

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 – PPGE

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

RESUMO

Os simuladores de tráfego recentemente incorporaram modelos para representação do comportamento de pedestres. Travessias de pedestres são elementos importantes, pois nestes locais ocorrem atrasos e riscos de acidentes. 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 dos simuladores de tráfego incorporarem 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 que a sinalização é ignorada. As características e limitações dos modelos utilizados por simuladores de tráfego e estudos acadêmicos são analisados, indicando aspectos que devem ser observados na escolha de modelos para simular as travessias de pedestres.

ABSTRACT

Traffic simulators have recently incorporated pedestrian behavior's models. Pedestrian crossings' are important elements, which generate delays and risk of accidents. This article presents a review about crossing behaviors and the models developed to represent them. The behavior of pedestrians is represented by the following models: (i) route choice, (ii) movement, (iii) gap acceptance, (iv) decision about ignoring signalization and (v) motorist yield. Although the traffic simulators incorporated advanced pedestrians' movement models, the interaction between drivers and pedestrians is usually represented by deterministic models, that simplify their behavior and do not represent situations on which the signalization is ignored. This paper analyses the characteristics and limitations of models adopted by traffic simulators, indicating aspects that should be considered on the choice of model to simulate pedestrian crossings.

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. 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.

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, estão 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 os 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.

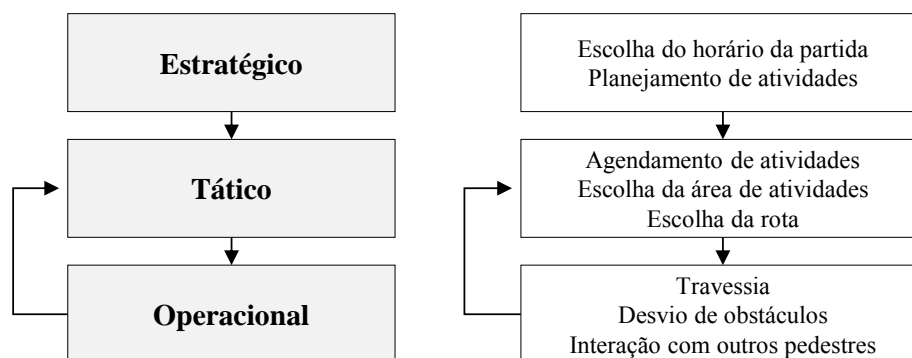


Figura 1: Estrutura das atividades de pedestres - adaptado de Papadimitriou *et al.* (2009)

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 pedestres 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 à 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, 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

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, Chu *et al.* (2004) identificaram que características dos pedestres, como idade e renda, também influenciam esta escolha.

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 desejada é uma das diferenças mais evidentes entre pedestres, especialmente ao avaliar grupos como crianças, idosos e pessoas com mobilidade reduzida, que geralmente apresentam velocidades inferiores à média.

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. 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 entre eles 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. Dentre estes fatores, a faixa etária e sexo, por exemplo, influenciam a brecha mínima também porque estão relacionados às velocidades que os pedestres estão dispostos a desenvolver para atravessar.

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 se aproximando da travessia e decidem, em função de um conjunto de fatores, se concedem a preferência de passagem ao pedestre. Nos simuladores de tráfego (e.g. VISSIM) o comportamento dos veículos é simplificado por um modelo de aceitação de brechas. Estudos que indiquem valores referenciais de brechas mínimas entre a passagem de pedestres para utilização nestes modelos não foram encontrados na literatura.

Na prática, os motoristas consideram diversos fatores além da brecha entre pedestres na decisão sobre dar preferência. 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) observa que características dinâmicas dos veículos também são importantes, pois a decisão dos motoristas é influenciada pela desaceleração necessária e a distância da travessia. A existência de pedestres com comportamento assertivo, demonstrando claras intenções de atravessar, é um dos fatores que aumentam a probabilidade de veículos darem preferência aos pedestres, segundo este autor. Outros fatores citados 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 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 também influenciam o comportamento dos veículos.

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 principalmente com estudantes 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.

Em travessias semaforizadas na China, Zhuping *et al.* (2011) analisaram a influência do sexo, idade, tamanho dos grupos de pedestres, distância de travessia, tempo semaforico, volume de pedestres e volume de veículos na decisão sobre ignorar o vermelho, com base em entrevistas e levantamentos de campo utilizando filmagens. 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 atravessam.

3. MODELOS DE SIMULAÇÃO DE PEDESTRES

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

A complexidade dos modelos utilizados em simulações de travessias, no entanto, depende especialmente dos objetivos da simulação. Para avaliar as condições de segurança de travessias e a probabilidade de pedestres e veículos apresentarem comportamentos que provoquem acidentes, os modelos de simulação devem reproduzir as decisões de pedestres e veículos com o maior realismo possível. No entanto, nas simulações que tem o objetivo de representar os atrasos médios de pedestres e veículos, 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.

Liu *et al.* (2000) apresenta uma lista dos principais requisitos para simulação de travessias com objetivo de avaliar atrasos e medidas de desempenho do gerenciamento de tráfego. Segundo o autor, o simulador deve permitir: (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, (vi) controle semaforico 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 simulação de travessias. Os modelos apresentados correspondem a movimentação de pedestres, aceitação de brechas de pedestres, aceitação de brechas de veículos, escolha do local de travessia e 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 um pedestre não utilizar uma faixa de segurança aumenta proporcionalmente à 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. Caso contrário, o pedestre obrigatoriamente caminha até uma travessia sinalizada ou semaforizada.

O modelo proposto por Airault e Espié (2005) representa 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 nos simuladores de tráfego analisados (e.g. VISSIM, Aimsun), seria necessário rever a forma como as áreas de pedestres são codificadas para que os pedestres considerassem as condições de tráfego e a prioridade de cada travessia na sua escolha de rotas.

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 a 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 estágio de desenvolvimento mais avançado que outros modelos utilizados simulação de travessias e permitem calibrações para diversos perfis de pedestres.

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 se considera 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 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 probabilísticos de aceitação de brechas, avaliando 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 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, 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.

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 e ainda permite 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), em vez do tempo utilizado em outros modelos. 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 do objetivo da simulação. Na avaliação dos atrasos, é possível que o comportamento médio seja representado adequadamente pelos modelos determinísticos apresentados. Em travessias onde os atrasos de pedestres aguardando por brechas 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 microsimulação para representar o comportamento em travessias de pedestres.

Tabela 1: Quadro resumo de características e limitações dos modelos analisados

Modelo	Características	Limitações
Escolha de rotas dos pedestres	Pedestres seguem o caminho mínimo entre a origem e o destino do deslocamento. VISSIM: utiliza o caminho mínimo, mas na versão 5.30 considera o potencial de conflito com outros pedestres (PTV, 2011) Aimsun: pedestres utilizam o caminho mínimo.	As características das travessias não são consideradas na escolha da rota. Se existem múltiplas travessias possíveis entre a origem e destino, a rota escolhida é sempre a mais curta. Este pode ser um aspecto crítico nas simulações de pedestres.
Movimentação dos pedestres	Adaptados a partir de modelos desenvolvidos para representar dinâmica de multidões. Aimsun: minimiza o “custo” de deslocamento e possui mecanismos para evitar bloqueios. VISSIM: utiliza o Modelo de Forças Sociais para representar a movimentação dos pedestres.	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.

Aceitação de brechas dos pedestres	São baseados em modelos de aceitação de brechas desenvolvidos para representar veículos em interseções não semaforizadas. Consideram os pedestres homogêneos, pois todos aceitam a mesma brecha crítica, e consistentes, pois sempre aceitam uma brecha superior à crítica. VISSIM: avalia as brechas nas áreas de conflito em cada faixa de tráfego independentemente e a aceitação depende da velocidade desejada de cada pedestre. Aimsun: pedestres atravessam quando a distância dos veículos até a travessia é maior que um determinado valor mínimo.	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. 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.
<i>Motorist Yield</i>	Veículos sempre respeitam a preferência de pedestres nas travessias sinalizadas, como faixas de segurança. VISSIM/Aimsun: veículos sempre respeitam a preferência na travessia, independentemente de outros fatores locais.	Diversos fatores influenciam a decisão dos motoristas sobre dar preferência, como idade e sexo do motorista, tipo de veículo, existência de veículos dando preferência na travessia e a posição do veículo em um pelotão. Em situações reais, a preferência não é sempre respeitada.
Decisão sobre ignorar o semáforo	Pedestres sempre obedecem ao semáforo. VISSIM: 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.	Na prática, a decisão sobre ignorar semáforos é influenciada pelas condições da travessia. A adoção de um percentual fixo dos pedestres desobedientes pode ser adequada para condições específicas, mas pode produzir erros expressivos com a alteração nas condições de tráfego.

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 normalmente para representar a aceitação de brechas dos pedestres e veículos dando preferência em faixas de segurança incorporam variáveis que não são usualmente considerados explicitamente nos modelos de simulação

Os simuladores de tráfego avaliados incorporam 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 são determinísticos e consideram que pedestres e veículos são 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. Estas restrições, entretanto, têm sido superadas a cada atualização dos simuladores,

que estão investindo em modelos que permitam avaliar projetos de gerenciamento de tráfego considerando os pedestres, além dos modais de transporte tradicionalmente analisados.

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, 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.
- Blue, V., e J. Adler (1999) Cellular automata microsimulation of bidirectional pedestrian flows, *Research Board 78nd 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 ninth 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. Benekahal, 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^a 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.