, observou-se que (i) os veículos apresentavam comportamento cordial, mantendo a travessia livre para os pedestres, ou (ii) os pedestres atravessavam entre os veículos parados, considerando que os motoristas aguardariam a conclusão da travessia antes de acelerar.

Por fim, recomenda-se que trabalhos futuros avaliem a incorporação de modelos Logit Binomiais em simuladores de tráfego multimodais para representar os comportamentos de pedestres e motoristas nas travessias. Estes modelos podem ser desenvolvidos de forma análoga aos modelos estimados por Sun *et al.* (2003) e Schroeder (2008), selecionando apenas as variáveis compatíveis com as utilizadas no simulador de tráfego.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRAULT, V.; ESPIÉ, S. Behavioral model of the pedestrian interaction with road traffic. In: EUROPEAN TRANSPORT CONFERENCE, Strasbourg, 2005. **Anais...** Association for European Transport, Londres, 2005.

AMOS, J, KOHN, B.; ZACHARIADIS, V. Microsimulation approaches to pedestrian route assignment modeling. In: EUROPEAN TRANSPORT CONFERENCE, Glasgow, 2009. **Anais...** Association for European Transport, Londres, 2009.

ANTONINI, G.; BIERLAIRE, M.; WEBER, M. Discrete choice models of pedestrian walking behavior. **Transportation Research Part B**, 40, 667–687, 2006.

BERROU, J. *et al.* Calibration and validation of the Legion simulation model using empirical data. In: WALDAU, N. *et al.* (eds.) **Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005**. Springer Berlin Heidelberg, 2005. p. 167-181, 2005.

BLUE, V.; ADLER, J. Cellular automata microsimulation of bidirectional pedestrian flows. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 78<sup>th</sup> ANNUAL MEETING, 1999, Washington D.C. **Anais...** Washington D.C.: TRB, 1999. CD-ROM.

BÖNISCH C.; KRETZ, T. **Simulation of Pedestrians Crossing a Street**. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/0911.2902>>. Acessado em: 8 mar. 2011. 2009.

| BREWER, A. *et al.* Exploration of Pedestrian Gap-Acceptance Behavior at Selected Locations. **Transportation Research Record**: Journal of the Transportation Research Board, v. 1982. Whashington, D.C., 2006.

CHAE, K. **Simulation of pedestrian-vehicle interactions at roundabouts**. Tese (Doutorado), North Carolina State University, Raleigh, NC, Estados Unidos., 2005.

CHU, X.; GUTTENPLAN, M.; BALTES, M. Why people cross where they do: the role of the street environment. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, vol. 1878, Whashington, D.C., 2004.

DAS, S.; MASKI, C. F.; MANUSZAK, M. D. Walk or wait? An empirical analysis of street crossing decisions. **Journal of Applied Econometrics**, v. 20, p. 529–548, 2005.

FITZPATRICK, K. *et al.* **Improving Pedestrian Safety at Unsignalized Crossings**. NCHRP Report. 562. Transportation Research Board. National Research Council, Washington, DC., 2006.

HELBING, D.; MOLNÁR, P. Social force model for pedestrian dynamics. **Physical Review E** 51(5), 4282-4286, 1995.

ISMAIL, K. *et al.* Automated analysis of pedestrian-vehicle conflicts using video data. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 88<sup>th</sup> ANNUAL MEETING, 2009, Washington D.C. **Anais...** Washington D.C.: TRB, 2009. DVD-ROM.

JACOBSEN, A.; CYBIS, H. B. B. Microsimulação da travessia de pedestres: coleta de dados para calibração de modelos. In: XXIV CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES. **Anais...** Salvador, BA, Brasil. 2010. CD-ROM;

LEE, J. Y. S.; LAM, W. H. K. Simulating pedestrian movements at signalized crosswalks in Hong Kong. **Transportation Research Part A**, v. 42, p. 1314–1325, 2008.

LIU, R.; SILVA, J. P.; SECO, A. J. A bi-modal micro- simulation tool for the assessment of pedestrian delays and traffic management. **9th International Association of Travel Behavior Research Conference**, Gold Coast, Australia, 2000.

MATHWAVE. **EasyFit Professional Edition**. MathWave Technologies, 2010.

MATHWORKS. **Matlab** v.R2010a. MathWorks, 2010.

MEIJERING, E. **MTrackJ**: A Java Program for Manual Object Tracking. Disponível em: <<http://www.imagescience.org/meijering/software/mtrackj/>>. Acessado em: 24 out. 2010. 2010.

NIH. **ImageJ**: Image Processing and Analysis in Java. National Institutes of Health, 2010. Disponível em: <<http://rsbweb.nih.gov/ij/>>. Acessado em: 24 out. 2010.

PAPADIMITRIOU, E.; YANNIS, G.; GOLIAS, J. A critical assessment of pedestrian behaviour models. **Transportation Research Part F**, 12, 242–255, 2009.

PARAMICS. **Urban Analytics Framework Brochure**. PARAMICS, 2011. Disponível em: <<http://www.pedestrian-simulation.com/>>. Acessado em: 8 mar. 2011.

PTV. **VISSIM 5.20 User Manual**. Planung Transport Verkehr AG. Karlsruhe, Alemanha 2009.

PTV. **VISSIM 5.30 Technical details**. Planung Transport Verkehr AG, 2011. Disponível em: <<http://www.ptvag.com/software/transportation-planning-traffic-engineering/software-system-solutions/vissim/vissim-530-highlights/vissim-530-technical-details/>>. Acesso em: 8 mar. 2011.

ROBIN, T. *et al.* Specification, estimation and validation of a pedestrian walking behavior model. **Transportation Research Part B**, 43, 36–56. 2009.

SCHMIDT, S.; FÄRBER, B. Pedestrians at the kerb – Recognising the action intentions of humans. **Transportation Research Part F**, v. 12, p. 300–310. 2009.

SCHMÖCKER, J.; AHUJA, S.; BELL, M. Multi-objective signal control of urban junctions – Framework and a London case study. **Transportation Research Part C** 16 (2008) 454-470. 2008.

SCHROEDER, B.J. **A Behavior-Based Methodology for Evaluating Pedestrian-Vehicle Interaction at Crosswalks**. Tese (Doutorado), North Carolina State University, Raleigh, NC, Estados Unidos. 2008.

SHI, J. *et al.* Research on pedestrian behaviors and traffic characteristics at unsignalized midblock crosswalk: a case study in Beijing. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 86<sup>th</sup> ANNUAL MEETING, 2007, Washington D.C. **Anais...** Washington D.C.: TRB, 2007. DVD-ROM.

SISIOPIKU, V. P.; AKIN, D. Pedestrian behaviors at and perceptions towards various pedestrian facilities: an examination based on observation and survey data. **Transportation Research Part F**, v. 6, p. 249–274. 2003.

SUN, D. *et al.* Modeling of motorist-pedestrian interaction at uncontrolled mid- block crosswalks. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 82<sup>th</sup> ANNUAL MEETING, 2003, Washington D.C. **Anais...** Washington D.C.: TRB, 2003. DVD-ROM.

TEKNOMO, K. Application of microscopic pedestrian simulation model. **Transportation Research Part F**, 9, 15–27. 2006.

TRB. **Highway Capacity Manual**. Transportation Research Board. Special Report 209. National Research Council, Washington, DC, EUA, 4<sup>a</sup> ed., 2000.

TROUTBECK, R.; BRILON, W. **Unsignalized Intersection Theory**, Revised Monograph on Traffic Flow Theory. Turner-Fairbank Highway Research Center. 1992.

TSS. **Aimsun 6.1 User's Manual**. Transport Simulation Systems. Barcelona, 2010.

YANG, J. *et al.* Modeling pedestrians' road crossing behavior in traffic system micro-simulation in China. **Transportation Research Part A**, v. 40, p. 280–290. 2006.

WANG *et al.* Pedestrian Delay Models at Signalized Intersections Considering Signal Phasing and Pedestrian Treatment Alternatives In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 88<sup>th</sup> ANNUAL MEETING, 2009, Washington D.C. **Anais...** Washington D.C.: TRB, 2009. DVD-ROM.

ZHUPING, Z. *et al.* Pedestrian Crossing Behaviors at Signalized Intersections: Observational Study and Survey in China. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 90<sup>th</sup> ANNUAL MEETING, 2011, Washington D.C. **Anais...** Washington D.C.: TRB, 2011. DVD-ROM.