

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

DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE PEDESTRES
CONSIDERANDO A INTERAÇÃO ENTRE PEDESTRES E VEÍCULOS

Carlos Oliva Pretto

PORTO ALEGRE

Abril de 2011

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

DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE PEDESTRES
CONSIDERANDO A INTERAÇÃO ENTRE PEDESTRES E VEÍCULOS

Carlos Oliva Pretto

Orientador: Helena Beatriz Betella Cybis, Ph.D.

Banca Examinadora:

Luis Antonio Lindau, Ph.D.

UFRGS

Rosaldo Rossetti, Dr.

FEUP

Benamy Turkienicz, Ph.D.

UFRGS

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de

Produção como requisito parcial à obtenção do título de

DOUTOR EM ENGENHARIA

Área de concentração: Transportes

Porto Alegre, 26 de abril de 2011

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Prof^a. Helena Beatriz Betella Cybis, Ph.D.

PPGEP/UFRGS

Orientadora

Prof^a Carla Schwengbe ten Caten, Dr.

Coordenadora do PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Rosaldo Rosseti, Dr.

FEUP/PT

Benamy Turkienicz, Ph.D.

UFRGS/RS

Luis Antonio Lindau, Ph.D.

UFRGS/RS

AGRADECIMENTOS

Com muita consideração, agradeço:

a minha mãe Gláucia, pela ajuda imprescindível na reta final do trabalho, a minha noiva Renata, pelo apoio e motivação incondicional, ao meu pai João Carlos e ao meu irmão Bruno, pela torcida e apoio em todas as horas;

a minha orientadora Helena pelo acolhimento, pela orientação e, principalmente, pela confiança no meu trabalho;

à UFRGS e ao PPGEP que, através de seus professores e funcionários, proporcionam o desenvolvimento da pesquisa na área de Transportes;

à CAPES pelo apoio financeiro concedido através da bolsa de doutorado.

RESUMO

O modelo apresentado neste trabalho, denominado SimPed, foi concebido para fornecer uma boa representação da interação entre pedestres e uma abordagem realista para a interação entre pedestres e veículos em ambiente urbano. O modelo apresenta uma estrutura híbrida, combinando conceitos baseados em campo de força e as abordagens baseadas regra. Pedestres e veículos são representados por agentes e os atributos das infraestruturas são definidos através de camadas estruturais.

Este trabalho, apresenta também, o desenvolvimento de dois modelos preliminares ao SimPed. O primeiro modelo apresenta conceitos básicos de movimento de pedestres. O segundo refere-se aos problemas de geração de rotas dos pedestres. O modelo SimPed é um novo modelo de movimentação de pedestres, que considera a interação entre veículos e pedestres.

A fim de verificar a aplicabilidade prática do SimPed, este trabalho apresenta três testes de simulação. O primeiro teste preocupa-se com a capacidade do modelo para representar a interação entre os pedestres. O segundo analisa uma travessia de pedestres, e foi concebido para investigar a influência do campo de força dos pedestres no desempenho do tráfego de veículos. O terceiro teste se preocupa com a representação da aceitação de *gaps* pelos pedestres. Neste teste os valores dos *gaps* obtidos na simulação são comparados com valores de *gaps* obtidos a partir de uma coleta de dados de vídeo em um local de travessia de pedestres. Os testes indicam que o modelo SimPed fornece bons fundamentos para uma representação de qualidade do processo de travessia dos pedestres.

Palavras-chave: Simulação de Pedestres, Simulação Baseada em Agentes, Interação entre Veículos e Pedestres, Travessia de pedestres.

ABSTRACT

The model presented in this work, named as SimPed, has been devised to provide a sound representation of interaction among pedestrians and a more realistic approach for interaction between pedestrians and vehicles. The model presents a hybrid structure, combining force field and rule based approaches. Pedestrians and vehicles assume an agent based representation and the attributes of the infrastructure are defined by several structural layers.

This work presents the development of 2 preliminary models and the SimPed model. The first model concerns about basic concepts of pedestrians' movement. The second one concerns about the pedestrians' path generation problem. The SimPed model is a new pedestrian's movement model with vehicle and pedestrians interaction capabilities.

In order to verify the practical applicability of the SimPed, this work presents three simulation tests. The first test concerns the capacity of the model to represent interaction among pedestrians. The second analyses a pedestrian crossing environment, and was devised to investigate the influence of the force-based parameter on traffic performance. The third simulation test is concerned with pedestrians' gap acceptance representation. In this test gap acceptance values obtained from simulation are compared with gap values obtained from a video data collection of pedestrians at a crossing facility. The tests indicate that the model structure and its calibration resources provide good grounds for sound representations of realistic conditions.

Key-words: Pedestrian Simulation, Agent based simulation, Vehicle and Pedestrians interaction, Road Crossing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Estrutura do Trabalho	26
Figura 2	Congestionamento	41
Figura 3	Formação de filas.....	41
Figura 4	Oscilação.....	41
Figura 5	Cruzamentos	42
Figura 6	Resumo das abordagens.....	45
Figura 7	Modelo 1 - Ambiente de simulação	48
Figura 8	Modelo 1 - Processo decisório.....	49
Figura 9	Simulação 1: dinâmica dos pedestres.....	52
Figura 10	Simulação 1: velocidade média global	52
Figura 11	Simulação 2: dinâmica dos pedestres.....	53
Figura 12	Simulação 2: velocidade média global	53
Figura 13	Simulação 3: dinâmica dos pedestres.....	54
Figura 14	Simulação 3: velocidade média global	54
Figura 15	Comparação dos resultados das simulações.....	55
Figura 16	Agentes parados no tempo	56
Figura 17	Nível macro	58
Figura 18	Nível meso.....	59
Figura 19	Escolha do próximo passo.....	60

Figura 20	Grafo	62
Figura 21	Simulação do comportamento	63
Figura 22	Distância percorrida por dois pedestres.....	65
Figura 23	Distância percorrida por seis pedestres.....	66
Figura 24	Tempo médio de travessia dos pedestres.....	66
Figura 25	Pedestre.....	68
Figura 26	Veículo	69
Figura 27	Parede	69
Figura 28	Ambiente de simulação do modelo SimPed.....	70
Figura 29	Deteção de colisão entre agentes.....	70
Figura 30	Pedestres em rota de colisão	72
Figura 31	Pedestres em rotas paralelas.....	73
Figura 32	Grafo e Rota	74
Figura 33	Representação gráfica do campo de força.....	75
Figura 34	Vetores para o cálculo da força	76
Figura 35	Exemplo de cálculo em um ponto do espaço	77
Figura 36	Escolha discreta do local do próximo passo	79
Figura 37	Linha imaginária de percepção do pedestre	79
Figura 38	Veículo com percepção do pedestre	80
Figura 39	Ambiente de simulação do SimPed	80

Figura 40	Visualização 3D.....	84
Figura 41	Grafo sobre a camada micro	85
Figura 42	Grafo	86
Figura 43	Formação dos grupos de pedestres	92
Figura 44	Conflito de pedestres no corredor.....	93
Figura 45	Formação de fila no corredor	93
Figura 46	Trajetória dos pedestres em uma faixa de segurança	94
Figura 47	Relação entre tempo médio de travessia dos pedestres e campo de força.	95
Figura 48	Relação entre o tempo médio de travessia dos veículos e campo de força	96
Figura 49	Parâmetros da aceitação de brechas.....	97
Figura 50	Área de conflito entre pedestres e veículos.....	98
Figura 51	Posicionamento da câmera	98
Figura 52	Percentuais de pedestres por intervalo de tempo	99
Figura 53	Camadas complementares	102
Figura 54	Associação de cálculo entre camadas.....	103
Figura 55	Nova abordagem de próximo passo	103

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	19
<i>1.1 O TEMA E SUA IMPORTÂNCIA</i>	<i>19</i>
<i>1.2 OBJETIVOS</i>	<i>23</i>
1.2.1 Objetivo Geral	23
1.2.2 Objetivos Específicos	23
<i>1.3 LIMITAÇÕES</i>	<i>24</i>
<i>1.4 MÉTODO DE TRABALHO</i>	<i>24</i>
<i>1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO</i>	<i>27</i>
CAPÍTULO 2. REVISÃO CONCEITUAL	29
<i>2.1 TÉCNICAS UTILIZADAS NA MODELAGEM DE PEDESTRES</i>	<i>29</i>
2.1.1 Autômatos Celulares	29
2.1.2 Agentes	29
<i>2.2 MODELAGEM DE PEDESTRES</i>	<i>33</i>
<i>2.3 FENÔMENOS DE AUTO-ORGANIZAÇÃO</i>	<i>41</i>
<i>2.4 CALIBRAÇÃO DE MODELOS</i>	<i>42</i>
<i>2.5 RESUMO DAS ABORDAGENS</i>	<i>44</i>
<i>2.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</i>	<i>45</i>
CAPÍTULO 3. MODELOS PRELIMINARES	47
<i>3.1 MODEL 1 – MOVIMENTAÇÃO SIMPLES DE PEDESTRES</i>	<i>47</i>
3.1.1 Regras do Modelo	48
3.1.2 Movimentação dos Agentes	49
3.1.3 Variáveis	50
3.1.4 Resultados	51

3.1.4.1 <i>Cenário 1</i>	51
3.1.4.2 <i>Cenário 2</i>	52
3.1.4.3 <i>Cenário 3</i>	53
3.1.4.4 <i>Comparação dos Resultados</i>	54
3.1.5 <i>Conclusões sobre o Modelo 1</i>	56
3.2 . <i>MODELO 2 – ESTRUTRA EM CAMADAS DE DECISÃO</i>	57
3.2.1 <i>Nível de Simulação Macro</i>	58
3.2.2 <i>Nível de Simulação Meso</i>	58
3.2.2.1 <i>A-estrela</i>	59
3.2.3 <i>Nível de Simulação Micro</i>	59
3.2.4 <i>Espaço e Tempo</i>	60
3.2.5 <i>Perfil dos Pedestres</i>	61
3.2.6 <i>Decisão dos Passos</i>	62
3.2.7 <i>Resultados do Modelo</i>	64
3.2.7.1 <i>Cenário 1</i>	64
3.2.7.2 <i>Cenário 2</i>	65
3.2.8 <i>Impacto do Aumento de Pedestre na Simulação</i>	66
3.2.9 <i>Conclusões sobre o Modelo 2</i>	67
CAPÍTULO 4. MODELO DE SIMULAÇÃO PROPOSTO: SIMPED	68
4.1 REPRESENTAÇÃO DOS AGENTES NO SIMPED	68
4.2 REPRESENTAÇÃO DO AMBIENTE	69
4.3 DETECÇÃO DE COLISÃO	70
4.3.1 Previsão de Colisão	71
4.4 GRAFO	73

4.5 PROCESSO DE CAMINHADA DOS PEDESTRES	74
4.5.1 Detecção do Campo de Força	75
4.5.2 Escolha do Próximo Passo	78
4.6 VEÍCULOS E PEDESTRES.....	79
4.7 PROGRAMAÇÃO DO MODELO	81
4.7.1 Desenvolvimento do Código.....	81
4.7.2 Componentes do Sistema	82
4.7.2.1 Classe Simulador	82
4.7.2.2 Classe PedList.....	83
4.7.2.3 Coleção VeiList.....	83
4.7.2.4 Interface	83
4.7.2.5 Grafo	84
4.7.3 Classe Veículo	86
4.7.3.1 4. Classe Útil.....	86
4.7.3.2 Classe Pedestre	87
4.8 DESEMPENHO COMPUTACIONAL	88
CAPÍTULO 5. TESTES E CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	91
5.1.1 Formação de Fila (<i>Lane Formation</i>)	92
5.1.2 Formação de Fila em Ambiente de Travessia.....	93
5.1.2.1 <i>Influência dos Pedestres no Fluxo de Veículos</i>	95
5.1.3 Aceitação de Brechas (<i>Gap Acceptance</i>)	96
5.2 EXPANSÃO DO MODELO.....	101
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

CAPÍTULO 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 microsimulação que permitam análises dos diferentes modos de transportes com um adequado nível de detalhamento. Atualmente, os modelos de microsimulação utilizados para simular veículos estão plenamente consolidados, porém a inclusão de pedestres nesses modelos mostra-se um desafio complexo.

1.1 O TEMA E SUA IMPORTÂNCIA

O planejamento da circulação define a forma de uso das estruturas viárias. Observa-se que o planejamento urbano e de transportes priorizam a circulação de longo percurso, favorecendo o transporte motorizado, em detrimento das rotas de pedestres e ciclistas. Essas rotas se caracterizam por não serem contínuas, mas sim fragmentadas pela rede de tráfego dos veículos que, normalmente, constitui a base do desenho geométrico urbano.

Como um contraponto ao uso excessivo do automóvel, 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 vêm surgindo intervenções urbanas, tendo 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).

Em concepções de projetos urbanos, a integração de pedestres e o transporte coletivo eficiente têm impacto positivo no desenvolvimento das cidades. Assim, tornar a infraestrutura para pedestres mais atraente e segura reverte-se em melhoria da qualidade de vida, tanto pelos ganhos provenientes da utilização do modo a pé, como pelo aumento da eficiência do sistema de transportes em geral.

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 especializada, como por exemplo em Xiaoping et al. (2009), têm-se disponíveis vários tipos de modelos usados para avaliar as possibilidades de gestão das infraestruturas de pedestres. Entre esses modelos, os mais encontrados são os de planejamento de evacuação de edifícios, os modelos que consideram multidões e simulações de congestionamentos, causados pelo intenso fluxo de pedestres em movimentos conflitantes.

O fluxo intenso de pedestres e os atrasos originados desse conflito devem ser considerados no projeto de novas instalações — edifícios, estações de trem, aeroportos, ou cruzamentos de vias urbanas —, a fim de tornar mais eficiente as respectivas operações diárias. Desse modo, o enfoque no comportamento individual do pedestre é importante na identificação das variáveis que deverão ser consideradas no processo de modelagem de pedestres. Isso porque, diferentes áreas de conhecimento possuem interesses distintos. A área de Marketing e Propaganda, por exemplo, tem como preocupação a exposição global de seus anúncios e a rota utilizada pelos consumidores em centros comerciais de grande porte. Por outro lado, os produtores de filmes e jogos computacionais estão interessados em representar um comportamento mais realista dos personagens, através de processos de computação

gráfica. A engenharia de tráfego, por sua vez, preocupa-se em estudar a interação entre os pedestres e os veículos, principalmente em ambiente urbano.

Atualmente, a maioria dos simuladores de tráfego tem o veículo e a circulação viária como foco principal. Por outro lado, a maioria das pesquisas realizadas na área de pedestres possui foco na interação pedestre versus pedestre, principalmente em situações de evacuação e multidões.

É importante salientar que os modelos com foco na simulação de tráfego e os modelos com foco na dinâmica de pedestres em ambiente urbano evoluíram em paralelo, e o cruzamento das linhas de pesquisas é muito tênue. Existem diferentes níveis de interação entre veículos e pedestres, onde cada nível, de certa forma, é mais complexo de ser modelado do que o anterior. Dentre esses níveis, conforme Meschini e Gentile (2009), tem-se:

- interação normal: ocorre em um cenário mais básico, onde os pedestres usam apenas calçadas e cruzamentos em semáforos ou em pontos de passagem. Dentro deste cenário, não ocorre interação longitudinal. 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 não pode ser negligenciada, 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 ficar 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 partir dessas considerações, tem-se como um dos objetivos deste trabalho o desenvolvimento de um modelo computacional para representação da dinâmica de pedestres em ambiente urbano, considerando a interação entre pedestres e veículos. Atualmente, muitos aplicativos comerciais consideram os pedestres na simulação. Porém, de uma forma geral, esses aplicativos não permitem qualquer alteração nos respectivos modelos utilizados para descrever o comportamento dos pedestres. Dessa forma, propõe-se um modelo de simulação computacional de pedestres, considerando a interação de pedestres e veículos, de forma a permitir uma livre experimentação das regras que regem essas interações.

O modelo proposto neste trabalho foi desenvolvido como uma ferramenta computacional — denominado Modelo de Simulação da Movimentação de Pedestres, SimPed. Acredita-se que a abordagem adotada neste modelo possui capacidade suficiente para representar diferentes níveis de interação entre pedestres e veículos. Neste trabalho, nos cenários simulados foi considerada a interação de nível normal entre veículos e pedestres.

Tanto o modelo como o aplicativo computacional desenvolvidos são passíveis de melhorias contínuas, de forma a agregar novas funcionalidades. Dessa forma, é possível um aumento da capacidade representativa do comportamento dos pedestres.

Acredita-se que uma das contribuições deste trabalho seja o fato de o modelo ter sido concebido sem a utilização de um *framework* computacional previamente desenvolvido. Dessa forma, os processos e algoritmos utilizados foram concebidos para permitir:

- uma representação verossímil do comportamento dos pedestres, com um baixo custo computacional;
- inclusão de modelos alternativos para representação do comportamento de pedestres e veículos na mesma ferramenta computacional;
- expansão e refinamento do modelo.

Além disso, a simplicidade de entendimento do modelo viabiliza sua aplicação em estudos acadêmicos sem a necessidade de um grande conhecimento nos processos relacionados ao desenvolvimento de *softwares*.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho de pesquisa consiste em desenvolver um modelo de movimentação de pedestres, em espaço contínuo, de forma a proporcionar um realismo comportamental do processo decisório do pedestre. Os principais objetivos deste estudo consistem na representação da interação entre pedestres, pedestres e obstáculos fixos e a representação da interação entre pedestres e veículos em ambiente urbano.

1.2.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos, os mais significativos são:

- desenvolver um modelo realista da movimentação de pedestres que contemple escolha de rotas e percepção e reação a obstáculos;
- desenvolver uma estrutura consistente de representação da interação entre veículos e pedestres introduzindo habilidades de percepção mútua entre pedestres e veículos;
- prototipar o modelo em um aplicativo computacional funcional e passível de melhorias contínuas;
- desenvolver o modelo a fim de permitir a inclusão de novas funcionalidades de forma modular e de fácil implementação;
- calibrar e validar o modelo através de dados reais, considerando situações de travessia de vias com interação entre veículos e pedestres.

1.3 LIMITAÇÕES

De forma geral, as limitações do modelo desenvolvido neste trabalho estão diretamente relacionadas com o nível de refinamento necessário para representar a interação entre pedestres e veículos. Uma vez que o principal objetivo é modelar de forma verossímil o processo decisório do pedestre - considerando as situações de travessia de uma via - o grau de refinamento do modelo impede uma aplicação do mesmo em larga escala. Isso restringe, por questões de desempenho computacional, as simulações que contenham um grande número de pedestres, como as simulações de evacuação de estádios ou grandes estruturas. Além disso, a característica complexa do comportamento humano impõe muitos desafios ao processo de modelagem, mesmo quando se trata de uma simples movimentação de pedestres em calçadas. A diversidade de possíveis reações humanas bem como as inúmeras simplificações necessárias para que o modelo tenha desenvolvimento factível, resultam em algumas limitações. Dentre elas, citam-se:

- incapacidade de reproduzir todas as percepções sensorias humanas que qualificam as decisões dos pedestres e motoristas;
- dificuldade de calibração do modelo através de dados reais devido, principalmente, às restrições de obtenção de dados.

1.4 MÉTODO DE TRABALHO

Um modelo nada mais é do que uma representação simplificada de um sistema. Essa representação pode ser feita das mais variadas formas, incluindo explicações verbais, gráficos, equações matemáticas, estruturas físicas e programas de computador. Todos esses modelos possuem a mesma finalidade: fazer com que um sistema de difícil compreensão e de manipulação arriscada seja apresentado em um formato de compreensão mais fácil, oferecendo menos riscos na hora de testá-los. No universo de abrangência da simulação de pedestres, independente de sua forma de representação, a maioria dos modelos é especificada para analisar e gerar previsões sobre o comportamento global de um grupo de pedestres frente às situações de evacuação e interação de multidões (ASHIDA et al. 2001; HAMAGI; HIRATA, 2003).

O modelo proposto neste trabalho pretende representar tanto a interação de pedestres versus pedestres como, também, a interação de pedestres e veículos em ambiente urbano. Para tanto, foram desenvolvidos dois modelos auxiliares: o Modelo 1 e o Modelo 2. O Modelo 1 — Movimentação Simples de Pedestre — foi concebido com o objetivo de identificar os fatores mais importantes no processo de movimentação de pedestres em ambientes com obstáculos.

O Modelo 2 — Estrutura de Camada de Decisão — foi concebido com o objetivo de aprimorar o processo de movimentação de agentes, considerando os processos de escolha de rotas.

Com o auxílio desses dois modelos, foi concebido o modelo proposto nesta pesquisa — o SimPed. A concepção do SimPed é apresentada de forma gradual, onde as etapas preliminares do trabalho são abordadas para demonstrar a evolução do desenvolvimento desta pesquisa de doutorado. Além disso, após a apresentação dos resultados, são elencadas algumas propostas de expansão do modelo, utilizando a base computacional oriunda desta pesquisa.

Esta pesquisa, embasada sob o ponto de vista prático e teórico, tem objetivo prático uma vez que investiga e consolida conhecimentos sobre a dinâmica de pedestres, através de um conjunto de cenários simulados. A estrutura básica do processo utilizado nesta pesquisa está apresentada no fluxograma da Figura 1.

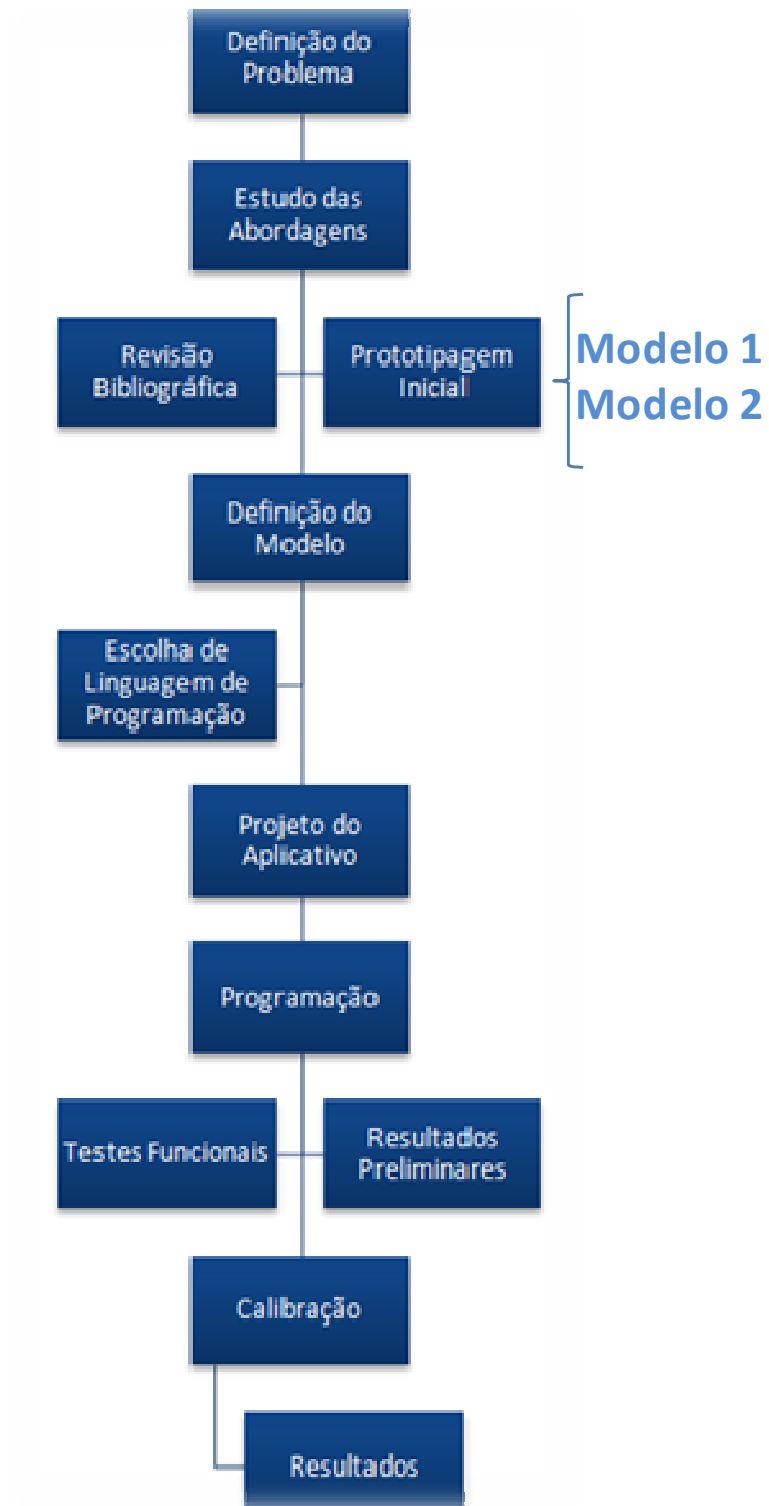


Figura 1 Estrutura do Trabalho

O objeto da pesquisa consiste na simulação de pedestres, considerando a travessia de vias de veículos. Com isso, foi realizada uma revisão das abordagens descritas em literatura específica. Após a revisão bibliográfica, deu-se início ao processo de prototipagem de modelos. A seguir, definiu-se a linguagem de programação a ser utilizada no desenvolvimento do SimPed. Durante o processo de programação do SimPed, foram realizados diversos testes funcionais. Alguns resultados foram publicados em artigos científicos (PRETTO; CYBIS, 2007; PRETTO et al. 2008, PRETTO; CYBIS, 2010). Um estudo mais aprofundado do SimPed, com calibração utilizando coleta de dados em vídeo, foi publicado no *90th Annual Meeting Transportation Research Board, 2011*, (PRETTO et al, 2011).

1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este documento está organizado em seis capítulos. O presente capítulo apresenta o contexto do estudo, através do tema e sua importância, os objetivos — geral e específicos —, as limitações do trabalho e o método de trabalho utilizado no desenvolvimento desta pesquisa

O Capítulo 2 consiste no referencial utilizado para o desenvolvimento desta tese. São apresentados os principais aspectos sobre a modelagem proposta na literatura para tratar as complexidades envolvidas no processo de modelagem de pedestres, bem como as principais técnicas utilizadas na modelagem de pedestres.

No Capítulo 3 apresentam-se os dois modelos auxiliares criados com o objetivo de identificar as principais características inerentes ao processo de movimentação de agentes em ambientes com obstáculos — Modelo 1 e Modelo 2. Na primeira parte desse capítulo apresenta-se o Modelo 1 — Movimentação Simples de Pedestres — desenvolvido para testar conceitos básicos de movimentação do pedestre, além de estudar a incorporação de conceitos pertinentes à simulação de colônias. Na segunda parte apresenta-se o Modelo 2 — Estruturas em Camadas de Decisão — onde são consideradas características que foram adotadas no desenvolvimento do modelo final, objeto deste trabalho. Em cada parte desse capítulo são apresentadas as conclusões sobre cada um dos modelos auxiliares.

No Capítulo 4 apresentam-se todas as fases necessárias ao desenvolvimento, programação e testes do modelo objeto desta tese de doutoramento, ou seja, o Modelo de Simulação da Movimentação de Pedestres — SimPed. No Capítulo 5, apresentam-se os resultados obtidos. No Capítulo 6 apresentam-se as conclusões e sugestões para novos trabalhos.

CAPÍTULO 2. REVISÃO CONCEITUAL

Neste capítulo são apresentadas as duas principais técnicas utilizadas em modelagem de pedestres, a saber: autômatos celulares e agentes. Uma revisão conceitual sobre os principais trabalhos sobre modelagem de pedestres é descrita. Além disso, são apresentados exemplos dos fenômenos de auto-organização, uma revisão conceitual sobre coleta de dados de pedestres, uma classificação das abordagens encontradas na revisão bibliográfica e algumas considerações finais sobre a revisão.

2.1 TÉCNICAS UTILIZADAS NA MODELAGEM DE PEDESTRES

2.1.1 Autômatos Celulares

Autômatos celulares é uma abordagem bastante utilizada para demonstrar movimentação de partículas. Através de regras simples, emergem comportamentos macroscópicos realistas (BLUE et al. 1997; HAMMAGAMI; HIRATA, 2003). Um autômato celular é um tipo de modelagem discreta estudada em áreas como computação, matemática e biologia teórica. O estado do conjunto de células formado pelos autômatos varia de acordo com regras determinísticas, geralmente simples. O modelo consiste de uma grade infinita e regular de células, onde cada uma possui um número finito de estados. A grade pode ser de qualquer número finito de dimensões. A passagem do tempo também é de forma discreta, e o estado de uma célula no tempo t é uma função do estado de um número finito de células chamadas de vizinhança no tempo $t-1$. Todas as células possuem a mesma regra para atualização, baseada nos valores de suas células vizinhas. Cada vez que as regras são aplicadas à grade completa, uma nova geração é produzida.

2.1.2 Agentes

Um agente é tudo que é capaz de perceber seu ambiente por meio de sensores e, também, de agir sobre esse ambiente por intermédio de atuadores. Um agente humano tem olhos,

ouvidos, e outros órgãos como sensores, e têm mãos, pernas, boca e outras partes como atuadores. Um agente robótico poderia ter câmeras e detectores da faixa infravermelha, funcionando como sensores, e vários motores funcionando como atuadores. Um agente de *software* recebe sequências de dados, conteúdo de arquivos e pacotes de rede como entradas, gerando arquivos, sequências numéricas ou outras ações dentro do ciclo do aplicativo. O estudo sobre modelagem, desenvolvimento e implementação dos possíveis comportamentos de múltiplos agentes, membros de uma mesma sociedade, é a base da investigação na área de conhecimento denominada Inteligência Artificial Distribuída (IAD).

Geralmente, a coordenação do comportamento inteligente em uma comunidade de agentes é descentralizada. Essa coordenação é resultado da integração do conhecimento, da capacidade, dos objetivos e dos planos dos diferentes agentes. Os agentes participam de forma mais autônoma na decisão de realização das suas próprias ações. De uma forma geral, não existe um planejamento global para o conjunto das entidades modeladas (ALVARES; SICHMAN, 1997).

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 agente utiliza o seu conhecimento sobre o ambiente onde está inserido para maximizar a sua utilidade ou atingir o seu objetivo.

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. Um tipo de agente cognitivo é o agente intencional BDI — *Belief, Desire and Intention* — (RAO; GEORGEFF, 1995). Esse agente, baseado em suas crenças e desejos, é capaz de raciocinar para criar planos de ação e executá-los. Agentes desse tipo podem ser considerados como sistemas planejadores, pois podem:

- selecionar seus objetivos de acordo com suas motivações e raciocinar sobre eles, detectando e resolvendo objetivos conflitantes ou coincidentes;
- selecionar e criar planos;
- detectar conflitos entre planos;
- executar e rever planos.

Em sistemas multiagente, os agentes intencionais coordenam-se através de intercâmbio de informações sobre as suas crenças, metas ou ações. Essas informações são eventualmente incorporada nos seus planos. O comportamento exibido por um agente, reflexo do seu próprio conhecimento, deve satisfazer a existência desse agente como entidade individual e como membro de uma comunidade.

Os agentes reativos, por sua vez, são baseados em modelos de organização biológica ou etológica. O modelo de funcionamento de um agente reativo é definido por um sistema de estímulo-resposta. Em um sistema multi-agente baseado em agentes reativos, não existe uma representação explícita do conhecimento: o conhecimento dos agentes é implícito (as suas regras de comportamento) e sua manifestação se externa através do seu comportamento. O ambiente, por sua vez, também não é representado, o comportamento de cada agente é baseado apenas no que ele percebe. Não existe uma representação interna explícita do ambiente. Os agentes não possuem memória das ações, os agentes reativos não mantêm um histórico de suas ações, ou seja, o resultado de uma determinada ação passada não influencia diretamente na decisão de uma ação futura (RUSSELL; NORVIG, 2002).

Macal e North (2006) propõem um tutorial de modelagem e simulação baseado em agentes. Os autores descrevem as principais características de um agente, salientando quando e porquê é melhor utilizar esse tipo de modelagem. Os autores apresentam os pré-requisitos necessários para trabalhar com esse tipo de modelo, além de inúmeros exemplos práticos de utilização. É um trabalho que serve como um guia para a estruturação de modelos baseados em agentes, pois apresenta um resumo das ferramentas utilizadas, salientando as vantagens e desvantagens quanto à utilização dos modelos baseados em agentes. Os autores apresentam os requisitos necessários para a adoção da modelagem baseadas em agentes no momento do desenvolvimento de um novo modelo, ou seja, quando:

- existir uma representação natural de agentes;
- as decisões e o comportamento puderem ser definidos discretamente;
- for importante que os agentes se adaptem e mudem seu comportamento;
- for importante que os agentes aprendam e se envolvam dinamicamente;
- os agentes tiverem uma relação dinâmica com outros agentes de modo que essas relações se formem e se dissolvam.

Ronald e Sterling (2005) propõem um modelo de pedestres usando uma arquitetura de agentes do tipo BDI (*Believe – Desire – Intention*). No trabalho há uma descrição das abordagens clássicas de modelagem de pedestres, onde os autores os dividem em Abordagem de Engenharia e Abordagem de Urbanismo. A Abordagem de Engenharia tem seu foco central na previsão de demanda, onde as decisões são relacionadas à infraestrutura. O principal resultado dessas abordagens é a quantificação do número de pessoas que viaja por cada rota. Os algoritmos utilizados são geralmente baseados na modelagem clássica de veículos. Ou seja, são modelagens macroscópicas, onde o nível máximo de detalhamento dos agentes é o local visitado e os caminhos utilizados até o destino pretendido. A Abordagem de Urbanismo, por sua vez, se preocupa em modelar como os agentes se deslocam em uma determinada área, principalmente, como o projeto de uma área influencia nas rotas escolhidas, durante um deslocamento. Nesse caso, a modelagem é microscópica, pois os caminhos dos agentes são modelados de forma mais detalhada. O autor apresenta uma análise estatística de dados para desenvolver, de forma mais realista, o comportamento de agentes. Ainda nesse trabalho, os autores propõem um modelo de ação de um agente humano em um ambiente virtual, por meio de equações que governam a trajetória e a forma de andar do agente.

É amplamente reconhecida na literatura sobre sistemas multiagente a necessidade de modelar o ambiente em que os agentes estão situados (RUSSELL; NORVIG, 2002; FERBER, 1999; KOWALSKI, 2005). As primeiras tentativas nesse sentido envolveram uma plataforma multiagente que permitia uma interação entre os agentes por meio do envio e recebimento de mensagens através do framework JADE¹ (Java Agente Development).

¹ Disponível em [HTTP://jade.tilab.com](http://jade.tilab.com)

Alguns autores criticam essa abordagem, argumentando que o ambiente deve ser tratado como uma entidade tão importante, ou mais, que o próprio agente (ODELL et al., 2003; WEYNS, 2007). Algumas referências interessantes sobre esse tema podem ser encontradas em uma série de *workshops* que ocorreram nos anos de 2004 até 2006, denominados E4MAS².

Uma das propriedades fundamentais dos agentes é a sua autonomia. No entanto, a autonomia não é uma questão de tudo ou nada. Sob um ponto de vista prático, os agentes não podem ser totalmente livres de dependências externas, e nem completamente dependentes. Porém, de uma forma ou de outra, eles sempre dependem de fatores externos.

O ambiente fornece as condições necessárias para que uma entidade (agente ou objeto) possa existir. Em outras palavras, além de se definir as propriedades do mundo em que um agente pode e deve agir, deve-se considerar todas as outras entidades e regras nas quais os agentes se baseiam para existir e se comunicar.

O projeto de um sistema multiagente exige uma análise cuidadosa de todos os principais fatores relacionados ao ambiente. Um exemplo clássico de agentes situados em um ambiente é uma colônia de formigas. As formigas interagem umas com as outras em grande parte através de substâncias químicas, chamadas feromônios. As formigas depositam os feromônios no ambiente e, em seguida, os utilizam como uma marcação para orientar suas ações. No Capítulo 3 deste documento, apresenta-se uma simulação onde se considera esse fenômeno.

2.2 MODELAGEM DE PEDESTRES

O estudo da movimentação de pedestres em áreas urbanas é realizado, principalmente, através de técnicas de simulação. Na maioria dos casos, as análises são dedicadas aos modelos de simulação de multidões e evacuações.

² Disponível em <http://distrinet.cs.kuleuven.be/events/e4mas/>

Quanto aos modelos de evacuação, uma revisão inicial pode ser encontrada em Xiaoping et al. (2009). Nesse trabalho, a análise refere-se aos estudos relacionados com a área de transportes, abordando as técnicas de modelagem, indo desde a macroscópica até simulações microscópicas. Os autores consideram tanto a passagem do tempo de forma contínua como de forma discreta.

Muitas vezes, as regras de simulação são baseadas na cinemática básica ou na teoria do fluxo de tráfego. Contudo, em abordagens mais microscópicas, as regras são derivadas, notadamente, a partir dos resultados da literatura ou de dados observacionais.

Hunt e Griffiths (1991) desenvolveram modelos macroscópicos de aceitação de atrasos na circulação de pedestres em relação ao volume de veículos, baseados em matrizes de decisão.

Mitchell e MacGregor (2001) analisaram as topologias de redes de filas de pedestres e desenvolveram uma metodologia de aproximação analítica para medidas de desempenho.

Hughes (2002) propôs uma teoria do fluxo contínuo de pedestres em grandes multidões. O autor considera que a multidão é vista como uma entidade que se comporta de forma racional, com objetivos imediatos, ao invés de uma meta global. Esse modelo foi reformulado por Huang, et al. (2009), onde os autores demonstram que o modelo satisfaz o princípio de equilíbrio dinâmico, que é frequentemente utilizado em modelos com uma abordagem mais microscópica.

Gipps e Marksjo (1985) desenvolveram uma ferramenta de simulação para a circulação de pedestres dentro, e em torno, de edifícios, através de um conjunto de regras bastante simples. Nesse modelo a escolha de rotas foi baseada no conceito de destinos intermediários. O conceito de "caminho mais curto percebido" é introduzido. Nesse conceito a distância da viagem é uma função das características dos pedestres e dos estímulos. Dentro desse contexto, a seleção de destinos intermediários sucessivos durante o percurso é estocástico.

Outra ferramenta de micro-simulação estocástica foi desenvolvida por Borges e Timmermans (1986) onde os autores abordam o movimento de pedestres e a escolha de rotas dentro de centros urbanos e áreas comerciais. A maioria das regras da simulação que os autores utilizaram foi baseada nos resultados existentes na literatura. O número total de

paradas em cada viagem, a seqüência de produtos a serem adquiridos, bem como os locais onde ocorrem as paradas são determinados por meio de uma distribuição de probabilidade.

Løvas (1994) apresentou a ferramenta de simulação estocástica microscópica chamada EVACSIM, dedicada à modelagem da dinâmica da evacuação, considerando duas premissas básicas. A primeira refere-se às instalações de pedestres, que podem ser modeladas como uma rede de pontos e passagem de fluxo. A segunda refere-se à capacidade de os pedestres serem modelados como processos de filas. Nesse caso, cada pedestre é tratado como um objeto de fluxo separado, e interage com outros objetos. O autor assume um processo de evacuação baseado em eventos de Markov, com base em uma seqüência de probabilidades condicionadas.

Blue e Adler (2001) modelaram três fenômenos distintos de movimentação de pedestres. O primeiro deles refere-se aos fluxos separados que é análogo a dois fluxos unidirecionais. O segundo, refere-se a fluxos congruentes, onde os pedestres encontram seu caminho através de uma multidão sem formação de filas distintas. O terceiro refere-se à formação dinâmica de filas, onde as filas de pedestres não são previamente definidas e emergem da interação entre os pedestres. Os autores utilizam a abordagem de autômato celular para modelar o comportamento dos pedestres, considerando-os como entidades autônomas. O comportamento dos pedestres é descrito por meio de um conjunto limitado de regras. Entre as regras, tem-se a mitigação de conflitos, através de passos laterais e paradas temporárias. A velocidade de caminhada dos pedestres foi considerada como uma distribuição de probabilidade uniforme. Após o teste de uma ampla gama de densidades de pedestres nas simulações, alguns parâmetros fundamentais do fluxo de pedestres foram definidos, como velocidade e regras de movimentação.

Uma abordagem diferente foi seguida por Burstedde et al. (2001). Nesse estudo, foi utilizada uma ferramenta de micro-simulação estocástica de fluxos bidirecionais por meio de autômatos celulares. Nesse caso, uma rede dinâmica subjacente à grade estática³ ocupada pelos pedestres foi considerada. A grade estática não evolui com o tempo ou com a presença

³ Nesse caso, a grade estática é uma matriz de posição contendo as regras de movimentação.

de pedestres; apenas é utilizada para definir o aspecto de movimentação. Por outro lado, a grade dinâmica⁴ é alterada pela presença de pedestres e possui um coeficiente de decaimento, sendo utilizada para definir as interações entre os pedestres. A ocupação da grade estática é modificada em função de uma matriz de transição probabilística presente na grade dinâmica.

Utilizando a mesma base da ferramenta anterior, Weifeng et al. (2003) desenvolveram uma nova ferramenta de simulação de fluxo de pedestres bidirecional. Os autores consideraram três evoluções. A primeira trata da movimentação livre dos pedestres, quando a densidade é baixa. A segunda trata da auto-organização em várias filas, quando aumenta a densidade. A terceira trata da fusão de todas as vias, em dois grandes corredores, quando a densidade aumenta. Nesse estudo, uma série de recursos básicos de comportamentos como, por exemplo, o movimento para trás e a mudança de faixa também são considerados. Além disso, uma probabilidade pré-definida é atribuída à movimentação do pedestre, no caso da célula à frente estar ocupada.

Lee e Lam (2008) calibraram um modelo de simulação de fluxo de pedestres bidirecional em calçadas, através da exploração das regras de simulação e equações testadas em estudos anteriores. O modelo foi estendido para fornecer resultados sobre nível de serviço em faixas de pedestres semaforizadas.

Liu et al. (2000) estenderam o modelo de micro-simulação DRACULA para simular o movimento individual de pedestres e veículos e suas interações em uma rede de vias e calçadas. Dois tipos de pedestres são definidos: os obedientes e os oportunistas. Ambos são designados a seguir uma rota fixa em uma rede de calçadas definida por nós interligados. A cada tipo de pedestre, diferentes regras de travessia são atribuídas. A interação com motoristas também é considerada. Os autores modelaram as decisões dos motoristas e pedestres por meio de probabilidades pré-definidas. O modelo foi aplicado em um cruzamento sinalizado, onde diferentes estratégias de controle de sinalização foram testadas.

⁴ Nesse caso, a grade dinâmica é uma matriz cujos valores alteram-se com o passar da simulação.

Wakim et al. (2004) propõem um modelo discreto de Markov, onde o pedestre pode assumir quatro estados: parado, caminhando, caminhando rápido e correndo. Esses estados foram definidos a partir de dados coletados de velocidade. O modelo foi utilizado para demonstrar situações de risco em travessias de pedestres.

Dijkstra e Timmermans (2002) desenvolveram um modelo conceitual multiagente para simular o comportamento de pedestres. Esse sistema inclui um autômato celular para representar a rede virtual e conjuntos de agentes autônomos de diferentes tipos que navegam no ambiente virtual. Cada agente é considerado com seus próprios comportamentos, crenças e intenções.

Batty e Jiang (1999) desenvolveram uma série de modelos multiagente que operam no espaço celular⁵ e demonstram que os padrões globais emergem como consequência de uma realimentação positiva. Essa realimentação é oriunda da exploração das propriedades locais do espaço, durante a caminhada do pedestre até seu destino.

Com base nesses princípios, Kukla et al. (2001) desenvolveram a ferramenta de simulação PEDFLOW para circulação de pedestres. PEDFLOW é um modelo microscópico de circulação de pedestres, onde cada pedestre é representado como um agente. O agente é capaz de tomar suas próprias decisões, com base em uma parte da cena local a ele visível. O modelo foi implementado na linguagem Java e oferece uma estrutura na qual os agentes são visualizados como quadrados em uma grade. O movimento dos agentes é modelado como uma mudança de posição na grade e regido por um atraso, esse atraso caracteriza a velocidade do agente. Existe um conjunto de regras e parâmetros simples, específicos para cada agente. As regras foram obtidas por meio de análise de vídeo. Após, foram transformadas em um formulário de parametrização de regras para os agentes. Assim, os agentes passaram a ter perfis diferentes de comportamento na mesma simulação.

Uma abordagem probabilística para simulação do deslocamento de pedestres foi proposta por Antonini et al. (2006), por meio de análise de escolha discreta. O conjunto de opções de

⁵ Nesse caso o espaço celular é uma matriz análoga à grade de movimentação de autômatos.

escolha é resultado de uma combinação de alternativas com base em alguns fatores. Os mais importantes deles referem-se à velocidade — mesma velocidade, aceleração, desaceleração — e à direção radial — onze alternativas. Para calibrar os modelos, os autores utilizaram vídeos dos movimentos reais de pedestres. O vídeo foi obtido em uma entrada de uma estação de metrô, em *Lausanne*. Com base nesse modelo, um micro-simulador foi desenvolvido. A mesma ferramenta foi aprimorada por Robin et al. (2009), onde, os autores consideram os seguintes cenários: livre, outro com regras de líder-seguidor e um processo de anticolisão. Os modelos foram validados a partir de um conjunto de dados que representam duas condições: as não controladas e as controladas. No entanto, nenhum sistema de simulação relacionado é proposto.

Uma pesquisa na qual é considerada a interação de pedestres com o tráfego de veículos foi apresentada por Airault et al. (2004). Na ferramenta de simulação microscópica ARCHISIM, o pedestre se move em um ambiente urbano, onde os veículos e os outros pedestres são considerados obstáculos. Para cada iteração do modelo, um mapa de obstáculo é gerado. Cada vez que um pedestre dá um passo, ele analisa o mapa de obstáculos e aplica um algoritmo de geração de rotas, para atingir o seu destino, sem colisão com os obstáculos. Os autores desenvolveram um conjunto de regras baseadas em estudos psicológicos do comportamento dos pedestres. Os detalhes dos algoritmos implementados não são descritos no trabalho. Em pesquisa recente, Doniec et al. (2008) utilizaram essa mesma ferramenta de simulação para modelar os movimentos de pedestres em cruzamentos e rotatórias.

Através de uma técnica de vários níveis de simulação multiagente, Gaud et al. (2008) propõem uma análise hierárquica dos sistemas complexos para descrever o comportamento de pedestres movimentando-se em zonas urbanas. Entretanto, a pesquisa está focada, principalmente, na descrição do projeto do sistema, nos processos e no desempenho do sistema. Em termos de comportamento, os resultados da simulação de pedestres não são relatados.

Entre os modelos multiagentes existe uma gama que é classificada como modelos baseados em forças newtonianas. Nesses modelos, 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.

Uma especificação dessa abordagem é conhecida como forças sociais, e parte do princípio de que a movimentação de pedestres pode ser descrita através de forças vetoriais oriundas das motivações internas — motivações psicológicas — dos pedestres para realizar certas ações. Através do conceito de forças sociais, é possível representar inúmeros comportamentos típicos de pedestres, como por exemplo, a formação de filas e trilhas. Os modelos de forças sociais podem ser classificados como modelos baseados em forças newtonianas (HELBING; MOLNAR, 1995).

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).

Treuille et al. (2006) apresentam uma abordagem de campo potencial dinâmico, que unifica o processo de navegação global e o processo de anticolisão local em uma única estrutura. Entretanto, essa abordagem é destinada a grupos homogêneos de pedestres que se deslocam na direção de um objetivo comum. Contudo, não permite simular indivíduos com características e objetivos distintos. 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).

Em alguns trabalhos como o de Ioannis Karamouzas et. al. (2009), o pedestre é modelado para calcular — antecipadamente e em tempo determinado — se está em rota de colisão de modo a evitá-la. Conseqüentemente, se os pedestres, ao invés de se repelirem, anteciparem situações futuras, evitarão as colisões com antecedência e com pequeno esforço. Nesses trabalhos, os movimentos gerados pelos pedestres não apresentaram as oscilações comuns

observadas nas simulações de multidões. Desse modo, os autores consideraram que os resultados obtidos nas simulações foram satisfatórios.

Em situações de travessia, a identificação dos diferentes tipos de pedestres e dos respectivos comportamentos é de fundamental importância 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 a travessias semaforizadas — obediente ou oportunista⁶ — e em relação ao local de travessia — prudente ou imprudente⁷. 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. Geralmente 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) buscam identificar as características que influenciam o comportamento de pedestres em travessias semaforizadas, através de uma abordagem qualitativa. Para tanto, foi utilizada a técnica de grupos focados, 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 ressalta 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.

⁶ Os obedientes são os pedestres que realizam a travessia com o sinal verde. Os imprudentes, por sua vez, são os pedestres que realizam a travessia quando há uma brecha no fluxo de veículos, independente da sinalização.

⁷ Os prudentes são pedestres que realizam a travessia no local apropriado e os imprudentes os pedestres que realizam a travessia em local não apropriado.

2.3 FENÔMENOS DE AUTO-ORGANIZAÇÃO

Através da modelagem do comportamento de pedestres, é possível simular alguns fenômenos de auto-organização que demonstram um comportamento realista frente a situações conhecidas. Dentre esses fenômenos, citam-se: congestionamento, formação de filas, oscilações e cruzamentos, através das Figura 2, Figura 3, Figura 4 e Figura 5, oriundas do trabalho de Helbing e Molnar (1995).

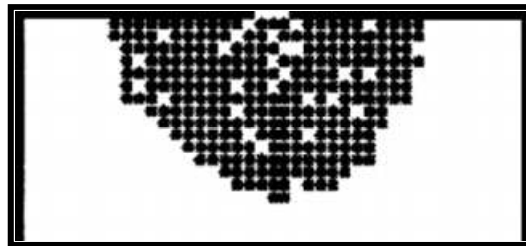


Figura 2 Congestionamento

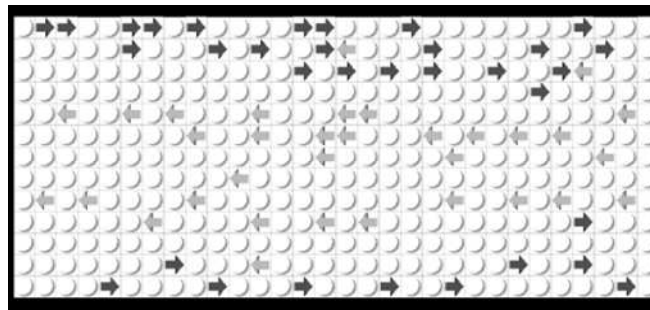


Figura 3 Formação de filas



Figura 4 Oscilação



Figura 5 Cruzamentos

2.4 CALIBRAÇÃO DE MODELOS

Um dos grandes desafios impostos aos modelos de pedestres é a etapa de calibração. Atualmente, a técnica mais utilizada é a de obtenção de dados, através do reconhecimento de imagem em vídeo.

Os sistemas automáticos para contar pedestres, baseados em técnicas de processamento de sequência de imagens digitais, têm despertado considerável interesse de pesquisadores da área (SACCHI et al., 2000). Isso pode ser comprovado pelo número de pesquisas relacionadas ao tema. Sistemas utilizando câmeras de vídeo surgiram como boa alternativa para a estimação do fluxo de pedestres, uma vez que necessitam de pouca infraestrutura. Os sistemas computacionais atualmente disponíveis facilitam o desenvolvimento desse tipo de tecnologia (BEYMER, 2000).

Um sistema automático que utiliza câmeras de vídeo para a contagem de pedestres deve ser capaz de lidar com diversos problemas, tais como: vibrações mecânicas, flutuações de luminosidade, variações ambientais e fluxo irregular de pedestres. Sistemas automáticos

podem realizar algumas tarefas, como por exemplo, a detecção de movimento das pessoas presentes em uma cena, a segmentação das mesmas e a estimação da direção delas.

Quanto à aplicabilidade dos sistemas automáticos, é possível segmentar dois tipos de sistemas: os sistemas utilizados para medir fluxo unidirecional, como por exemplo, em corredores estreitos de ambientes fechados; os sistemas utilizados para medir o fluxo multidirecional, onde pedestres podem ter direções diferentes, como por exemplo, pedestres caminhando em ambientes não restritos.

Zhang e Sexton (1997) sugerem o uso de um filtro específico para localizar a cabeça das pessoas na imagem, com fundos não constantes como, por exemplo, na saída de escadas rolantes. O sistema tem um bom rendimento quando há um bom contraste entre a cabeça do pedestre e sua roupa. Seu desempenho fica prejudicado quando as pessoas não apresentam um formato de cabeça arredondado, ou quando apresentam a cabeça com dimensões fora das especificadas no modelo. Isso pode acontecer quando as pessoas estiverem, por exemplo, usando chapéu ou apresentarem penteados incomuns. O sistema utiliza apenas uma câmera de vídeo, posicionada perpendicularmente ao plano de fundo.

Rossi e Bozzoli (1994) apresentam um trabalho sobre a localização e contagem de pessoas que se movem pela saída de um recinto. O campo de visão da câmera de vídeo foi dividido em três áreas: uma área de alerta⁸, uma área de *tracking*⁹ e uma área de contagem¹⁰. Na primeira área foram determinados os objetos em movimento, através das diferenças de intensidade de brilho entre quadros sucessivos e da análise de histogramas. A análise dos histogramas é feita apenas na área de alerta e determina o número de pontos que se moveram.

Os picos dos histogramas podem corresponder a objetos que se movem, enquanto os vales representam regiões onde não há movimentos. Na área de *tracking*, diferentes modelos foram gerados para cada pessoa e foi usado um método de correlação para identificar os modelos.

⁸ Área de alerta é a área em que o sistema detecta qualquer tipo de objeto em movimento.

⁹ Na área de *tracking*, os objetos detectados na área de alerta são classificados em pedestres ou não.

¹⁰ Na área de contagem os pedestres são contabilizados.

Na contagem foram agrupados os diferentes modelos de uma pessoa baseados em um procedimento hierárquico que usa um algoritmo aglomerativo. O sistema foi experimentado em um ambiente externo de uma estação ferroviária, sob as seguintes restrições: câmera de vídeo colocada perpendicularmente ao plano do chão e objetos movendo-se apenas em duas direções. Com esse sistema obteve-se, aproximadamente, 90% de acertos.

De acordo com Chae (2006), as ferramentas de processamento automático de imagens — *video image processing* — são utilizadas comercialmente para detectar e rastrear veículos, contudo não são apropriadas para realizar a detecção de pedestres. A maioria dos processos automáticos consiste no uso de algoritmos para identificar, classificar e verificar a posição de um objeto em uma sequência de imagens. O autor ainda destaca que, em situações nas quais o processamento automático de imagens não é eficiente em rastrear os objetos, faz-se necessário o desenvolvimento de ferramentas semiautomáticas. Essas ferramentas permitem ao observador identificar um objeto, medir seu comprimento e determinar sua posição na sequência de imagens. O autor salienta que a utilização dessas ferramentas não são adequadas para períodos extensos de vídeo.

2.5 RESUMO DAS ABORDAGENS

De forma resumida, a Figura 6 apresenta uma classificação das principais abordagens de modelagem de pedestres descritas neste capítulo.

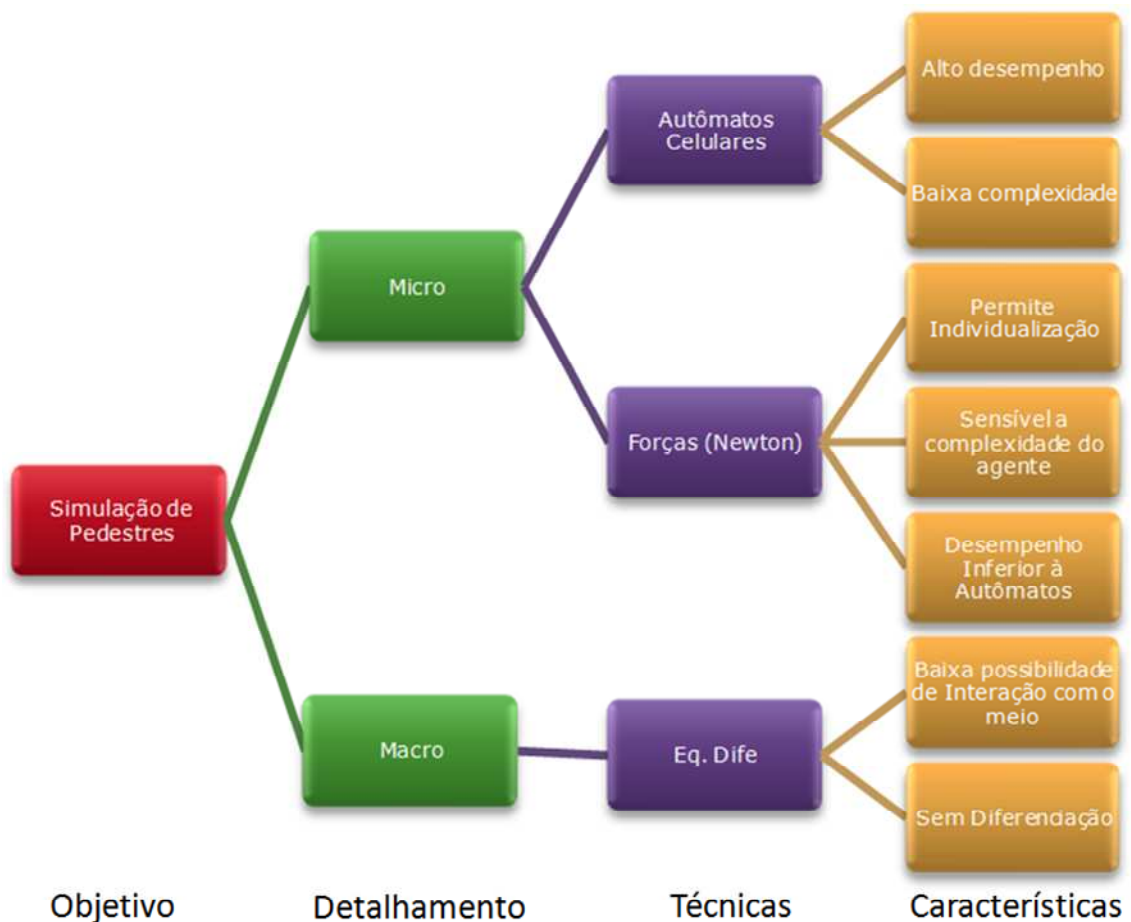


Figura 6 Resumo das abordagens

2.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo sobre simulação de pedestres engloba diversas áreas de conhecimento como: psicologia, física, matemática, ciência da computação, engenharia de transportes, entre outras. Tradicionalmente, qualquer modelo computacional que envolve o comportamento de seres vivos pode chegar a uma complexidade virtualmente infinita. Principalmente, tratando-se de modelos que mimetizam qualquer tipo de comportamento humano.

Notadamente, é possível verificar que os estudos e os desenvolvimentos realizados no sentido de modelar o comportamento de pedestres possuem um caráter multidisciplinar. Além

disso, a literatura oferece um grande cardápio de modelos e técnicas, cada qual com suas vantagens e desvantagens.

A utilização isolada de técnicas baseadas em regras necessita de muito tempo de desenvolvimento e, de forma geral, não apresenta capacidade de generalização satisfatória. Os modelos baseados em força — força social, campo de força, etc — apresentam ótimos resultados, em situações de evacuação e conflitos de pedestres versus pedestres em ambientes simples. Esses modelos, quando aplicados de forma isolada, não representam o processo de escolha de rotas pelos pedestres.

Observa-se que a união de diversas técnicas para formar um modelo padrão ou definitivo para representar o comportamento dos pedestres é impraticável, uma vez que não existe um consenso na literatura sobre qual é a melhor união de técnicas para o desenvolvimento de um modelo completo e genérico. Sob o ponto de vista computacional, é praticamente inviável o refinamento necessário para representar o pedestre em toda sua gama de possibilidade de atuação, porém vários modelos acadêmicos e aplicativos comerciais estão atingindo representações do comportamento de pedestres em ambientes urbanos, com precisão considerada bastante satisfatória para os estudos de transportes. Nesses trabalhos, utilizam-se processos mistos entre modelos baseados em regras e modelos baseados em campo de força com auxílio de algoritmos de geração de caminhos. Baseado na tabela presente em Papadimitriou et. al. (2009) apresenta-se um comparativo entre os principais modelos multiagentes discutidos na revisão bibliográfica, com o modelo objeto deste trabalho - SimPed.

Tabela 1 – Comparação entre modelos

Autor	Ano	Problema			FrameWork				Interação				Dados Reais
		Tráfego	Evacuação	Rota	Tempo		Transição		Outro Pedestres	Ambiente Viário	Obstáculos	Tráfego	
					Contínuo	Discreto	tempo	eventos					
Antonini et al.	2006			X		X	X		X		X		X
Airault et al.	2004			X		X	X		X	X		X	
Robin et al.	2009			X					X		X		X
Doniec et al.	2008			X		X	X		X	X		X	X
Gaud et al.	2008			X		X	X		X	X		X	
SimPed	2011	X		X		X	X		X	X	X	X	X

CAPÍTULO 3. MODELOS PRELIMINARES

De forma geral, as etapas de elaboração e programação de modelos computacionais obedecem uma evolução graduativa de complexidade e funcionalidade. Neste capítulo, são apresentados dois modelos — Modelo 1 e Modelo 2. O desenvolvimento desses modelos foi importante para se atingir os principais objetivos deste trabalho, a saber: desenvolver um modelo comportamental de pedestres, considerando a interação de pedestres versus veículos e a interação de veículos versus pedestres; prototipar o modelo em um aplicativo computacional funcional e passível de melhorias contínuas.

O Modelo 1, Movimentação Simples de Pedestres, foi desenvolvido para testar conceitos básicos de movimentação do pedestre, além de estudar a incorporação de conceitos pertinentes à simulação de colônias. O Modelo 2, Estruturas em Camadas de Decisão, apresenta as principais características a serem adotadas no modelo objeto deste trabalho: o SimPed. A seguir, apresentam-se as descrições de cada um dos modelos, uma breve conclusão e as características úteis ao desenvolvimento do modelo SimPed.

3.1 MODEL 1 – MOVIMENTAÇÃO SIMPLES DE PEDESTRES

O primeiro modelo desenvolvido durante este trabalho – o Modelo 1 – constitui de um sistema para simulação da movimentação de grupos de pedestres que caminham em direções opostas. Este modelo foi desenvolvido utilizando o simulador Sesam¹¹ — abreviação para “*Shell for Simulated Agent Systems*”. O Sesam consiste em um aplicativo genérico para o desenvolvimento e simulação de modelos baseados em simulação multiagente. O foco principal da ferramenta é o desenvolvimento rápido de protótipos de modelos multiagente, através de uma programação visual funcional.

¹¹ O Sesam foi desenvolvido na Universidade de Würzburg e está disponível gratuitamente na internet em <http://www.simsesam.de>

O Modelo 1 consiste em uma micro-simulação de movimentação de pedestres; cada pedestre é representado como um agente capaz de tomar sua própria decisão, baseada na observação parcial do local. O ambiente — espaço de movimentação — é representado por uma matriz de movimentação, aqui denominada *grid*. Nesta matriz, cada pedestre ocupa um espaço por vez. A cada vez que precisa dar um passo, o pedestre avalia a situação do ambiente e o local de destino do próximo passo é decidido baseado num conjunto de regras fixas, como o processo de movimentação dos autômatos celulares.

3.1.1 Regras do Modelo

O Modelo 1 consiste em um agente que se move em um *grid*, e nasce com o objetivo de alcançar o lado oposto ao seu nascimento. A Figura 7 apresenta o cenário de simulação. Um grupo de agentes nasce no quadrado à esquerda, sendo que o segundo grupo nasce em um quadrado análogo à direita. O objetivo de todos os pedestres é alcançar o quadrado oposto ao seu nascimento. Cada pedestre tem chance de 50% de nascer de um lado. Definido o lado, eles nascem em uma posição aleatória dentro do quadrado. Cada pedestre sorteia aleatoriamente um ponto no quadrado oposto como meta final.

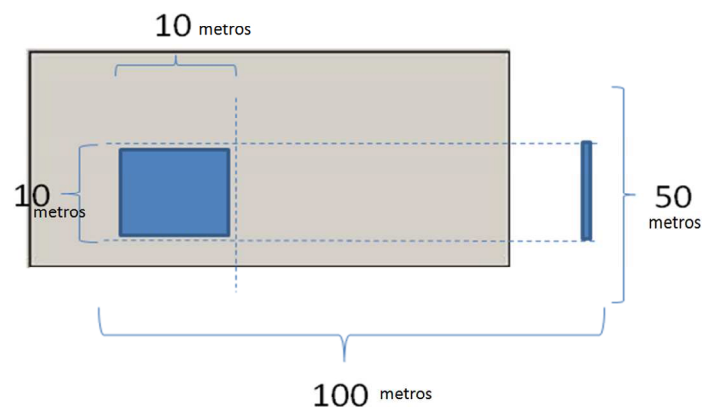


Figura 7 Modelo 1 - Ambiente de simulação

3.1.2 Movimentação dos Agentes

Todos os agentes movem-se com a mesma velocidade, sendo esta considerada unitária. Dessa forma, cada agente ocupa uma nova posição no *grid* a cada iteração do ciclo de programa. A passagem do tempo na simulação é discreta. Para cada iteração do programa, uma unidade de tempo é decorrida. Toda vez que um ciclo de programa é decorrido, cada pedestre tem a chance de tomar a decisão sobre a posição do seu próximo passo. Essa decisão consiste em escolher qual das oito posições possíveis de movimentação o pedestre vai ocupar no próximo ciclo. A seguir, a Figura 8 apresenta esse processo.

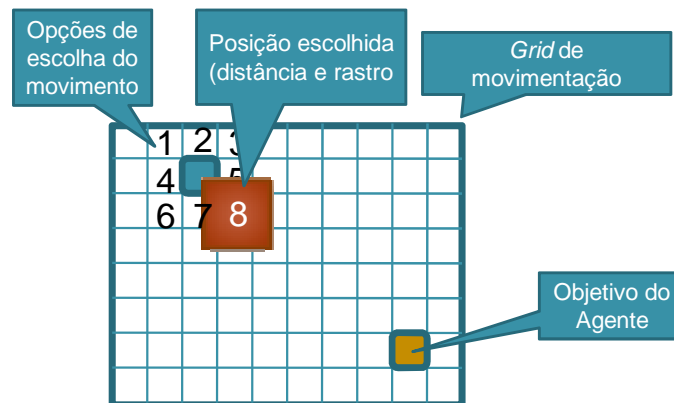


Figura 8 Modelo 1 - Processo decisório

A próxima célula do *grid* a ser ocupada pelo pedestre é escolhida baseada na sua distância em relação ao objetivo final. Porém, foi implementado um mecanismo chamado rastro, baseado nos conceitos encontrados no estudo de colônias. Através desse mecanismo, para cada célula ocupada por um pedestre, um fator de redução de distância é acumulado. Ou seja, se uma célula possui a menor distância em relação ao objetivo final e, outra célula, logo ao lado, já foi anteriormente ocupada por outro pedestre, essa célula ao lado pode ter sua distância “aparente” reduzida por esse fator. O pedestre pode escolher a célula que já foi ocupada por outro pedestre, ao invés da célula com a menor distância (de fato) ao objetivo final.

O objetivo do uso desse fator de rastro no modelo é estudar sua influência no processo de formação de filas, que consiste no processo emergente de movimentação de pedestres, onde um pedestre tende a seguir o pedestre à frente quando existe uma aglomeração.

É importante salientar que o rastro pode estar habilitado ou não. Além disso, existe um decaimento para cada iteração, onde o rastro decai de um valor fixo por interação do programa. Através do uso do rastro e do fator de decaimento desse rastro, cada célula contém um percentual de desconto na distância para cada iteração da simulação. Esse conceito de rastro foi baseado nos estudos de simulações de colônia de formigas, muito úteis para o desenvolvimento de modelos de otimização.

3.1.3 Variáveis

As variáveis de saída deste modelo são baseadas na velocidade média total do sistema. Ou seja, é realizada uma análise macro da dinâmica de movimentação dos pedestres, uma vez que o agente básico ainda apresenta um nível elevado de simplicidade no processo decisório. A cada instante de tempo, todos os pedestres têm a possibilidade de realizar o seu movimento. Desta forma, todos os pedestres possuem velocidade de caminhada igual a 1. Sendo assim, a velocidade média global (V_m) é definida como:

$$V_m = \frac{\text{total de pedestres que se movimentaram}}{\text{total de pedestres presentes na simulação}} \quad (1)$$

Neste caso, apesar de V_m passar uma noção de velocidade, é uma grandeza adimensional, pois se trata de uma razão entre agentes que se moveram e agentes presentes na simulação. O principal objetivo da simulação foi o de estudar o impacto dos parâmetros de rastro e decaimento de rastro na velocidade média global do sistema. Assim, outra variável de interesse foi calculada, a velocidade média global.

A velocidade média global instantânea (VMA), em metros por segundo, representa, durante o tempo, a variação da velocidade média do sistema simulado. Para o cálculo da velocidade média global, tem-se:

$$VMA = \frac{(T-1)VMA_{t-1}}{T} + \frac{VM}{T} \quad (2)$$

onde T representa o total de pedestres presentes na simulação, e o tempo t representa a iteração do processo de simulação. É importante salientar que neste modelo, todos os agentes que não estão bloqueados, movem-se a uma velocidade de 1 m/s. Sendo assim, a velocidade média máxima do modelo é 1 m/s e a unidade de medida da VMA é m/s.

3.1.4 Resultados

Foram simulados três cenários, designando-se um valor distinto de rastro para cada um deles. Para cada simulação, o valor da variável VMA foi calculado durante o tempo da simulação. Os cenários avaliados foram os seguintes:

- com o rastro inativo;
- com o rastro em 0,01 e o decaimento em 0,005;
- com o rastro em 0,015 e o decaimento em 0,005.

Os valores utilizados para o rastro e o decaimento são adimensionais, e foram escolhidos através de experimentação para melhor representar o fenômeno em estudo. A seguir apresentam-se os resultados obtidos a partir dos três cenários.

3.1.4.1 Cenário 1

Neste primeiro cenário, o rastro e, por sua vez, o decaimento estão inativos. Através da Figura 9 é possível observar a zona de conflito formada quando os pedestres vermelhos e azuis se encontram no centro da área de simulação, enquanto tentam transpor o obstáculo. Existe um acúmulo de pedestres parados, esperando a liberação da célula mais próxima do objetivo final.

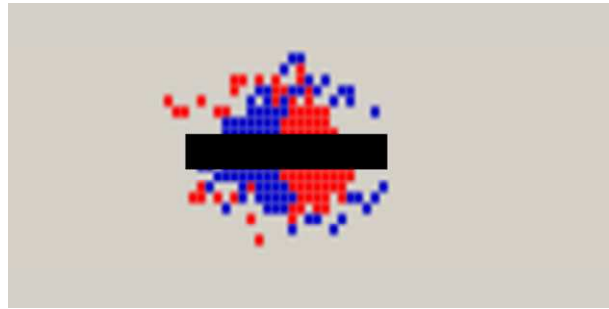


Figura 9 Simulação 1: dinâmica dos pedestres

Desta forma, ocorre uma queda significativa na velocidade média do sistema, como pode ser observada no gráfico da Figura 10.

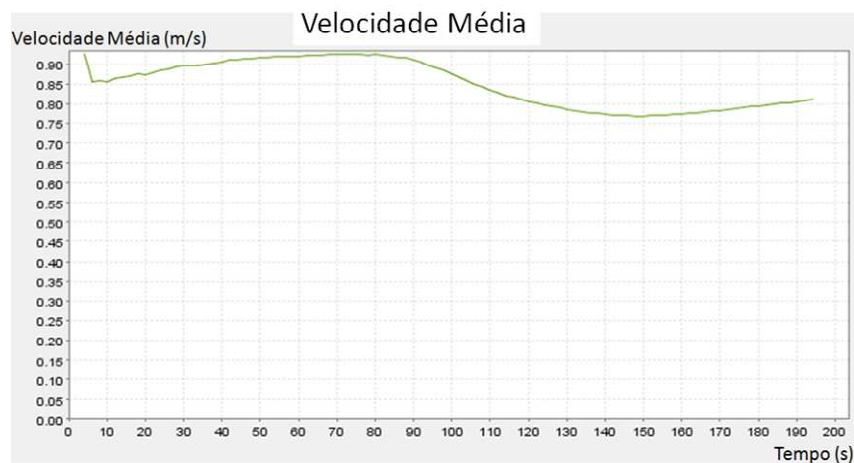


Figura 10 Simulação 1: velocidade média global

3.1.4.2 Cenário 2

No segundo cenário foi considerado um rastro no valor de 0,01 e um decaimento de 0,005. Ou seja, no momento da decisão do próximo passo, os pedestres tendem a escolher posições onde outros pedestres já passaram. É possível observar que na zona de conflito, os pedestres se comportam de maneira mais organizada, tendendo a formar uma fila - efeito

muito comum em simulações de multidões (*Lane formation*) (HELBING; MOLNAR, 1995). A formação de fila resulta em uma velocidade média mais uniforme, sem grande declínio no momento do confronto dos dois grupos de pedestres, conforme mostra a Figura 11. Na Figura 12, pode-se observar que a velocidade média global tem um comportamento mais uniforme.

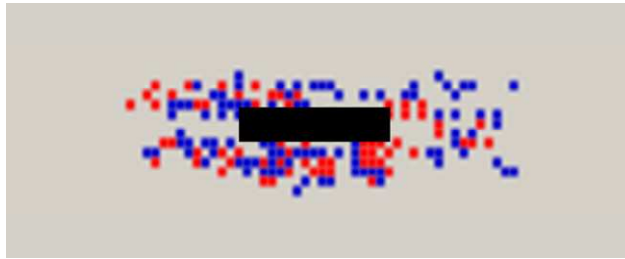


Figura 11 Simulação 2: dinâmica dos pedestres

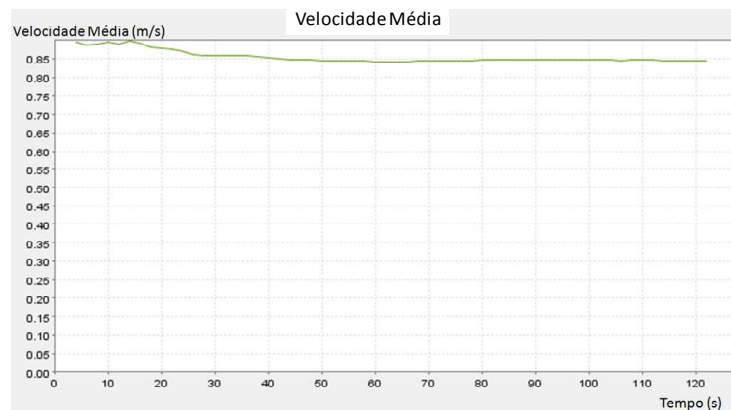


Figura 12 Simulação 2: velocidade média global

3.1.4.3 Cenário 3

No terceiro cenário foi considerado um rastro de 0,015, ou seja, 50% maior do que o rastro do cenário anterior, porém, com a mesma taxa de decaimento. Com este aumento no rastro, os pedestres tendem a formar fila desde o início da caminhada, e não somente na zona de conflito. Dessa forma, a velocidade média global diminuiu significativamente, quando comparada com a velocidade média global do cenário 2. Esse impacto negativo deve-se à

tendência dos pedestres de ocuparem posições já ocupadas por outros pedestres, formando assim, um gargalo na simulação. A Figura 13 ilustra esse fenômeno e o gráfico da Figura 14 apresenta o impacto negativo obtido na velocidade média global.



Figura 13 Simulação 3: dinâmica dos pedestres

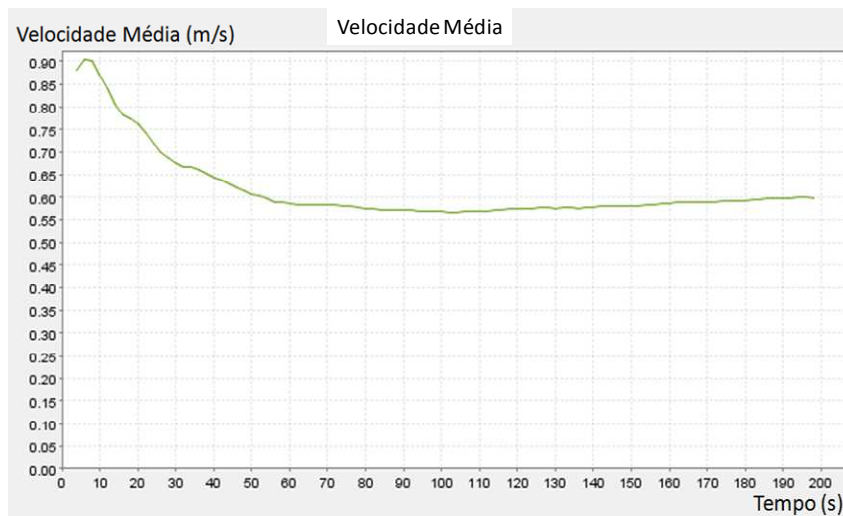


Figura 14 Simulação 3: velocidade média global

3.1.4.4 Comparação dos Resultados

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos nos três cenários, foram criados dois gráficos. O gráfico da Figura 15 mostra as três simulações na mesma base de tempo,

evidenciando que um nível bem ajustado no valor do rastro aumenta a velocidade média global do sistema, uma vez que ao final da simulação, a simulação 2 (linha amarela) encontra-se no nível mais alto do eixo y. Este efeito ocorre devido ao fato de o rastro facilitar a formação de filas de pedestres, diminuindo a disputa por espaço na área de conflito. O efeito no mundo real do rastro pode ser comparado com a capacidade dos pedestres de identificarem filas durante a movimentação em aglomerações, e utilizarem essas filas para atingir os seus objetivos de forma mais eficiente.

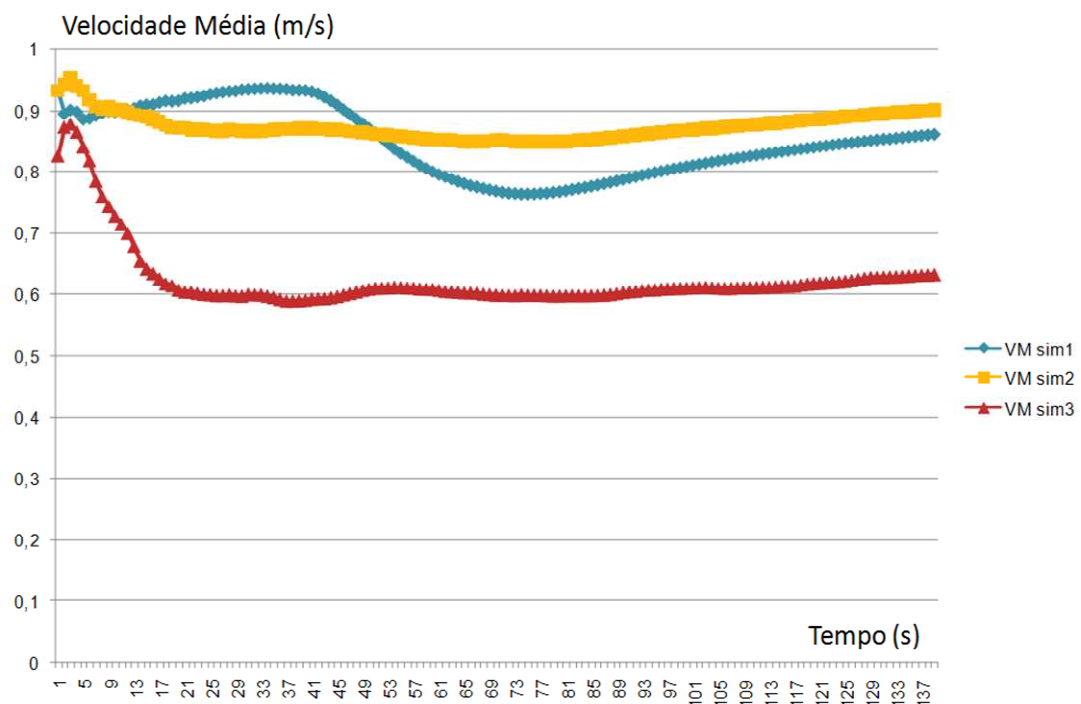


Figura 15 Comparação dos resultados das simulações

Através de uma análise visual do gráfico da Figura 15, é possível identificar em que momento os pedestres encontram-se no corredor, uma vez que existe uma queda considerável na linha que representa a simulação 1. O gráfico da Figura 16, apresenta o total de agentes parados no tempo, contendo dados dos três cenários.

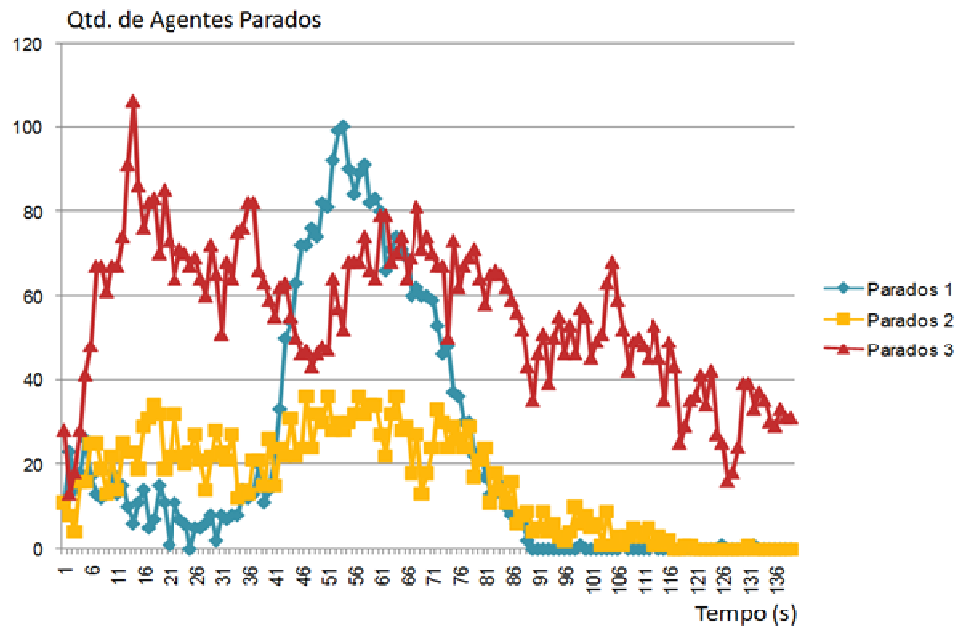


Figura 16 Agentes parados no tempo

A partir da análise desta figura, é possível observar três fatos:

- o pico de agentes parados, no Cenário 1 — linha azul da Figura 16 — , no período em que os grupos de pedestres atingem a zona de confronto;
- o péssimo comportamento global encontrado no Cenário 3, proveniente da busca desnecessária dos pedestres pela formação de filas, em momentos onde não existia aglomeração;
- o comportamento global satisfatório encontrado no Cenário 2, onde os níveis de rastro e decaimento estão ajustados adequadamente para um desempenho apropriado.

3.1.5 Conclusões sobre o Modelo 1

De forma resumida, é possível dizer que, apenas com regras de distância mínima, os pedestres não resolvem fluxo oposto e obstáculos da melhor forma, como pode ser observado no Cenário 1. Um nível ajustado de rastro e decaimento aumenta o desempenho médio, como pode ser verificado no resultado obtido no Cenário 2. Um desajuste no nível de rastro e

decaimento prejudica a simulação, resultado evidenciado pela simulação realizada no Cenário 3.

É importante salientar que este modelo demonstrou a importância do processo de formação de filas em ambientes de aglomeração. O Modelo 1 se mostrou não apropriado para representar situações mais complexas, como a movimentação de pedestres em ambiente urbano. A principal limitação para o uso deste modelo em estudos que consideram o ambiente urbano é a falta de um processo de geração de rotas. Além disso, é possível citar algumas deficiências do modelo, entre elas:

- tamanho fixo do pedestre por espaço do *grid*, dificultando a representação realista de situações de aglomeração, além de impor a condição que outros agentes, como por exemplo, os veículos, devem possuir um tamanho múltiplo do tamanho da célula do *grid*;
- a falta da representação de um processo mais eficiente de detecção de colisão pelos pedestres, o que resulta em uma interação pobre em situações de aglomeração.

3.2 . MODELO 2 – ESTRUTURA EM CAMADAS DE DECISÃO

O desenvolvimento do segundo modelo originou-se da idéia de dividir o processo decisório do agente em camadas, como pode ser visto, entre outras referências, em Pretto, (2008) e Gaud et al., (2008). Esse método permite dividir o processo entre as decisões mais estratégicas — como planejamento e mudanças de rotas — e os processos mais intuitivos — como a decisão do próximo passo do pedestre. A relação existente entre esses dois processos é apresentada a seguir.

O Modelo 2 foi dividido em três níveis de simulação: macro, meso e micro. No nível macro, tem-se apenas o ponto inicial e final da viagem que o pedestre pretende realizar, considerando apenas a distância Euclidiana entre o início e fim do percurso. O nível meso é responsável pela geração das possíveis rotas. O nível micro tem como foco o processo de negociação por espaço entre pedestres e a tarefa de evitar obstáculos. Os três níveis de simulação são descritos a seguir.

3.2.1 Nível de Simulação Macro

No nível de simulação macro, representado na Figura 17, considera-se apenas o ponto inicial e final de cada pedestre na simulação. Cada pedestre é criado com uma origem e um destino. A origem é definida através de um ponto (coordenadas x e y), e o destino pode ser definido por pontos ou áreas. Essa informação, ponto inicial e final, consiste na entrada para o nível meso. Múltiplas entradas e saídas podem ser definidas na camada mesmo através de uma matriz origem destino.

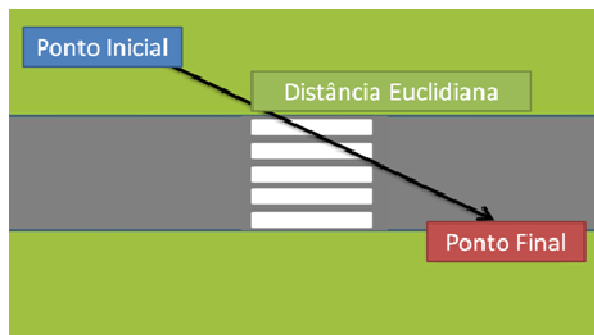


Figura 17 Nível macro

3.2.2 Nível de Simulação Meso

O nível de simulação meso, representado na Figura 18 é responsável por identificar a melhor rota para levar o pedestre ao seu destino. Esse nível de simulação é definido por um grafo, onde os nós são colocados acima da área de circulação do pedestre. Esse grafo é orientado nos dois sentidos, ou seja, cada nó se liga aos nós vizinhos nos dois sentidos. Cada nó do grafo representa um ponto de referência do espaço de simulação, sendo que o grafo contém apenas um número parcial da área total utilizada na simulação. Utilizando a camada do grafo, cada pedestre resolve o problema da rota, a partir do ponto inicial ao ponto final, suportado pelo algoritmo A^* (A - estrela).

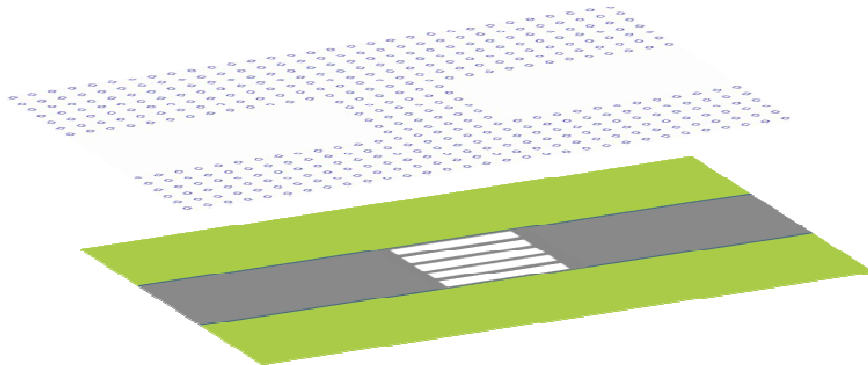


Figura 18 Nível meso

3.2.2.1 A-estrela

Algoritmo A* é um algoritmo utilizado para busca de caminho em um grafo de um vértice inicial até um vértice final. Ele é a combinação de aproximações heurísticas como as encontradas no algoritmo *Best-first Search* e da formalidade do Algoritmo de Dijkstra (DIJKSTRA, 1959).

3.2.3 Nível de Simulação Micro

No nível de simulação micro considera-se, passo a passo, a negociação por espaço realizada pelos pedestres. Cada pedestre percebe o mundo a sua volta e tenta desviar de outros pedestres e de obstáculos. Para identificar a colisão entre pedestres, foi utilizado um processo chamado pixel a pixel (*pixel collision*). Para decidir o próximo passo, o pedestre leva em consideração uma combinação de alternativas. Essas alternativas são definidas por dois parâmetros: ângulo do passo e módulo da distância. Pode-se citar como exemplo, o caso de um ângulo de 15 graus e um módulo de 10, no qual o pedestre irá avaliar 24 regiões a sua volta para decidir o próximo passo. Para tanto, o pedestre leva em consideração a rota definida no nível meso, a distância ao ponto final e os outros pedestres e obstáculos.

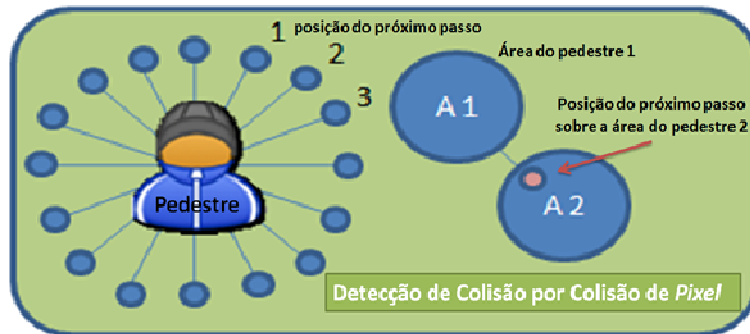


Figura 19 Escolha do próximo passo

A Figura 19 ilustra um pedestre (A1) avaliando algumas posições para definir se existe uma colisão com outros pedestres. Se uma das possíveis posições de próximo passo (de 1 a 24) estiver sobre a área de outro pedestre essa posição é descartada como uma possibilidade de próximo passo.

3.2.4 Espaço e Tempo

O espaço é representado por um *grid*, virtualmente de qualquer tamanho, na camada micro e um grafo na camada meso. O pedestre é representado por um círculo de raio definido. O tempo foi modelado através de uma variável que é incrementada a cada ciclo do programa. Dessa forma, é possível estabelecer uma relação de tempo para todos os pedestres. Cada pedestre possui um contador interno que representa o período de tempo que ele deverá esperar até chegar a sua vez de se movimentar, ou seja, de dar um novo passo. Quando o passo é dado, a espera reinicia. Do ponto de vista de implementação, o ciclo principal do programa percorre uma lista de pedestres e acumula o contador interno presente em cada pedestre. Quando o valor do seu tempo de espera for alcançado, o pedestre pode dar o passo e, portanto, zera o seu contador. E assim, sucessivamente. Com isso, é possível modelar tempo e velocidade. Abaixo segue um trecho de código para ilustrar o processo, a parte destacada na cor amarela refere-se ao processo de controle da passagem do tempo através de um contador interno.

```

namespace NewSimPed.Simulation.Agents
{
    public class pedestrian : a_base
    {
        ...
        public void Run()
        {
            if (verifyGoal() == true)
            {
                this.alive = false;
            }
            if (time == tick && this.alive==true) // time é o tempo que o pedestre espera
                // e tick é o contador interno
            {
                verifyNextNode();
                if (util.dist(X_NEXT, Y_NEXT, X, Y) > _profile.dis2changePath)
                {
                    pathRecalculation();
                }
                nextStep();
                tick = 0; // zera o contador interno
            }
            tick++; // incremento do contador interno
        }
    }
}

```

3.2.5 Perfil dos Pedestres

Os pedestres são gerados com um perfil pré-determinado antes da simulação, sendo que eles podem ser prudentes ou imprudentes em relação ao espaço. Quando um pedestre prudente gera seu grafo, apenas a área segura é considerada, conforme pode ser visto na Figura 20. Por definição, a faixa de veículos não é um caminho válido para um pedestre prudente. Dessa forma, essa área da simulação não possui nós do grafo e, conseqüentemente, o caminho gerado no nível meso não irá contemplar essa área. Apesar dessas restrições, os pedestres podem invadir uma pequena área da faixa de veículos, devido à influência do processo decisório presente no nível micro.

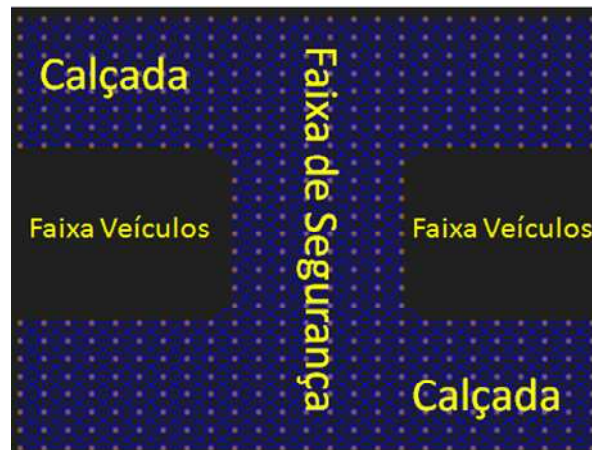


Figura 20 Grafo

3.2.6 Decisão dos Passos

O processo de decisão do próximo passo de um pedestre unifica o nível meso e micro. O pedestre tenta caminhar pela rota gerada pelo algoritmo A*, ao mesmo tempo em que ele precisa evitar obstáculos e, conseqüentemente, desviar da rota. O processo de decisão do próximo passo de um pedestre é definido pela seguinte sequência:

Decisão 1 — A Rota e o próximo ponto a seguir:

- o pedestre tenta seguir a rota de menor custo, considerando as restrições identificadas no nível micro;
- se um ponto fora da rota original for atingido, o pedestre avalia a sua distância aos nós vizinhos utilizando o nível meso;
- se o nó mais próximo ainda pertence à rota original, ele continua seguindo a rota;
- se o nó mais próximo não pertence à rota original, o pedestre gera uma nova rota e tenta segui-la, recomeçando o ciclo. Para gerar a nova rota, o pedestre considera o nó mais próximo da sua posição atual como nó inicial da rota, e considera o nó mais próximo da sua meta como posição final da rota.

Decisão 2 – Passo:

- o pedestre escolhe as próximas coordenadas (x,y) do passo, utilizando o critério de módulo e ângulo descrito anteriormente;
- a melhor opção é definida baseada na disponibilidade do local com menor distância ao próximo ponto da rota, sendo que a colisão pixel a pixel é utilizada para verificar se existe algum obstáculo na nova posição escolhida.

Para exemplificar este processo, foi criada a simulação apresentada na Figura 21, onde o pedestre inicia no ponto “A”, com o objetivo de chegar ao ponto “B”. A linha vermelha representa a rota gerada pelo algoritmo A*. O pedestre tenta seguir a linha vermelha sujeito às restrições do nível micro. Quando o pedestre percebe o obstáculo “X”, ele faz um desvio de rota, alcançando o ponto “A’”. No entanto, como esse ponto fica distante da rota original, o pedestre calcula uma nova rota considerando o ponto “A”, como início de percurso e o ponto “B” como final de percurso - (linha azul). No final da simulação, o pedestre percorreu um caminho sinuoso, representado pela linha verde.



Figura 21 Simulação do comportamento

É importante salientar que, em função da presença de outros pedestres, o pedestre irá se distanciar frequentemente da sua rota original. Dessa forma, o valor da distância que define o recálculo da rota definirá, na maioria das vezes, com que frequência que o pedestre irá gerar outra rota. Porém, a não utilização de um valor adequado da distância para recálculo da rota

acarreta em um movimento não realista do pedestre, onde o pedestre tenta, desnecessariamente, voltar a sua rota original, mesmo que isso não seja um movimento esperado na vida real.

3.2.7 Resultados do Modelo

Para avaliar as características e o desempenho do Modelo 2, dois cenários foram criados. No primeiro cenário — Cenário 1 — simula-se dois pedestres em situação de travessia, em direções opostas, tendo-se que tomar um desvio para não colidir no meio da faixa de segurança. O segundo cenário — Cenário 2 — considera-se 3 pedestres, em cada lado da faixa, tentando chegar ao outro lado, totalizando seis pedestres presentes na simulação. A seguir apresentam-se os resultados de cada cenário.

3.2.7.1 Cenário 1

A Figura 22 apresenta a distância percorrida, em determinado tempo, por dois pedestres (Ped 1 e Ped 2) ao atravessar uma faixa de segurança. Os pedestres atravessam a faixa de segurança em direções opostas. É possível observar que o Ped 2 executa uma rota diferente do Ped 1, devido ao desvio realizado para evitar uma colisão frontal com o Ped 1. Essa mudança de rota é evidenciada pela mudança de curso da linha vermelha no gráfico e, também, pelo valor de tempo maior de travessia que o encontrado no Ped 1.

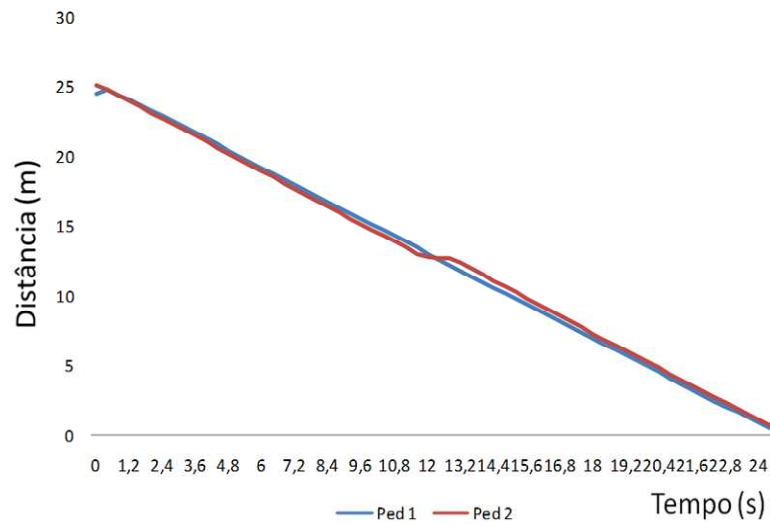


Figura 22 Distância percorrida por dois pedestres

3.2.7.2 Cenário 2

Neste cenário consideram-se seis pedestres - Ped 1, Ped 2, Ped 3, Ped 4, Ped 5 e Ped 6. Dentre eles, três pedestres de cada lado de uma faixa de segurança atravessam ao mesmo tempo em rota de colisão. Através da Figura 23 observa-se que três pedestres — Ped 4, Ped 5 e Ped 6 — realizam um desvio de rota, provocando aumento no tempo de travessia. Isso acontece pela mesma razão da simulação anterior; os três pedestres que levaram mais tempo foram os que desviaram dos outros pedestres.

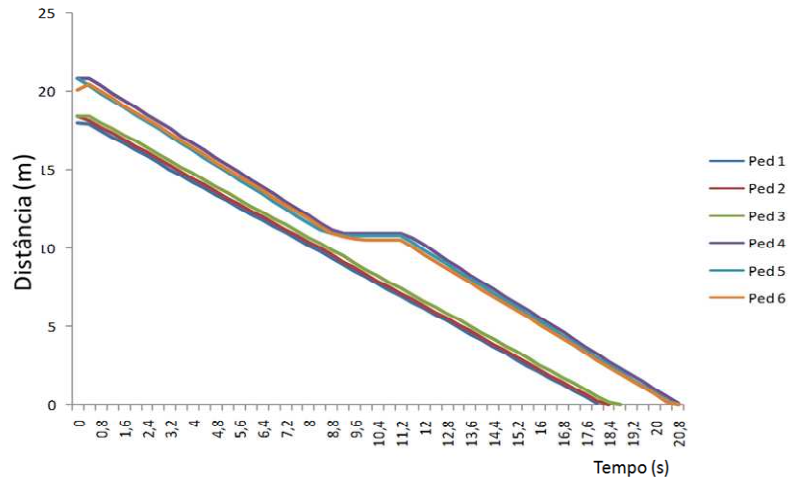


Figura 23 Distância percorrida por seis pedestres

3.2.8 Impacto do Aumento de Pedestre na Simulação

O gráfico abaixo, ilustrado pela Figura 24, mostra o impacto do número de pedestres atravessando uma faixa no tempo médio de travessia dos pedestres. Para uma simulação com dois pedestres, o tempo praticamente não muda. Porém com quatro e seis pedestres houve um aumento significativo do tempo médio de travessia, uma vez que existe uma competição por espaço na faixa.

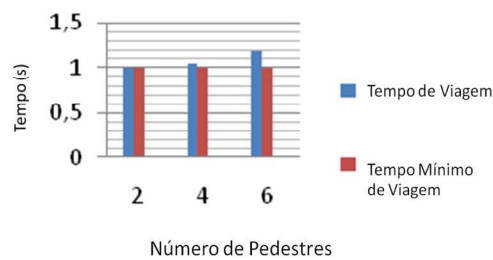


Figura 24 Tempo médio de travessia dos pedestres

Salienta-se que, conforme os pedestres disputam espaço na faixa de segurança, o tempo médio de travessia sofre um aumento. Esse fenômeno poderá ser observado com mais clareza na simulação descrita no Capítulo 4

3.2.9 Conclusões sobre o Modelo 2

Com a implementação do Modelo 2, foi possível observar que o processo de desvio e ajuste de rotas, em função do aumento de pedestres em uma simulação, tem um impacto considerável no tempo de travessia de pedestres.

O método de determinação de colisão por colisão de pixel se mostrou ágil, porém, considerando um contexto de desenvolvimento de software, fortemente agregado aos processos de interface gráfica. Desta forma, apresenta-se no próximo capítulo, uma nova abordagem para determinar colisão de forma totalmente desagregada aos processos de desenho.

A divisão do modelo em camadas facilita o entendimento dos processos e permite a incorporação de soluções para a geração de rotas, como o algoritmo A*. De posse dos modelos 1 e 2 foi possível identificar as principais características que devem estar presente em um modelo capaz de representar a interação de pedestres versus pedestres, pedestres versus obstáculos e geração de rotas. No próximo capítulo, apresenta-se o desenvolvimento do modelo SimPed, que agrega as funcionalidades dos dois modelos anteriores.

CAPÍTULO 4. MODELO DE SIMULAÇÃO PROPOSTO: SIMPED

O modelo de simulação de pedestres em ambiente urbano proposto neste trabalho — SimPed — tem como base o conceito de divisão em camadas presente no Modelo 2. No SimPed, o processo presente na camada micro — decisão passo a passo do pedestre — foi substituído por um processo mais refinado. Além disso, foi considerada a inclusão de agentes do tipo veículo e, os processos de interação entre veículos e pedestres foram desenvolvidos. A seguir apresentam-se os passos realizados no desenvolvimento do SimPed.

4.1 REPRESENTAÇÃO DOS AGENTES NO SIMPED

Um das principais características deste modelo refere-se ao fato de que todos os agentes do sistema são baseados em apenas uma figura geométrica, a saber: o círculo. Pedestres, carros, ônibus, paredes e obstáculos são representados por um ou mais círculos. Por exemplo, um pedestre, é representado por um círculo com um raio aproximado de 0,25 metros, conforme ilustrado na Figura 25.

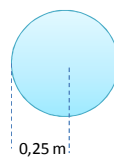


Figura 25 Pedestre

Um carro é representado por dois círculos unidos, cada um com raio aproximado de 1,5 metros, conforme ilustra a Figura 26.

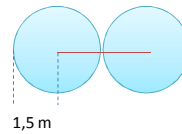


Figura 26 Veículo

Conforme apresentado na Figura 27, uma parede é representada por uma sequência de círculos.

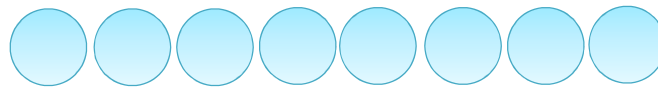


Figura 27 Parede

4.2 REPRESENTAÇÃO DO AMBIENTE

No SimPed, o ambiente físico de simulação é concebido por meio de um espaço cartesiano de duas dimensões, definido pelas propriedades largura e altura, que consistem na camada onde a micro simulação ocorre. Para definir as propriedades do ambiente, como por exemplo, a faixa de segurança, a faixa de veículos e calçadas, existe uma segunda camada, chamada meso. Além disto, considera-se o processo de geração de pedestres e a definição da matriz origem destino como uma camada de alto nível, camada macro. A Figura 28 mostra o espaço cartesiano com o grafo duplamente orientado sobre ele.

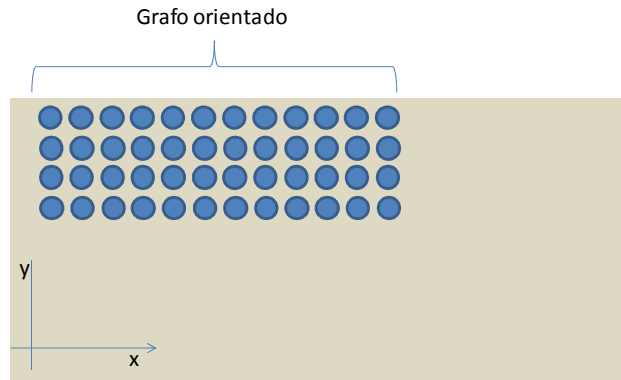


Figura 28 Ambiente de simulação do modelo SimPed

4.3 DETECÇÃO DE COLISÃO

Um dos tradicionais problemas encontrados no desenvolvimento de simuladores ou jogos eletrônicos consiste no processo de detecção de colisão, principalmente, quando essa detecção deve ser realizada em um ambiente contínuo. No desenvolvimento do SimPed, a detecção de colisão foi considerada de forma simples, valendo-se do fato de todas as entidades geométricas possuírem a mesma forma. Para determinar a colisão, é preciso identificar se a distância entre os centros dos círculos é maior que a soma dos raios — Figura 29. Uma vez que todas as entidades são compostas de círculos, este método de detecção pode ser aplicado para a detecção de pedestres contra pedestres, veículo contra veículo e qualquer outra combinação possível.

2,5 m > 2 m -> Sem colisão entre agentes

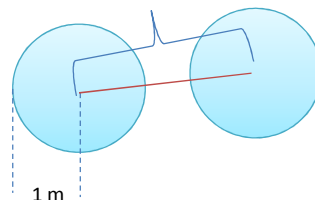


Figura 29 Detecção de colisão entre agentes

De forma geral, o processo de avaliação de colisão deve ser realizado antes da movimentação do agente — pedestre, veículos, etc — comparando sua posição de destino com a posição atual de todos os outros agentes do sistema. Cada pedestre avalia a posição de seu próximo passo e a detecção de colisão, considerando que todos os outros pedestres estão parados.

Com o auxílio da camada meso, utilizou-se um artifício para aumentar o desempenho do sistema. Um agente pode comparar a sua posição com a dos agentes “associados” ao seu nó do grafo mais próximo e aos agentes “associados” aos nós adjacentes. Isso diminui o número de comparações de distância entre raios e, em alguns casos, pode ser útil para aumentar o desempenho geral do sistema. Além disso, esse artifício pode ser considerado como uma perspectiva mais realista. Quando os pedestres avaliam os obstáculos e os outros pedestres tendem a priorizar os obstáculos mais próximos.

4.3.1 Previsão de Colisão

O processo de previsão de colisão é de fundamental importância para o realismo das simulações de pedestres. O modo como os pedestres interagem e evitam as colisões uns com os outros é essencial para o realismo dos movimentos gerados pelo simulador. Porém, na maioria das abordagens baseadas em campo de força, os pedestres interagem quando chegam suficientemente perto uns dos outros. O problema se torna mais evidente em ambientes grandes e desordenados, com os pedestres mudando constantemente suas orientações, empurrando uns aos outros e se movendo para trás e para frente.

Outra forma de se aprimorar as interações na simulação de pedestres é baseada na previsão de colisão. Tradicionalmente, o processo de previsão de colisão é baseada na extrapolação das trajetórias dos agentes, onde essa extrapolação é utilizada para determinar possíveis colisões futuras (KARAMOUZAS et. al, 2009).

Com base nessa idéia, foi desenvolvido neste modelo um processo alternativo de detecção de colisão. Esse processo é baseado na geração dinâmica de rotas para os pedestres, considerando o valor do campo de força gerado pelos pedestres no cálculo de suas respectivas rotas.

No processo de geração da rota, o peso dos nós não é apenas a distância euclidiana ao objetivo, mas também o valor do campo de força na posição x e y do nó. Ou seja, um nó na posição “ $x = 10$ ” e “ $y = 10$ ”, tem um peso no cálculo da rota constituído pela distância euclidiana do nó ao objetivo do pedestre, bem como pela força resultante do campo de força na posição “ $x = 10$ ” e “ $y = 10$ ”. A Figura 30 apresenta os dois pedestres em rota de colisão, onde o campo de força não foi considerado no cálculo das rotas.

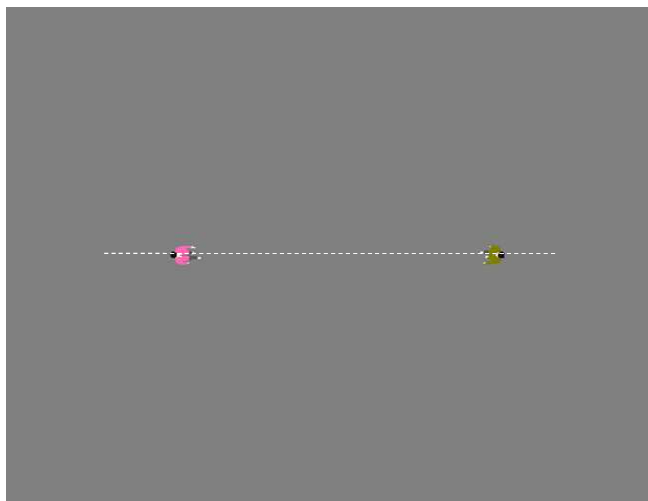


Figura 30 Pedestres em rota de colisão

A Figura 31 apresenta as rotas geradas pelos pedestres quando o campo de força é utilizado no processo de geração das rotas. Nota-se que a colisão é previamente identificada e evitada pelos pedestres. Assim, mostra-se a capacidade de previsão de colisão entre os pedestres através do uso conjunto do grafo de do campo de força.

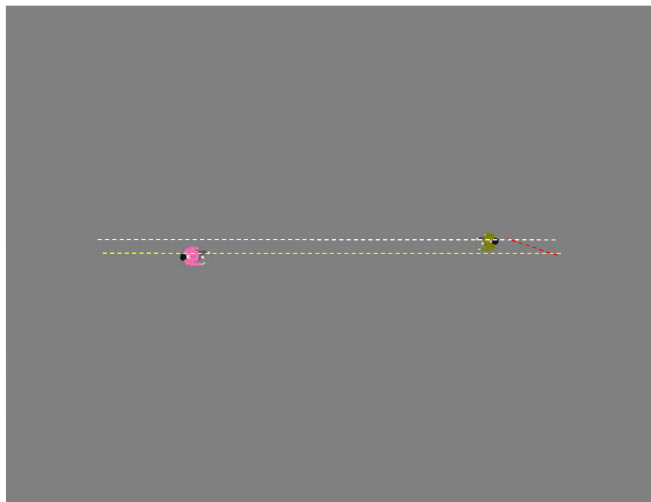


Figura 31 Pedestres em rotas paralelas

4.4 GRAFO

No SimPed, o grafo tem funções importantes. Dentre elas, citam-se:

- definir os melhores caminhos para um determinado par origem-destino;
- atribuir ao pedestres a capacidade de resolver qualquer problema relacionado a rotas — sem pedestres presos em cantos;
- atribuir uma regra capaz de envolver apenas pedestres vizinhos no processamento do passo de um pedestre.

Na Figura 32, a linha vermelha ilustra o trajeto percorrido por um pedestre em uma rota gerada através dos nós do grafo. Os nós pertencem à rota calculada pelo pedestre que, durante a caminhada, deverá alcançá-los em seqüência.

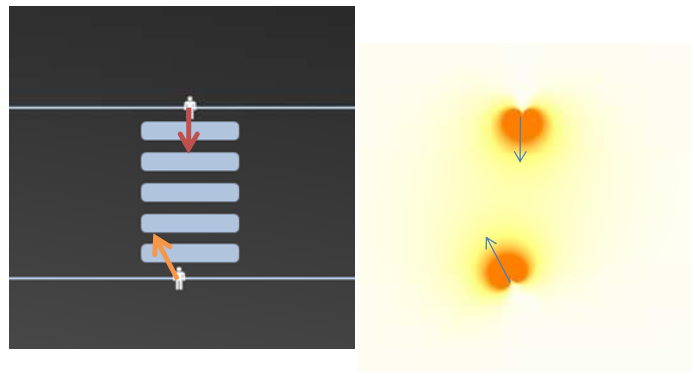


Figura 33 Representação gráfica do campo de força

4.5.1 Detecção do Campo de Força

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

$$Pe = Fr\beta + \gamma Md \quad (3)$$

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. Por exemplo, se o pedestre avalia quatro pontos a sua volta, para cada ponto avaliado, Pe é calculado.

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 Figura 34 ilustra a relação entre os vetores V e W para o cálculo do ponto de força $Fr(x,y)$.

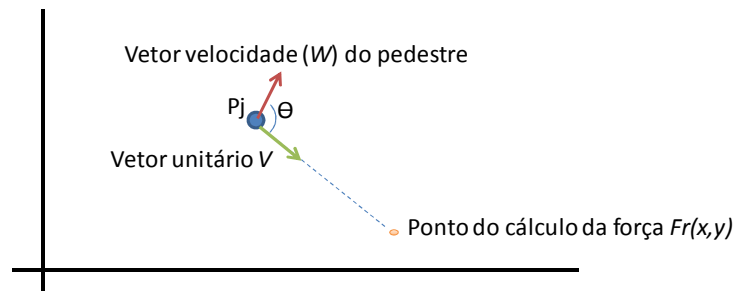


Figura 34 Vetores para o cálculo da força

A força resultante (Fr), em um ponto qualquer (x,y) é descrita pelo somatório de forças oriundas de cada pedestre, Fp_j , presentes na simulação, como segue:

$$Fr(x_r, y_r) = Fp_1 + Fp_2 + \dots = \sum_{j=1}^n Fp_j \quad (4)$$

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

$$Fp_j = \frac{|Wp_j| \alpha_{pj}}{d_{(p_j, Fr)}^2} \quad (5)$$

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

$$\alpha_{pj} = 0,5 + \frac{\cos \theta}{2} \quad (6)$$

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

$$\theta = \arccos \frac{W_{pj} \cdot V_{pj}}{|W_{pj}| |V_{pj}|} \quad (7)$$

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 . A Figura 35 mostra um exemplo de cálculo de força em um ponto do espaço.

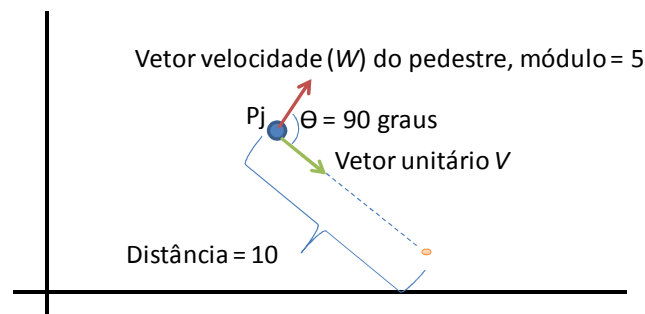


Figura 35 Exemplo de cálculo em um ponto do espaço

Para calcular a força F_r , primeiro aplica-se a equação a seguir:

$$\alpha_{p1} = 0,5 + \frac{\cos 90}{2} \quad (8)$$

após, aplica-se a equação dada por:

$$F_{pj} = \frac{5 \cdot 0,5}{100} = 0,025 \quad (9)$$

A força aumenta quando o vetor velocidade tem o sentido apontando para o ponto de estudo, atingindo $\alpha=1$, quando o ângulo for zero, e atingindo $\alpha=0$ quando o vetor velocidade estiver no sentido oposto ao ponto de cálculo (ângulo de 180 graus). Em função disso, e como pode ser observado na Figura 33, o campo de força na região posterior dos pedestres é nulo. Isso acaba gerando um efeito parecido com o rastro, ou feromônio, estudado na simulação 1, uma vez que os pedestres que caminham na mesma direção acabam por escolher uma posição próxima as costas do pedestres à frente, gerando filas.

4.5.2 Escolha do Próximo Passo

Apesar de o SimPed permitir a escolha do próximo passo de forma analítica, utilizou-se uma abordagem de escolha discreta. 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. É assumido um grau de utilidade para cada alternativa, 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 (Figura 36).

Na camada micro, o pedestre seleciona a melhor entre oito opções de próximo passo. As oito opções correspondem aos 360° divididos por 45° , conforme Figura 36. Não foram encontradas evidências, através de experimentação, que justifiquem um aumento das oito opções de escolha do próximo passo. Isso porque, verificou-se que qualquer aumento das opções acarreta em um conseqüente aumento do custo computacional, porém não influencia significativamente no comportamento dos pedestres. 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.

É importante salientar que, apesar de todos os experimentos terem sido realizados considerando a velocidade do pedestre como constante, o módulo pode ser utilizado para variar esta velocidade, conforme realizado no trabalho de Antonini et al., (2006). Nesse trabalho os autores consideram três módulos distintos para o próximo passo: igual, inferior — referente à diminuição da velocidade, superior — referente ao aumento da velocidade.

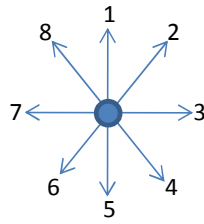


Figura 36 Escolha discreta do local do próximo passo

4.6 VEÍCULOS E PEDESTRES

No modelo objeto deste trabalho – o SimPed - considera-se apenas uma faixa de veículos, e o processo de aceleração e desaceleração segue uma aproximação do modelo de *car following* que pode ser encontrado em Gipps (1981). Neste modelo – SimPed - o processo de movimentação de veículos permite que um veículo qualquer da fila, sendo esse líder ou seguidor, perceba os pedestres. O espaço de movimentação dos veículos é contínuo, porém com a passagem do tempo de forma discreta. A percepção de pedestres pelos veículos ocorre quando o pedestre ultrapassa uma linha imaginária, paralela ao início da faixa de veículo, conforme Figura 37.

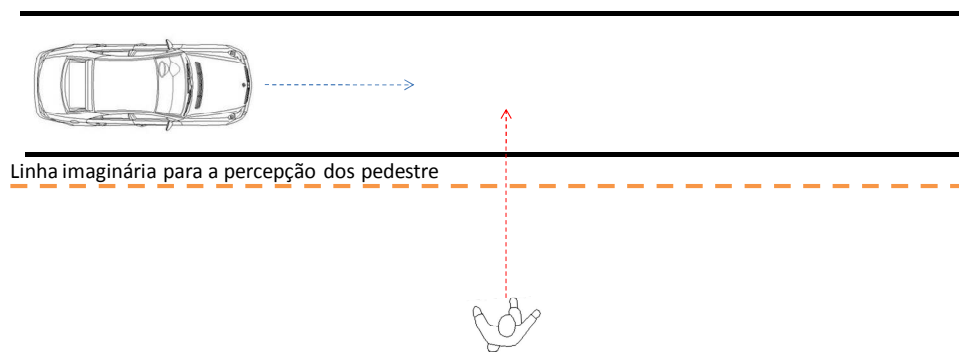


Figura 37 Linha imaginária de percepção do pedestre

Conforme Figura 38, se um pedestre ultrapassa a linha imaginária indicada na Figura 37, o veículo avalia a distância ao pedestre, de forma longitudinal ao eixo x. Uma distância padrão para percepção do pedestre é definida. Se o pedestre se encontrar a uma distância

menor do que essa distância padrão ele é considerado e, portanto, o veículo começa a desaceleração.

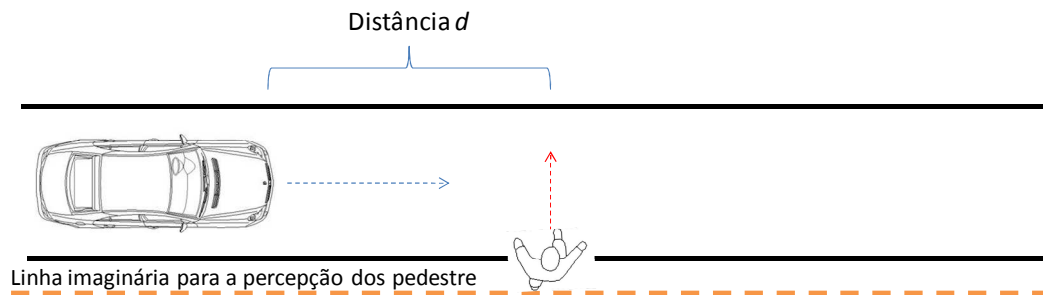


Figura 38 Veículo com percepção do pedestre

A simulação do processo de caminhada do pedestre ocorre através da ajuda do grafo. O processo de travessia da via pelo pedestre ocorre após o pedestre cruzar uma linha imaginária, paralela ao início da faixa de veículos. Quando o pedestre cruza essa linha imaginária, o processo de decisão de quando atravessar a via de veículos é iniciado. A Figura 39 ilustra o ambiente de simulação com o grafo de caminhada e da via de veículos.

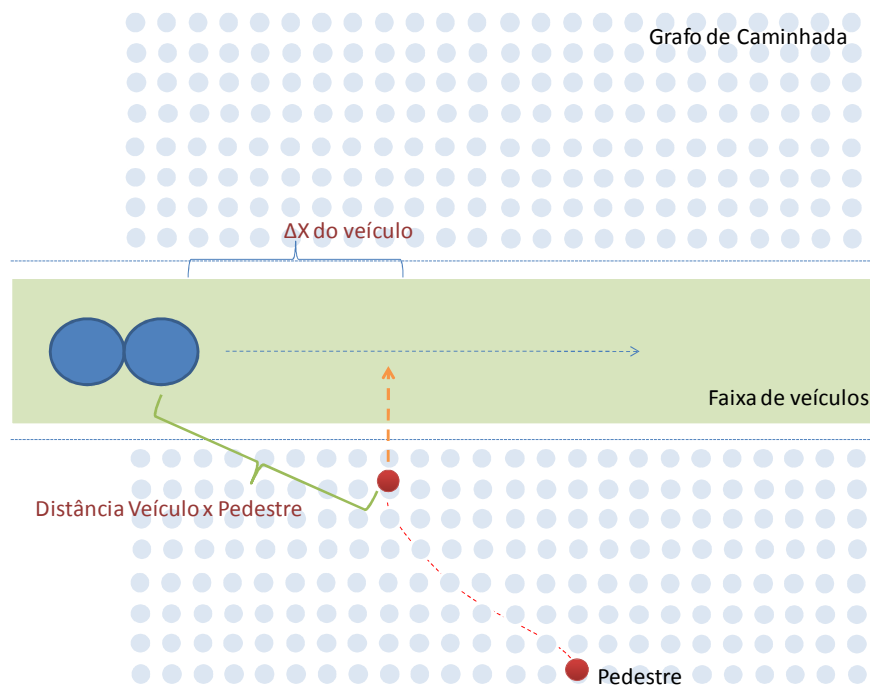


Figura 39 Ambiente de simulação do SimPed

4.7 PROGRAMAÇÃO DO MODELO

O aplicativo computacional desenvolvido tem por objetivo permitir um aumento gradual de sua complexidade. Os conceitos físicos mais básicos foram definidos, considerando as implementações da passagem de tempo na simulação e as medidas de espaço. O tempo decorre através de um *loop* infinito, onde cada agente presente na simulação possui um tempo de espera para atuar. A frequência de atuação dos agentes é definida pelo período de espera do agente. O espaço foi definido contendo duas dimensões. Os agentes negociam espaço num plano cartesiano. O sistema foi desenvolvido utilizando-se a linguagem de programação chamada C#¹², ou *C Sharp*.

4.7.1 Desenvolvimento do Código

O código foi dividido em dois processos distintos; o processo de simulação e o processo que atualiza a interface. As principais entidades do sistema são os pedestres e os veículos. Essas duas entidades são representadas por classes derivadas da classe Agente, que contêm as principais propriedades de localização espacial (x e y), além dos métodos de atualização de posição. Qualquer outro método que contenha processos decisórios é específico de cada classe. Abaixo segue trecho de código da implementação da classe Agente.

```
namespace NewSimPed.Simulation.Agents
{
    public abstract class a_base // base class where all agents are derivated
    {
        public bool alive = true;
        //Agent dinamic (changes over time) position
        public int X;
        public int Y;
        // Agent dinamic Goals' position - the next point to reach
        public int X_NEXT;
        public int Y_NEXT;
        // Agent dinamic olds' position - the next point to reach
        public int X_OLD;
        public int Y_OLD;
        // Agent static Goals' position
        public int X_GOAL;
        public int Y_GOAL;
        // Agent static (do not changes over time) initial position
        public int X_INI;
        public int Y_INI;
    }
}
```

¹² C# consiste em uma linguagem de programação orientada a objetos, fortemente tipada, desenvolvida pela empresa Microsoft como parte da plataforma denominada .NET. A sua sintaxe orientada a objetos foi baseada no C++, mas inclui muitas influências de outras linguagens de programação, como Object Pascal e Java. Em C# o gerenciamento de memória é controlado pelo compilador, código gerenciável, o que a torna mais custosa computacionalmente do que a linguagem C++.

```

// Agent radius
public int R;
// Agent ID
public int ID;
}
}

```

De uma maneira simplificada, processo de simulação consiste em um *loop* que percorre uma coleção de pedestres e veículos, atualizando cada agente por vez. A seguir, apresenta-se um trecho de código do processo de simulação.

```

namespace NewSimPed.Simulation.Engine
{
    public delegate void pedestrianCreateHandler(pedestrian p);
    public class simulation
    {
        Window1 window;
        public Thread t;
        public List<odPair> odList = new List<odPair>();
        public bool sim_state = false;
        public event pedestrianCreateHandler OnPedCreate;
        public void setForm(Window1 w){...}
        public simulation(){...}
        public void pause(){...}
        public void play(){...}
        public void ProcessFrame()
        {
            while (true)
            {
                while (sim_state == true)
                {
                    foreach (pedestrian ped in a_list.agents)
                    {
                        if (ped.alive == true) ped.Run();
                    }
                    Thread.Sleep(50);
                    window.Dispatcher.Invoke(System.Windows.Threading.DispatcherPriority.Normal, (Action)window.FormUpdate);
                    // on simulation pedestrians creation
                    foreach (odPair od in odList)
                    {
                        pedestrian p = od.process();
                        if (p != null && OnPedCreate != null) OnPedCreate(p);
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

Uma vez que o método `Run()`, presente em cada agente é chamado, o agente analisa o ambiente ao seu redor e toma a decisão pertinente ao seu objetivo. O método `Run()` contém as chamadas para as funcionalidades específicas do processo de decisão de cada agente.

4.7.2 Componentes do Sistema

4.7.2.1 Classe Simulador

Na classe Simulador, o processo de simulação é controlado. O método que define o *loop* principal do programa foi implementado.

4.7.2.2 Classe PedList

Esta classe contém a coleção principal de pedestres do simulador. Todos os pedestres criados para uma simulação são armazenados nesta coleção em forma de lista.

4.7.2.3 Coleção VeiList

Esta classe contém a coleção dos veículos presentes na simulação. Essa coleção é gerenciada por um processo que determina a movimentação dos veículos.

4.7.2.4 Interface

A interface é um conjunto de classes do sistema responsável pela visualização da simulação. Até o momento, uma interface de visualização 2D foi desenvolvida, bem como um teste rudimentar de visualização 3D - Figura 40. A interface foi desenvolvida utilizando uma tecnologia vetorial de desenho conhecida como *Windows Presentation Foudation (WPF)*. O *Windows Presentation Foundation* é um subsistema gráfico da plataforma .NET, que usa uma linguagem de marcação, conhecida como *XAML*¹³ para desenvolvimento de interfaces ricas em conteúdo gráfico. O WPF oferece um modelo consistente de programação para construir aplicações e uma clara separação entre interface com o usuário e lógica de negócios. Uma aplicação *WPF* possibilita o desenvolvimento de controles de design moderno. O *WPF* possui capacidade de geração de imagens em terceira dimensão de forma nativa, ou seja, não necessita de nenhum framework externo.

¹³ XAML (sigla de *eXtensible Application Markup Language*) é a principal linguagem de interface da Microsoft, usada para criar interfaces de usuário de forma simples e rápida. Numa típica forma de uso, os arquivos do tipo XAML são produzidos por uma ferramenta de desenho.

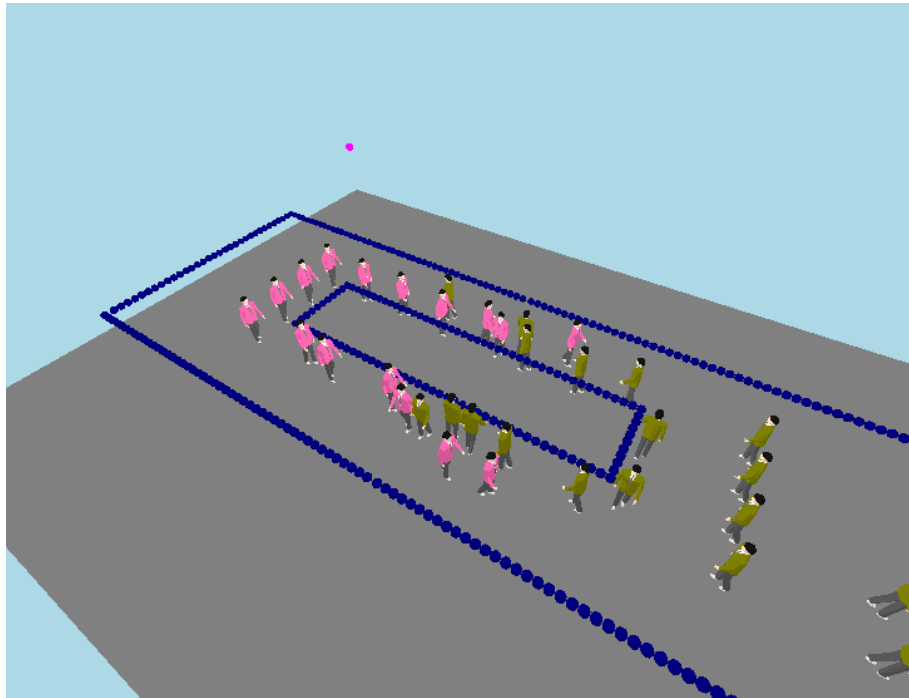


Figura 40 Visualização 3D

4.7.2.5 Grafo

Para a camada de definição de rotas, foi desenvolvido um conjunto de classes para representar e manipular o grafo presente na simulação. O grafo foi gerado sobre a área da simulação, respeitando tanto as áreas de circulação de pedestres como as faixas de segurança e de veículos, conforme ilustrado na Figura 41.

Por definição, o grafo é duplamente orientado; para cada ligação entre nós, é gerado um ramo para cada sentido. Os nós do grafo são posicionados sobre o espaço cartesiano com o objetivo de cobrir todo o ambiente de simulação onde os pedestres podem se movimentar. O custo mínimo de rota é baseado no somatório das distâncias euclidianas entre os nós que são adjacentes e que compõe a rota. A rota que possuir o menor custo é a rota escolhida.

O algoritmo Dijkstra de geração de rota foi implementado para gerar uma rota válida. Esse algoritmo busca o caminho em um grafo, de um vértice inicial até um vértice final. Abaixo seguem as etapas do algoritmo em pseudo-linguagem para um melhor entendimento:

- inicialize Q com o nó de busca (S) como única entrada;
- se Q está vazio, interrompa. Se não, escolha o melhor elemento de Q ;
- se o estado (n) é um objetivo, retorne n ; Se não, remova n de Q ;
- encontre os descendentes do estado (n) que não estão em visitados e crie todas as extensões de n para cada descendente;
- adicione os caminhos estendidos a Q e vá ao passo 2.

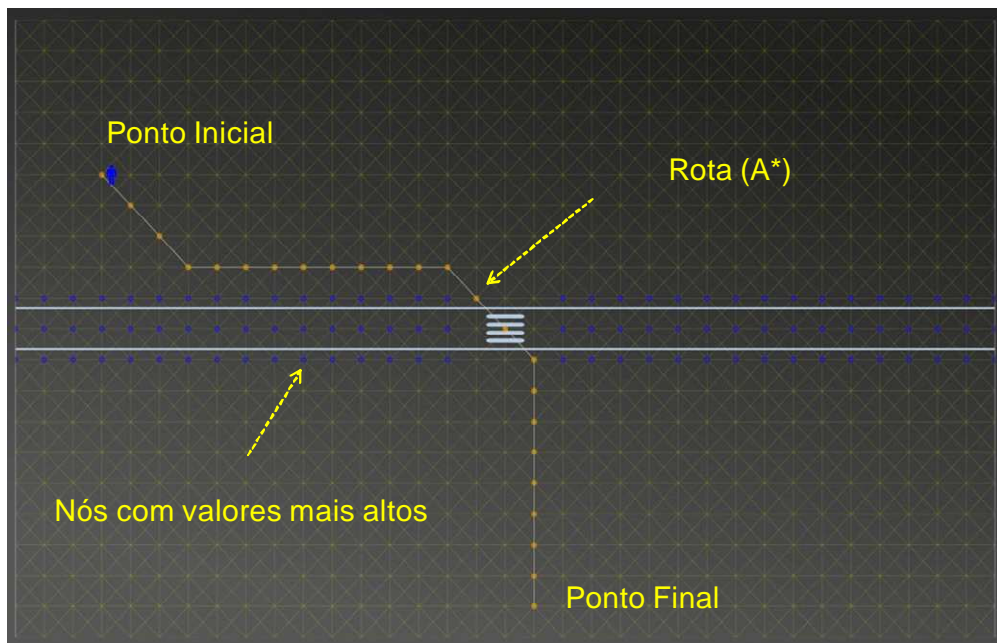


Figura 41 Grafo sobre a camada micro

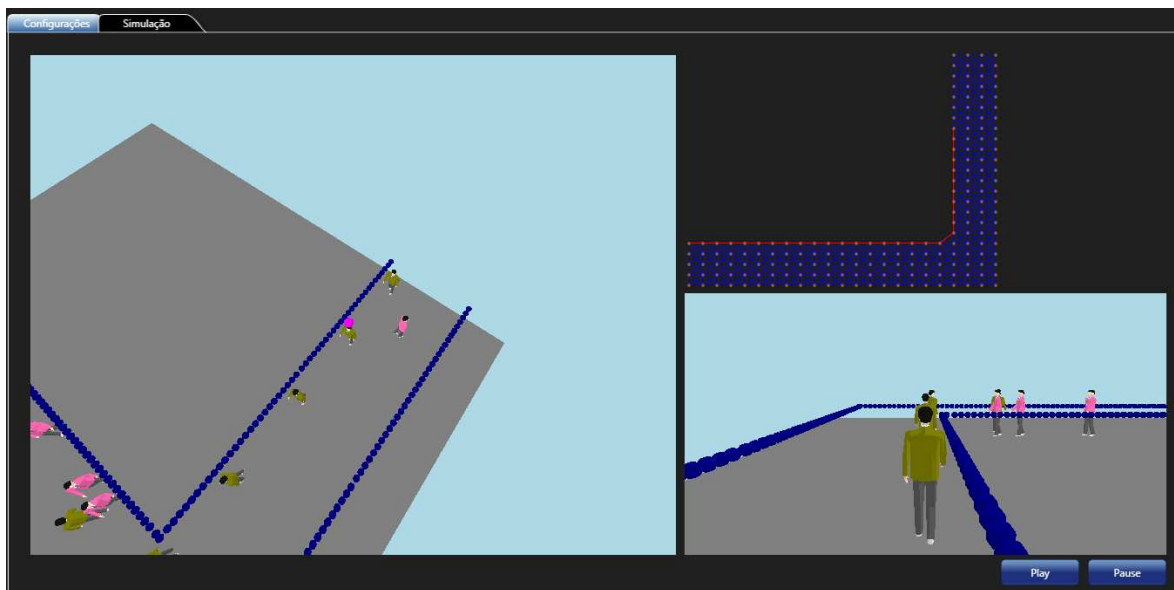


Figura 42 Grafo

A Figura 42 apresenta uma simulação em um ambiente em forma de corredor. O grafo com a rota gerado pelo pedestre selecionado (marcado com uma esfera acima do agente) pode ser visto no canto superior esquerdo da representação.

4.7.3 Classe Veículo

A classe veículo representa os agentes do tipo Veículo da Simulação. Cada veículo possui um método `Run()`, o qual identifica a posição do veículo no algoritmo de *car following* (líder ou seguidor) e chama os métodos de tomada de decisão. Basicamente, os algoritmos implementados nesta classe são os seguintes:

1. Identificação da posição (líder ou seguidor) conforme distância euclidiana do veículo da frente;
2. Identificação aproximação de pedestres;
3. Escolha de aceleração ou desaceleração conforme Gipps (ausência de pedestres) ou conforme formulação para detecção de pedestres.

4.7.3.1 4. Classe Útil

Nessa classe as funções dos cálculos matemáticos, comuns aos agentes, são armazenadas. É possível elencar alguns exemplos:

- cálculo do campo de força;
- cálculo da distância entre dois agentes;
- verificação de espaço disponível para movimentação de agentes.

4.7.3.2 Classe Pedestre

O pedestre é o principal protagonista do simulador proposto. A classe Pedestre contém os códigos referentes ao processo decisório do pedestre. As funções implementadas na classe pedestre são as seguintes:

- escolha da rota;
- verificação de distância entre a posição atual do pedestre e a rota;
- verificação do próximo ponto da rota;
- escolha do próximo passo.

Abaixo, segue trecho de código em C# da classe pedestre.

```
namespace NewSimPed.Simulation.Agents
{
    public class pedestrian : a_base
    {
        public pedProfile _profile; // pedestrian's profile (defines initial and final points,
        speed, radius, etc.)
        public double angule = 0; // last used angule for next point calculation (module and
        angule);
        int tick, time; //tick is an internal time count and time is an time to  pedestrians
        wait for next step
        enviroment _enviroment;
        Graph _graph; // reference for the graph (same graph for all pedestrians) - reset
        nodes value before used it;
        Node n1, n2; //n1 -> Star Node and n2 -> End Node (pedestrian's goal)
        public List<Node> path = new List<Node>();
        public pedestrian(){...}
        public void setEnviroment(enviroment enviroment, Graph graph){...}
        public void setProfile(pedProfile profile){...}
        public void firstTime(){...} //call this method after set all initial variables
        public void initialNode(int x, int y){...}
        public void initialPath(){...}
        public void finalNode(){...}
        public bool freeSpace(int x, int y){...} //this method verifies if the next point (x,y)
        is free and return false for free space available
        public bool verifyGoal(){...}
        public void updateGoal(){...}
        public void pathRecalculation(){...}
        public void re_InitialNode(int x, int y){...}
        public void nextStep()
        {
            int module = _profile.module; // sets the next step module (ped profile)
            int angule = 0; // angule (0 to 360)
            int angule_step = 45;
            int best_angule = 0; // best angule calculation variable
        }
    }
}
```

```

double d = 0; // distance variable
double dis = Double.MaxValue; // minor distance variable. Starts with extreme high
value, so its only gets down
double decision = 0; //variable for calculation of the energy and distance balance
double e; //variable for energy calculation
Point p = new Point(0, 0);
for (int i = 0; i < 360; i = i + angule_step)
{
    X_OLD = X;
    Y_OLD = Y;
    angule = i;
    p = util.NextPoint((int)this.X, (int)this.Y, angule, module);
    if (freeSpace((int)p.X, (int)p.Y) == false)
    {
        d = util.dist(p.X, p.Y, this.X_NEXT, this.Y_NEXT);
        e = util.Energy((int)p.X, (int)p.Y, (int)this.ID);
        decision = d * _profile.alpha + e * _profile.beta;
        if (dis > decision)
        {
            best_angule = i;
            dis = decision;
        }
    }
}
if (dis != Double.MaxValue)
{
    p = util.NextPoint((int)this.X, (int)this.Y, best_angule, module);
    this.X = (int)p.X;
    this.Y = (int)p.Y;
    this.angule = best_angule;
}
}
public void Run(){...}

```

4.8 DESEMPENHO COMPUTACIONAL

Algumas medidas para aumentar o desempenho computacional do modelo foram analisadas e adotadas. Para exemplificar esse processo, um teste de desempenho foi realizado utilizando-se o modelo sem e com uma janela de percepção de pedestres baseada em distância - modelagem rudimentar do conceito de “campo de visão”.

Dois cenários forma considerandos, cenário 1: Uma atualização de posição de 1500 pedestres, sem considerar nenhuma artifício para filtrar pedestres que se encontram muito longe do pedestre que está analisando as possibilidades do seu próximo passo. Ou seja, o *loop* principal do algoritmo irá percorrer uma vez a lista de pedestres e atualizar todas as posições dos pedestres, considerando todos os cálculos para obtenção da posição do proximo passo do pedestre. O cenário 2 consistia em uma atualização de posição de 1500 pedestres,

considerando uma janela para cálculo do campo de força aproximadamente 8 vezes o raio do pedestre, e um janela para verificação de espaço livre no ambiente de aproximadamente 6 vezes o tamanho do pedestres.

O filtro de distância utilizou as distâncias por eixo x e y, sem o cálculo da distância euclidiana (mais custosa computacionalmente pois utiliza uma raiz quadrada no cálculo). O filtro utilizado pode ser visto marcado na cor amarela no algoritmo abaixo.

```
#include <iostream>
#include "pedestrian.h"
#include "Math.h"
#include <time.h>
#include <cmath>

using namespace std;
typedef list< pedestrian > agent_list;
agent_list agents;
int contador_e = 0;
pedestrian::pedestrian(){};
double pedestrian::dist(double xgoal, double ygoal, double xactual, double yactual) {...}
point pedestrian::NextPoint(int x, int y, double angule, double module) {...}
double pedestrian::Energy(int i, int j, int ID) {...}
double pedestrian::Energy2(int i, int j, int ID)
{
    double acc_energy = 0;
    double d = 0;
    agent_list::iterator it_begin = agents.begin();
    agent_list::iterator it_end = agents.end();
    for( /*empty*/; it_begin != it_end; ++it_begin )
    {
        pedestrian p = *it_begin;
        if (p.ID != ID && p.alive == true && abs(i-p.X) < 40 && abs(j-p.Y) < 40 )
        {
            contador_e++;
            acc_energy += (1 * ResultCoefficient(ResultAngule2(i, j,p.angule, p.X, p.Y))) / (d * d);
        }
    }
    return acc_energy;
}
double pedestrian::Energy(int i, int j) {...}
double pedestrian::ResultCoefficient(double dAngule) {...}
double pedestrian::innerProd(vector<double> v1, vector<double> v2) {...}
double pedestrian::ResultAngule2(int x_point, int y_point, double ped_angule, double ped_x, double ped_y)
{...}
bool pedestrian::freeSpace(int x, int y)
{
    agent_list::iterator it_begin = agents.begin();
    agent_list::iterator it_end = agents.end();
    for( /*empty*/; it_begin != it_end; ++it_begin )
    {
        pedestrian p = *it_begin;
        if (p.alive == true && abs(x-p.X) < 30 && abs(y-p.Y) < 30 && ID != ID)
        {
            if (dist(x, y, p.X, p.Y) < (p.R + R) ) return true;
        }
    }
    return false;
}
void pedestrian::nextStep() {...}
int main (int argc, const char * argv[]) {...}
```

O algoritmo de teste foi implementado na linguagem de programação C++, considerando apenas as etapas de cálculo do modelo, sem considerar nenhuma representação gráfica da movimentação dos agentes. No cenário 1, o tempo para atualização da posição dos 1500 pedestres foi de 15,56 segundos. No cenário 2, o tempo para atualização da posição dos mesmos 1500 pedestres, considerando o uso dos filtros no cálculo do campo de força e da verificação de posição livre foi de 0,3 segundos, evidenciando a necessidade de utilizar artifícios que melhorem o desempenho global do sistema. Uma vez que as janelas de percepção de pedestres adotadas tenham um tamanho apropriado, nenhuma diferença significativa nos resultados pode ser observada.

CAPÍTULO 5. TESTES E CALIBRAÇÃO DO MODELO

Antes da utilização de qualquer modelo, ele deve ser validado de forma correta. Devido à diversidade de abordagens existentes na literatura, não existe um consenso sobre a melhor e mais precisa maneira de validar um modelo de simulação de pedestres. Porém, é possível classificar as abordagens comumente utilizadas em qualitativas e quantitativas. A validação qualitativa avalia a qualidade de representação de certos fenômenos emergentes, como formação de filas e formação de aglomerações, comparando com o observado na prática. Na validação quantitativa avaliam-se variáveis como densidade, velocidade, atraso, e suas relações de interdependência. Na validação quantitativa é possível analisar as variáveis para grandes grupos de agentes na simulação, considerando principalmente as médias das variáveis em estudo, além das variáveis relativas a um indivíduo, comparando-as e analisando-as em função do tempo, espaço e densidade. É importante salientar que o processo de teste se difere do processo de calibração no sentido em que o teste representa uma análise de funcionamento do modelo. A calibração, por sua vez, representa o procedimento no qual se define as variáveis do modelo cujos valores podem ser ajustados para que o resultado do modelo seja o mais fidedigno possível com os resultados encontrados nas medições reais.

Neste trabalho, a primeira análise realizada corresponde a uma validação qualitativa, considerando dois indivíduos caminhando em sentidos opostos, em trajetória de colisão. Esta análise tem como objetivo identificar a capacidade dos pedestres de identificarem colisão e tomarem uma ação de desvio. Esta propriedade é conhecida na literatura como “*collision avoidance*” (GANDHI; TRIVEDI, 2006).

Nesta análise é realizada uma avaliação da influência do valor campo de força no valor da distância em que os pedestres são capazes de perceber outros pedestres. Foram realizadas várias simulações para identificar, de forma qualitativa, qual valor é o mais adequado para representar um comportamento realista.

O cenário das simulações consiste em dois pedestres caminhando em direções opostas, em rota de colisão. O local de início de percurso do primeiro pedestre é o destino do segundo, e vice versa, sendo os percursos representados por uma linha reta.

Neste teste, foi observado que quanto maior a influência do campo de força no processo de escolha do próximo passo dos pedestres, mais cedo os pedestres irão perceber outros pedestres caminhando em direção oposta e mais cedo o pedestre irá atuar, desviando a sua rota. Alguns testes realizados com um valor muito elevado de influência do campo de força mostraram que as rotas realizadas pelos pedestres são muito curvas, distanciando-se muito do que é observado na realidade. Para definir um valor mais preciso da influência do campo de força, na decisão do próximo passo dos pedestres, alguns testes foram realizados. Esses testes são descritos a seguir.

5.1.1 Formação de Fila (*Lane Formation*)

Um dos cenários mais utilizados para realizar uma avaliação qualitativa em modelos de movimentação de pedestres é o de formação de fila. Esse cenário corresponde a grupos de pedestres posicionados em lados opostos de um corredor, conforme Figura 43.

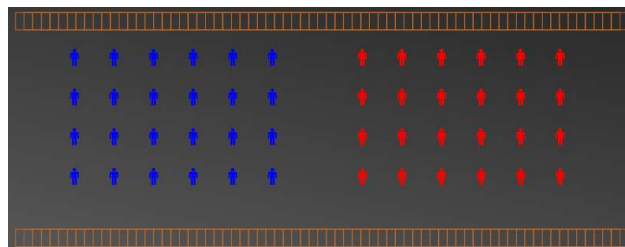


Figura 43 Formação dos grupos de pedestres

Para avaliar o efeito do campo de força, a primeira simulação foi realizada considerando-se o coeficiente do campo de força $\beta=0$. Sendo assim, todos os pedestres buscam sempre o ponto de menor distância ao seu objetivo final como sendo o ponto do seu próximo passo. Com isso, os pedestres não evitam colisão de forma antecipada, gerando uma aglomeração no centro do percurso, como pode ser observado na Figura 44.

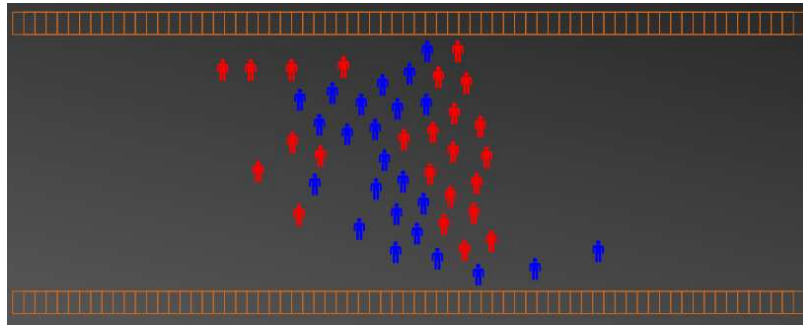


Figura 44 Conflito de pedestres no corredor

A aglomeração observada na Figura 44 pode ser evitada com o uso do campo de força como parte do critério de escolha das coordenadas do próximo passo. Considerando-se o valor de $\beta=0,25$, tem-se um comportamento mais realista com a formação de filas de pedestres azuis e vermelhos, conforme Figura 45.

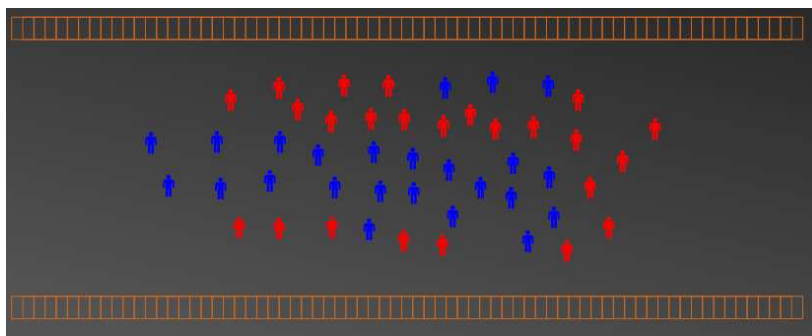


Figura 45 Formação de fila no corredor

5.1.2 Formação de Fila em Ambiente de Travessia

Avaliou-se o valor da influência do campo de força considerando um ambiente de travessia real. Para essa validação, uma câmera foi posicionada no alto de uma torre de igreja, perto de um cruzamento de grande fluxo de pessoas e veículos na cidade de Porto Alegre. Várias horas de filmagens foram realizadas e os dados de tempo de travessias dos pedestres foram coletados para viabilizar a calibração do modelo. A Figura 46, vêem-se as trajetórias identificadas com auxílio de um *software* de análise de imagem. A posição inicial e final de cada pedestre foi medida, bem como o tempo e as velocidades de deslocamento. Com o

objetivo de facilitar o processo de calibração, foram considerados apenas ciclos de semáforo vermelho para automóveis, e verde para pedestre.

Como o principal objetivo desse processo é representar de forma realista o comportamento de grupos de pedestres interagindo na faixa de segurança, os pedestres oportunistas foram desconsiderados no processo de calibração. O local escolhido para a filmagem possui três faixas de veículos, sendo que os pedestres se acumulam no canteiro central durante o ciclo de semáforo verde para veículos. Os dados coletados a partir dos vídeos correspondem às informações sobre quatro parâmetros: tempo de início, posição de início, tempo final e posição final. Os parâmetros de 110 (cento e dez) pedestres foram medidos.

O método de coleta de dados consiste em converter o vídeo em uma seqüência de imagens, marcando as posições dos pedestres no início e no fim da viagem. Como a imagem filmada não corresponde às coordenadas reais, uma transformada de perspectiva foi aplicada às imagens.

O processo de calibração foi realizado de forma a identificar o melhor valor de β para o grupo de pedestres. Os testes foram iniciados com o valor de β nulo, finalizando-se as simulações com um valor de β muito alto — alto o suficiente para inviabilizar o processo de travessia. Considerou-se esse valor alto como o fim da escala, ou seja, $\beta = 100\%$. Dez simulações foram realizadas para avaliar o melhor valor de β .



Figura 46 Trajetória dos pedestres em uma faixa de segurança

O tempo médio de travessia dos pedestres coletado foi de 7,09 segundos, com um desvio padrão de 1 segundo. A Figura 46 apresenta o tempo de médio de travessia dos pedestres simulado para os valores de β . O valor que melhor se aproxima do tempo médio coletado é de 30% de influência do campo de força (β)

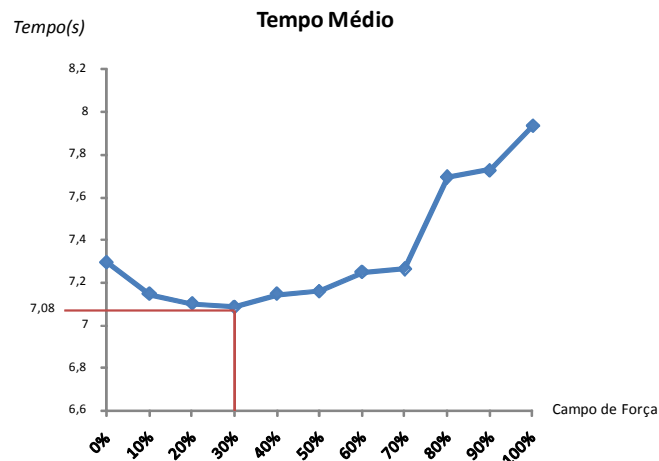


Figura 47 Relação entre tempo médio de travessia dos pedestres e campo de força

5.1.2.1 Influência dos Pedestres no Fluxo de Veículos

Para avaliar o efeito da variação do tempo de travessia dos pedestres no fluxo de veículos, foi criado um cenário que consiste em uma faixa de veículos e uma faixa de segurança, que garante total prioridade aos pedestres. Pedestres azuis e vermelhos são gerados em lados opostos da faixa de segurança e possuem direções conflitantes.

Durante a simulação, 20 veículos passam pelo cenário, considerando um espaçamento uniformemente distribuído de 72 a 96 metros. O movimento dos veículos é baseado no modelo de *car following* de Gipps (GIPPS, 1981). A velocidade desejada dos veículos é de 40 km/h, a aceleração típica é de 3 m/s^2 , e a distância típica entre veículos é de 15 m. A velocidade dos pedestres foi considerada constante em 1.3 m/s (RANJITKA et.al, 2005).

O objetivo do estudo é identificar o impacto da variação do tempo de travessia dos pedestres no fluxo de veículos. Da mesma forma que o estudo anterior, considerou-se o valor de β variando de 0 até 100%.

A Figura 48 mostra o tempo médio de travessia dos 20 veículos que passaram pelo cenário, em função do valor de β . A calibração em torno de $\beta = 25\%$ possui a menor influência no tempo dos veículos.

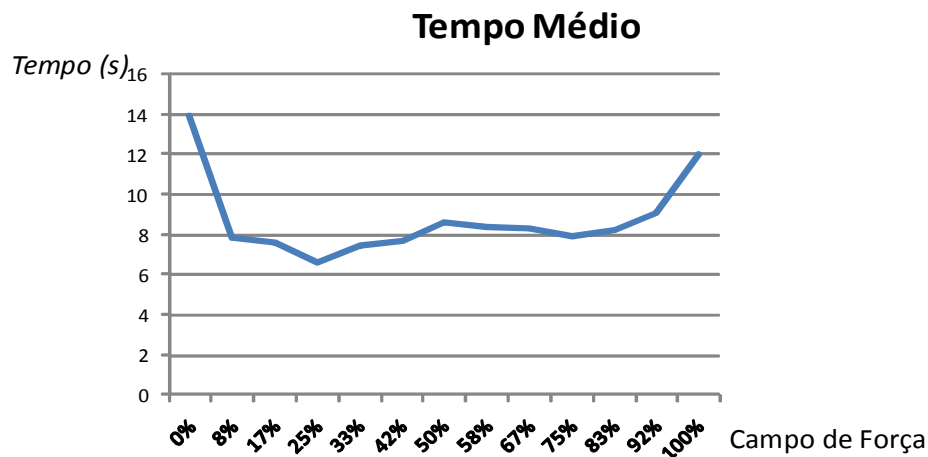


Figura 48 Relação entre o tempo médio de travessia dos veículos e campo de força

5.1.3 Aceitação de Brechas (*Gap Acceptance*)

Representar a tomada de decisões dos pedestres e veículos em travessias, sujeitas a um conjunto de regras que possibilitam diversas reações, é uma tarefa complexa. As travessias são situações nas quais os pedestres, além de interagirem com outros pedestres, interagem com a sinalização e com o mobiliário urbano, e interagem também com os veículos. Nas travessias, essas interações desempenham um papel crítico na segurança e no tempo de viagem.

Atualmente, na simulação de tráfego, interação entre pedestres e veículos recebe atenção especial de técnicos e desenvolvedores de *software* de simulação. A engenharia de tráfego, que historicamente tem o foco nos usuários de veículos motorizados, está passando considerando também os modos não motorizados. Nesse cenário, surge uma demanda por

modelos compatíveis com os microssimuladores de tráfego, que representem o comportamento de pedestres e veículos (motoristas) com nível de detalhamento compatível.

O modelo tradicional de aceitação de brechas (*gap acceptance*) é determinístico e define que a aceitação ocorre quando a brecha entre dois veículos é superior à brecha crítica; tempo entre a passagem do para-choque dianteiro de dois veículos consecutivos para o qual a probabilidade de um pedestre aceitar ou rejeitar a brecha é igual.

Com o objetivo de calibrar e simular a interação entre os veículos e pedestres em uma travessia não sinalizada, foi desenvolvida uma metodologia de coleta de dados para avaliar o valor dos parâmetros *front gap* e *rear gap*. A metodologia baseia-se na análise de rotas de pedestres e veículos, utilizando processamento de imagens, rastreamento e processamento das rotas.

Os parâmetros utilizados na interação entre veículos e pedestres nas áreas de conflitos são a visibilidade, *front gap*, *rear gap* e distância adicional de parada, apresentados na Figura 49. Considerando a distância adicional de parada o pedestre estima as velocidades dos veículos 1 e 2 ao chegar à área de conflito, caso os veículos estejam dentro de sua distância de visibilidade. Se a velocidade mínima de caminhada necessária para que o pedestre, iniciando a travessia t_{fg} segundos (*front gap*) após a saída do veículo 1, conclua a travessia t_{rg} segundos (*rear gap*) antes do veículo 2 chegar à área de conflito for menor que a sua velocidade de caminhada máxima, a brecha é aceita e o pedestre inicia a travessia.

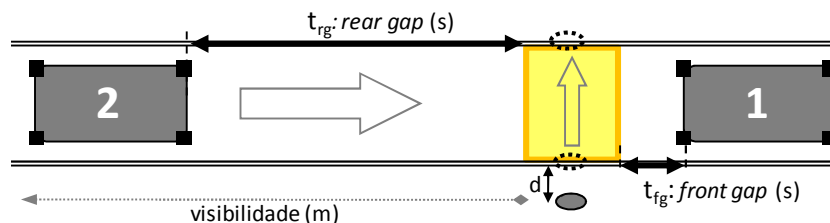


Figura 49 Parâmetros da aceitação de brechas

Nas áreas de conflito apresentadas na Figura 50, mesmo que o veículo tenha preferência, o modelo de travessia verifica se o pedestre conseguirá atravessar antes da chegada do veículo. Caso o pedestre tenha errado a estimativa de tempo para concluir a travessia, o veículo desacelera e tenta parar (segundo o modelo de Gipps) antes da área de conflito.

Podem ocorrer erros na estimativa se o pedestre iniciar a travessia antes do veículo entrar no trecho em que ele é visível.

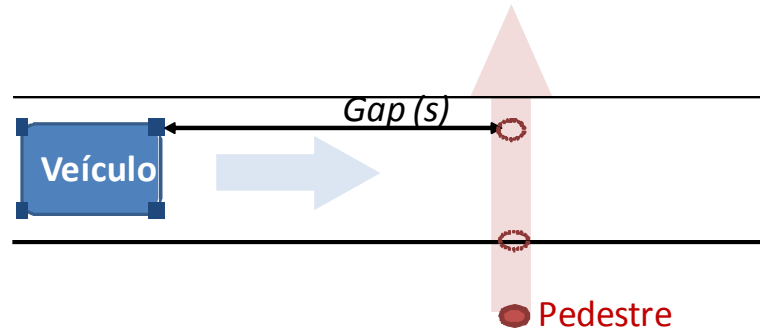


Figura 50 Área de conflito entre pedestres e veículos

Os dados para a realização do experimento foram coletados em uma interseção na cidade de Porto Alegre, entre 11:00 e 12:00 horas, de segunda a sexta. A câmera foi posicionada no nono andar de um prédio perto do local da filmagem, a uma altura de 3 metros, e 25 metros distante longitudinalmente da área de estudo. A Figura 51 mostra o posicionamento da câmera.



Figura 51 Posicionamento da câmera

O ambiente de simulação foi construído para corresponder, da forma mais fidedigna possível, as condições observadas. Os parâmetros utilizados foram os que seguem, baseados em Ranjitka (2005):

- velocidade do pedestre: 1,3 m/s;

- processo de geração de pedestres: 100 pedestres, avanço de distribuição uniforme 10-18 metros;
- velocidade desejada do veículo: 40 km/h, a taxa de aceleração: 3 m/s^2 distância, típica: 15 m;
- geração de veículos: uniformemente distribuído a partir de 60 metros a 100 metros;
- linha imaginária para os veículos perceberem os pedestres: um metro da borda da faixa de veículos;
- distância dos veículos para a percepção pelos pedestres: 100 metros;
- largura da faixa de veículos: 3 metros.

Tanto os dados coletados quanto os dados simulados foram agrupados em períodos de tempo de aceitação de *gap*. Foi avaliado o *gap* médio, e o percentual de pedestres por intervalo de aceitação de *gap*. A Figura 52 mostra os percentuais de pedestres por intervalo de tempo para os dados simulados e os coletados.

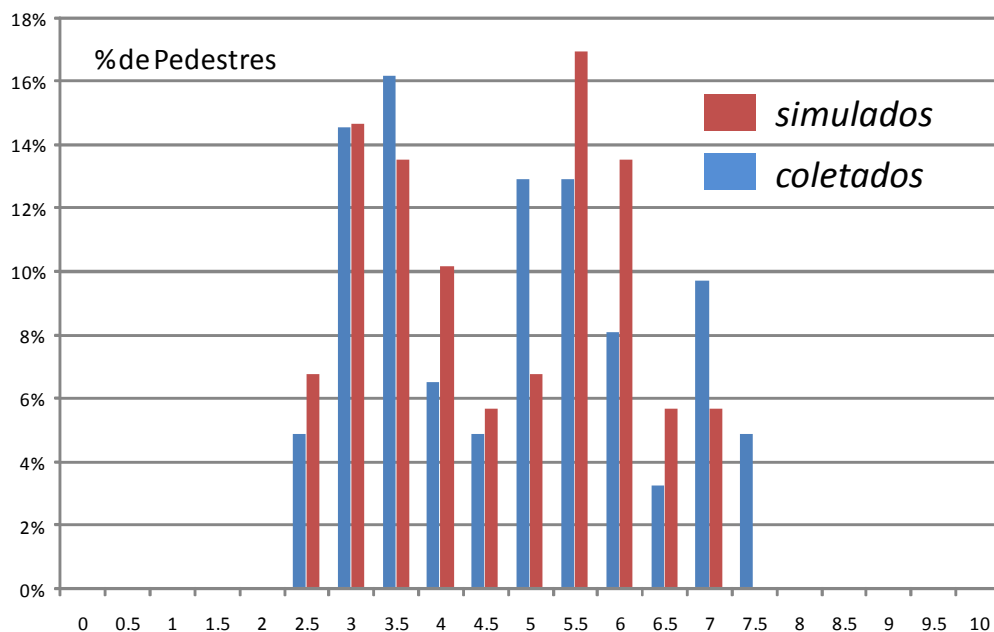


Figura 52 Percentuais de pedestres por intervalo de tempo

O erro médio absoluto de percentual de pedestres alocados nos intervalos de tempo foi de 3,2%. O erro médio quadrado (MSE) foi de 13,9%. Apesar de existir uma diferença significativa entre o simulado e o coletado, a simulação se mostrou um bom instrumento para representar o comportamento de aceitação de *gap*. O *gap* médio em segundos dos dados coletados foi de 4,44 segundos e o *gap* médio para o cenário simulado foi de 4,46 segundos.

5.2 EXPANSÃO DO MODELO

Para que o SimPed possa oferecer opções mais realistas de representação dos pedestres e, principalmente, para melhorar a representação da interação entre veículos e pedestres, camadas adicionais podem ser incluídas no modelo. Outros elementos, como por exemplo, a qualidade do pavimento, pode ser incluída na camada micro, alterando o processo de escolha do próximo passo.

O relevo do terreno pode ser uma característica da camada meso, alterando o processo de geração de rota para considerar esse fator. Até mesmo alguns elementos subjetivos, como a percepção de segurança, podem ser introduzidos em camadas adicionais, para qualificar o cenário de simulação. A camada meso ainda oferece inúmeras possibilidades de agregação de detalhamento do modelo, uma vez que o peso dos nós foi utilizado apenas para identificar zonas de caminhada e travessia. Contudo, esse peso pode ser utilizado de forma dinâmica para representar um processo de alteração de rota baseado no volume de pedestres por região durante a simulação.

A abordagem de campo de força utilizada neste trabalho, em comparação com as abordagens de forças sociais e forças newtonianas encontradas na literatura, possui menos complexidade matemática. Além disso, tem uma implementação computacional mais simples e um desempenho muito elevado.

A Figura 53 ilustra como informações auxiliares podem ser incorporadas ao modelo, de forma a representar situações que hoje não são consideradas nos modelos de movimentação de pedestres. A primeira camada inserida é a que considera a qualidade do pavimento. Essa camada é considerada no processo de decisão do próximo passo, presente na camada micro. A equação número 3, anteriormente referida e dada por

$$Pe = Fr\beta + \gamma Md$$

pode ser estendida, acrescentando-se um coeficiente que corresponda à qualidade do pavimento (Qp_{ij}), variando de 0 a 1, como segue:

$$Pe = Fr\beta + \gamma Md + Qp_{ij} \quad (10)$$

As informações da qualidade do pavimento podem ser armazenadas em uma matriz do tamanho do espaço cartesiano da simulação, de forma que as coordenadas da posição do pedestre fornecem os índices i e j (linha e coluna da matriz), para obtenção do valor da qualidade do pavimento.

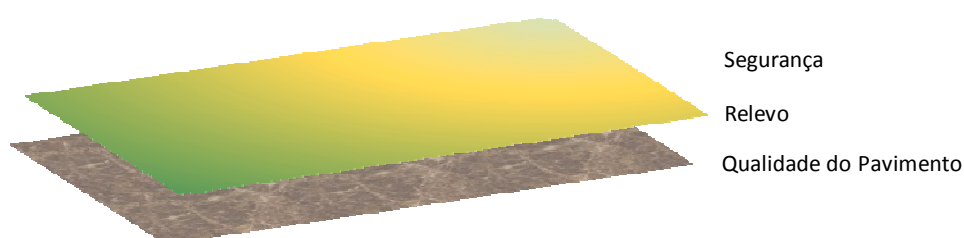


Figura 53 Camadas complementares

A camada meso pode ser estendida para considerar o relevo do terreno. Cada nó do grafo pode receber um valor associado de altura para compor o valor de seu peso. Uma vez que o valor do peso do nó é considerado no cálculo da geração da rota, os valores de altura do terreno vão influenciar na escolha de rota dos pedestres. O grau de influência do relevo na escolha de rota pode ser definido por um coeficiente associado, análogo ao coeficiente (Qp_{ij}), anteriormente referido. Na Figura 53, as cores mais claras representam valores mais baixos de altura.

Na camada macro, fatores subjetivos como segurança pública, podem ser incorporados ao modelo considerando o processo de geração dos pontos de origem e destino. Um pedestre pode alterar o seu destino baseado-se em uma informação associada ao ambiente de simulação que represente segurança. A última camada da Figura 53 representa o nível de segurança de uma área, onde a cor mais escura representa a área com menor segurança. Essa informação pode ser utilizada para modificar o destino dos pedestres. A Figura 54 apresenta onde o cálculo das camadas auxiliares pode ser incorporado.

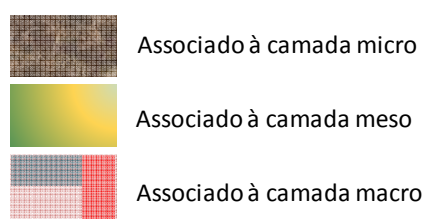


Figura 54 Associação de cálculo entre camadas

É possível ainda, considerar algumas alterações no processo de escolha do próximo passo do pedestre, considerando negociação de espaço através de comunicação entre agentes. Além dos conceitos de negociação de espaço utilizados neste trabalho, é possível refinar esse processo incluindo uma negociação direta de espaço entre os pedestres considerando uma comunicação explícita entre os agentes. É possível expandir o modelo de forma que os agentes pedestres comuniquem aos agentes em sua volta o seu destino pretendido, onde os outros agentes podem ou não respeitar essa vontade. Uma vez que a densidade de pedestres aumenta durante a simulação, a possibilidade de um agente respeitar a vontade do outro agente diminui, representando o que ocorre em situações de grande disputa de espaço, como em momentos de aglomerações.

A Figura 55 apresenta um diagrama exemplificando o processo. O pedestre 1, demonizando ped 1, tem como objetivo seguir uma rota retilínea até o seu destino, porém, desvio as informações recebidas pelo segundo pedestres (ped 2), realiza um desvio de rota.

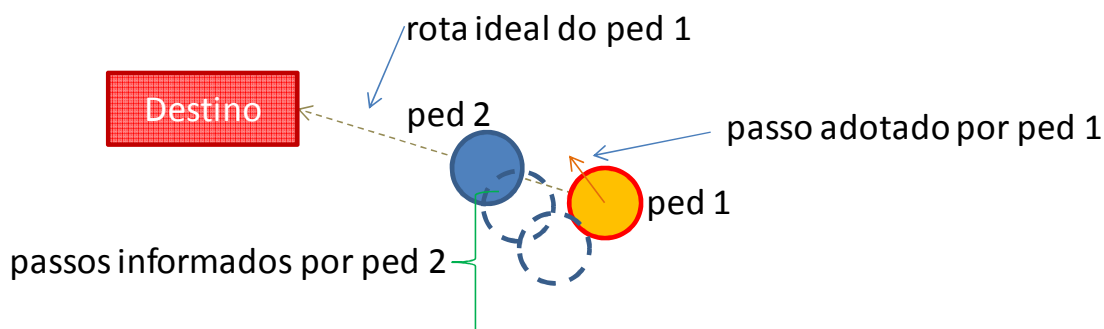


Figura 55 Nova abordagem de próximo passo

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O planejamento estratégico das cidades tornou-se um requisito importante no processo de desenho urbano contemporâneo, a fim de evitar a criação de rotas de veículos e pedestres que poderão se tornar gargalos no futuro. Com o aumento da população nas áreas urbanas, verifica-se a importância de se utilizar o espaço disponível de forma eficiente. O planejamento e a construção de áreas urbanas devem levar em conta não apenas os aspectos econômicos e estéticos, mas também os problemas logísticos associados à concentração de locais de trabalho, de moradia e de atividades comerciais. Com isso, um aspecto particular do tráfego vem recebendo crescente interesse nos últimos anos — a circulação de pedestres.

Os engenheiros e os urbanistas, confrontados com a tarefa de projetar espaços atraentes para os pedestres, precisam de uma ferramenta que permita a comparação e a análise de inúmeros projetos. Para contribuir com essa área de conhecimento, este trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento de um modelo computacional — SimPed — de modo a propiciar um melhor entendimento da dinâmica de pedestres e dos fatores críticos para o desenvolvimento de uma ferramenta de simulação de pedestres em travessia.

O SimPed é uma tentativa de criar uma ferramenta concebida, desde o início do seu desenvolvimento, com o enfoque nos pedestres. O SimPed consiste em um modelo baseado em agentes. Para percorrerem suas respectivas rotas, os agentes pedestres devem evitar outros pedestres, obstáculos e veículos. Com isso, os agentes ficam sujeitos a uma multiplicidade de influências, levando-os a diferentes comportamentos que emergem de cada simulação. O SimPed permite, de forma bastante simples, que esses diferentes comportamentos sejam analisados e observados.

De forma geral, o desenvolvimento do SimPed mostrou que a incorporação de várias técnicas de simulação para representar o comportamento dos pedestres agrega qualidade no modelo, viabilizando maior realismo nos resultados obtidos. Observou-se também, que a separação do processo de detecção de colisão entre os pedestres e o processo de geração de

rota oferece simplicidade no processo de desenvolvimento e resultados satisfatórios para representar simulações em ambientes urbanos.

Através da revisão bibliográfica, observou-se que os estudos e os desenvolvimentos realizados no sentido de modelar o comportamento de pedestres possuem um caráter multidisciplinar. A literatura oferece uma grande variedade de modelos e técnicas, mostrando que a utilização isolada de apenas uma dessas técnicas não apresenta capacidade de generalização satisfatória, para uma representação microscópica dos pedestres. Além disso, verificou-se que a união de diversas técnicas para formar um modelo padrão ou definitivo que represente o comportamento dos pedestres é impraticável. Notadamente, existe escassez de trabalhos sobre a influência do ambiente viário no comportamento de pedestres, e este trabalho e constitui em uma contribuição nesse sentido.

No desenvolvimento deste trabalho, no que tange à interação entre os pedestres, concluiu-se que o conceito de campo de força é uma maneira simples e eficiente de incorporar características que representam a percepção mútua entre pedestres. A combinação da abordagem baseada em regras e forças fornece uma rica interação entre os pedestres. A estrutura de grafo, definida na camada meso, demonstrou ser uma solução conveniente para o planejamento de rotas. Essa estrutura também permite a introdução de novos aspectos comportamentais no processo de decisão, tais como diferentes perfis de pedestres e diferentes variáveis associadas ao ambiente.

Através deste estudo, foi possível observar que algumas características oriundas da teoria dos autômatos celulares podem ser incorporadas para a criação de modelos simples de movimentação de pedestres. As funções matemáticas utilizadas para representar o campo de força gerado pelos pedestres levam em considerações essas características, originando espaços de campo de força nulo na região posterior dos pedestres. Essa ausência de campo de força funciona como um rastro para pedestres que possuem um mesmo destino. A segmentação do modelo em várias camadas, além de facilitar seu entendimento, fornece os subsídios para sua expansão.

Os testes realizados mostraram-se promissores e indicam que o SimPed fornece bons fundamentos para uma representação realista do comportamento de pedestres, frente a situações do ambiente urbano, considerando também os processos relativos à travessia.

Atualmente, muitos aplicativos comerciais consideram os pedestres na simulação. Porém, de uma forma geral, esses aplicativos não permitem qualquer alteração nos respectivos modelos utilizados para descrever o comportamento dos pedestres. Nesse sentido, evidencia-se algumas vantagens do SimPed:

- facilidade de agregar novas variáveis no processo decisório do pedestre, tanto nas funções de geração de rota como na negociação de espaço no processo de “passo a passo”;
- aplicativo computacional simples e desenvolvido de forma modular para um fácil reaproveitamento no desenvolvimento de modelos mais complexos;
- modelo concebido e desenvolvido tendo o pedestre como foco principal;
- possibilidade de agregação de novos agentes, como motos e bicicletas, uma vez que o processo de movimentação dos agentes não é restrito apenas à veículos e pedestres;
- processo de percepção de pedestres eficiente, através de campo de força, com baixo custo computacional.

Dessa forma, o modelo apresentado neste trabalho consituiu-se em uma importante ferramenta capaz de contribuir com novos desenvolvimentos e estudos que têm o pedestre como foco principal. A inclusão de novas variáveis como, por exemplo, a qualidade do pavimento, o relevo do terreno, a iluminação e percepção de segurança do ambiente podem ser incluídas no modelo, com pouco custo de desenvolvimento computacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRAULT, V. et al. Interaction between pedestrians and their environment when road-crossing: A behavioural approach. **Proceedings of the 24th urban data management symposium**. Italy, 2004.

ALVARES, L.; SICHMAN, J. Introdução aos sistemas multiagentes. **Jornada de atualização em informática**, 1997.

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

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.; CYBIS, H. B. B. 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.

ASHIDA K., LEE S., ALLBECK J., SUN H., BADLER N., METAXAS., D.: Pedestrians: Creating agent behaviors through statistical analysis of observation data. *Proc. IEEE Computer Animation*, p.82-92, Seoul, 2001.

BATTY, M.; JIANG, B. Multi-agent simulation: New approaches to exploring space–time dynamics within GIS. **Centre for Advanced Spatial Analysis**, University College London, 1999.

BEYMER, D. Person counting using stereo. **Workshop on Human Motion**, p.127–133, Austin, 2000.

BLUE, V. J.; ADLER, J. L. Cellular automata micro-simulation for modeling bi-directional pedestrian walkways. **Transportation Research Part B**, n 35, p. 293–312, 2001.

BLUE, V.; EMBRECHTS, M.; ADLER, L. **Cellular automata modeling of pedestrian movements**. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, p. 2320-2323, 1997.

BORGERS, A.; TIMMERMANS, H. J. P. City centre entry points, store location patterns and pedestrian route choice behaviour: A microlevel simulation model. **Socio-Economic Planning Science**, n.1, v. 20, p. 25–31, 1986.

BURSTEDDE, C. et al. Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. **Physica A**, n. 295, p. 507–525, 2001.

CHAE, K. S. Pedestrian collision avoidance systems: A survey of computer vision based recent studies", **Proc. IEEE Int. Intell. Transp. Syst. Conf.**, n.976, 2006.

- DIJKSTRA, J.; TIMMERMANS, H. Towards a multi-agent model for visualizing simulated user behavior to support the assessment of design performance. **Automation in Construction**, p. 135–145, 2002.
- DONIEC, A. et al. A behavioural multi-agent model for road traffic simulation. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, n. 21, p. 1443–1454, 2008.
- EDSGER.W. DIJKSTRA. A note on two problems in connection with graphs. *Numerische Mathematik*, v.1, p. 83–89, 1959.
- FERBER, J.: *Multi-Agent Systems*. Addison-Wesley, Harlow , 1999.
- GAUD, N. et al. Holonic multilevel simulation of complex systems: Application to real-time pedestrians simulation in virtual urban environment. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v 16, p. 1659–1676, 2008.
- GERAERTS, R.; OVERMARS, M. 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.; MARKSJO, B. (1985). A micro-simulation model for pedestrian flows. **Mathematics and Computers in Simulation**, n. 27, p. 95–105, 1985.
- GIPPS, P.G. A behavioural car-following model for computer simulation. **Transportation Research Part B: Methodological**. v. 15, issue 2, p. 105-111, 1981.
- HAMAGAMI, T.; HIRATA, H. Method of crowd simulation by using multiagent on cellular automata. **International Conference on Intelligent Technology**, IEEE, 2003.
- HELBING, D.; MOLN`AR, P. Social force model for pedestrian dynamics. **Physical Review E 51**, p. 4282–4286, 1995.
- HUANG, L. et al. Revisiting Hughes' dynamic continuum model for pedestrian flow and the development of an efficient solution algorithm. **Transportation Research Part B**, 43, p. 127–141, 2009.
- HUGHES, R. L. A continuum theory for the flow of pedestrians. **Transportation Research Part B**, 36, p. 507–535, 2002.
- HUNT, J.; GRIFFITHS, J. Pedestrian crossing criteria research: random crossing model. **TRL Contract Report CR248, Transportation and Road Research Laboratory**, Crowthorne, UK, 1991.
- IOANNIS, K.; KARAMOUZAS, PETER, H.; BEEK,P.; OVERMARS, M. A Predictive Collision Avoidance Model for Pedestrian Simulation. **Motion in Games (MIG2009)**,v.5884, p.40–52, Netherlands, 2009.
- KOWALSKI, R.A. Reconciling Logic and Objects. In: 6th Mexican Intl. Conference on Computer Science (ENC), IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, 2005.

- KUKLA, R. et al. Pedflow: development of an autonomous agent model of pedestrian flow. **Transportation Research Record**, n. 1774, p. 11–17, 2001.
- LAMARCHE, F.; DONIKIAN, S. Crowd of Virtual Humans: a new approach for real time navigation in complex and structured environments. **Computer Graphics Forum 23**, p. 509–518, 2004.
- LEE, J. Y. S.; LAM, W. H. K. Simulating pedestrian movements at signalized crosswalks in Hong Kong. **Transportation Research Part A**, n. 42, p. 1314–1325, 2008.
- LIU, R.; SILVA, J. P. C.; SECO, A. J. D. M. 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**, Australia, 2000.
- LÖHNER, R. On the modeling of pedestrian motion. **Applied Mathematical Modelling**, n.34, p.366-382, 2010.
- LOVAS, G. G. Modeling and simulation of pedestrian traffic flow. **Transportation Research Part B**, n. 28, v.6, p. 429–443, 1994.
- MACAL, M.; NORTH, M. Tutorial on agent-based modeling and simulation. **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, Orlando, 2006.
- MESCHINI, L.; GENTILE, G. Simulation car-pedestrian interactions during mass events with DTA models: the case of Vancouver Winter Olympic Games. **SIDT 2009 International Conference**, Milan, 2009.
- MITCHELL, D. H.; MACGREGOR SMITH, J. Topological network design of pedestrian networks. **Transportation Research Part B**, n.35, p. 107–135, 2001.
- ODELL, J., PARUNAK, H.V.D., FLEISCHER, M., BRUECKNER, S.: Modeling Agents and their Environment: The Physical Environment. **Journal of Object Technology** n.2, v.2, p. 43–5, 2003.
- PAPADIMITRIOU, E.; YANNIS, G.; GOLIAS, J. A critical assessment of pedestrian behaviour models, **Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour**, v.12. p. 242-255, 2009.
- PRETTO, C. O. ; CYBIS, H. B. B.. Modelagem da movimentação de pedestres utilizando a abordagem multi-agentes. **VII SEPROSUL, 2007**, Anais da 7 Semana de Engenharia de Produção Sul Americana, FEEng, Porto Alegre, 2007.
- PRETTO, C. O. ; CYBIS, H. B. B. . Modeling Pedestrian movement on road-crossing environment. **12th World Conference on Transport Research**, Lisboa, 2010.
- PRETTO, C. O. ; Jacobsen, A. C. ; CYBIS, H. B. B. . A multi-layer simulation model for vehicle and pedestrian. **90th Annual Meeting Transportation Research Board**, v. 1. p. 1-15, Washington, 2011.

PRETTO, C.O, ARIOTTI, P., CYBIS, H.,B. Modeling Pedestrians' Movement Regarding Road-Crossing Compliance. **ESM'2008. The 2008 European Simulation and Modeling Conference**, v.1, p. 221-225, Le Havre, 2008.

RANJITKA, P.; NAKATSUJI, T.; KAWAMURA, A. Car-Following Models:An Experiment Based Benchmarking. **Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies (EASTS 2005)**. Bangkok, v. 6, p.1582–1596, 2005.

RAO, AS., and GEORGEFF, M.: 'BDI agents: From theory to Practice'. **Proceedings of the first international conference on Multi-agent systems, (ICMAS-95)**, p.312-319, San Francisco, 1999.

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

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

RONALD, N.; STERLING, L. Modelling pedestrian behavior using the BDI architecture. **IEEE, International Conference on Intelligent Agent Technology, IAT'05**, 2005.

ROSSI, M.; BOZZOLI, A. Tracking and counting moving people. **Image Processing**, v.3, n.13-16, p.212–216, 1994.

RUSSELL, S., NORVIG, P.: *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 2nd Edition. Pearson Education (2002).

SACCHI, C. et al Advanced image-processing tools for counting people in tourist site-monitoring applications. **Signal Processing**, n.81, p.1017–1040, 2000.

SHAO, W.; TERZOPOULOS, D. Autonomous pedestrians. **Graphical Models**. n. 69, v. 5-6, p. 246–274, 2007.

SISIOPIKU, V.P., AKIN, D. 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. et al. Real-time navigation of independent agents using adaptive roadmaps. **ACM symposium on Virtual reality software and technology**, p. 99–106, 2007.

TREUILLE, A.; COOPER, S.; POPOVIC, Z. 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.

WAKIM, C. F.; CAPPERON, S.; OKSMAN, J. A Markovian model of pedestrian behavior. In: **Proceedings of the 2004 IEEE International conference on systems, man and cybernetics**, p. 4028–4033, 2004.

WEIFENG, F.; LIZHONG, Y.; WEICHENG, F. Simulation of bi-direction pedestrian movement using a cellular automata model. **Physica A**, 321, P.633–640, 2003.

WEYNS, D., OMINICINI, A., ODELL, J.: Environment as a first class abstraction in multiagent systems. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* n.14, v.1, p. 5–30, 2007.

XIAOPING, Z.; TINGKUAN, Z.; MENGTING, L. Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches. **Building and Environment**, n. 44, p. 437–445, 2009.

ZHANG, X.; SEXTON, G. Automatic human head location for pedestrian counting. **Image processing and its applications**. n.443, p. 535–540, 1997.