

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

Bruno Rocha Werberich

Modelagem de Pedestres:
comportamento em travessia e escolha de rota

Porto Alegre
2013

Bruno Rocha Werberich

**Modelagem de Pedestres:
comportamento em travessia e escolha de rota**

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.^a Helena Beatriz Bettella Cybis, Ph.D.

Porto Alegre

2013

Bruno Rocha Werberich

**Modelagem de Pedestres:
comportamento em travessia e escolha de rota**

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.^a Helena Beatriz Bettella Cybis, Ph.D.

Orientadora PPGEP/UFRGS

Prof. José Luís Duarte Ribeiro, Dr.

Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professor Rosaldo José Fernandes Rossetti, PhD. (FEUP)

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

Carlos Oliva Pretto, Dr. (PPGEP/UFRGS)

RESUMO

Esta dissertação busca identificar aspectos carentes de melhorias na modelagem de pedestres. A modelagem do comportamento de pedestres se inicia pelo entendimento de seu processo decisório, entendendo como ele se desloca, realiza escolha de rotas, interage com outros pedestres, veículos, obstáculos, etc. Os modelos de simulação de pedestres estão hoje aptos a representar de forma bastante realista o deslocamento dos mesmos, entretanto, a simulação conjunta com veículos apresenta ainda alguns aspectos fracos devido as grandes diferenças de abordagem na modelagem dos dois modos. A representação da travessia de pedestres nos modelos de simulação tradicionais apresenta 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 na lateral da 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. Os resultados mostraram que a inclusão do novo comportamento provoca redução significativa dos tempos médios de viagem dos pedestres e que a simulação pode ser mais condizente com o comportamento real de pedestres em diversos ambientes urbanos. Para representar o comportamento de um pedestre em um ambiente urbano, é preciso também estudar como ele escolhe suas rotas. No processo de escolha de rotas, o pedestre é influenciado por diversos fatores, como hábitos pessoais, o número de cruzamentos, níveis de poluição e de ruído, segurança, abrigo de condições climáticas ruins, e estimulação do ambiente. Para representar o comportamento de escolha de rota dos pedestres, foi desenvolvido um modelo que considera a interação entre pedestres como uma impedância alterando a rota do pedestre. O estudo foi inspirado por equações de forças de atrito, considerando que pedestres tendem a evitar passar próximo de outros pedestres com elevada velocidade relativa. Para escolher uma rota o pedestre realiza uma ponderação entre a impedância e a distância a ser percorrida. O modelo foi capaz de reproduzir comportamentos emergentes da interação entre os agentes, permitindo concluir que as equações de forças de atrito adotadas nesta modelagem podem ser uma abordagem válida na representação da escolha de rotas de pedestres, podendo também ser uma forma indireta de avaliação de atrasos.

Palavras-chave: simulação de pedestres, travessias de pedestres, escolha de rotas

ABSTRACT

This dissertation aims to identify aspects in need of improvement in modeling pedestrians. The modeling of pedestrian behavior begins by understanding their decision making process, understanding how people move, make route choice, interact with other pedestrians, vehicles, obstacles, etc. Simulation models of pedestrians are able to represent the way they move quite realistically, however, the combined simulation of pedestrians and vehicles still presenting some poor aspects due to the wide differences in the modeling approach of the two modes. The pedestrian road crossing representation in the traditional simulation models has limitations that may impact on the results generated by the simulators. This dissertation lists several behaviors arising from the interaction of pedestrians with vehicles at road crossing situations, which are generally not present in the simulators. Having identified these behaviors, a survey was conducted with pedestrians, aged between 22 and 60 years old, to evaluate how these behaviors are frequent and important to estimate travel times. The behavior indicated by the interviewees as more impactful in the travel times was the “search for a gap while walking”, describing the pedestrian that walks laterally to the road, in the sidewalk, at the same time that is trying to cross the road, looking for gaps in the traffic stream. Such behavior was modeled and then aggregated at a simulation model of pedestrians. Results showed that the inclusion of the new behavior causes significant reduction in average travel time for pedestrians and that the simulation can be more consistent with the actual behavior of pedestrians in different urban environments. To represent a pedestrian behavior in an urban environment, it is also necessary to study how he chooses their route. At the route choice process, the pedestrian is influenced by several factors, such as personal habits, the number of road crossings, levels of pollution and noise, safety, shelter from bad weather, and other stimulation of the environment. In order to represent the pedestrians route choice behavior was devised a model that considers the interaction between pedestrians as an impedance to alter pedestrians route. The study is inspired by friction forces equations, considering that pedestrians avoid passing near other pedestrians with high relative velocity. To choose a route a pedestrian consider a balance between the impedance and the path length. The model is able to reproduces emergent behavior between agents, allowing the assumption that friction equations adopted in this modeling may provide a suitable approach to route choice behavior and can also be used as an indirect measure of pedestrians delay.

Keywords: pedestrian simulation, pedestrian crossing, route choice

LISTA DE FIGURAS

Artigo 1

Figura 1 - Níveis de decisão do pedestre - Fonte: Papadimitriou <i>et. al.</i> (2009).....	16
Figura 2 - Campo de força gerado pelos pedestres - Fonte: Pretto <i>et. al.</i> (2011).....	20
Figura 3 - Problemas não resolvidos na modelagem da interação entre pedestres e veículos: Travessia, Ambientes Compartilhados e Escolha de Rota de Pedestres - Fonte: Elaborado pelo autor.....	26

Artigo 2

Figura 1 - Comportamentos do Pedestre – Fonte: Elaborado pelo autor.....	34
Figura 2 - Modelo de Comportamento do Pedestre – Fonte: Elaborado pelo autor.....	41
Figura 3 - Cenário de Simulação – Fonte: Elaborado pelo autor	41
Figura 4 - Visualização Gráfica dos Resultados da Simulação – Fonte: Elaborado pelo autor	43

Artigo 3

Figure 1 - Dynamic route choice – Source: Made by author.....	52
Figure 2 - The route choice model – Source: Made by author	53
Figure 3 - The four different scenarios – Source: Made by author	55
Figure 4 - Simulation views – Source: Made by author.....	56
Figure 5 - Impedance map color – Source: Made by author	56
Figure 6 - Proportion of pedestrians on R2 – Source: Made by author.....	57
Figure 7 - Desired speed histogram at R1 and R2 – Source: Made by author	58

LISTA DE TABELAS

Artigo 1

Tabela 1 - Dificuldades da Simulação de Pedestres e Veículos	25
--	----

Artigo 2

Tabela 1 - Matriz de Priorização dos Comportamentos	36
Tabela 2 - Resultados das Simulações.....	42
Tabela 3 - Análise de Variância (ANOVA)	43
Tabela 4 - Resultados da Simulação por Pedestre	44

Artigo 3

Table 1 - Average pedestrians travel time	57
Table 2 - Average reduction in travel time through R2 compared to R1	58

SUMÁRIO

1. Introdução	10
1.1. Objetivos	12
1.2. Justificativa	12
1.3. Delimitações	13
1.4. Estrutura do trabalho	13
2. Artigo 1	15
1. Introdução	16
2. Nível tático - Escolha de rotas	17
3. Nível Operacional - Movimentação dos Pedestres	18
3.1. Modelos Newtonianos	18
3.2. Modelo de Forças sociais	18
3.3. Modelos Baseados em Campo de Forças	20
3.4. Modelo de Forças Sociais Vs. Campos de Força	21
3.5. Interação do pedestre com o veículo	22
4. Conclusão	25
5. Referencias	26
3. Artigo 2	29
1. Introdução	30
2. Limitações dos Modelos de Simulação Tradicionais	32
2.1. Travessia Semaforizada	33
2.2. Travessia Fora da Faixa de Segurança	35
2.3. Travessia Na Faixa de Segurança	35
3. Metodologia de Priorização dos Comportamentos do Pedestre	35
4. Modelagem dos Pedestres	37
4.1. Caminhando	37
4.2. Aproximando da Faixa	39
4.3. Esperando	39
4.4. Atravessando	40
4.5. Busca por Brecha em Caminhada	40
5. Experimento	41
5.1. Cenário De Simulação	41
5.2. Resultados	42
6. Conclusão	44
7. Referências	45
4. Artigo 3	48
1. Introduction	49
2. The model	51
2.1. Configuration of the modeling demand	51
2.2. Configuration of the modeling environment	51
2.3. Pedestrian motion: sense and avoidance modeling	51
3. Route choice process modeling	52
4. Simulations	54
4.1. Qualitative analysis	55
4.2. Quantitative analysis	56
5. Conclusions	58
6. References	59
5. Conclusões	61
5.1. Trabalhos Futuros	63
Referências Bibliográficas	65

Agradecimentos

Agradeço, com muita consideração, algumas pessoas pela contribuição na construção deste trabalho:

À minha orientadora, Prof.^a Helena Cybis, pela orientação, pela disponibilidade e pela confiança depositada neste trabalho.

Ao Dr. Carlos Pretto pela participação e pelas contribuições fundamentais ao desenvolvimento da pesquisa.

À toda minha família, especialmente ao meu pai Luis Carlos, minha mãe Sandra, e minha namorada Belisa, por apoiar a minha formação acadêmica e profissional.

À UFRGS e ao PPGEP, aos professores e funcionários, por proporcionarem o desenvolvimento da pesquisa.

À CAPES pelo apoio financeiro concedido através da bolsa de mestrado.

1. INTRODUÇÃO

As grandes cidades presenciam o crescimento de suas frotas de veículos e o conseqüente aumento dos níveis de congestionamento, gerando problemas como atrasos aos usuários do sistema de transporte e elevados índices de poluição. A ampliação de capacidade do sistema viário esbarra no limite físico das cidades, sendo o incentivo aos modos de transporte alternativos ao automóvel a solução cada vez mais procurada. O incentivo à utilização de modos públicos de transporte, do uso da bicicleta e das viagens a pé, tem o sucesso condicionado à facilidade de integração modal. A implantação de uma rede integrada de transportes alternativos ao automóvel é um fator chave para a atração de usuários, sendo necessário estudar a qualidade do ambiente para o pedestre, que viaja a pé ou necessita realizar o transbordo entre modos de transporte, avaliando tempos de atraso e níveis de conforto e segurança. Surge, assim, a demanda por modelos de simulação de pedestres que possam ser utilizados como uma ferramenta de planejamento de transportes.

Se por um lado os modelos de simulação de veículos estão hoje plenamente desenvolvidos para a utilização como uma ferramenta de planejamento de tráfego, os modelos de simulação de pedestre apresentam grandes possibilidades de melhoria. O modo a pé ocorre em infraestruturas bastante diversificadas, como em calçadas, estações de transporte público, em travessias, ambientes compartilhados, aeroportos, lojas, etc. A diversidade de situações às quais o pedestre é exposto, e às quais reage de forma diferente, torna a modelagem complexa.

A modelagem de pedestres abrange principalmente aspectos relativos à escolha de rota, movimentação dos pedestres, interação com outros pedestres e com veículos, resposta a variáveis do ambiente, como sinalização, tipo de pavimentação, etc. Algumas das abordagens tradicionais da modelagem de pedestre são baseadas em autômatas celulares e em forças newtonianas. Em modelos baseados em autômatos celulares o espaço é discretizado em células, que definem as possíveis posições a serem ocupadas por um pedestre. Os modelos baseados em forças newtonianas descrevem o deslocamento do pedestre sujeito a forças exercidas sobre ele, como o modelo de forças sociais (Helbing e Molnár, 1995) e modelos baseados em campos de força (Pretto *et. al.*, 2008).

Dentre os aspectos da modelagem de pedestres carentes de melhorias é possível destacar a representação de travessias. A modelagem de pedestres e a modelagem de veículos evoluíram em paralelo e com filosofias bastante distintas; a interação dos dois modos em um mesmo ambiente de simulação não é natural. Outro aspecto fraco dos simuladores atuais é o desenvolvimento dos métodos de escolha de rota dos pedestres. A maioria dos modelos considera a opção do pedestre pelo caminho mais curto, entretanto se sabe que a escolha de rota compreende muitos aspectos, como a densidade e direção de deslocamento dos pedestres no ambiente, tipos de pavimento, condições de iluminação, segurança, etc. A escolha de rotas dos pedestres além de envolver um número elevado de fatores, muitas vezes subjetivos, engloba ainda uma infinidade de possíveis caminhos, o pedestre é livre para caminhar sobre o espaço disponível em qualquer direção, diferente da escolha de rota dos veículos limitada por caminhos definidos pela infraestrutura.

Papadimitriou *et. al.* (2009) sugere que o processo decisório do pedestre pode ser sintetizado em três níveis: estratégico, tático e operacional. No nível estratégico o pedestre define suas atividades, origem e destino, no nível tático realiza a escolha de rota, e no nível operacional efetivamente caminha interagindo com outros pedestres, obstáculos e veículos.

Após uma exaustiva revisão bibliográfica, Papadimitriou *et. al.* (2009) constataram que ao realizar a escolha de rota os modelos de simulação descritos na literatura não consideram aspectos do nível operacional, principalmente referentes a travessias, como dificuldade das travessias, níveis de tráfego, números de faixas de veículos, etc. Os modelos de simulação falham em representar a interação entre o nível tático e operacional do processo decisório dos pedestres. O pedestre que busca minimizar seu esforço e tempo de viagem optará por rotas

que incluam travessias mais fáceis ou rápidas, e que desviem de grandes aglomerações e de fluxos de pedestres com sentido contrário ao seu deslocamento desejado.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo geral desta dissertação é analisar o estado atual dos modelos de simulação de pedestres e propor modelos de escolha de rotas. Os objetivos específicos são:

- a) Realizar uma revisão bibliográfica sobre o estado atual dos modelos de simulação de pedestres;
- b) Identificar comportamentos de pedestres em travessias que não são corretamente representados nos modelos de simulação;
- c) Avaliar o impacto causado sobre o tempo de viagem dos pedestres pelos comportamentos não representados nos modelos.
- d) Desenvolver um modelo de escolha de rota de pedestres em travessia que considere o tráfego de veículos;
- e) Desenvolver um modelo de escolha de rota de pedestre que considere a influência dos outros pedestres do ambiente.

1.2. JUSTIFICATIVA

As viagens a pé oferecem inúmeros benefícios para o indivíduo e para a sociedade, pois melhoram a qualidade de vida e reduzem impactos ambientais. Contudo, o planejamento de rotas para pedestres ainda é pouco considerado. Em alguns países estão surgindo intervenções urbanas que têm os pedestres e os ciclistas como prioridade, principalmente em áreas residenciais, onde a harmonia dos pedestres com o espaço público possui destaque em relação aos automóveis (Vasconcellos, 2001). O fluxo intenso de pedestres e os atrasos originados do conflito com o fluxo de veículos devem ser considerados no projeto de novas instalações que visam atender ao pedestre.

O presente estudo se justifica na medida que visa contribuir para o desenvolvimento do estágio atual dos modelos de simulação de pedestres. Este estudo avalia o impacto de comportamentos não representados pelos simuladores e propõe soluções para a modelagem do processo de escolha de rotas do pedestre.

1.3. DELIMITAÇÕES

Esta dissertação descreve a modelagem matemática de processos de escolha de rotas de pedestres. O estudo é limitado à simulação de diferentes cenários fictícios, não sendo abordados procedimentos de validação e calibração sobre coleta de dados reais. Os comportamentos de pedestre em travessia estudados foram identificados com base na literatura. Não foram realizadas observações em campo; contudo, uma pesquisa foi feita com pedestres de forma a conhecer dentre os comportamentos listados os mais comuns nas suas viagens.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação é composta por cinco capítulos. O primeiro capítulo apresentou uma introdução à importância da simulação de pedestres bem como os objetivos e justificativa desta tese. O estudo foi desenvolvido na forma de artigos científicos apresentados nos capítulos 2, 3 e 4.

O Capítulo 2 deste trabalho corresponde ao artigo “Estado da Arte da Simulação de Pedestres e Futuros Desenvolvimentos”. Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre modelos de simulação de pedestres. Na revisão bibliográfica são identificadas possíveis contribuições ao estado atual dos simuladores, inspirando a elaboração dos estudos apresentados nos Capítulos 3 e 4.

O Capítulo 3 corresponde ao artigo “Análise e Simulação de Comportamentos de Pedestres em Momento de Travessia”. Neste artigo foram identificados diversos comportamentos de pedestres em momento de travessia que ainda não são adequadamente representados nos modelos de simulação. Uma vez identificados os comportamentos foram

realizadas entrevistas com usuários do sistema de transporte de forma a priorizar a inclusão destes comportamentos em um simulador, buscando com o resultado das entrevistas conhecer os comportamentos que são realizados com mais frequência e que resultam em maiores impactos nos tempos de viagem dos pedestres. O artigo apresenta ainda a implementação da modelagem do comportamento definido pelos entrevistados como o mais frequente.

O comportamento modelado no artigo envolve um processo dinâmico de escolha de rota em momento de travessia. Neste processo, o pedestre observa os níveis de tráfego da via que deseja atravessar decidindo por realizar a travessia ou postergá-la, atravessando em outro local. O modelo de movimentação dos pedestres utilizado neste estudo foi baseado em campos de força (Preto *et. al.*, 2011).

O Capítulo 4 corresponde ao artigo “Pedestrians Route Choice model based on friction forces”. Este artigo propõe um método de escolha de rota para pedestres no qual a rota escolhida minimiza a impedância imposta por outros pedestres no ambiente. A movimentação dos pedestres utiliza o modelo de forças sociais (Helbing e Molnár, 1995).

O Capítulo 5 apresenta as conclusões finais desta dissertação e visões para trabalhos futuros.

2. ARTIGO 1

ESTADO DA ARTE DA SIMULAÇÃO DE PEDESTRES E FUTUROS
DESENVOLVIMENTOS

ESTADO DA ARTE DA SIMULAÇÃO DE PEDESTRES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

RESUMO

A modelagem do comportamento de pedestres se inicia pelo entendimento de seu processo decisório, entendendo como ele se desloca, realiza escolha de rotas, interage com outros pedestres, veículos, obstáculos, etc. Os modelos de simulação de pedestres estão hoje aptos a representar de forma bastante realista o deslocamento dos mesmos, entretanto a simulação conjunta com veículos apresenta ainda alguns aspectos fracos, devido às grandes diferenças de abordagem na modelagem dos dois modos. O processo de escolha de rotas do pedestre é influenciado por diversos fatores, como hábitos pessoais do pedestre, o número de cruzamentos, níveis de poluição e de ruído, segurança, abrigo de condições climáticas ruins, e estimulação do ambiente. Os modelos de escolha de rotas devem adequar-se agregando novas variáveis.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de modelos de microssimulação de pedestres tem se mostrado mais presente na literatura. O principal desafio da modelagem é cada vez mais agregar inteligência aos pedestres, tornando-os mais verossímeis em seus comportamentos relativos a escolhas de rota, interação com veículos e com o ambiente.

Dentre as abordagens conhecidas para a modelagem de pedestres e veículos, a implementação de sistemas multiagente é uma das técnicas mais utilizadas. Os sistemas multiagente permitem modelar o comportamento de um conjunto de entidades inteligentes e organizadas de acordo com leis do tipo social. Essas entidades, ou agentes, dispõem de certa autonomia e estão imersos num ambiente com o qual necessitam interagir. Desse modo, os agentes devem possuir uma representação parcial desse ambiente e dos meios de percepção e comunicação com o mesmo. O agente possui objetivos próprios que, em conjunto com o conhecimento sobre o estado do ambiente onde ele está inserido, guiam o seu comportamento. O comportamento inteligente do sistema está localizado em cada um dos agentes individuais. Nessa inteligência podem estar incluídas uma racionalidade individual e uma racionalidade social.

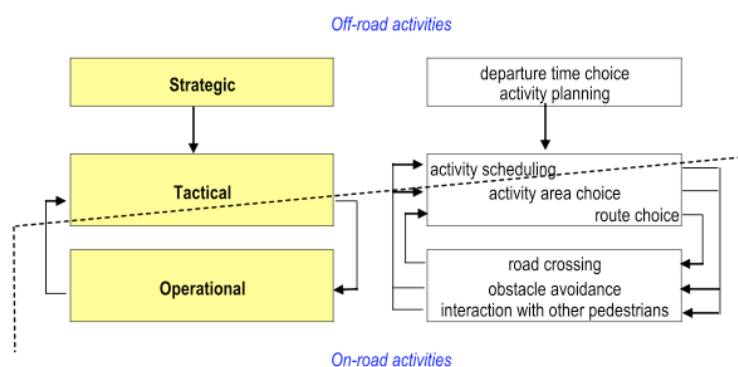


Figura 1- Níveis de decisão do pedestre - Fonte: Papadimitriou *et. al.* (2009)

A modelagem do comportamento do agente pedestre se inicia pelo entendimento de seu processo decisório. Papadimitriou *et. al.* (2009) utilizam uma estrutura hierárquica de três níveis para classificar as atividades do pedestre, conforme a Figura 1. Nesta estrutura, o nível estratégico corresponde à escolha do horário de partida, o planejamento das atividades que serão realizadas, origem e destino. No nível tático é realizada a escolha de rota, e o nível

operacional corresponde aos processos de travessia, desvio de obstáculos e interação com outros pedestres. Neste estudo serão particularmente abordadas as atividades do pedestre nos níveis tático e operacional. Em microssimulação, os aspectos do nível estratégico são tradicionalmente dados de entrada do modelo.

2. NÍVEL TÁTICO - ESCOLHA DE ROTAS

Comparada com outros modos de transporte, a modelagem da escolha de rotas de pedestres é bastante complexa, uma vez que o pedestre escolhe sua rota dentre infinitas alternativas, ponderando conforto, segurança, tempos de atraso e inúmeros outros aspectos. A maioria das atividades do pedestre, como estratégias de seleção de rota, são baseadas em decisões subconscientes. A percepção de distância e direção são as razões mais comuns para a escolha de uma determinada rota. Outros fatores que desempenham um papel importante no comportamento de escolha rota são os hábitos e preferências pessoais do pedestre, o número de cruzamentos, poluição e ruído, segurança, abrigo de condições climáticas ruins, e estimulação do ambiente (Papadimitriou, 2012). Entender o comportamento do pedestre e como as rotas são escolhidas são essenciais para o planejamento e projeto de infraestruturas públicas e privadas.

A maioria dos modelos de simulação assumem um processo de escolha de rota estática. Eles são construídos no pressuposto de que os pedestres escolhem sempre o caminho mais curto, tradicionalmente utilizando o algoritmo de Dijkstra (1959), definido antes da viagem começar, e tentam caminhar por este caminho, evitando contato com obstáculos e outros pedestres. No entanto, os pedestres muitas vezes reveem e alteram suas rotas com base em sua avaliação instantânea do meio ambiente.

Muitos dos modelos mais relevantes de escolha de rotas dinâmicas estão preocupados com a evacuação de pedestres. O modelo descrito em Banerjee *et. al.* (2009) representa o comportamento do pedestre em escolher caminhos que evitem áreas congestionadas por outros pedestres. As áreas congestionadas são consideradas como obstáculos dinâmicos e são evitadas na escolha de rota. De forma semelhante, no modelo de evacuação descrito por Wagoum *et. al.* (2012) os pedestres escolhem a rota mais rápida com base na observação do ambiente, identificando a formação de aglomerações e evitando-as. O modelo diferencia ainda pedestres familiarizados e não familiarizados com o ambiente. Ambas as abordagens são focadas na formação de gargalos, sendo improvável a aplicação destes modelos na representação de ambientes urbanos em situações comuns e não de evacuação.

Dentre os modelos não preocupados com a evacuação de pedestres, Kretz *et. al.* (2011) propõe a modelagem da intenção do pedestre em seguir o caminho mais rápido até seu destino. Para isso, é levado em consideração o atraso gerado pela interação com outros pedestres no ambiente. Os autores desenvolveram um método para estimar a direção do caminho mais rápido, gerando sobre o cenário de simulação um mapa de tempo de viagem. Em cada posição do mapa, o pedestre sabe qual a direção do caminho mais rápido até seu destino. O caminho mais rápido tende a desviar de grandes aglomerações de pedestres, no entanto o método, é mais indicado para grupos de pedestres com destino comum e não permite que diferentes perfis de pedestre optem por diferentes rotas.

Papadimitriou *et. al.* (2009) apresenta uma revisão aprofundada sobre a modelagem de escolha de rotas de pedestres e a modelagem de travessias, concluindo que os processos de escolha de rota e do comportamento dos pedestres em ambiente de travessia são relatados

separadamente na literatura. Os estudos normalmente não consideram aspectos de travessia na escolha de rota de viagem dos pedestres.

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, como por exemplo: travessias de meio de quadra são mais propensas a ocorrer durante viagens mais longas; 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.

3. NÍVEL OPERACIONAL - MOVIMENTAÇÃO DOS PEDESTRES

No nível operacional o pedestre tem como atividade seguir sua rota de forma a não colidir com outros pedestres ou obstáculos, normalmente baseando-se em modelos newtonianos. Neste nível o pedestre também tem como atividade a interação e negociação de espaço com veículos, tanto em situações de ambientes compartilhados como em situações de travessias.

3.1. Modelos Newtonianos

Os modelos baseados em forças newtonianas são modelos onde os pedestres estão sujeitos a forças baseadas nos conceitos físicos descritos por Newton (Löhner, 2010). Existem três exemplos de campos newtonianos na natureza: o elétrico, o magnético e o gravitacional. Esses três campos possuem propriedades idênticas, e seguem as mesmas equações. Uma diferença de comportamento entre eles está no fato de existirem forças de atração e de repulsão, nos campos elétricos e magnéticos, enquanto que, no gravitacional, só há forças de atração. Os modelos de Forças Sociais e os modelos baseados em campos de força são classificados como modelos newtonianos.

3.2. Modelo de Forças sociais

O modelo de forças sociais é um dos mais utilizados na microssimulação de pedestres, como em Zainnudin e Shuaib (2010), Kretz *et. al.* (2011) e Anvari (2012). No modelo, equações vetoriais relativamente simples descrevem de maneira bastante realista o comportamento de um pedestre ao desviar de pessoas e objetos.

O modelo de forças sociais proposto por Helbing e Molnár (1995) sugere que o deslocamento de um pedestre é definido pela sobreposição de diversas forças que atuam sobre ele. Considerando o pedestre α que tem como destino \vec{r}_α^0 , este pedestre normalmente seguirá o caminho mais curto possível. A viagem do pedestre pode ter diversos destinos parciais, $\vec{r}_\alpha^1 \dots \vec{r}_\alpha^k$, e se \vec{r}_α^k é o próximo destino parcial de α , então a direção para a qual o pedestre α deseja ir é representada pelo vetor \vec{e}_α , descrito pela Equação 1.

$$\vec{e}_\alpha(t) = \frac{\vec{r}_\alpha^k - \vec{r}_\alpha(t)}{\|\vec{r}_\alpha^k - \vec{r}_\alpha(t)\|} \quad (1)$$

Onde $\vec{r}_\alpha(t)$ representa a posição do pedestre α no instante de tempo t . Em condições normais o pedestre α caminha na direção de \vec{e}_α com a sua velocidade desejada \vec{v}_α^0 . Ocorrendo algum desvio na direção de caminhada do pedestre o mesmo tem a tendência a adaptar sua velocidade atual $\vec{v}_\alpha(t)$ para a velocidade desejada $\vec{v}_\alpha^0(t)$ com um certo tempo característico τ_i , gerando uma força descrita pela Equação 2.

$$\vec{F}_\alpha^0(\vec{v}_\alpha, v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha) = \frac{1}{\tau_i} (v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha - \vec{v}_\alpha) \quad (2)$$

O deslocamento de um pedestre é também influenciado pela interação com outros pedestres. Normalmente o desconforto de um pedestre aumenta com a proximidade de outros. A presença de um pedestre β gera uma força de repulsão sobre o pedestre α , descrita pela Equação 3.

$$\vec{f}_{\alpha\beta}(\vec{r}_{\alpha\beta}) = -\nabla_{\vec{r}_{\alpha\beta}} V_{\alpha\beta}[b(\vec{r}_{\alpha\beta})] \quad (3)$$

Onde $V_{\alpha\beta}$ é uma função monotônica decrescente em função de b , que por sua vez representa o semieixo menor de uma elipse em função de $\vec{r}_{\alpha\beta}$ ($\vec{r}_{\alpha\beta} = \vec{r}_\alpha - \vec{r}_\beta$). A forma elíptica foi escolhida pelo fato de um pedestre requer mais espaço na sua direção de caminhada. A função $V_{\alpha\beta}$ expressa valores maiores quanto menor for o semieixo da elipse b , ou seja, quanto mais próximos estiverem dois pedestres, maior será a força de repulsão entre eles.

Um pedestre não reage a outro pedestre que está à sua frente da mesma forma que à um pedestre às suas costas, por esta razão a força $\vec{f}_{\alpha\beta}$ é ponderada pelo fator ω , em função do ângulo entre a direção desejada de movimentação do pedestre e da força $\vec{f}_{\alpha\beta}$. A Equação 4 descreve finalmente a força exercida pelo pedestre β sobre o α .

$$\vec{F}_{\alpha\beta}(\vec{e}_\alpha, \vec{r}^{\alpha\beta}) = \omega(\vec{e}_\alpha, -\vec{f}_{\alpha\beta}) \vec{f}_{\alpha\beta}(\vec{r}^{\alpha\beta}) \quad (4)$$

Pedestres também se sentem desconfortáveis ao caminhar próximo de paredes ou outros obstáculos. Considerando o pedestre α , a força que a borda B exerce sobre ele é descrita pela Equação 5.

$$\vec{F}_{\alpha B}(\vec{r}_{\alpha B}) = -\nabla_{\vec{r}_{\alpha B}} U_{\alpha B}(\|\vec{r}_{\alpha B}\|) \quad (5)$$

Onde U é uma função monotônica decrescente e $\vec{r}_{\alpha B} = \vec{r}_\alpha - \vec{r}_B^\alpha$, onde \vec{r}_B^α é o local da borda B mais próximo do pedestre α .

Conhecidas todas as forças sociais que atuam sobre um pedestre, temos a força resultante $\vec{F}_\alpha(t)$, responsável pelo deslocamento do pedestre α e descrita pela Equação 6.

$$\vec{F}_\alpha(t) = \vec{F}_\alpha^0 + \sum_{\beta} \vec{F}_{\alpha\beta} + \sum_B \vec{F}_{\alpha B} \quad (6)$$

Para o estudo da dinâmica de pedestres em grandes aglomerações e situações de pânico Helbing e Johansson (2009) adaptaram o modelo forças sociais. Foram incluídas no modelo forças referentes à compressão corporal do pedestre e forças de atrito entre pedestres próximos. As forças de atrito atuam antes mesmo de os pedestres se tocarem devido a tendência psicológica das pessoas de não passar próximo a outros pedestres com uma elevada velocidade relativa. Uma implementação análoga foi utilizada para modelar a interação entre pedestres e obstáculos.

3.3. Modelos Baseados em Campo de Forças

Pretto *et. al.* (2008), Pretto e Cybis (2010) e Pretto *et. al.* (2011) descrevem um modelo de simulação de pedestres com uma abordagem inspirada nas relações de forças newtonianas, e em conceitos de campos de força. No modelo os pedestres são representados matematicamente por círculos e os obstáculos por conjuntos de círculos, como forma de facilitar a detecção de colisão.

Para a negociação de espaço cada um dos pedestres projeta um campo de força sobre o ambiente da simulação, este campo de força tem valor máximo na direção do vetor velocidade do pedestre e zero no sentido contrário. Cada ponto do ambiente sofre a ação do somatório de forças que os pedestres geram, sendo um dos parâmetros de escolha na movimentação dos pedestres. A Figura 2 ilustra o campo de força gerado no encontro de dois pedestres, onde a cor branca representa o campo de força com intensidade nula e a cor laranja com a intensidade mais elevada.

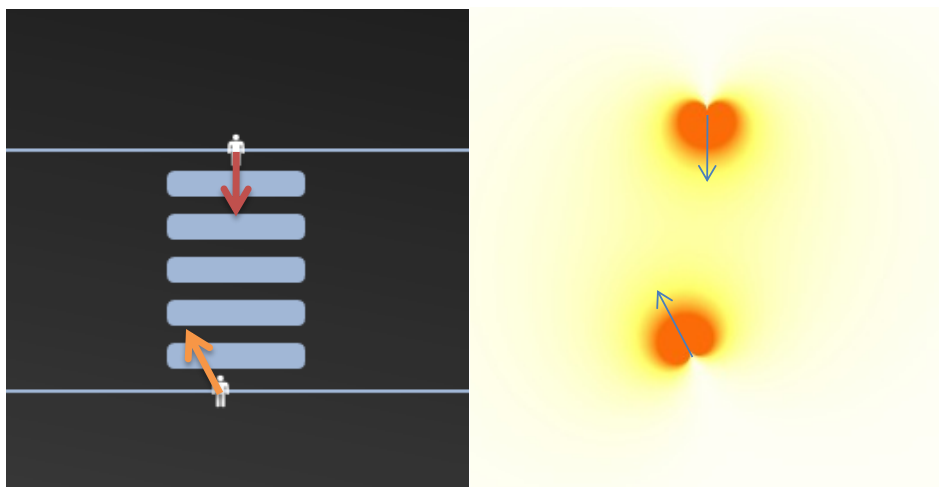


Figura 2 - Campo de força gerado pelos pedestres - Fonte: Pretto *et. al.* (2011)

Para cada passo o pedestre avalia o valor de Pe , descrito na Equação 7. O valor de Pe é a relação entre o valor do campo de força em determinada posição e a distância, desta mesma posição, em relação ao objetivo do pedestre.

$$Pe = Fr\beta + \gamma Md \quad (7)$$

Onde Fr é o valor do campo de força resultante e Md representa a distância euclidiana entre o local de próximo passo do pedestre e o seu objetivo. Os fatores β e γ são fatores calibráveis. O pedestre busca caminhar por locais com o menor valor de Pe possível, evitando a aproximação com outros pedestres e evitando também afastar-se de seu objetivo.

Para a escolha do próximo passo o pedestre utiliza uma abordagem discreta, apesar do equacionamento permitir uma abordagem analítica e contínua, como forma de reduzir custos computacionais. Neste processo o pedestre avalia um número finito de posições ao seu redor e opta pelo local de menor Pe associado. Além do valor de Pe o pedestre avalia também a disponibilidade de espaço na posição pretendida. Com um cálculo simples de colisão entre círculos o pedestre avalia se existe espaço suficiente para sua movimentação sem colisão com outros pedestres e obstáculos. Caso não seja possível mover-se para nenhuma das posições avaliadas, o pedestre permanece parado.

3.4. Modelo de Forças Sociais Vs. Campos de Força

A ideia de comportamentos coletivos que emergem de interações entre indivíduos é um conceito crucial no estudo de simulação de pedestres. Exemplos de tais comportamentos coletivos são a formação de filas ou a oscilação entre fluxos de pedestres em sentidos opostos na passagem por gargalos (Helbing e Molnár 1995).

O modelo descrito por Pretto *et. al.* (2008), Pretto e Cybis (2010) e Pretto *et. al.* (2011), assim como o modelo de forças sociais descrito por Helbing e Molnár (1995), conseguem representar comportamentos emergentes da interação entre os agentes. O modelo inspirado em campos de força compreende uma detecção explícita de colisão entre pedestres e obstáculos, onde o corpo dos pedestres é rígido e intransponível. O modelo de forças sociais considera pedestres como partículas, forças de repulsão garantem a não proximidade entre pedestres, em simulações de grandes aglomerações os pedestres podem ser comprimidos, ocupando um espaço menor. A complementação ao modelo de forças sociais descrito em Helbing e Johansson (2009) torna o modelo mais realista em simular multidões.

O modelo baseado em campos de força não compreende processos de aceleração suave dos pedestres, as variações de direção de velocidade dos agentes ocorre de forma discreta, uma vez que a escolha da próxima posição do pedestre é também discretizada. É possível conferir mais suavidade às variações de velocidade do pedestre em se aumentando o universo de posições possíveis, contudo, para cada uma das posições avaliadas pelo pedestre se faz necessário o cálculo de Pe , que representa um custo computacional elevado. O modelo de forças sociais representa variações de velocidade de forma contínua e bastante realística, sendo esta uma das principais vantagens do modelo.

A agregação de inteligência baseada em regras ao modelo dos pedestres, como por exemplo, aguardar a abertura de um semáforo ou em determinadas situações evitar avançar sobre uma via de veículos, é relativamente fácil no modelo baseado em campos de força, uma vez que o

pedestre avalia sua próxima posição antecipadamente. No momento de avaliação da próxima posição quaisquer regras de decisão podem ser aplicadas.

No modelo de forças sociais a movimentação do pedestre ocorre somente sob o efeito de forças externas exercidas sobre ele e a força para manter sua velocidade desejada \vec{v}_α^0 , dificultando o controle de suas tomadas de decisão. Zainnudin e Shuaib (2010) entendem que aspectos de tomada de decisão nos modelos de forças sociais ainda estão em fase inicial, em seu estudo os autores estenderam o modelo de forças sociais agregando ao pedestre a capacidade de analisar uma área à sua frente, antecipando conflitos com outros pedestres, decidindo por mover-se para locais com menores aglomerações.

3.5. Interação do pedestre com o veículo

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: 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.

Segundo a classificação de Meschini e Gentile (2009), a interação entre veículos e pedestres em momento de travessia é normalmente uma interação controlada, sem interação longitudinal à via. Contudo, 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. Os modelos de microssimulação de travessias ainda não representam muitos dos comportamentos observados em situações reais.

Em travessias semaforizadas encontram-se descritos na literatura os seguintes comportamentos:

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.

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.

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. 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.

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. 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.

Em travessias fora da faixa de segurança, podem ser observados os seguintes comportamentos:

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.

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.

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.

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.

Segundo a classificação de Meschini e Gentile (2009), a interação entre veículos e pedestres em ambiente compartilhado é a mais difícil de ser modelada, sendo uma interação caótica conflitante. Anvari *et. al.* (2012) modelaram a interação entre pedestres e veículos em ambientes compartilhados baseando-se no modelo de forças sociais. Na condição de tráfego misto o agente veículo foi implementado com o mesmo equacionamento dos pedestres, com algumas adaptações. As variações angulares da velocidade do agente veículo foram limitadas, uma vez que um veículo não apresenta variações de direção livres como o pedestre. Além disso, a percepção dos pedestres pelo veículo foi também limitada em função dos pontos-cego comuns ao motorista.

Schönauer *et. al.* (2012) propõe um modelo de simulação de ambientes compartilhados utilizando campos de força para guiar a escolha de rota dos veículos, uma vez que mesmo em um ambiente compartilhado amplo, o tráfego costuma ocorrer em um espaço restrito, com pouca lateralidade. No modelo cada um dos agentes, veículos, pedestres e ciclistas, geram seu percurso independentemente da interação com outros agentes. Geradas as rotas de cada agente é utilizado um modelo de teoria de jogos de detecção de colisão. Rotas que colidem em tempo e espaço são deslocadas até que todos os conflitos sejam resolvidos.

Kaparias *et. al.* (2012) apresentam um estudo sobre a percepção de pedestres e motoristas em espaços compartilhados. Através de pesquisas de preferência declarada os autores concluíram que em espaços compartilhados as condições do local como luminosidade, baixo tráfego de veículos e presença de outros pedestres melhoram a percepção de conforto para o pedestre. Por outro lado a presença de muitos pedestres, principalmente idosos e crianças, é o fator de maior desconforto para motoristas. Estes fatores devem ser considerados na escolha de rota de pedestres que em sua viagem possam optar por utilizar um ambiente compartilhado ou outra via tradicional.

A modelagem proposta por Anvari *et. al.* (2012) é bastante interessante por tratar pedestres e veículos com o mesmo equacionamento matemático, baseado em forças sociais, contudo, não considera aspectos da segregação natural que ocorre entre pedestres e veículos que compartilham um ambiente, aspecto este considerado por Schönauer *et. al.* (2012). O tratamento de conflitos descrito em Schönauer *et. al.* (2012) impossibilita simulações em tempo real e é fraco em representar a variabilidade de interações entre os agentes, uma vez que a solução de cada tipo de conflito deve ser modelada. A abordagem de forças sociais utilizada por Anvari *et. al.* (2012) possibilita interações bastante realistas e a observação de comportamentos emergentes.

4. CONCLUSÃO

Os simuladores baseados em agentes tratam pedestres e veículos de forma bastante distinta, onde veículos realizam basicamente atividades de *car following* (Gipps, 1981) e *lane changing* (Gipps, 1986), e pedestres atividades relativas a seguir sua rota desviando de outros pedestres e obstáculos, tradicionalmente utilizando o modelo de forças sociais (Helbing e Molnár, 1995). A Tabela 1 define alguns desafios a serem superados na simulação de pedestres e veículos:

Tabela 1 - Dificuldades da Simulação de Pedestres e Veículos

Desafios	Observações
Movimentação de Veículos	Modelos de <i>Car Following</i> (Gipps, 1981) e <i>Lane Changing</i> (Gipps, 1986) descrevem a movimentação de veículos de forma realista, entretanto são muito distintos dos modelos de movimentação de pedestres.
Movimentação de Pedestres	Modelos de Forças Sociais (<i>et. al.</i> , 1995) e baseados em Campo de Forças (Pretto <i>et. al.</i> , 2008) conseguem reproduzir comportamentos emergentes de grupos de pedestres.
Ambientes de Travessia	Jacobsen (2011) identificou limitações dos modelos de simulação comerciais na representação de travessias. Muitos comportamentos descritos na literatura não são representados em simuladores
Ambientes Compartilhados	Os modelos propostos por Anvari <i>et. al.</i> (2012) e Schönauer <i>et. al.</i> (2012) estão em fase inicial de desenvolvimento.
Tomada de decisão dos agentes	Lakoba <i>et. al.</i> (2005) e Zainnudin e Shuaib (2010) apontam a tomada de decisão dos agentes de forças sociais como um dos aspectos a serem desenvolvidos na modelagem de pedestres.
Escolha de Rotas	Papadimitriou <i>et. al.</i> (2009) identificou em uma exaustiva revisão bibliográfica a fraqueza dos modelos em representar aspectos das travessias na escolha de rotas

O estudo realizado permitiu a elaboração do diagrama exposto na Figura 3, onde são identificados alguns dos problemas enfrentados na simulação conjunta de pedestres e veículos, como:

- A criação de modelos matematicamente semelhantes para representar tanto pedestres quanto veículos, tornando a interação entre os agentes mais natural, possibilitando a representação de ambientes compartilhados.
- Agregar aos agentes a capacidade de tomar decisões baseados em regras, principalmente para representar o respeito à sinalização, possibilitando a simulação de ambientes de travessia.

- Agregar à escolha de rota dos pedestres a influência das diversas possibilidades de locais de travessia considerando dificuldade das travessias, nível de tráfego, etc.



Figura 3 - Problemas não resolvidos na modelagem da interação entre pedestres e veículos: Travessia¹, Ambientes Compartilhados² e Escolha de Rota de Pedestres³ - Fonte: Elaborado pelo autor

A criação de um modelo matemático onde a movimentação de pedestres e veículos sejam regidos por um equacionamento semelhante é um fator chave para a simulação de ambientes compartilhados, como visto em Anvari (2012). Contudo, o modelo deve ser também adequado às situações de travessias, como: semaforizada; sinalizada; de meio de quadra.

Uma vez definidos os processos pelos quais serão guiados pedestres e veículos em suas atividades de seguir suas rotas e evitar obstáculos, é preciso agregar a estes agentes a capacidade de obedecer à sinalização, conceder o direito de passagem aos pedestres ou veículos, dentre outras regras. Zainnudin e Shuaib (2010) consideram que a inclusão de processos de tomada de decisão nos modelos de forças sociais é ainda um vasto campo de desenvolvimento, nos últimos anos, este aspecto vem gradualmente sendo abordado na literatura.

Os modelos de simulação de pedestres tradicionalmente não consideram aspectos de travessias na escolha de rota dos pedestres (Papadimitriou *et. al.*, 2009). Em situações de baixa densidade de tráfego um pedestre pode optar por realizar a travessia em meio de quadra, assim como pode optar por travessias mais seguras em outras ocasiões. A presença de pedestres, gerando aglomerações e fluxos conflitantes também influenciam na escolha. Nestes aspectos, diferentes perfis de pedestres também devem ser considerados.

5. REFERENCIAS

Anvari, B., W. Daamen, V. Knoop, S. Hoogendoorn, M. Bell. Shared Space Modeling Based on Social Forces and Distance Potential Field. International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics - PED 2012, 2012.

¹ Helbing e Treiber (2005), Papadimitriou *et. al.* (2009), Pretto *et. al.* (2008), Jacobsen (2011)

² Anvari (2012), Schönauer *et. al.* (2012 b)

³ Papadimitriou *et. al.* (2009), Papadimitriou (2012)

- Banerjee, B., A. Abukmail, L. Kraemer. Layered Intelligence for Agent-based Crowd Simulation. Simulation, 2009.
- Dijkstra, E. W. A note on two problems in connection with graphs. Numerische Mathematik, v.1, p. 83–89, 1959.
- Gipps, P.G., A behavioral car-following model for computer simulation, Transportation Research B, 1981.
- Gipps, P.G., A model for the structure of lane-changing decisions, Transportation Research B, 1986.
- Godara, A., S. Lassarre, A. Banos. Simulating Pedestrian-Vehicle Interaction in an Urban Network Using Cellular Automata and Multi-Agent Model, 2007.
- Helbing, D. e P. Molnár. Social force model for pedestrian dynamics. Physical Review E 51, p. 4282–4286, 1995.
- Helbing, D. e Treiber R. Analytical Investigation Of Oscillations In Intersecting Flows Of Pedestrian And Vehicle Traffic. Physical Review E 72, 046130, 2005.
- Helbing, D. e A. Johansson. Pedestrian, crowd, and evacuation dynamics. In R. A. Meyers, editor, Encyclopedia of Complexity and Systems Science, volume 16, pages 6476–6495. Springer New York, 2009.
- Jacobsen, A. C. Microssimulação da travessia de pedestres, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- Kaparias, I., M. Bell, A. Miri, C. Chan, B. Mount. Analysing the perceptions of pedestrians and drivers to shared space, Transportation Research Part F 15 297–310, 2012.
- Kretz, T., A. Große, S. Hengst, L. Kautzsch , A. Pohlmann , P. Vortisch. Quickest paths in simulations of pedestrians, 2011
- Lakoba, T, D. Kaup, N. Finkelstein. Modifications of the Helbing-Molnár-Farkas-Vicsek Social Force Model for Pedestrian Evolution. SIMULATION 2005 81: 339, 2005.
- Liu, R., J. P. Cruz da Silva, A. J. Maia Seco. 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, 2000.
- Löhner, R. On the modeling of pedestrian motion. Applied Mathematical Modelling, n.34, p.366-382, 2010.
- Meschini, L. e G. Gentile. Simulation car-pedestrian interactions during mass events with DTA models: the case of Vancouver Winter Olympic Games. SIDT 2009 International Conference, Milan, 2009.

- Papadimitriou, E. Theory and models of pedestrian crossing behaviour along urban trips. *Transportation Research Part F* 15 (2012) 75–94, 2012.
- Papadimitriou, E., G. Yannis, J. Golias. A critical assessment of pedestrian behaviour models, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, v.12. p. 242-255, 2009.
- Pretto, C. O., P. Ariotti, H. B. Cybis. Modeling Pedestrians Movement Regarding Road-Crossing Compliance. *ESM'2008. The 2008 European Simulation and Modeling Conference*, v.1, p.221-225, Le Havre, 2008.
- Pretto, C. O. and H. B. Cybis. Modeling Pedestrian movement on road-crossing environment. *12th World Conference on Transport Research*, Lisboa, 2010.
- Pretto, C. O., A. C. Jacobsen, H. B. Cybis. A multi-layer simulation model for vehicle and pedestrian. *90th Annual Meeting Transportation Research Board*, v. 1. p. 1-15, Washington, 2011.
- Schönauer, R., M. Stubenschrott, W. Huang, C. Rudloff, and M. Fellendorf. Modeling Concepts for Mixed Traffic: Steps towards a Microscopic Simulation Tool for Shared Space Zones. *TRB 2012 Annual Meeting*, 2012.
- Velde, A., J. Kamp, J. Barela, G. Savelsbergh. Visual timing and adaptive behavior in a road-crossing simulation study. *Accident Analysis and Prevention* 37 (2005) 399–406, 2005.
- Wagoum, A., A. Seyfried, S. Holl. Modelling dynamic route choice of pedestrians to assess the criticality of building evacuation. *Advances in Complex Systems*, 2012
- Yang, J., W. Deng, J. Wang, Q. Li, Z. Wang. Modeling pedestrians road crossing behavior in traffic system micro-simulation in China. *Transportation Research Part A*, v. 40, p. 280–290. 2006.
- Zainuddin, Z. e M. Shuaib. Incorporating Decision Making Capability into the Social Force Model in Unidirectional Flow. *Research Journal of Applied Science* 5, 6:388–393, 2010.

3. ARTIGO 2

ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE COMPORTAMENTOS DE PEDESTRES EM MOMENTO
DE TRAVESSIA

ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE COMPORTAMENTOS DE PEDESTRES EM MOMENTO DE TRAVESSIA

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 na lateral da 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.

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.

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).

Pedestre influenciado

Yang *et. al.* (2006) avaliaram 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).

Busca por brechas sucessivas

Yang *et. al.* (2006) consideram 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) descrevem 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.

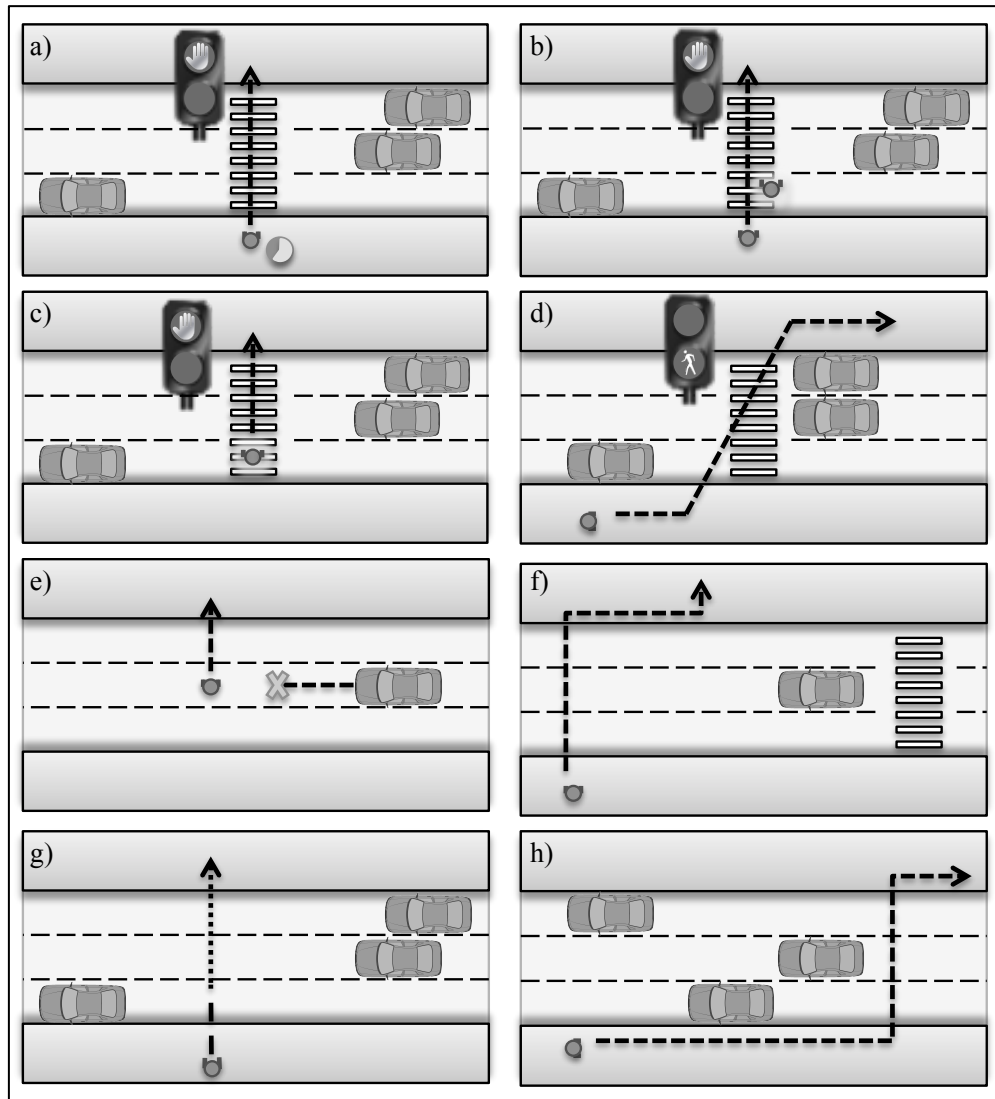


Figura 1 - Comportamentos do Pedestre – Fonte: Elaborado pelo autor

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:

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).

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) descrevem 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).

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).

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. Os entrevistados foram todos selecionados na cidade de Porto Alegre, Brasil. 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 uma escala geométrica, conforme a matriz de priorização descrita em Cristofari Júnior (2010), com os 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. Contudo, a priorização obtida reflete a realidade do local onde a pesquisa foi realizada, sendo, possivelmente, bastante diferente em outros países e em outras realidades socioeconômicas.

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.

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:

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

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”.

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.

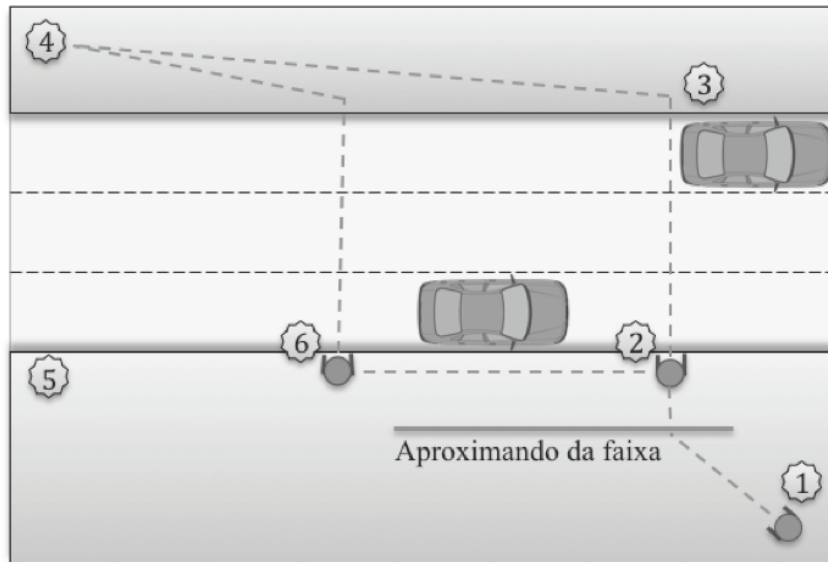


Figura 2 - Modelo de Comportamento do Pedestre – Fonte: Elaborado pelo autor

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 dos pedestres. Com a modelagem proposta não se pode estudar o impacto gerado pela presença dos pedestres no fluxo de veículos, uma vez que os mesmos não percebem os pedestres.

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 pelos pequenos 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. Como o intuito do experimento não é calibrar ou validar o modelo, para todas estas grandezas, utilizou-se a a distribuição normal, por ser de simples implementação.

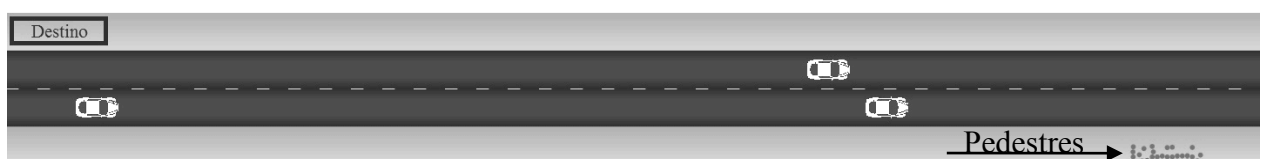


Figura 3 - Cenário de Simulação – Fonte: Elaborado pelo autor

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).

Os níveis de *headway* utilizados foram escolhidos após uma análise de sensibilidade do sistema, onde para *headways* menores do que B1 a travessia se torna muito difícil e para valores maiores do que B9 se torna demasiadamente fácil. 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} .

Tabela 2 - Resultados das Simulações

A	B (<i>headway</i>)									Média
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	
A1 <i>(sem o novo comportamento)</i>	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 <i>(com o novo comportamento)</i>	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	

Para investigar o efeito do novo comportamento incluído no modelo sobre os valores de tempo de viagem dos pedestres, realizou-se um projeto fatorial. No projeto fatorial se deseja avaliar o efeito da variação do valor dos fatores A e B sobre a variável de resposta, o tempo médio de viagem dos pedestres. Para esta avaliação é realizada uma análise de variância sobre os resultados da simulação. 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%. Sobre os fatores onde o valor do “Teste F” é maior do que o valor de “F tabelado”, pode-se afirmar que o efeito sobre a variável de resposta é significativo.

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				

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.

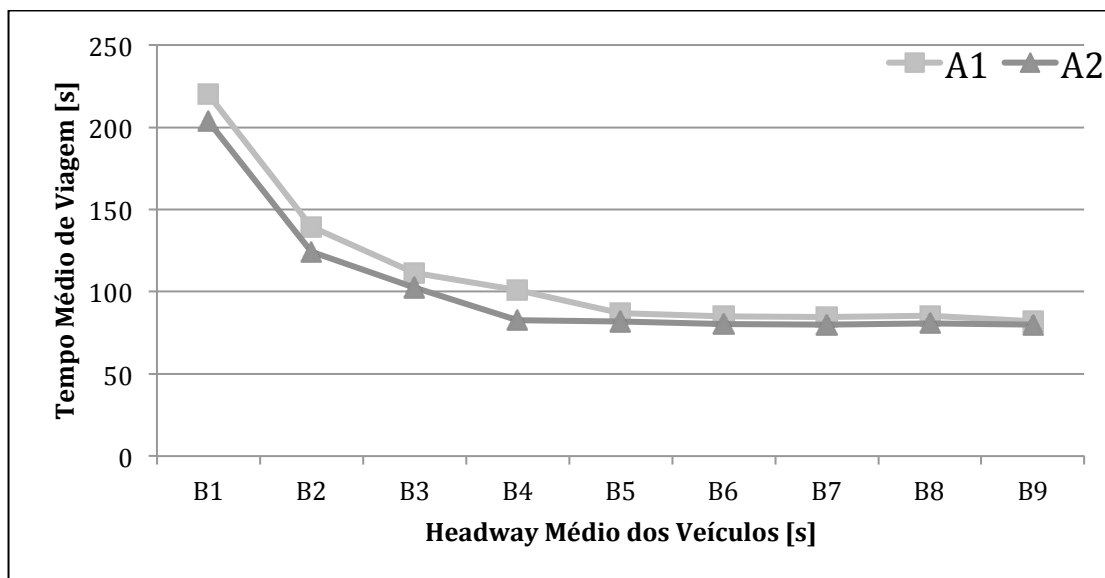
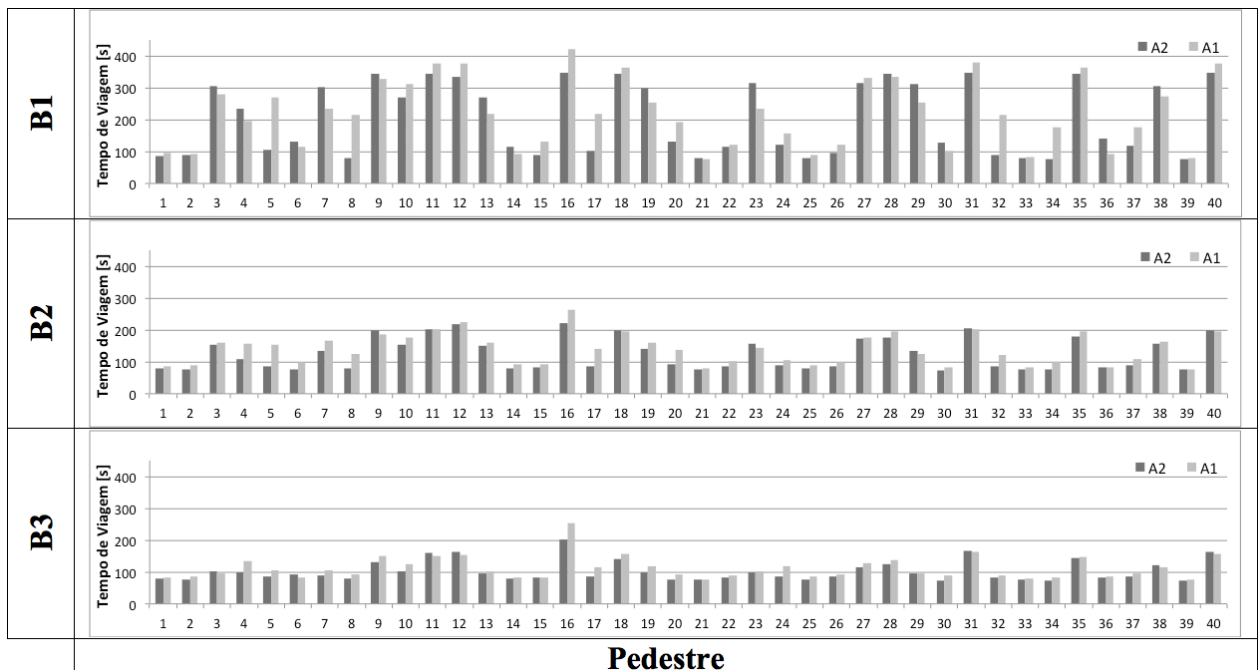


Figura 4 - Visualização Gráfica dos Resultados da Simulação – Fonte: Elaborado pelo autor

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, onde a maioria dos pedestres conseguiu realizar a viagem em um menor tempo realizando a busca por brecha em caminhada.

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.

6. 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. Este estudo comprova a capacidade do modelo de simulação de pedestres descrito por Pretto *et. al.*

(2008), Pretto e Cybis (2010) e Pretto *et. al.* (2011) em suportar novas heurísticas no processo decisório dos agentes.

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.

7. 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.

Cristofari Júnior, C. A., I. C. de Paula, F. Sanson Fogliatto (2010) Método de análise de maturidade e priorização de melhorias na gestão do Processo de Desenvolvimento de Produtos. *Produção*, v. 20, n. 3, p. 359-377.

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.

4. ARTIGO 3

PEDESTRIANS ROUTE CHOICE MODEL BASED ON FRICTION FORCES

PEDESTRIANS ROUTE CHOICE MODEL BASED ON FRICTION FORCES

ABSTRACT

In order to represent the pedestrians route choice behavior, a model that considers the interaction between pedestrians as an impedance to alter pedestrians route was devised. The study is inspired by friction forces equations, considering that pedestrians avoid passing near other pedestrians with high relative velocity. To choose a route a pedestrian consider a balance between the impedance and the path length. The social forces model was used to model pedestrians walk behavior. The model is able to reproduce emergent behavior among agents, allowing the assumption that friction equations adopted in this modeling approach may provide a suitable approach to route choice behavior and can also be used as an indirect measure of pedestrians delay.

Keywords: route choice, social force, pedestrian simulation, modeling of pedestrians, pedestrian behavior

1. INTRODUCTION

The simulation of pedestrians within urban environments is a complex problem. In order to represent the motion of pedestrians more realistically, models are able to simulate several processes, including path planning, sense and avoidance of obstacles, interaction with other pedestrians and route choice.

Regarding the simulation of pedestrians' sense and avoidance of obstacles, most microscopic models reported in the literature can be classified as force-based approaches. In force-based models, agents evaluate forces exerted by the infrastructure and by other agents. Helbing and Molnár [1] present a relevant work about force-based model, in which the authors use Newtonian mechanics with a continuous space representation to model a long-range interaction. The social force model has been successful in reproducing various observed phenomena. The concept behind the modeling suggests that the motion of a pedestrian can be described by the combination of several forces (including repulsive forces from other pedestrians, walls etc.) that result in the pedestrian's direction, at a certain desired speed.

Extending the traditional application of Social Force models, Helbing and Johansson [2] propose a Social Force Model for simulating crowds. In this model, the authors aggregate friction-inspired equations, based on pedestrians' relative speed, to the standard Social Force approach. The interactions with walls and other obstacles are treated analogously to pedestrian interaction. The concept of friction between pedestrian adds an important component for the reasoning of pedestrians' dynamics.

The idea that collective behavior emerges from interactions among individuals is a crucial concept to study simulation of pedestrians [3][4]. Examples of such collective behaviors are the lane formation, or the oscillation of the passing direction at bottlenecks [5][1].

The route choice process can also include an element of collective behavior. Although the decision about what route the pedestrian will take during a trip is an individual decision, it is influenced by a wide range of factors, including the conditions of the environment and the presence of other pedestrians. The analysis of pedestrian route choice in urban areas may help understanding the way pedestrians interact with each other. Compared to other modes of transport, modeling the pedestrian route choice process is complex, since a pedestrian chooses a route from an infinite set of alternatives, weighing his comfort and safety needs with the delay cost.

Most walking processes, such as route selection strategies, are based on subconscious decisions. The perception of distance and directness are the most common reasons for choosing a particular route [6]. Pedestrians frequently choose the shortest route, although they are not aware of this utility maximization process [7]. Other factors that play an important

role in route choice behavior are peoples' habits, number of crossings, pollution and noise levels, safety and shelter from poor weather conditions, and stimulations of the environment [8]. Understanding pedestrians' behavior and how routes are chosen is essential for planning and designing public and private infrastructures.

Most pedestrian models assume a static route choice process. They are built on the assumption that pedestrians walk along the shortest path, defined before the trip starts, and try to walk through this path while avoiding collisions and other pedestrians. However, pedestrians frequently revise and alter their routes based on their instant evaluation of the general environment.

Dynamic route choice models differ from their static counterparts on the sense they represent route changes over time. They aim to provide a sounder representation of the route choice process, emulating the behavior of individual pedestrians while considering variations in the condition of the environments. Many models have layered structures that separate the process of collision avoidance from the route generation process [9][10]. The route generation process in layered models is usually described at the tactical level and the collision avoidance at the operational level.

One interesting approach for pedestrian route choice is provided by Wagoum *et. al.* [11]. The model presents an event-driven way finding algorithm for evacuation scenarios. The algorithm operates on a graph-based structure. The modeled strategy consists on a combination of shortest and quickest path. In contrast to the shortest path, the quickest path is dynamic and changes over time throughout the simulation timeframe. Pedestrians' decisions consider the observed environment, and the dynamic route choice is based on a cost-benefit analysis. The key element of Wagoum's approach is the estimation of travel times between the graph's nodes based on the observed velocity of other agents in the network.

Most relevant route choice models are concerned with pedestrians' evacuation. In the model proposed by Kretz *et. al.* [12] pedestrians adopt paths that present the minimal remaining travel time to the destination. Patil *et. al.* [13] present an interactive algorithm to direct and control crowd simulations. Their approach adopts user-specified guidance fields to direct the agents in a simulation performing a goal-directed navigation. The model by Treuille *et. al.* [14] unifies path planning and local collision avoidance by using a set of dynamic potential and velocity. Banerjee *et. al.* [15] use layer intelligence from computer games to represent congestion avoidance. The authors consider congestion of agents as a dynamic obstacle. Groups of unmoving pedestrians are considered as obstacles and agents tend to avoid them in their route choice.

Most models presented in the literature are concerned only with the quickest or shortest path, like Kirik *et. al.* [16], Dressler *et. al.* [17] and Lämmel *et. al.* [18]. The majority of the models assume that all pedestrian will choose routes only considering variables like distance and density of pedestrians. Sound route choice processes should also consider different pedestrian's profile, regarding characteristics like their desired speed and direction. This paper presents a dynamic route choice model based on a combination of distance and impedance generated by other pedestrians. The calculation of impedance is derived from the friction concept proposed by Helbing and Johansson [2]. The impedance generated by the friction equations involves variables related to the pedestrian's profile, like the desired speed and other pedestrians' velocity. The impedance can be used as an indirect measure of pedestrians' delay.

2. THE MODEL

The aggregation of different levels of abstraction on a simulation model is a complex task. In most cases, each level of abstraction can be separately modeled on a multi-level simulation approach [19]. The framework adopted to describe pedestrian motion in this model was divided in a three-layer structure responsible for: (i) representing the demand for travel, (ii) representing the simulation environment, and (iii) modeling the movement of pedestrians and the process of the sense and avoidance of obstacles.

2.1. Configuration of the modeling demand

The demand for pedestrian trips is defined by a set of origin and destination pairs. Each origin-destination pair is associated to a number of pedestrian trips and a pedestrian generation rate. Origins and destinations are nodes from the graph layer.

2.2. Configuration of the modeling environment

The environment is composed by geometric entities like rooms, doors, and others, and is described as a continuous space. The environment and its entities are linked by a graph-based structure. In this model, the graph provides a path to all entities. The graph generation process should provide a valid path to all entities and guarantee that no edge of the graph intersects any wall or other obstacles in the environment.

2.3. Pedestrian motion: sense and avoidance modeling

The Social Force model [1] describes the pedestrian walking behavior, regarding the agents' low level motion - collision avoidance and velocity adaptation. The social force model considers that pedestrians' motion can be described as a superposition of several forces. Helbing and Molnár [1] assume that these forces are a mixture of psychological and physical forces.

Considering a pedestrian α who wants to reach his destination \vec{r}_α^0 , this pedestrian normally takes the shortest possible way. The pedestrian's trip will usually have some partial destinations, $\vec{r}_\alpha^1 \dots \vec{r}_\alpha^k$. If \vec{r}_α^k is the next partial destination to reach, the desired direction of motion $\vec{e}_\alpha(t)$ will be:

$$\vec{e}_\alpha(t) = \frac{\vec{r}_\alpha^k - \vec{r}_\alpha(t)}{\|\vec{r}_\alpha^k - \vec{r}_\alpha(t)\|} \quad (1)$$

Where $\vec{r}_\alpha(t)$ denotes the pedestrian's α position at time t .

The pedestrian will normally walk with the desired speed v_α^0 , into the desired direction \vec{e}_α . The desired velocity is $\vec{v}_\alpha^0(t) = v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha(t)$. In case of deviations of the current velocity $\vec{v}_\alpha(t)$ from the desired velocity $\vec{v}_\alpha^0(t)$, the pedestrian α tends to adapt $\vec{v}_\alpha(t)$ within a certain relaxation time τ_α . This adaptation can be described by the acceleration term \vec{F}_α^0 :

$$\vec{F}_\alpha^0(\vec{v}_\alpha, v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha) = \frac{1}{\tau_\alpha} (v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha - \vec{v}_\alpha) \quad (2)$$

Pedestrians feel uncomfortable to be closer to other pedestrians and walls, therefore pedestrian β presence will result in a repulsive effect in the motion of pedestrian α . This effect is represented by $\vec{f}_{\alpha\beta}$:

$$\vec{f}_{\alpha\beta}(\vec{r}^{\alpha\beta}) = -\nabla_{\vec{r}_{\alpha\beta}} V_{\alpha\beta}[b(\vec{r}_{\alpha\beta})] \quad (3)$$

Where $V_{\alpha\beta}$ is the repulsive potential, represented by a monotonic decreasing function with equipotential elliptical lines. The elliptical shape reproduces the pedestrian's need for more space in the direction of motion. b is the semi-minor axis of the pedestrian ellipse in defined by $\vec{r}_{\alpha\beta}$ ($\vec{r}_{\alpha\beta} = \vec{r}_{\alpha} - \vec{r}_{\beta}$). The final resultant force exerted over a pedestrian is the superposition of the force to adapt $\vec{v}_{\alpha}(t)$ to the desired velocity, to the forces exerted by other pedestrians and to the forces exerted by walls and other obstacles.

3. ROUTE CHOICE PROCESS MODELING

Route choice modeling is a complex task, since most route selection strategies are based on subconscious decisions. The perception of distance and directness are the most common reasons for choosing a particular route, but other factors play an important role, like safety, pavement conditions, density of people, people walking on the opposite direction, etc. In this model, the cost of each route is calculated as a balance of two factors: route length and the impedance generated by other pedestrians. Impedance generated by the friction between pedestrians exists even before physical contact, due to the psychological tendency to avoid passing close to individuals with high relative velocity [2]. Pedestrians seek the route that minimizes length and friction with other pedestrians.

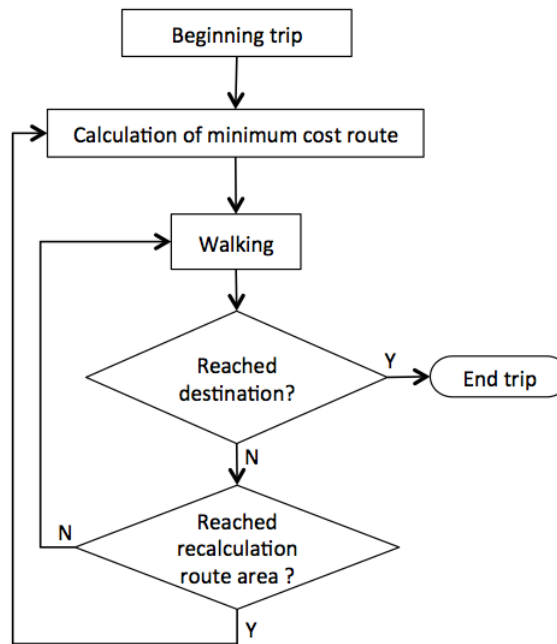


Figure 1 - Dynamic route choice – Source: Made by author

The dynamic process of route choice proposed is represented by the flowchart in Figure 1. The pedestrian starts the route choice process as soon as he starts the trip. In order to choose the route, the pedestrian takes into account the distance between nodes and also the impedance generated by other pedestrians. Once a route is defined, the pedestrian walks through this route until he reaches an area of route recalculation or the final destination. An area of route recalculation is any location where pedestrians can choose between two or more alternatives paths (represented by green areas in Figure 3).

The modeling approach uses the Dijkstra algorithm [20], which generates valid paths for any origin and destination on the graph. The calculation procedure starts at the destination node of the pedestrian, covering all the possible paths to the origin node, assigning a cost for each link between the nodes. At the end of the process, the pedestrian chooses the path defined by

nodes with the minimum accumulated cost. In most applications, cost is defined by the distance between nodes. In this formulation, cost is a combination of distance and a term that represents the impedance exerted by other pedestrians in the simulation. The impedance is calculated by the procedure described below.

Figure 2 describes a pedestrian α who wants to find a route starting at the node O and ending at the node D on the graph. The algorithm traverses the graph assigning the cost for each link between the nodes. Figure 2 shows in the zoomed view how the cost between nodes u and n is calculated for the pedestrian α . The impedance calculation process adopts a fictitious pedestrian α' that is positioned on node u and has the desired direction motion, $\vec{v}_{\alpha'}$, oriented to the direction of node n . The fictitious pedestrian has the same attributes of pedestrian α ($\vec{v}_{\alpha'}^0 = v_{\alpha}^0$).

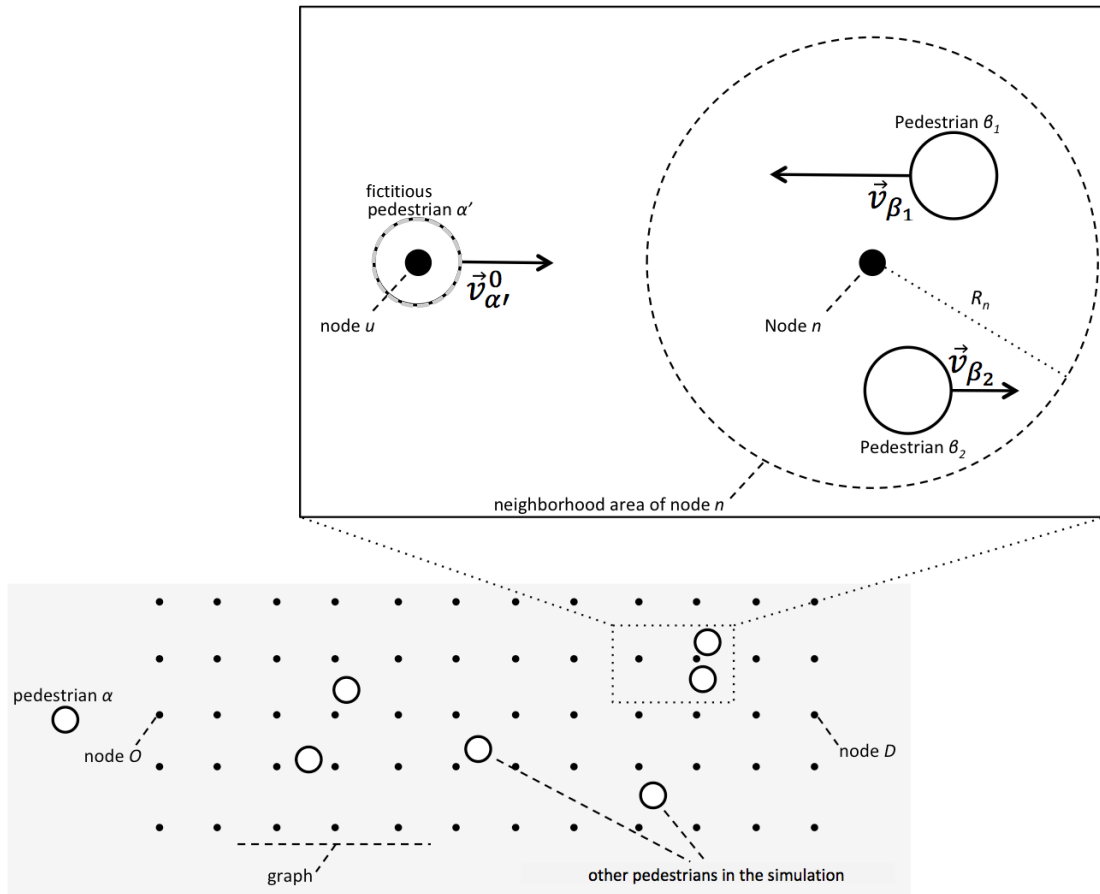


Figure 2 - The route choice model – Source: Made by author

To estimate the impedance exerted over the pedestrian α' is necessary to know the pedestrian desired velocity, $\vec{v}_{\alpha'}^0$, when he is trying to walk from \vec{r}_u to \vec{r}_n :

$$\vec{v}_{\alpha'}^0 = \frac{\vec{r}_n - \vec{r}_u}{\|\vec{r}_n - \vec{r}_u\|} \cdot v_{\alpha}^0 \quad (4)$$

In order to calculate the impedance exerted by other pedestrians over α' , neighborhood areas are defined, by a radius R_n , around the graph nodes. The Impedance is evaluated by the

difference between $\vec{v}_{\alpha'}^0$ and the current velocity of other pedestrians β , \vec{v}_{β} , walking in neighborhood area. Only pedestrians within the neighborhood area of the node n are considered in the impedance estimation.

Considering each pedestrian β currently in the neighborhood area of the node n , the absolute impedance perceived by the pedestrian α' to walk from u to n , $I_{\alpha'}$ is:

$$I_{\alpha'} = \sum_{\beta} \|\vec{v}_{\beta} - \vec{v}_{\alpha'}^0\| \quad (5)$$

The value of $I_{\alpha'}$ is normalized over a settable parameter I_{\max} . The cost perceived by the pedestrian α to walk from node u to n , $W_{\alpha}^{u,n}$, is a balance between distance and impedance exerted by other pedestrians:

$$W_{\alpha}^{u,n} = \|\vec{r}_n - \vec{r}_u\| \cdot (1 + I_{\alpha'} / I_{\max}) \quad (6)$$

The described procedure is repeated until all the possible paths costs are defined. The pedestrian α chooses the route with the lowest cost. The algorithm adopted to calculate the motion cost for the pedestrian α' from node u to n is presented below:

```

Double Cost_from_node_u_to_n(Node u, Node n, Pedestrian A)
{
  Double Absolute_Impedance = 0;
  Vector vA = Normalize(n.position - u.position) * A.DesiredVelocity;
  Q = List with all Pedestrians in the simulation;

  foreach Pedestrian B in Q
    if(DistanceBetween(B, n) < n.NeighborhoodRadius)
      Absolute_Impedance += Module(B.currentVelocity - vA);
    end if;
  endforeach;

  return Module(n.position - u.position) * (1 + Absolute_Impedance/ Max_Impedance);
}

```

One important aspect about the configuration of the model is the granularity of the nodes on the graph and the radius of the neighborhood areas, R_n . Some issues should be considered when defining the modeling environment. If the distance between nodes is too large, the estimation of the impedance generated by the pedestrians' interaction may be poor. On the other hand, if a graph is too dense, the performance of the model can be jeopardized. The radius of the neighborhood area should ideally cover the maximum distance between nodes without overlapping, in order to reduce the probability of over counting or missing pedestrians.

4. SIMULATIONS

The following session presents the results of simulations derived from the implementation of the model described above. The main goals of these simulations were to provide a realistic representation for the route choice model conceived, to understand the pedestrian behavior that emerged from the model and to evaluate the overall model behavior.

To accomplish the simulations' objectives an experiment was set up. Four different scenarios were created consisting of two alternative routes. The experiment aims to compare travel times of pedestrians on both routes.

Figure 3 illustrates the four different scenarios, indicating the shortest route, R1 and the length of the alternative route for each scenario, R2. The number of pedestrians who depart from zone A and has destination B is equal to the number of pedestrians who travel from B to A. The conflicting flows generate congestion on the network. The green zones are the recalculation route areas. Each time a pedestrian reaches one of these areas, he recalculates the route.

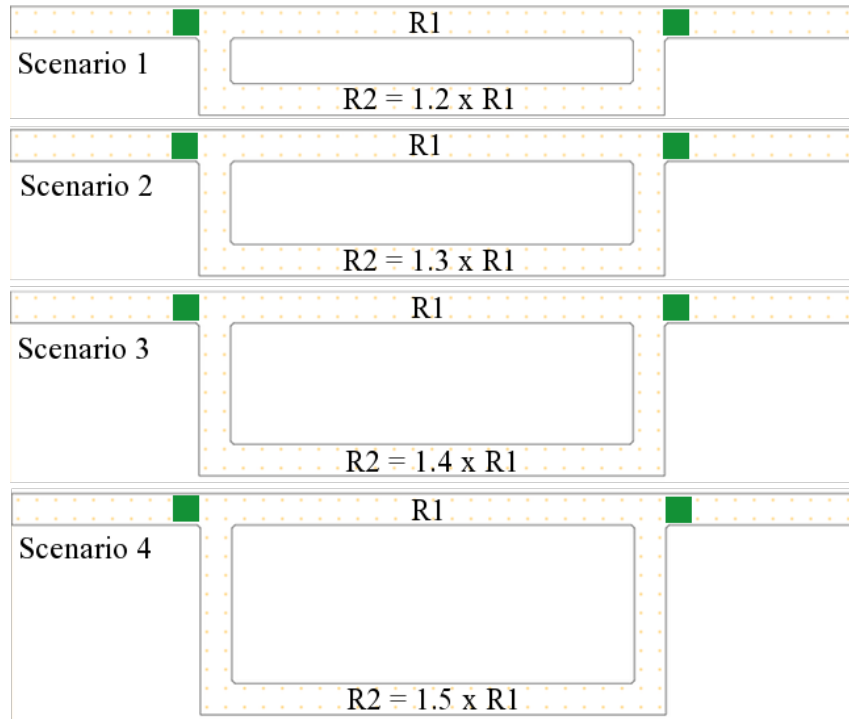


Figure 3 - The four different scenarios – Source: Made by author

The controllable parameters of the simulation were:

- Scenario layout (S), with four levels:
S1 = Scenario 1; S2 = Scenario 2; S3 = Scenario 3; S4 = Scenario 4
- Pedestrian generation rate (F), with three levels (Pedestrians / s):
F1 = 2.4; F2 = 4.0; F3 = 5.6

The social forces model parameters were configured as in Helbing and Molnár [1]. The I_{\max} value was 3.9. The average desired velocity of pedestrians was 1.1 m/s with a standard deviation of 0.2 m/s. For each combination of factors S and F 10 simulations were performed, totaling 120, each one with 350 pedestrians.

The simulation results led to a qualitative and a quantitative analysis. The qualitative analysis is concerned with the pedestrian behavior that emerges from the route choice model. The quantitative analysis regards the numerical results of the simulations, considering different network layouts and pedestrian densities.

4.1. Qualitative analysis

A detailed qualitative analysis from the simulation images demonstrated that the model provides sound representations for pedestrians' behavior.

Figure 4 (A) shows an instant of the simulation. Full circles symbolize pedestrians traveling from left to right and empty circles symbolize pedestrians traveling on the opposite direction. The diameter of the circle is a measure of the pedestrian's current speed. It is clear that route R1 is more congested than R2, and has lower speeds.

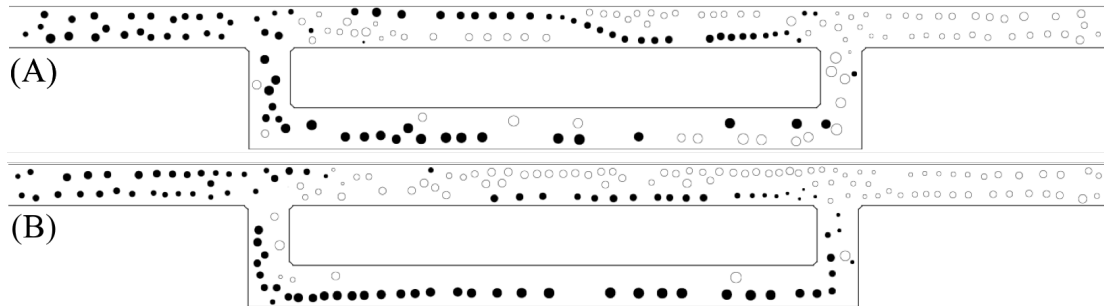


Figure 4 - Simulation views – Source: Made by author

During the simulation, the lane formation of pedestrians moving in the same direction may occur in distinct routes. Lane formation happens because one pedestrian perceives the concordant flow of pedestrians with lower impedance than the opposing flow. Figure 4 (B) shows one instant in the simulation when route R1 is predominantly occupied by empty circles and route R2 predominantly occupied by full circles.

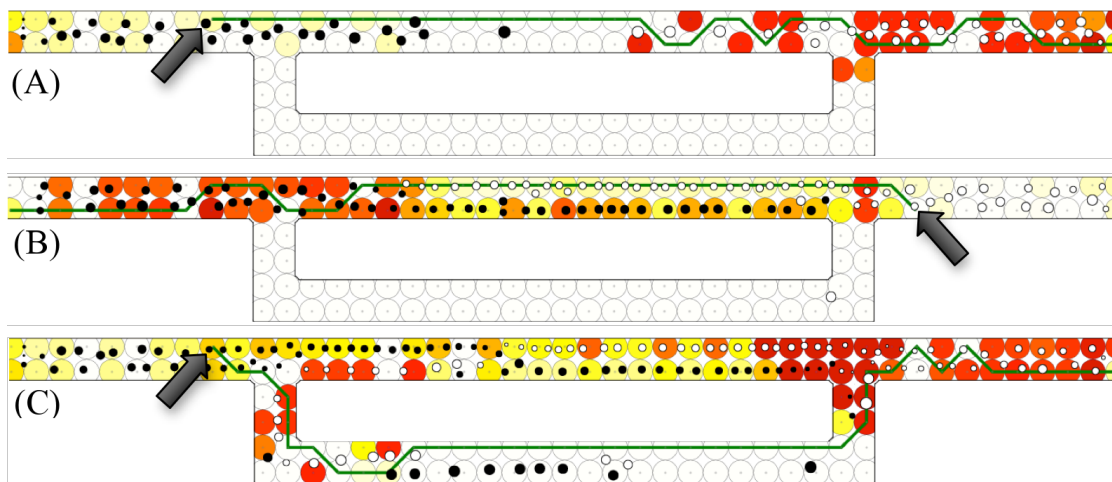


Figure 5 - Impedance map color – Source: Made by author

The pedestrians reasoning about the choice of route can be verified in Figure 5, which illustrates the impedance perceived by pedestrians. The impedance value was associated with a color scale. The color scale varies from light yellow (for lower impedance) to dark red (for higher impedance). Figure 5 (A) shows the perceived impedance for the pedestrian indicated by the arrow at the instant of his route choice; the green line is the chosen route. The colored circles are neighborhood node areas. In Figure 5 (B) the pedestrian indicated by the arrow perceives the lane formation between the conflicting flows of pedestrians as a facilitator of the trip, choosing his route following the lane. Figure 5 (C) shows the moment when the pedestrian chooses the longer route, once the shorter route becomes too congested.

4.2. Quantitative analysis

Table 1 shows the average travel time of pedestrians for each simulation. For this analysis, the average travel time was calculated independently for pedestrians who chose the shortest route,

R1, and for pedestrians who chose the longest route, R2. The average travel time of pedestrians on route R2 is, in most cases, lower than the time of pedestrians who chose the shorter route R1.

Table 1 - Average pedestrians travel time

	S1		S2		S3		S4	
	R1	R2	R1	R2	R1	R2	R1	R2
F1	47.3s	46.9s	49.9s	50.4s	51.9s	51.9s	51.8s	-
F2	55.6s	54.2s	64.8s	60.6s	72.0s	62.5s	76.8s	66.0s
F3	70.7s	67.8s	97.5s	74.9s	105.4s	81.1s	107.6s	81.1s

Figure 6 shows the percentage for the total population of pedestrians in each simulation that chose the longer route R2 for all combination of controllable parameters. The figure demonstrates that the percentage of pedestrians on R2 decreases when the length of R2 increases, leading to longer travel times in R1. This greater number of pedestrian on R1 enables pedestrians who choose R2 to experiment shorter travel times than those opting for R1. Pedestrians only choose to travel on a longer route if they evaluate it as more advantageous over the impedance imposed by contact with other pedestrians. It was also clear that the higher the frequency of pedestrians' generation in the simulation, the higher the portion of pedestrians opting for the alternative route, once route R1 becomes more congested.

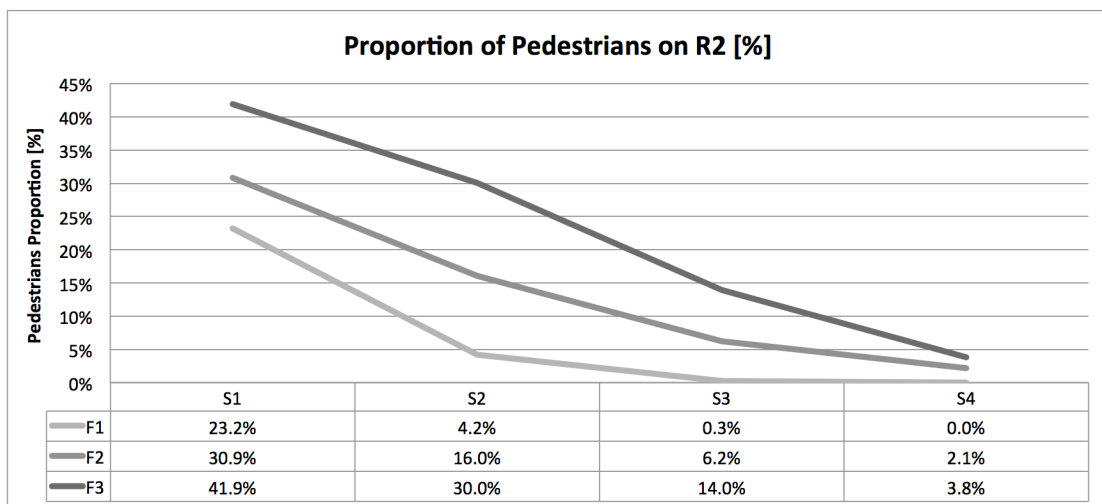


Figure 6 - Proportion of pedestrians on R2 – Source: Made by author

In the warming up and the cooling down period of the simulation, the scenario does not present high density of pedestrians. In these conditions, the pedestrian's obvious route choice is the shortest route R1. This behavior leads to a reduction in the average travel time for R1. In order to eliminate this undesirable effect in the analysis, the simulation time was divided into 10-second intervals, grouping pedestrians who started their travel within the same time interval. Pedestrian groups in which all members chose the same route were not considered in this analysis. Table 2 shows the average gain in travel time of pedestrians who chose R2 in comparison to those who chose R1 for each interval.

Table 2 - Average reduction in travel time through R2 compared to R1

	S1	S2	S3	S4
F1	2.9%	7.4%	5.6%	-
F2	4.8%	15.7%	26.5%	36.5%
F3	5.4%	29.2%	32.3%	37.0%

The increasing volume of pedestrians has a direct relationship with the time saved by pedestrians who choose R2. The more congested the simulation environment, the higher the travel time gain of pedestrians who chose the longest route.

In order to explore the applicability of the model formulation, one of the main objectives of the simulations performed was to understand underlined relationships that emerged from the model. Was there any relationship between pedestrians' profiles, i.e. pedestrians' desired speed, and their choice of route? For this analysis, a simulation with 800 pedestrians was performed for scenario S2 and generation frequency F2. The desired speeds of pedestrians on both routes can be analyzed in Figure 7.

Pedestrians x Velocity Histogram

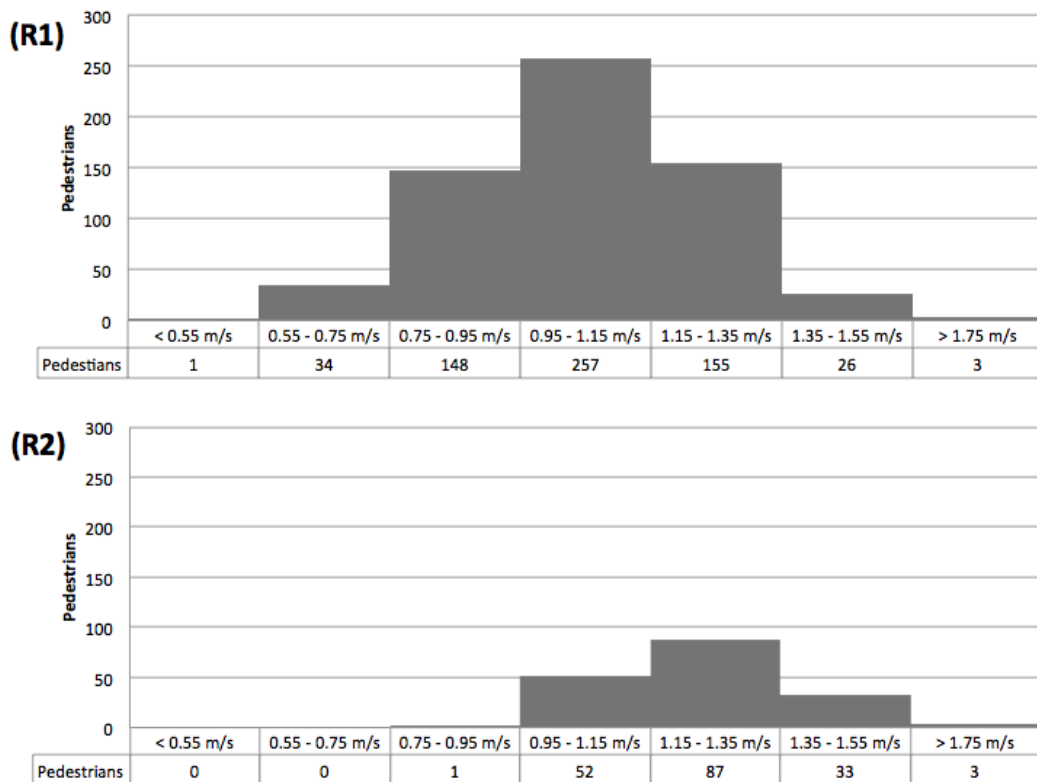


Figure 7 - Desired speed histogram at R1 and R2 – Source: Made by author

Pedestrians with higher desired speed are more likely to choose the longer route, R2, than a slower pedestrian. This effect is due to the fact that for the calculation of friction with other pedestrians, higher speeds tend to generate higher impedance. Thus, pedestrians prepared to walk faster are also more willing to walk more if possible, thus diverting from congested area.

5. CONCLUSIONS

The modeling approach presented in this paper provides a sound representation of pedestrian route choice dynamics. Route choice is based on a combination of distance and the impedance

generated by other pedestrians. The model adopts a pedestrian friction concept to calculate impedance. The analysis from simulations indicates that the emerging behavior of this model provides a promising approach for real case applications.

Interesting pedestrian route choice behaviors emerged from the model. Pedestrians on longer routes presented travel times similar to pedestrians traveling on shorter routes. Pedestrians who choose the longest route tended to have a higher desired speed. Pedestrian dynamics presented a sound lane formation behavior. The lane formation of concurrent flows occurred at the same route or segregated into distinct routes.

The emergent behavior from the model allows the assumption that friction equations adopted in this modeling may provide a suitable approach to route choice behavior and can also be used as an indirect measure of pedestrian delay.

6. REFERENCES

- [1] Helbing, D. and P. Molnar. 1995. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 51, 42–82.
- [2] Helbing, D and A. Johansson. Pedestrian, Crowd and Evacuation Dynamics. *Swiss Federal Institute of Technology*, 2009.
- [3] Helbing, D., I. Farkas, T. Vicsek. 2000. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature* 407, 487-490.
- [4] Sumpter, D. 2006. The principles of collective animal behaviour. *Phil. Trans. R. Soc. B* 361, 5–22.
- [5] Milgram, S. and H. Toch. 1969. Collective behavior and social movements. *Handbook of social psychology*, 2nd ed, Vol. IV, 507-610.
- [6] Hill, M.R. 1982. Spatial Structure and Decision-Making of Pedestrian Route Selection Throught An Urban Envioronment, Ph.D Thesis, University Microfilms International.
- [7] Senevarante, P.N., J. Morall. 1986. Analysis of factores affecting the choice of route of pedestrians. *Transportation Planning and Technology* 10, 147-159.
- [8] Papadimitriou, E. 2012. Theory and models of pedestrian crossing behaviour along urban trips. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 15, 75-94.
- [9] Hoogendoorn, S., P. Bovy, W. Daamen. 2002. Microscopic pedestrian wayfinding and dynamics modelling. *Schreckenberg, M., Sharma, S. (Eds.), Pedestrian and Evacuation Dynamics*. Springer, 123–155.
- [10] 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, 1, 1-15, Washington.
- [11] Wagoum, A. U. K., A. Seyfried, S. Holl. 2012. Modeling The Dynamic Route Choice Of Pedestrians To Assess The Criticality Of Building Evacuation. *Advances in Complex Systems*, 15.07.
- [12] Kretz, T., A. GROßE, S. Hengst, L. Kautzsch, A. Pohlmann, P. Vortisch. 2011. Quickest Paths in Simulations of Pedestrians. *Advances in Complex Systems* 14.05, 733-759.

- [13] Patil, S. J. Berg, S. Curtis, M. Lin, D. Manocha. 2010. Directing crowd simulations using navigation fields, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 244-254.
- [14] Treuille, A., S. Cooper, Z. Popović. 2006. Continuum crowds. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 25. No. 3. ACM, 2006.
- [15] Banerjee, B., A. Abukmail, Landon K. 2009. Layered Intelligence for agent-based crowd simulation. *SIMULATION: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, 85(10), 621–633.
- [16] Kirik, E. S., Yurgel'yan, T. B. and Krouglov, D. V. 2009. The shortest time and/or the shortest path strategies in a CA FF pedestrian dynamics model. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*, 2, 271–278.
- [17] Dressler, D., M. Groß, J. Kappmeier, T. Kelter, J. Kulbatzki, D. Plümpke, G. Schlechter, M. Schmidt, M. Skutella, and S. Temme. 2010. On the use of network flow techniques for assigning evacuees to exits. *Procedia Engineering*, 3, 205–215.
- [18] Lämmel, G., M. Plaue. 2012. Getting out of the way: Collision avoiding pedestrian models compared to the real world. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*.
- [19] Gaud, N., S. Galland, F. Gechter, V. Hilaire, A. Koukam. 2008. Holonic multilevel simulation of complex systems: Application to real-time pedestrians simulation in virtual urban environment. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16, 1659–1676.
- [20] Dijkstra, E. 1959. W.A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1, 269–271.

5. CONCLUSÕES

Nesta dissertação foi apresentada uma revisão sobre simulação de pedestres, focada em lacunas a serem vencidas pelos modelos. A partir da identificação de possíveis melhorias pertinentes à simulação de pedestres, foram desenvolvidos estudos contemplando alguns dos aspectos. Este capítulo apresenta as principais conclusões deste estudo.

A revisão bibliográfica mostra que os modelos de movimentação de pedestres e veículos, apesar de estarem constantemente sofrendo melhorias, estão bastante consolidados e são capazes de reproduzir com bastante fidelidade fenômenos reais. Entretanto, as abordagens de modelagem de pedestres e de veículos são de naturezas bastante distintas, dificultando a interação entre as duas entidades em um mesmo ambiente de simulação. Dentre as limitações do modelos destacam-se a representação de travessias e de ambientes compartilhados e a escolha de rotas do pedestre considerando aspectos relativos à interação com os veículos.

Neste trabalho de dissertação foram estudados comportamentos de pedestres em travessia descritos na literatura e que não são normalmente representados em simuladores tradicionais. A inclusão de muitas variáveis à modelagem, muitas vezes pouco conhecidas e de difícil calibração, pode comprometer a confiabilidade dos resultados gerados pelo modelo, da mesma forma que não considerar aspectos importantes. Por este motivo foi realizada a priorização dos comportamentos estudados, com base em entrevistas com usuários do sistema de transportes, que indicaram qual o comportamento que geraria maior impacto nos tempos de viagem de pedestres caso a modelagem fosse incluída em um simulador.

A utilização de entrevistas para embasar aspectos de modelagem esbarra nas limitações do auto relato dos entrevistados. A utilização de uma ilustração esquemática para cada um dos comportamentos se mostrou um método bastante eficaz para o correto entendimento por parte dos respondentes da pesquisa. Como resultado das entrevistas o comportamento de busca por brecha em caminhada foi o comportamento com maior prioridade em ser agregado a um simulador de pedestres.

O comportamento de busca por brecha em caminhada pode ser visto como um processo de escolha dinâmica de rotas baseado nos níveis de tráfego, onde o pedestre opta por realizar a travessia no local onde encontra brechas aceitáveis na corrente de tráfego. A modelagem proposta para este comportamento se mostrou bastante satisfatória em representar o fenômeno. De acordo com o experimento realizado sobre o resultado de inúmeras simulações foi comprovada uma diferença significativa nos tempos de viagem dos pedestres com e sem a modelagem do novo comportamento. A inclusão de novos comportamentos aos modelos de simulação pode gerar resultados bastante diferentes e mais verossímeis a cenários urbanos reais.

A escolha de rotas do pedestre, realizada no nível tático do processo decisório, deve ser corrigida ao longo da viagem de acordo com as percepções do pedestre no nível operacional, conforme Papadimitriou et. al. (2009). Na modelagem do comportamento de busca por brecha em caminhada, o pedestre recalcula sua rota observando níveis de tráfego de veículo. No nível operacional o pedestre também está ocupado em desviar de outros pedestres, e em sua escolha de rota, ele busca também evitar grandes atrasos originados deste confronto.

A modelagem proposta para representar o processo de escolha de rota que minimiza a impedância gerada por outros pedestres no cenário foi baseada em equações de atrito, onde um pedestre tende a evitar passar próximo de outro pedestre com elevada velocidade relativa. O método utilizado mostrou-se capaz de representar efetivamente pedestres optando por rotas mais longas, evitando confrontos com outros pedestres, e conseqüentemente evitando atrasos. Nas simulações realizadas foi observado o comportamento dos pedestres em seguir a rota de outros pedestres que viajam no mesmo sentido pretendido, evitando o confronto com pedestres que viajam de encontro ao seu objetivo.

Desta forma, conclui-se que a inclusão de comportamentos de pedestres ainda não presentes em simuladores tradicionais pode torná-los mais fieis na representação de cenários urbanos reais e podem gerar também grandes impactos nos resultados das simulações. Os modelos de escolha de rotas apresentados foram eficazes na representação dos fenômenos propostos e conseguiram representar comportamentos emergentes da interação entre os agentes.

5.1. Trabalhos Futuros

O estudo dos diferentes comportamentos de pedestres em travessia não se limita aos descritos nesta dissertação. Inúmeros fenômenos podem ser estudados, como o comportamento de pedestres que caminham juntos, comportamento de crianças e idosos, comportamento de pedestres com dificuldade de locomoção (portadores de deficiência física ou visual), etc. Para o desenvolvimento da modelagem de travessias também se faz necessária a análise do comportamento dos motoristas, identificando os fenômenos da interação destes com os pedestres.

A modelagem proposta no Capítulo 3 para a representação de travessias tem por objetivo analisar o impacto da inclusão de um novo comportamento de pedestre. Neste estágio de desenvolvimento, o modelo não é capaz de ser utilizado como uma ferramenta de planejamento de transportes. Desenvolvimentos futuros devem contemplar a percepção e resposta dos veículos em relação aos pedestres, bem como generalizar o modelo para sua utilização em cenários mais complexos.

O modelo de escolha de rotas proposto no Capítulo 4 se mostrou bastante promissor para a utilização na representação de ambientes urbanos. Contudo, se faz necessária a análise de sua atuação em cenários com diferentes *layouts*. Desenvolvimentos futuros devem considerar no processo de escolha de rota outros aspectos, como diferentes tipos de pavimento, topografia e também aspectos relativos às travessias, fundamental para a representação de ambientes urbanos.

A validação e calibração dos modelos propostos nesta dissertação são atividades complexas. A calibração da modelagem do comportamento dos pedestres em travessia e de sua escolha de rota não consiste somente em contagens ou medições quantitativas. Uma

análise qualitativa, baseada na observação de travessias, e com dados coletados em vídeo, se faz necessária para um melhor entendimento e classificação de perfis de pedestres e motoristas em interação.

O desenvolvimento da modelagem de travessias tornará possível, durante a simulação de um ambiente urbano, estimar com maior realismo tempos de atraso e níveis de conforto encontrados pelos pedestres. Estas estimativas podem alimentar o modelo de escolha de rotas, agregando os dois modelos e criando possibilidades de simulações bastante representativas da realidade. Este modelo de simulação poderá ser utilizado como uma ferramenta de planejamento urbano, possibilitando a análise da implantação de diferentes *layouts*, como por exemplo o estudo do melhor local para a colocação de uma faixa de segurança, avaliação da necessidade de utilização de barreiras físicas, avaliação da melhor temporização semafórica, etc. A função do simulador é auxiliar na escolha do melhor *layout* para um ambiente urbano, considerando tempos de atraso e níveis de conforto e segurança para veículos e pedestres.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anvari, B., W. Daamen, V. Knoop, S. Hoogendoorn, M. Bell. Shared Space Modeling Based on Social Forces and Distance Potential Field. International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics - PED 2012, 2012.
- Ariotti, P. 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, 2006
- Ariotti, P., H. B. B. Cybis. Modelo de análise do comportamento de pedestres em travessias semaforizadas. XIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, v. 2, p.1142-1153, Recife, 2005.
- Banerjee, B., A. Abukmail, L. Kraemer. Layered Intelligence for Agent-based Crowd Simulation. Simulation, 2009.
- Cambon, L. B., C. Tijus, S. Poitrenaud, C. Leproux, J. Bergeron, J. P. Thouez. Pedestrian crossing decision-making: A situational and behavioral approach, Safety Science, 47 (9) , pp. 1248-1253, 2009.
- Cristofari Júnior, C. A., I. C. de Paula, F. Sanson Fogliatto. Método de análise de maturidade e priorização de melhorias na gestão do Processo de Desenvolvimento de Produtos. Produção, v. 20, n. 3, p. 359-377, 2010.
- Dijkstra, E. W. A note on two problems in connection with graphs. Numerische Mathematik, v.1, p. 83–89, 1959.
- Dressler, D., M. Groß, J. Kappmeier, T. Kelter, J. Kulbatzki, D. Plümpe, G. Schlechter, M. Schmidt, M. Skutella, and S. Temme. On the use of network flow techniques for assigning evacuees to exits. Procedia Engineering, 3, 205–215, 2010

- Gaud, N., S. Galland, F. Gechter, V. Hilaire, A. Koukam. Holonic multilevel simulation of complex systems: Application to real-time pedestrians simulation in virtual urban environment. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16, 1659–1676, 2008.
- Geraerts, R. and M. Overmars. The Corridor Map Method: a general framework for real-time high-quality path planning. *Computer Animation and Virtual Worlds* 18, p. 107–119, 2007.
- Gipps, P.G., A behavioral car-following model for computer simulation, *Transportation Research B*, 1981.
- Gipps, P.G., A model for the structure of lane-changing decisions, *Transportation Research B*, 1986.
- Godara, A., S. Lassarre, A. Banos. *Simulating Pedestrian-Vehicle Interaction in an Urban Network Using Cellular Automata and Multi-Agent Model*, 2007.
- Helbing, D. e P. Molnár. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E* 51, p. 4282–4286, 1995.
- Helbing, D. e Treiber R. Analytical Investigation Of Oscillations In Intersecting Flows Of Pedestrian And Vehicle Traffic. *Physical Review E* 72, 046130, 2005.
- Helbing, D. e A. Johansson. Pedestrian, crowd, and evacuation dynamics. In R. A. Meyers, editor, *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, volume 16, pages 6476–6495. Springer New York, 2009.
- Hoogendoorn, S., P. Bovy, W. Daamen. Microscopic pedestrian wayfinding and dynamics modelling. Schreckenberg, M., Sharma, S. (Eds.), *Pedestrian and Evacuation Dynamics*. Springer, 123–155, 2002.
- Helbing, D., I. Farkas, T. Vicsek. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature* 407, 487-490, 2000.
- Hill, M.R. *Spatial Structure and Decision-Making of Pedestrian Route Selection Throught An Urban Envorironment*, Ph.D Thesis, University Miicrofilms International, 1982.
- Jacobsen, A. C. *Microssimulação da travessia de pedestres*, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- Kaparias, I., M. Bell, A. Miri, C. Chan, B. Mount. Analysing the perceptions of pedestrians and drivers to shared space, *Transportation Research Part F* 15 297–310, 2012.
- Karamouzas, I., P. Heil, P. Beek, M. H. Overmars. A Predictive Collision Avoidance Model for Pedestrian Simulation. *Motion in Games (MIG2009)*,v.5884, p.40–52, Netherlands, 2009.

- Kirik, E. S., Yurgel'yan, T. B. and Krouglov, D. V. The shortest time and/or the shortest path strategies in a CA FF pedestrian dynamics model. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*, 2, 271–278, 2009.
- Kretz, T., A. Große, S. Hengst, L. Kautzsch, A. Pohlmann, P. Vortisch. Quickest paths in simulations of pedestrians, 2011
- Lakoba, T, D. Kaup, N. Finkelstein. Modifications of the Helbing-Molnár-Farkas-Vicsek Social Force Model for Pedestrian Evolution. *SIMULATION* 2005 81: 339, 2005.
- Lamarche, F. And S. Donikian. Crowd of Virtual Humans: a new approach for real time navigation in complex and structured environments. *Computer Graphics Forum* 23, p. 509–518, 2004.
- Lämmel, G., M. Plaue. Getting out of the way: Collision avoiding pedestrian models compared to the real world. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, 2012.
- Liu, R., J. P. Cruz da Silva, A. J. Maia Seco. 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, 2000.
- Löhner, R. On the modeling of pedestrian motion. *Applied Mathematical Modelling*, n.34, p.366-382, 2010.
- Meschini, L. e G. Gentile. Simulation car-pedestrian interactions during mass events with DTA models: the case of Vancouver Winter Olympic Games. *SIDT 2009 International Conference*, Milan, 2009.
- Milgram, S. and H. Toch. Collective behavior and social movements. *Handbook of social psychology*, 2nd ed, Vol. IV, 507-610, 1969.
- Papadimitriou, E. Theory and models of pedestrian crossing behaviour along urban trips. *Transportation Research Part F* 15 (2012) 75–94, 2012.
- Papadimitriou, E., G. Yannis, J. Golias. A critical assessment of pedestrian behaviour models, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, v.12. p. 242-255, 2009.
- Patil, S. J. Berg, S. Curtis, M. Lin, D. Manocha. Directing crowd simulations using navigation fields, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 244-254, 2010.
- Pretto, C. O., P. Ariotti, H. B. Cybis. Modeling Pedestrians Movement Regarding Road-Crossing Compliance. *ESM'2008. The 2008 European Simulation and Modeling Conference*, v.1, p.221-225, Le Havre, 2008.
- Pretto, C. O. and H. B. Cybis. Modeling Pedestrian movement on road-crossing environment. *12th World Conference on Transport Research*, Lisboa, 2010.

- Pretto, C. O., A. C. Jacobsen, H. B. Cybis. A multi-layer simulation model for vehicle and pedestrian. 90th Annual Meeting Transportation Research Board, v. 1. p. 1-15, Washington, 2011.
- Reynolds, C. W. Steering behaviors for autonomous characters. The proceedings of Game Developers Conference, p. 763–782, 1999.
- Rosenbloom, T. Crossing at a red light: Behaviour of individuals and groups. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 12 (5), pp. 389-394, 2009.
- Schönauer, R., M. Stubenschrott, W. Huang, C. Rudloff, and M. Fellendorf. Modeling Concepts for Mixed Traffic: Steps towards a Microscopic Simulation Tool for Shared Space Zones. TRB 2012 Annual Meeting, 2012.
- Shao, W. And D. Terzopoulos. Autonomous pedestrians. Graphical Models. n. 69, v. 5-6, p. 246–274, 2007.
- Senevarante, P.N., J. Morall. Analysis of factores affecting the choice of route of pedestrians. Transportation Planning and Technology 10, 147-159, 1986.
- Sisiopiku, V. P. and D. Akin. 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, 2003.
- Sud A., R. Gayle, E. Andersen, S. Guy, M. Lin, D. Manocha. Real-time navigation of independent agents using adaptive roadmaps. ACM symposium on Virtual reality software and technology, p. 99–106, 2007.
- Sumpter, D. 2006. The principles of collective animal behaviour. Phil. Trans. R. Soc. B 361, 5–22, 2006.
- Treuille, A., S. Cooper, Z. Popovi`C. Continuum Crowds. ACM Transactions on Graphics, n. 25, v. 3, p. 1160–1168, 2006.
- Vasconcellos, E. A. Transporte urbano, espaço e equidade: análise das políticas públicas. Annablume, São Paulo, 2001.
- Velde, A., J. Kamp, J. Barela, G. Savelsbergh. Visual timing and adaptive behavior in a road-crossing simulation study. Accident Analysis and Prevention 37 (2005) 399–406, 2005.
- Wagoum, A., A. Seyfried, S. Holl. Modelling dynamic route choice of pedestrians to assess the criticality of building evacuation. Advances in Complex Systems, 2012
- Xiaoping, Z., Z. Tingkuan, L. Mengting. Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches. Building and Environment, n. 44, p. 437–445, 2009.

Yang, J., W. Deng, J. Wang, Q. Li, Z. Wang. Modeling pedestrians road crossing behavior in traffic system micro-simulation in China. *Transportation Research Part A*, v. 40, p. 280–290, 2006.

Zainuddin, Z. e M. Shuaib. Incorporating Decision Making Capability into the Social Force Model in Unidirectional Flow. *Research Journal of Applied Science* 5, 6:388–393, 2010.