

ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE COMPORTAMENTOS DE PEDESTRES EM MOMENTO DE TRAVESSIA

Bruno Rocha Werberich

LASTRAN - Laboratório de Sistemas de Transportes - Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS – Av. Osvaldo Aranha, 99, Porto Alegre, Brasil.
bruno.rwe@gmail.com

Carlos Oliva Pretto

LASTRAN - Laboratório de Sistemas de Transportes - Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS – Av. Osvaldo Aranha, 99, Porto Alegre, Brasil.
cpretto@gmail.com

Helena Beatriz Bettella Cybis

LASTRAN - Laboratório de Sistemas de Transportes - Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS – Av. Osvaldo Aranha, 99, Porto Alegre, Brasil.
helenabc@producao.ufrgs.br

RESUMO

A representação da travessia de pedestres nos modelos de simulação tradicionais apresenta ainda limitações que podem impactar nos resultados gerados pelos simuladores. Este trabalho enumera diversos comportamentos de pedestres decorrentes da interação com veículos, no momento da travessia, que geralmente não estão presentes nos simuladores. Uma vez identificados estes comportamentos, uma pesquisa foi realizada com usuários do sistema viário, com idades entre 22 e 60 anos, para avaliar o quanto estes comportamentos são frequentes e importantes na estimativa de tempos de viagem dos pedestres. O comportamento indicado pelos entrevistados como mais impactante nos tempos de viagem foi o de “busca por brecha em caminhada”, onde o pedestre percorre trechos lateralmente à via, enquanto observa possíveis brechas na corrente de tráfego para realizar sua travessia. O referido comportamento foi então modelado e agregado a um modelo de simulação de pedestres. Diversas simulações foram executadas com e sem o novo comportamento modelado. Uma análise fatorial foi realizada para identificar a influência do comportamento modelado nos tempos de viagens. Os resultados mostraram que a inclusão do novo comportamento provoca redução significativa dos tempos médios de viagem dos pedestres, e que a simulação de comportamento dos pedestres pode ser mais condizente com o comportamento real de pedestres em diversos ambientes urbanos.

PALAVRAS-CHAVE: Comportamento de Pedestres, Travessia de Pedestres, Simulação de Pedestres.

1. INTRODUÇÃO

Na maioria das cidades de médio e grande porte, o predomínio do automóvel na circulação viária é considerado um problema. De uma maneira geral, o excesso de automóveis prejudica o meio ambiente, a saúde e as condições de segurança da circulação. Com isso, reduzir os volumes de tráfego e incentivar meios de transportes alternativos ao automóvel têm sido uma busca constante. Dessa forma, surge a demanda por modelos de microssimulação que permitam análises dos diferentes modos de transportes com um adequado nível de detalhamento. Atualmente, os modelos de microssimulação utilizados para simular veículos estão plenamente consolidados, porém a inclusão de pedestres nesses modelos mostra-se um desafio complexo.

Entre os vários modos de transporte, o modo a pé é provavelmente o mais natural. Contudo, sob o ponto de vista da engenharia de transportes, esse modo é considerado o mais complexo de ser modelado. Isso porque, contrariamente aos outros modos de viagem, no modo a pé o pedestre não está associado a qualquer veículo. Além disso, a infraestrutura de deslocamento é muito heterogênea, envolvendo calçadas, cruzamentos, prédios, lojas, praças, etc.

Na literatura, como em Xiaoping et al (2009), estão disponíveis vários tipos de modelos de comportamento de pedestres, utilizados para avaliar as possibilidades de gestão das infraestruturas urbanas, principalmente as destinadas à circulação de pedestres. Entre esses modelos, os mais encontrados na literatura são os de planejamento de evacuação de edifícios, os modelos que consideram multidões e simulações de congestionamentos de pedestres, causados pelo intenso fluxo de pedestres em movimentos conflitantes.

Karamouzas et al (2012) apresenta um estudo sobre a percepção de pedestres em espaços compartilhados com veículos. Os autores concluíram que em espaços compartilhados, devido à grande interação entre pedestres e veículos, as condições do local (luminosidade, baixo tráfego de veículos, presença de outros pedestres, entre outros) influenciam diretamente no nível de conforto dos pedestres.

O fluxo intenso de pedestres e os atrasos originados desse conflito devem ser considerados em estudos multimodais, onde pedestres e veículos dividem espaço no ambiente urbano. Desse modo, o estudo do comportamento individual do pedestre é importante na identificação das variáveis que deverão ser consideradas no processo de modelagem, ainda mais nos processos que envolvem interação entre pedestres e veículos, como na travessia. Nos momentos de travessia, o pedestre toma suas decisões sob influência de vários aspectos que devem ser considerados para representar os tempos de viagem mais realistas.

Existem diferentes níveis de interação entre veículos e pedestres em um ambiente urbano. Estes níveis foram classificados por Meschini e Gentile (2009) em ordem crescente de complexidade:

- interação normal, onde ocorre em um cenário no qual os pedestres usam apenas calçadas e realizam cruzamentos em semáforos ou pontos determinados de travessia. Neste cenário, não ocorre interação longitudinal entre veículos e pedestres. A interação transversal ocorre de forma regulamentada por semáforo ou por faixa de pedestre com prioridade ao pedestre a priori;

- interação controlada: ocorre durante eventos especiais, geralmente com um número não muito elevado de pedestres. É possível identificar corredores destinados aos pedestres, porém sem interação longitudinal com as faixas de veículos. É possível assumir que a interação não ocorre longitudinalmente; a interação transversal pode ocorrer em vários pontos da via de veículos devido ao elevado número de pedestres;
- interação aleatória: ocorre durante um evento especial e/ou um cenário de evacuação. Nesse cenário, embora os pedestres devam permanecer nas calçadas, eles podem de forma aleatória e descontínua ocupar parte da faixa de veículos, geralmente ao lado das calçadas, causando uma espécie de "atrito longitudinal" com os fluxos de carro. Este fenômeno leva, basicamente, a uma perda de capacidade de circulação de pedestres e veículos, devido a um comportamento parcialmente caótico dos pedestres;
- interação caótica concordante: ocorre na presença de situações de evacuação onde não é possível separar os pedestres e o fluxo de automóveis, que são completamente misturados. No entanto, em cada faixa, pedestres e veículos tendem a fluir na mesma direção;
- interação caótica conflitante: é o pior caso, ocorrendo em presença de situações de evacuação onde não é possível separar pedestres e os fluxos de veículo, e os pedestres assumem qualquer direção, independente da direção das faixas dos veículos.

A maioria dos modelos tradicionais que incluem a interação entre pedestres e veículos consideram o primeiro nível citado - interação normal. Porém, existem comportamentos frequentes de pedestres frente à situação de travessia, que devem ser considerados pelos modelos, para aumentar a qualidade dos estudos. Dentre eles, é possível citar as diferenças de temperamento, assumindo a existência de diferentes perfis de usuários, como pedestres ousados e oportunistas, e as diferenças de estratégias no momento de travessia.

Papadimitriou (2012) desenvolveu e testou um modelo conceitual de travessia de pedestres durante viagens em ambiente urbano. O modelo inclui uma representação topológica das vias urbanas, as viagens de pedestres associadas a essas vias e um conjunto de critérios para contar e classificar as travessias. Os resultados do modelo revelaram uma série de fatores que influenciam a travessia de pedestres em vias urbanas. Travessias de meio de quadra são mais propensas a ocorrer durante viagens mais longas. Os pedestres que andam em uma velocidade mais elevada tendem a adiar a travessia e realizá-la no meio de quadra. O número de vias, o fluxo de tráfego elevado e a presença de sinalização aumentam a probabilidade de travessia na esquina.

O pedestre pode adotar estratégias distintas para atravessar uma via de veículos. Variáveis como o número de faixas na via, o perfil de velocidade dos veículos, o mobiliário urbano, a presença ou não de faixa de segurança são fatores que influenciam nessa estratégia. Entre as diferentes estratégias, pode-se citar o percurso de forma longitudinal à faixa de veículos, a fim de encontrar uma brecha para a travessia durante a caminhada, busca por brechas sucessivas em vias com várias faixas de veículos, travessia em diagonal à via, entre outras.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivos:

- Identificar as lacunas da simulação de pedestre. O trabalho descreve comportamentos de pedestres mal representados pelos modelos de simulação, isto é, comportamentos de pedestres em travessias observados em condições reais, que não são apropriadamente representados nos modelos de simulação.
- Hierarquizar os comportamentos identificados em função do seu grau de impacto no desempenho operacional dos pedestres, em particular na estimativa de atrasos nos tempos de viagem. Para isso, um conjunto de entrevistas foi realizado com os usuários da rede de transportes sobre suas percepções a respeito dos comportamentos.
- Apresentar a inclusão do comportamento de maior prioridade em um modelo de simulação de pedestres. Simulações foram realizadas para comparar os resultados do modelo com e sem a inclusão do novo comportamento, através de uma análise estatística. Foi realizado um projeto de experimento para determinar a influência do comportamento nos resultados obtidos.

2. LIMITAÇÕES DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO TRADICIONAIS

A complexidade e o detalhamento da estrutura de simulação de pedestres variam de acordo com os objetivos de cada estudo. Os processos de escolha de rota e do comportamento dos pedestres em ambiente de travessia são relatados separadamente na literatura. Um resumo sobre o tema pode ser encontrado em Papadimitriou et al (2009).

Jacobsen (2011) levanta diversas limitações dos simuladores de pedestres comerciais, que podem impactar nos resultados gerados pelos modelos. Este capítulo reúne alguns comportamentos de pedestres observados em condições reais, que não são apropriadamente representados nos modelos de simulação. Os comportamentos foram classificados de acordo com o tipo de travessia.

2.1 Travessia SemafORIZADA

A travessia semaforizada é controlada por semáforos, que concedem ora a prioridade para os veículos, ora para os pedestres. No entanto, em alguns casos, os conflitos entre pedestres e veículos ainda podem ocorrer.

Em situações de travessia, a identificação dos diferentes tipos de pedestres e dos respectivos comportamentos é importante para viabilizar uma modelagem realista. Sisiopiku e Akin (2003) apresentam os resultados de uma pesquisa sobre a obediência dos pedestres em cruzamentos sinalizados em um campus universitário. O estudo foi elaborado para obter informações sobre o comportamento dos pedestres frente à travessias semaforizadas — obediente ou oportunista— e em relação ao local de travessia — prudente ou imprudente. Os movimentos dos pedestres foram observados ao longo de um percurso de 1 km do centro de uma avenida ao lado do campus de uma Universidade. O local inclui vários tipos de cruzamentos, como meio da quadra, cruzamentos não-sinalizados e sinalizados. Os resultados das análises indicaram que existe uma forte correlação entre a presença de algum tipo de controle de tráfego e de pedestres obedientes. De uma maneira geral os pedestres identificaram e utilizaram as zonas de travessia corretamente, porém a grande maioria dos pedestres não respeitou o semáforo.

Na mesma linha de pesquisa, Ariotti (2006) e Ariotti e Cybis (2005) buscaram identificar as características que influenciam o comportamento de pedestres em travessias semaforizadas, através de uma abordagem qualitativa. Para tanto, a técnica de grupos focados foi utilizada, onde os participantes apresentaram suas experiências e percepções sobre diversas situações reais de travessia observadas. Nesse trabalho, o comportamento de pedestres em travessia semaforizadas também é classificado em prudente e imprudente, segundo a conformidade espacial. O trabalho evidencia que um mesmo pedestre, ao longo de sua vida, pode assumir os diferentes comportamentos, de acordo com as condições a que está exposto, identificando os fatores que influenciam as tendências ou mudanças desse comportamento.

Cambon et al (2009) propõe que o comportamento dos pedestres no momento da travessia não é apenas relacionado com a obediência ou não de regras de circulação, mas também relacionado com o meio ambiente da travessia. Rosenbloom (2009) observou, em um estudo de comportamento, que pessoas do sexo masculino atravessam a faixa com o sinal de pedestres fechado em maior número do que as do sexo feminino.

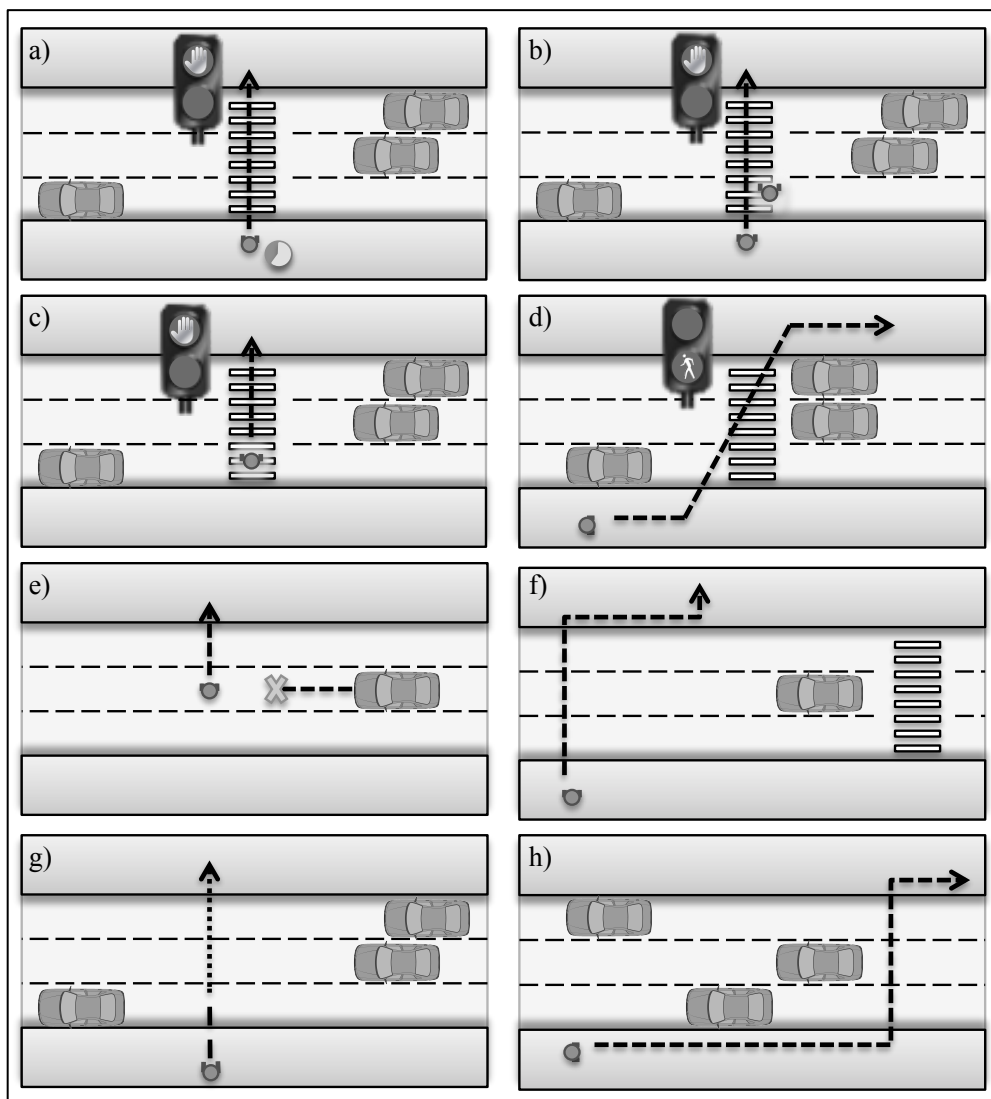


Figura 1 – Comportamentos do Pedestre

2.1.1 Pedestre oportunista

Liu et al (2000) define o pedestre obediente como aquele que só realiza a travessia no sinal verde. O pedestre oportunista é definido como aquele que aguarda um determinado período de tempo e, esgotando-se este período, torna-se impaciente e realiza a travessia no sinal vermelho, buscando por brechas entre os veículos, conforme a Figura 1 (a).

2.1.2 Pedestre influenciado

Yang et al (2006) avaliou através de questionários a influência exercida por pedestres oportunistas sobre pedestres obedientes na cidade de Xian em travessia semaforizada no período de sinal vermelho. O resultado da pesquisa mostrou que 69% dos pedestres obedientes podem se tornar oportunistas, uma vez que outros pedestres desrespeitem o sinal, conforme a Figura 1 (b).

2.1.3 Busca por brechas sucessivas

Yang et al (2006) considera que em travessias de múltiplas faixas o pedestre avalia brechas somente na faixa adjacente à sua posição, uma por uma. O pedestre não sabe o que acontecerá na próxima faixa até alcançá-la, conforme a Figura 1 (c). Liu et al (2000) descreve um comportamento semelhante para travessias de vias de sentido duplo, onde o pedestre também avalia uma corrente de tráfego por vez, independente de existir refúgio central ou não.

2.1.4 Travessia em diagonal

Jacobsen (2011) observou a trajetória dos pedestres em travessia, constatando que os pedestres se utilizam de uma área maior do que a delimitada pela faixa de segurança, como na Figura 1 (d). Este comportamento é relacionado à (i) existência de barreiras físicas, (ii) condições do tráfego, (iii) o momento em que o pedestre chega à travessia, podendo desempenhar este comportamento para aproveitar o final do sinal verde, e (iv) a origem e destino do pedestre, uma vez que a travessia em diagonal pode otimizar sua rota.

2.2 Travessia Fora da Faixa de Segurança

Fora da faixa de segurança o pedestre não tem prioridade sobre o veículo, contudo podem arriscar-se forçando a parada ou redução de velocidade de veículos, avaliando brechas na corrente de tráfego. Um pedestre normalmente atravessa fora da faixa de segurança por estar muito distante de alguma, buscando otimizar seu tempo e sua rota, podendo apresentar os seguintes comportamentos:

2.2.1 Pedestre ousado

Helbing e Treiber (2005) descreve o pedestre ousado como o que inicia a travessia, considerando que o veículo em aproximação consiga desacelerar mantendo determinada distância de segurança do pedestre. Pedestres com este comportamento podem forçar a parada ou redução de velocidade do veículo, conforme a Figura 1 (e).

2.2.2 Travessia fora da faixa de segurança em função da rota

Pretto et al (2011) considera que os pedestres escolhem o local de travessia de forma a otimizar sua rota, ponderando o custo de atravessar na faixa de segurança e fora dela. No entanto, deslocamentos realizados sobre a faixa de segurança representam um custo menor ao pedestre do que deslocamentos em outras áreas da via. Godara et al (2007) descreve como um campo de força exercido pela faixa de segurança sua atração sobre o pedestre. Uma vez próximo da faixa de

segurança, o pedestre é atraído, caso contrário realiza a travessia no local mais conveniente. Este comportamento é exemplificado na Figura 1 (f).

2.2.3 Aumento da velocidade do pedestre

Velde et al (2005) estudou o comportamento adaptativo de pedestres de diferentes grupos de idade, constatando que em todos os grupos, os pedestres aumentam sua velocidade de travessia se perceberem uma redução no tempo disponível para sua travessia, compensando uma situação de risco, conforme a Figura 1 (g).

2.2.4 Busca por brecha em caminhada

O pedestre pode caminhar ao longo da via observando possíveis brechas para a travessia, de forma a otimizar o tempo de conclusão de sua rota, conforme a Figura 1 (h).

2.3 Travessia na faixa de segurança

A travessia na faixa de segurança é caracterizada pela prioridade dos pedestres. Neste tipo de travessia alguns motoristas podem desrespeitar tal prioridade, levando os pedestres a desenvolver comportamentos semelhantes aos observados fora da faixa de segurança.

3. METODOLOGIA DE PRIORIZAÇÃO DOS COMPORTAMENTOS DO PEDESTRE

O desenvolvimento dos modelos de simulação deve ser adequado ao seu propósito, não sendo possível englobar todas as atividades, decisões, peculiaridades e possíveis situações que podem ser identificadas em travessias de pedestres. A inclusão de variáveis pouco conhecidas ou pouco expressivas em representar o comportamento esperado dos pedestres pode prejudicar a robustez e o desempenho do modelo. Entretanto, negligenciar aspectos importantes torna o estudo fraco e pouco representativo. Conhecidos alguns dos comportamentos de pedestres não corretamente representados em simuladores tradicionais, pretende-se classificar estes comportamentos em ordem de importância, identificando quais deles são mais significativos na estimativa de tempos de atraso. Os comportamentos mais significativos devem ter prioridade em ser agregados a simuladores.

Para esta avaliação foi realizada uma pesquisa com 30 pessoas com idades entre 22 e 60 anos. A pesquisa foi montada de forma a apresentar aos entrevistados os comportamentos não modelados pelos simuladores tradicionais, descritos na seção anterior, e extrair a percepção deles sobre a frequência com que realizam estes comportamentos e o impacto gerado em seus tempos de viagem.

Um questionário contendo o desenho esquemático de cada um dos comportamentos descritos foi apresentado para os entrevistados. Para cada um destes comportamentos o entrevistado deveria preencher dois campos. O primeiro campo denominado “Frequência de realização do comportamento” e o segundo denominado “Impacto gerado no tempo de viagem”. Ambos os campos deveriam ser preenchidos utilizando a escala de valores 1, 3, 9. Na escala utilizada, o valor “1” representa baixa frequência ou baixo impacto, “3” representa média frequência ou médio impacto e “9” representa alta frequência ou alto impacto.

As entrevistas aconteceram de forma presencial, onde o entrevistador auxiliou os entrevistados na interpretação dos desenhos esquemáticos de cada comportamento de forma a reduzir respostas equivocadas por dificuldade de compreensão. Durante a pesquisa, grande parte dos entrevistados

relatou situações cotidianas onde observam ou realizam tais comportamentos, demonstrando interesse e compreensão sobre o tema.

Com o resultado da pesquisa, uma matriz de priorização foi elaborada, onde é possível visualizar quais comportamentos foram vistos pelos entrevistados com uma maior pontuação de frequência e de impacto. A pontuação total é a soma das pontuações de frequência e impacto. A Tabela 1 mostra a classificação de cada um dos comportamentos.

Tabela 1 – Matriz de Priorização dos Comportamentos

	Frequência	Impacto	Pontuação Total
Busca por brecha em caminhada	7,500	6,375	13,875
Travessia fora da faixa em função da rota	7,125	6,625	13,750
Aumento de velocidade na travessia	5,250	4,625	9,875
Travessia em diagonal	4,125	4,875	9,000
Pedestre oportunista	3,375	2,875	6,250
Busca por brechas sucessivas	3,000	3,125	6,125
Pedestre influenciado	3,250	1,750	5,000
Pedestre ousado	1,250	1,875	3,125

Na entrevista realizada, o comportamento de busca por brecha em caminhada foi o mais pontuado. Realizando este comportamento, o pedestre evita ficar parado aguardando por uma brecha na corrente de tráfego e utiliza este tempo de forma a reduzir sua distância ao destino. O segundo comportamento foi o de travessia fora da faixa de segurança, onde o pedestre pode reduzir sua trajetória, não necessitando caminhar até alguma faixa de segurança, contudo, irá atravessar em um local da via sem prioridade. O terceiro comportamento foi o de aumento da velocidade do pedestre, onde, caso realize esse comportamento, o pedestre pode aceitar brechas menores na corrente de tráfego, facilitando a travessia.

4. MODELAGEM DOS PEDESTRES

O modelo de pedestres desenvolvido neste artigo é um modelo multiagente, onde a simulação ocorre em um ambiente com 2 dimensões. Os agentes (pedestres e veículos) são representados por círculos ou conjunto de círculos para facilitar a detecção de colisão. Uma melhor descrição do modelo utilizado pode ser encontrada em Pretto et al (2008), Pretto e Cybis (2010) e Pretto et al (2011).

A modelagem dos pedestres irá incluir o comportamento de busca por brecha em caminhada, por ter sido o mais pontuado no processo de priorização. O comportamento dos pedestres foi classificado em cinco comportamentos, onde para cada um destes comportamentos, um processo decisório distinto foi modelado. Os comportamentos modelados são os seguintes:

- Caminhando
- Busca Por Brecha em Caminhada
- Aproximando da Faixa
- Esperando
- Atravessando

4.1 Caminhando

O comportamento “Caminhando” define a estratégia do pedestre quando esse se encontra na calçada e não está em processo de aproximação de uma via para atravessar ou esperando uma brecha.

Treuille et al (2006) apresentaram uma abordagem de campo potencial dinâmico, que unifica o processo de navegação global e o processo de anticolisão local em uma única estrutura. Uma abordagem alternativa consiste em separar o planejamento global da prevenção de colisões (Lamarche & Donikian (2004); Geraerts & Overmars (2007); Sud et al 2007; Shao & Terzopoulos (2007)). Essas abordagens utilizam métodos baseados em grafo para direcionar o movimento global do agente, enquanto seu comportamento local é governado por algum tipo abordagem de campos de força, (Reynolds (1999); Helbing & Molnar (1995)).

Da mesma forma, no modelo utilizado neste trabalho, o pedestre busca seguir uma rota definida por um algoritmo de minimização de caminhos em grafo (Dijkstra, 1959), considerando um ponto de origem e um ponto de destino ao mesmo tempo que está sujeito à ação de um campo de força potencial. Conforme Löhner (2010), nos modelos de força newtoniana a negociação de espaço entre pedestre é regido por um processo matemático inspirado no conceito de campo de força.

Neste modelo, cada ponto do espaço cartesiano possui uma resultante de forças oriunda da movimentação dos pedestres. Cada ponto do espaço cartesiano sofre a ação do somatório de forças que os pedestres geram, formando, assim, um campo de força que é um dos parâmetros de escolha da direção dos pedestres.

4.1.1 Detecção do campo de força

Na escolha de seu próximo passo, o pedestre verifica o valor associado a Pe , que representa a relação entre o campo de força resultante e o ponto de menor distância ao objetivo.

$$Pe = Fr\beta + \gamma Md \quad (1)$$

onde:

Fr é o campo de força resultante;

Md representa o ponto de menor distância ao objetivo do pedestre. Representa a distância Euclidiana entre o possível ponto do próximo passo e o destino do pedestre;

β e γ são coeficientes de ajustes.

Dentre os pontos avaliados pelo pedestre, ele escolhe o de menor valor. É importante salientar que os termos força e campo de força são usados apenas como nomenclatura do processo, sem analogia conceitual com o significado físico.

Considerando o vetor W como o vetor velocidade de um pedestre, para o cálculo da força (Fr) de um ponto no espaço qualquer gerada por esse pedestre, considera-se um vetor unitário com início

na posição do pedestre e na direção do ponto de cálculo da Fr. A intensidade da força será proporcional ao coeficiente α , dado em função do ângulo θ formado entre o vetor unitário (V) com o vetor velocidade (W). A intensidade da força é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre o ponto de cálculo da força Fr(x,y) e a posição do pedestre. A força resultante (Fr), em um ponto qualquer (x,y) é descrita pelo somatório de forças oriundas de cada pedestre, Fpj, presentes na simulação, como segue:

$$Fr(x_r, y_r) = Fp_1 + Fp_2 + \dots = \sum_{j=1}^n Fp_j \quad (2)$$

Sendo que (Fpj), de um pedestre j, é calculada através da equação:

$$Fpj = \frac{|Wpj|\alpha pj}{d_{(pj,Fr)}^2} \quad (3)$$

Onde α , para um pedestre pj, é descrito pela seguinte equação:

$$\alpha_{pj} = 0,5 + \frac{\cos \theta}{2} \quad (4)$$

e θ , para cada pedestre pj, é descrito pela equação:

$$\theta = \arccos \frac{W_{pj} \cdot V_{pj}}{|W_{pj}| |V_{pj}|} \quad (5)$$

Desta forma, a força em uma coordenada (x,y) qualquer do espaço será resultado de um somatório das forças de cada um dos pedestres, sendo que um pedestre exerce força sobre essa coordenada, em função do ângulo θ e do módulo de seu vetor velocidade W.

Utilizou-se uma abordagem de escolha discreta para a escolha do próximo passo. Isso foi feito com o objetivo de diminuir o custo computacional. Os modelos de escolha discreta são baseados em uma função teórica de utilidade, onde um tomador de decisão escolhe uma opção entre um conjunto de alternativas. Um grau de utilidade para cada alternativa é assumido, e o tomador de decisão seleciona a alternativa correspondente a maior utilidade. Neste modelo, a maior utilidade é representada pela alternativa que contenha o menor valor do equilíbrio entre o campo de força percebido pelo pedestre e a distância ao seu objetivo.

O pedestre seleciona a melhor entre oito opções de próximo passo. As oito opções correspondem aos 360° divididos por 45°. O pedestre calcula as coordenadas do próximo passo utilizando a posição atual, o módulo e o ângulo; um cálculo para cada uma das 8 opções. Com essa nova coordenada, ele avalia a disponibilidade de espaço e o valor do campo de força do local, desconsiderando a própria influência no cálculo do campo de força.

Caso o pedestre esteja caminhando e atinja determinada distância de uma via que pretenda atravessar, assume o comportamento “Aproximando da faixa”. A Figura 2 mostra um pedestre

que inicia seu deslocamento no ponto 1 em direção ao seu destino, o ponto 4. Ao atingir determinada distância da via, assume o comportamento “Aproximando da faixa”.

4.2 Aproximando da faixa

Nesse comportamento o pedestre deixa de seguir a sua rota e assume o objetivo de minimizar sua distância ao início da faixa de veículos, respeitando as regras de escolha do próximo passo descritas no comportamento “Caminhando”. Este comportamento é mantido até que o pedestre chegue ao limite entre a calçada e a faixa de veículos, situação representada pelo ponto 2 da Figura 2. Neste ponto, a abordagem tradicional de simulação é que o pedestre permaneça parado aguardando por uma brecha na corrente de tráfego para realizar a travessia, neste caso, assumindo o comportamento “Esperando”. Este modelo irá incluir a possibilidade de o pedestre assumir neste ponto o comportamento de “Busca por brecha em caminhada”.

4.3 Esperando

Nesse comportamento, o pedestre espera uma brecha válida para realizar a travessia. Caso perceba uma brecha aceitável, assume o comportamento “Atravessando”.

4.3.1 Avaliação de brechas

O pedestre só inicia a travessia caso seja possível atravessar todas as faixas da via de uma única vez. O modelo de avaliação de brecha pressupõe uma via paralela ao eixo x das coordenadas geográficas do ambiente de simulação, com a origem do sistema de coordenada no vértice inferior esquerdo. O fluxo de veículos acontece da esquerda para a direita com velocidade constante.

Para cada uma das pistas o pedestre calcula T_r e T_c , que representam, respectivamente, o tempo necessário para alcançar o início da faixa e o tempo necessário para atravessar a faixa, considerando a velocidade de deslocamento do pedestre e as distâncias envolvidas. A brecha em uma faixa da via só é aceita caso nenhum dos veículos da faixa satisfaça ambas as condições descritas nas inequações 6 e 7.

$$V_{px} < P_{px} - (V_s \cdot T_r) + V_l \quad (6)$$

$$V_{px} > P_{px} - (V_s \cdot (T_r + T_c + P_{sg})) \quad (7)$$

Onde:

V_{px} é a coordenada x do veículo;

P_{px} é a coordenada x do pedestre;

V_s é a velocidade do veículo;

V_l é o comprimento do veículo;

P_{sg} é o intervalo de tempo de segurança da travessia, o pedestre só aceita uma brecha caso, ao final da travessia, ainda tenha este valor de tempo de sobra antes da colisão com o veículo.

Veículos que satisfaçam a inequação 6, são os veículos que estarão se aproximando do pedestre no instante em que ele alcançar o início de determinada faixa da via. Dentre estes veículos, os que satisfizerem a inequação 7, são os veículos que colidirão antes que o pedestre consiga concluir a travessia desta faixa, considerando as margens de segurança.

4.4 Atravessando

Nesse comportamento o pedestre define como objetivo parcial um ponto perpendicular à sua posição atual (borda da faixa de veículos) no outro lado das faixas, representado na Figura 2 pelo ponto 3, e atravessa a faixa aproveitando a brecha encontrada. Nesse momento de travessia, o pedestre fica sujeito ao processo de escolha dos próximos passos descritos em “Caminhando”. Ao concluir a travessia, o pedestre recalcula sua rota até seu destino assumindo novamente o comportamento “Caminhando”.

4.5 Busca por brecha em caminhada

Nesse comportamento o pedestre projeta o destino final de sua viagem em seu lado da via, projeção representada pelo ponto 5 da Figura 2. Este ponto passa a ser um destino parcial de sua rota. O pedestre passa, então, a buscar este ponto sujeito ao processo de escolha dos próximos passos descrito em “Caminhando”. A cada passo o pedestre avalia a existência de uma brecha aceitável para sua travessia e, caso identifique uma brecha aceitável, assume o comportamento “Aproximando Faixa”, como no ponto 6 da Figura 2.

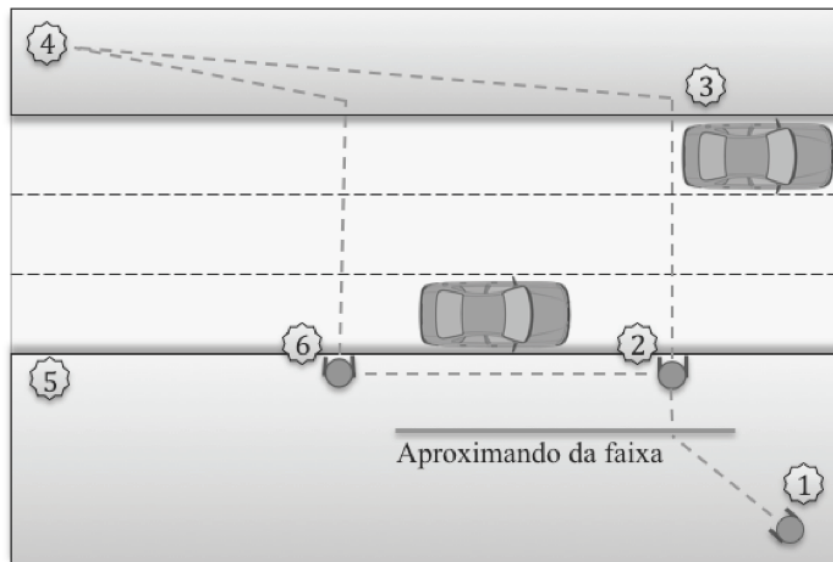


Figura 2 – Modelo de Comportamento do Pedestre

5. EXPERIMENTO

Uma vez modelado o comportamento do pedestre, pretende-se simular o efeito do comportamento de busca por brecha em caminhada nos tempos de viagem.

5.1 Cenário de simulação

As simulações do modelo são realizadas como visto na Figura 3, onde quarenta pedestres iniciam sua viagem no canto inferior direito do cenário, representados por círculos, e têm seu destino no canto superior esquerdo. Para alcançar seu destino, os pedestres devem atravessar duas faixas de

veículos, cujo sentido de tráfego é da esquerda para a direita, o comprimento da via é de 100 metros.

Os pedestres diferenciam-se entre si pela sua velocidade de deslocamento e pelo seu intervalo de tempo de segurança na avaliação de brechas, P_{sg} , contudo, são exatamente os mesmos em todas as execuções da simulação. Todos os veículos descrevem velocidade constante de 50 km/h, já o headway médio dos veículos é um parâmetro de configuração do cenário.

Nas simulações realizadas a velocidade média dos pedestres é de 1,2 m/s com desvio padrão de 0,2 m/s, o valor de P_{sg} utilizado foi de 1s, com desvio padrão de 0,2s. O desvio padrão utilizado para a distribuição dos valores dos headways dos veículos foi de 0,72 s. Para todas estas grandezas, utilizou-se a distribuição normal.

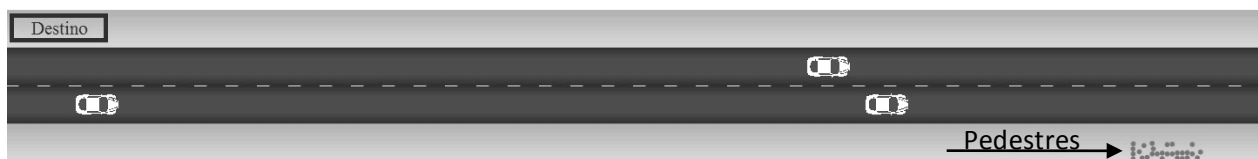


Figura 3 – Cenário de Simulação

5.2 Resultados

A Tabela 2 representa o resultado de 180 simulações realizadas em 18 cenários diferentes. A variável de resposta de cada uma das simulações é o tempo médio de viagem dos 40 pedestres simulados, expressa em segundos. Os cenários de simulação variam de acordo com os seguintes fatores controláveis:

- Fator A: comportamento dos pedestres, com dois níveis: A1 (pedestres permanecendo parados enquanto aguardam por brechas na corrente de veículos) e A2 (pedestres realizando busca por brechas em caminhada).
- Fator B: headway médio entre veículos, com nove níveis: B1 (2,88s); B2 (3,24s); B3 (3,60s); B4 (3,96s); B5 (4,32s); B6 (4,68s); B7 (5,04s); B8 (5,40s) e B9 (5,75s).

Quaisquer outros fatores envolvidos foram mantidos constantes em todas as simulações, incluindo as características dos pedestres como local de início e de destino, velocidade desejada e P_{sg} .

Para investigar o efeito do novo comportamento incluído no modelo sobre os valores de tempo de viagem dos pedestres, realizou-se um projeto fatorial com os fatores A e B. A Tabela 3 representa a análise de variância (ANOVA) dos dados do experimento. O valor de F tabelado foi escolhido para um nível de significância de 95%.

Pode-se afirmar que ambos os fatores A e B são significativos a um nível de significância de 95% no valor da variável de resposta, o tempo de viagem dos pedestres. A interação entre os fatores A e B não se mostrou significativa, ou seja, o efeito de A não depende no nível de B. A Figura 4 apresenta graficamente os dados obtidos sobre o efeito dos fatores estudados. A Tabela 4 mostra, como exemplo, os tempos médios de viagem dos 40 pedestres simulados para os níveis de headway médio dos veículos B1, B2 e B3.

Tabela 2 – Resultados das Simulações

A	B									Média
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	
A1	189,44	135,59	130,81	102,64	80,21	81,38	82,84	86,81	81,26	110,71
	151,44	130,35	106,86	127,53	95,08	82,85	83,66	84,03	79,84	
	274,02	180,73	120,21	103,63	91,35	89,27	81,33	88,56	80,54	
	226,84	129,12	96,16	95,00	90,78	93,10	80,63	84,39	81,24	
	210,90	105,21	92,30	96,96	83,26	86,00	84,72	80,78	85,67	
	193,13	139,31	81,99	93,35	89,45	85,09	81,96	86,90	82,69	
	271,66	159,77	110,00	115,27	81,31	80,35	84,18	84,44	81,41	
	231,92	123,13	169,54	92,37	86,21	79,94	86,98	81,53	80,75	
	196,56	128,75	106,09	88,85	85,36	90,91	82,70	96,30	79,92	
	256,79	164,18	102,62	93,63	88,31	79,83	95,41	81,05	86,92	
Média	220,27	139,61	111,66	100,92	87,13	84,87	84,44	85,48	82,02	
Desvio P.	39,60	22,33	24,55	12,04	4,74	4,85	4,26	4,62	2,41	
A2	207,81	150,31	132,53	83,07	78,62	80,19	80,56	81,28	80,68	101,82
	200,39	130,03	87,18	80,94	80,14	81,06	79,92	80,98	79,43	
	80,18	97,97	82,23	84,64	81,38	80,49	78,49	81,08	81,29	
	217,49	134,31	81,21	79,93	85,93	80,69	81,84	81,13	79,78	
	271,06	96,46	106,31	83,96	81,42	81,87	79,87	80,84	79,24	
	224,88	116,82	118,58	80,17	84,42	80,53	79,43	80,61	79,74	
	226,17	141,96	102,82	81,94	80,65	79,04	79,17	80,16	79,49	
	247,53	142,58	82,71	81,32	80,40	80,05	78,89	79,69	80,24	
	209,60	118,26	83,88	90,02	80,71	80,39	81,26	80,69	80,38	
	150,49	114,50	149,53	80,66	86,42	80,43	81,20	79,54	79,58	
Média	203,56	124,32	102,70	82,66	82,01	80,47	80,06	80,60	79,98	
Desvio P.	53,49	18,59	24,09	3,03	2,63	0,72	1,12	0,61	0,65	

Tabela 3 – Análise de Variância (ANOVA)

	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tabelado	
A	3558,722927	1	3558,722927	9,543725141	3,899502291	Significativo
B	296287,0914	8	37035,88643	99,32223655	1,995962469	Significativo
AB	1538,368868	8	192,2961085	0,515696569	1,995962469	Não Significativo
ERRO	60407,55635	162	372,8861503			
TOTAL	361791,7396	179				

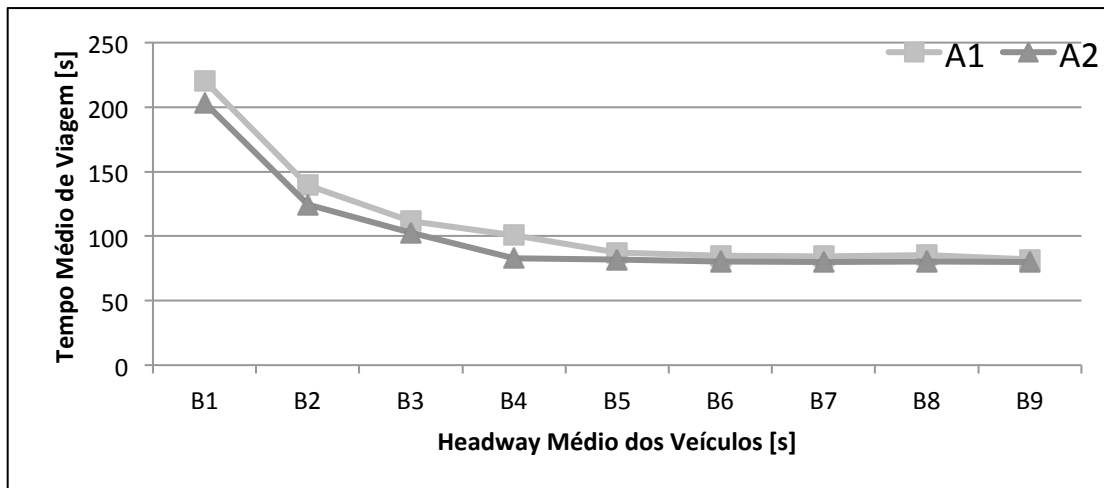
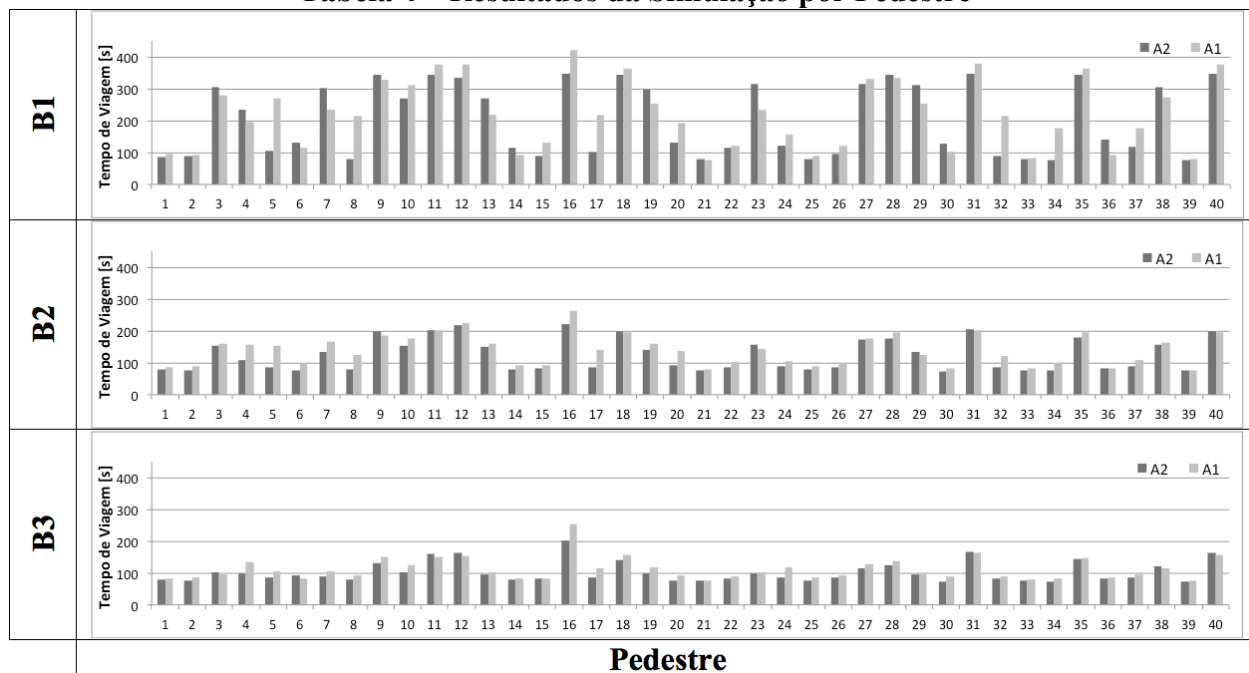


Figura 4 – Visualização Gráfica dos Resultados da Simulação

Tabela 4 – Resultados da Simulação por Pedestre



Na Tabela 2 pode-se observar que o fator A no nível A2 apresenta, em média, valores de tempo de viagem menores do que no nível A1 para todos os cenários simulados. Observa-se também que no nível A2, os resultados das simulações dentro de cada cenário, normalmente, apresentam desvio padrão menor do que no nível A1. Isso pode ser explicado pelo fato de que no nível A1 o pedestre pode demorar ou não para identificar uma brecha válida na corrente de veículos, gerando uma maior variabilidade nos resultados. Já no nível A2, este efeito é minimizado, uma vez que o pedestre ganha tempo se aproximando de seu destino enquanto aguarda por brechas, minimizando a variabilidade nos resultados. A exceção observada no nível B1, onde o desvio padrão dos resultados da simulação no nível A2 é superior ao nível A1, pode ser explicada pelo fato de que com este valor de headway médio entre os veículos, a travessia dos pedestres acaba

sendo bastante dificultada, fazendo com que os pedestres que realizam a “busca por brecha em caminhada” alcancem a posição em frente ao seu destino sem conseguir realizar a travessia. Os pedestres passam então, a desempenhar o comportamento tradicional de aguardar parado por uma brecha na corrente de tráfego.

7. CONCLUSÃO

A simulação de ambientes mistos entre veículos e pedestres possui ainda muitas possibilidades de melhoria. Este trabalho buscou enumerar alguns comportamentos de pedestres, decorrentes de sua interação com veículos, que não são representados adequadamente em simuladores tradicionais. Enumerados estes comportamentos, realizou-se uma pesquisa com usuários do sistema viário sobre sua percepção a respeito da influência destes comportamentos em seus tempos de viagem, priorizando-os em ordem de influência. Neste trabalho, o comportamento visto como mais influente foi agregado a um modelo de simulação de pedestres de forma a possibilitar avaliar seu efeito nos tempos de viagem.

Os comportamentos vistos na entrevista como mais influentes sobre os tempos de viagem dos pedestres foram, nesta ordem, os comportamentos de “busca por brecha em caminhada”, onde o pedestre percorre trechos lateralmente à via enquanto avalia possíveis brechas na corrente de tráfego para sua travessia; “travessia fora da faixa de segurança”, onde o pedestre realiza a travessia em locais mais convenientes em função de sua rota, ignorando a sinalização; e o comportamento de “aumento da velocidade do pedestre”, onde o pedestre aumenta sua velocidade no momento da travessia, possibilitando aceitar brechas menores.

A modelagem do comportamento “busca por brecha em caminhada” possibilitou a execução de diversas simulações. Neste experimento, 180 simulações foram executadas em 18 cenários diferentes, sendo estes cenários diferenciados por 9 níveis diferentes de valores de headway médio entre veículos e dois níveis, representando o pedestre com e sem o comportamento de “busca por brecha em caminhada”. Uma análise de variância (ANOVA) dos resultados da simulação comprova que ambas as variáveis, headway médio dos veículos e o comportamento do pedestre foram estatisticamente significativos na variável de resposta, tempo médio de viagem dos pedestres, a um nível de significância de 95%. A média dos resultados das simulações feitas sem o novo comportamento modelado foi de 110,71 segundos, já com o novo comportamento foi de 101,82 segundos, uma redução de tempo de 8,03% dos valores médios.

A inclusão de um novo comportamento no modelo de simulação do pedestre foi capaz de reduzir em 8,03% a média dos tempos de viagem, que podem ser mais condizentes com o comportamento real de pedestres em diversos ambientes urbanos, incluindo a maioria das cidades brasileiras.

Desta forma, conclui-se que a inclusão de novos comportamentos nos modelos de pedestres, principalmente nos momentos relacionados à travessia, são, não somente importantes para atribuir um maior realismo a simulação, como também acarretam num impacto significativo nos resultados gerados.

8. REFERÊNCIAS

Ariotti, P. (2006) Análise do padrão de comportamento de pedestres em travessias semaforizadas. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Ariotti, P., H. B. B. Cybis (2005) Modelo de análise do comportamento de pedestres em travessias semaforizadas. XIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, v. 2, p.1142-1153, Recife.

Cambon, L. B., C. Tijus, S. Poitrenaud, C. Leproux, J. Bergeron, J. P. Thouez (2009) Pedestrian crossing decision-making: A situational and behavioral approach, *Safety Science*, 47 (9) , pp. 1248-1253.

Dijkstra, E. W. (1959) A note on two problems in connection with graphs. *Numerische Mathematik*,v.1, p. 83–89.

Geraerts, R. and M. Overmars (2007) The Corridor Map Method: a general framework for real-time high-quality path planning. *Computer Animation and Virtual Worlds* 18, p. 107–119.

Godara, A., S. Lassarre, A. Banos (2007) Simulating Pedestrian-Vehicle Interaction in an Urban Network Using Cellular Automata and Multi-Agent Model.

Helbing, D. and P. Molnar (1995) Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E* 51, p. 4282–4286.

Helbing, D., R. Treiber (2005) Analytical investigation of oscillations in intersecting flows of pedestrian and vehicle traffic. *Physical Review E* 72, 046130.

Jacobsen, A. C. (2011) Microssimulação da travessia de pedestres, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Karamouzas, I., P. Heil, P. Beek, M. H. Overmars (2009) A Predictive Collision Avoidance Model for Pedestrian Simulation. *Motion in Games (MIG2009)*,v.5884, p.40–52, Netherlands.

Lamarche, F. And S. Donikian (2004) Crowd of Virtual Humans: a new approach for real time navigation in complex and structured environments. *Computer Graphics Forum* 23, p. 509–518.

Liu, R., J. P. Cruz da Silva, A. J. Maia Seco (2000) A bi-modal micro-simulation tool for the assessment of pedestrian delays and traffic management. *Proceedings of the ninth international association of travel behaviour research conference*, Gold Coast, Australia.

Löhner, R. (2010) On the modeling of pedestrian motion. *Applied Mathematical Modelling*, n.34, p.366-382.

Meschini, L. and G. GENTILE (2009) Simulation car-pedestrian interactions during mass events with DTA models: the case of Vancouver Winter Olympic Games. *SIDT 2009 International Conference*, Milan.

Papadimitriou, E. (2012) Theory and models of pedestrian crossing behaviour along urban trips. *Transportation Research Part F* 15 (2012) 75–94.

Papadimitriou, E., G. Yannis, J. Golias (2009) A critical assessment of pedestrian behaviour models, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, v.12. p. 242-255.

Pretto, C. O., P. Ariotti, H. B. B. Cybis (2008) Modeling Pedestrians Movement Regarding Road-Crossing Compliance. *ESM'2008. The 2008 European Simulation and Modeling Conference*, v.1, p.221-225, Le Havre.

Pretto, C. O. and H. B. B. Cybis (2010) Modeling Pedestrian movement on road-crossing environment. *12th World Conference on Transport Research*, Lisboa.

Pretto, C. O., A. C. Jacobsen, H. B. B. Cybis (2011) A multi-layer simulation model for vehicle and pedestrian. *90th Annual Meeting Transportation Research Board*, v. 1. p. 1-15, Washington.

Reynolds, C. W. (1999) Steering behaviors for autonomous characters. *The proceedings of Game Developers Conference*, p. 763–782.

Rosenbloom, T. (2009) Crossing at a red light: Behaviour of individuals and groups. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 12 (5), pp. 389-394.

Shao, W. and D. Terzopoulos (2007) Autonomous pedestrians. *Graphical Models*. n. 69, v. 5-6, p. 246–274.

Sisiopiku, V. P. and D. Akin (2003) Pedestrian behaviors at and perceptions towards various pedestrian facilities: an examination based on observation and survey data. *Transport Res.F-Traf.6*. p. 249–274.

Sud A., R. Gayle, E. Andersen, S. Guy, M. Lin, D. Manocha (2007) Real-time navigation of independent agents using adaptive roadmaps. *ACM symposium on Virtual reality software and technology*, p. 99–106.

Treuille, A., S. Cooper, Z. Popovi`C (2006) Continuum Crowds. *ACM Transactions on Graphics*, n. 25, v. 3, p. 1160–1168.

Velde, A., J. Kamp, J. Barela, G. Savelsbergh (2005) Visual timing and adaptive behavior in a road-crossing simulation study. *Accident Analysis and Prevention* 37 (2005) 399–406.

Xiaoping, Z., Z. Tingkuan, L. Mengting (2009) Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches. *Building and Environment*, n. 44, p. 437–445.

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.