

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO

MARCELO COSTA TOYAMA

**Estudo sobre Modelos de Autômatos
Celulares Para Simulação de Movimentos
de Pedestres**

Trabalho Individual I
TI-1168

Prof. Dra. Ana Lúcia Cetertich Bazzan
Orientador

Porto Alegre, dezembro de 2004

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS | 4 |
| LISTA DE FIGURAS | 5 |
| LISTA DE TABELAS | 7 |
| RESUMO | 8 |
| ABSTRACT | 9 |
| 1 INTRODUÇÃO | 10 |
| 1.1 Motivação | 10 |
| 1.2 Objetivos | 10 |
| 1.3 Organização do Texto | 10 |
| 2 DINÂMICA DE PEDESTRES | 11 |
| 2.1 Modelos | 11 |
| 3 MODELOS CONTÍNUOS | 13 |
| 3.1 Modelo de Forças Sociais para Dinâmica de Pedestres | 13 |
| 3.1.1 Modelo | 13 |
| 3.1.2 Regras do Modelo | 15 |
| 3.1.3 Experimentos de Simulação | 17 |
| 3.1.4 Análise do Modelo | 20 |
| 4 AUTÔMATOS CELULARES | 21 |
| 4.1 Modelo de Autômato Celular para o Comportamento Coletivo Bi-Direcional Emergente da Dinâmica de Pedestres | 22 |
| 4.1.1 Modelo | 22 |
| 4.1.2 Regras do Modelo | 22 |
| 4.1.3 Experimento de Simulação | 24 |
| 4.1.4 Análise do Modelo | 24 |
| 4.2 Modelo de Autômato Celular Estocástico para Simulação de Dinâmica de Pedestres | 28 |
| 4.2.1 Modelo | 28 |
| 4.2.2 Regras do Modelo | 28 |
| 4.2.3 Experimentos de simulação | 30 |
| 4.2.4 Análise do Modelo | 33 |

| | | |
|------------|---|----|
| 4.3 | Modelo de Autômato Celular para Dinâmica de Pedestres atravessando um cruzamento | 34 |
| 4.3.1 | Modelo | 34 |
| 4.3.2 | Regras do autômato | 34 |
| 4.3.3 | Experimentos de Simulação | 37 |
| 4.3.4 | Análise do Modelo | 39 |
| 5 | SISTEMAS MULTIAGENTES | 41 |
| 5.1 | Modelo de Comportamento de Pedestres | 41 |
| 5.1.1 | Modelo | 41 |
| 5.1.2 | Regras do Modelo | 41 |
| 5.1.3 | Experimentos de Simulação | 54 |
| 5.1.4 | Análise do Modelo | 55 |
| 6 | COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS E CONCLUSÃO | 57 |
| 6.1 | Dinâmica de Pedestres | 57 |
| 6.1.1 | Efeitos Atrativos e Efeitos Repulsivos | 58 |
| 6.1.2 | Filas | 58 |
| 6.1.3 | Cruzamentos | 59 |
| 6.2 | Modelo de Pedestre | 60 |
| 6.3 | Aspectos de Implementação | 60 |
| 6.3.1 | Desempenho | 60 |
| 6.3.2 | Corretude da Solução | 61 |
| 6.4 | Contribuições futuras | 61 |
| | REFERÊNCIAS | 63 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|---|
| AC | Autômato Celular |
| DML | <i>Dynamic multi-lane flow</i> |
| ISP | <i>Interspersed directional flow</i> |
| UMTSAS | <i>Urban Mixed Traffic Simulation and Analysis System</i> |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|--------------|---|----|
| Figura 3.1: | Representação esquemática dos processos que levam a mudanças comportamentais, <i>fonte: (HELBING; MOLNÁR, 1995)</i> | 14 |
| Figura 3.2: | Acima de uma densidade crítica de pedestres é possível observar a formação de filas (<i>lanes</i>) com uma direção uniforme. Nessa figura é possível ver $N = 4$ filas em um corredor com 10m de largura e 50m de comprimento. Círculos vazios representam pedestres se movimentando em direção contrária a círculos cheios, <i>fonte: (HELBING; MOLNÁR, 1995)</i> | 18 |
| Figura 3.3: | O número médio de filas N emergentes é linearmente dependente da largura W : $[N(W) = 0.36m^{-1}W + 0.59]$, <i>fonte: (HELBING; MOLNÁR, 1995)</i> | 18 |
| Figura 3.4: | Se um pedestre é capaz de passar por uma porta estreita, outros pedestres com a mesma direção podem seguir facilmente, enquanto pedestres em direções contrárias tem que esperar. Após algum tempo o fluxo de pedestres para e a porta é capturada por indivíduos se movimentando na direção contrária. O diâmetros dos círculos representam a velocidade do movimento atual, <i>fonte: (HELBING; MOLNÁR, 1995)</i> | 19 |
| Figura 4.1: | <i>Dynamic Multi-lane Flow</i> , <i>fonte: (ADLER; BLUE, 2000)</i> | 25 |
| Figura 4.2: | <i>Speed X density</i> , <i>fonte: (ADLER; BLUE, 2000)</i> | 25 |
| Figura 4.3: | <i>Flow X density</i> , <i>fonte: (ADLER; BLUE, 2000)</i> | 26 |
| Figura 4.4: | <i>Sidestep Rate X density</i> , <i>fonte: (ADLER; BLUE, 2000)</i> | 27 |
| Figura 4.5: | <i>Exchange Rate X density</i> , <i>fonte: (ADLER; BLUE, 2000)</i> | 27 |
| Figura 4.6: | Matriz de Preferências, <i>fonte: (SCHADSCHNEIDER, 2002)</i> | 29 |
| Figura 4.7: | Evacuação de uma sala grande: a esquerda a representação da sala no momento inicial, a direita mostra a for do <i>static floor field</i> , quanto mais escuro mais forte o campo. <i>Fonte: (BURSTEDDE et al., 2002)</i> . | 31 |
| Figura 4.8: | Evacuação de uma sala grande: a esquerda é mostrado uma configuração típica intermediária da simulação, a direita é mostrado o <i>dynamic floor field</i> criado pelas pessoas deixando a sala. <i>Fonte: (BURSTEDDE et al., 2002)</i> | 31 |
| Figura 4.9: | Evacuação auditório: a esquerda a configuração inicial, a direita o <i>static floor field</i> . <i>Fonte: (BURSTEDDE et al., 2002)</i> | 32 |
| Figura 4.10: | Evacuação auditório: Configurações típicas após algum tempo de simulação, <i>fonte: (BURSTEDDE et al., 2002)</i> | 32 |
| Figura 4.11: | Otimização de evacuação: a esquerda o cenário A, a direita o cenário B, <i>fonte: (BURSTEDDE et al., 2002)</i> | 33 |

| | | |
|--------------|--|----|
| Figura 4.12: | Movimentos possíveis dos pedestres, <i>fonte: (ZHANG; WANG; LI, 2003)</i> | 35 |
| Figura 4.13: | Campo visual do pedestre, <i>fonte: (ZHANG; WANG; LI, 2003)</i> | 35 |
| Figura 4.14: | Cena da simulação, <i>fonte: (ZHANG; WANG; LI, 2003)</i> | 38 |
| Figura 4.15: | Velocidade média, máxima e mínima dos pedestres X número de pedestres, <i>fonte: (ZHANG; WANG; LI, 2003)</i> | 38 |
| Figura 4.16: | Velocidade média, máxima e mínima dos veículos X número de pedestres, <i>fonte: (ZHANG; WANG; LI, 2003)</i> | 38 |
| Figura 5.1: | Conceito do modelo, <i>fonte: (OSARAGI, 2004)</i> | 42 |
| Figura 5.2: | Comportamento do pedestre baseado no estresse mental, <i>fonte: (OSARAGI, 2004)</i> | 43 |
| Figura 5.3: | Variações das funções de estresse, <i>fonte: (OSARAGI, 2004)</i> | 44 |
| Figura 5.4: | <i>Information space</i> e <i>walkable domain</i> , <i>fonte: (OSARAGI, 2004)</i> | 44 |
| Figura 5.5: | Condições para o comportamento de perseguição, <i>fonte: (OSARAGI, 2004)</i> | 45 |
| Figura 5.6: | Risco de colisão e Comportamento de antecipação, <i>fonte: (OSARAGI, 2004)</i> | 45 |
| Figura 5.7: | Condições para comportamento de ultrapassagem, <i>fonte: (OSARAGI, 2004)</i> | 46 |
| Figura 5.8: | Observação de Pedestres, <i>fonte: (OSARAGI, 2004)</i> | 48 |
| Figura 5.9: | Relação entre a distância crítica e os parâmetros, <i>fonte: (OSARAGI, 2004)</i> | 49 |
| Figura 5.10: | Velocidade Relativa do Fluxo de pedestre, <i>fonte: (OSARAGI, 2004)</i> | 49 |
| Figura 5.11: | Atributos e comportamento dos pedestres, <i>fonte: (OSARAGI, 2004)</i> | 51 |
| Figura 5.12: | Verificação do Modelo, <i>fonte: (OSARAGI, 2004)</i> | 53 |
| Figura 5.13: | Extração de grupos de multidões, <i>fonte: (OSARAGI, 2004)</i> | 54 |
| Figura 5.14: | Condições utilizadas na simulação, <i>fonte: (OSARAGI, 2004)</i> | 54 |
| Figura 5.15: | Efeitos da densidade nos grupos de pedestres, <i>fonte: (OSARAGI, 2004)</i> | 55 |
| Figura 5.16: | Atributos de pedestres e grupos, <i>fonte: (OSARAGI, 2004)</i> | 55 |
| Figura 6.1: | Formação de Filas, <i>fonte: (HELBIN; MOLNÁR P.AND FARKS; BOLAY, 2001)</i> | 59 |
| Figura 6.2: | Cruzamento de pedestres, <i>fonte: (HELBIN; MOLNÁR P.AND FARKS; BOLAY, 2001)</i> | 59 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------|--|----|
| Tabela 3.1: | Classificação dos comportamento segundo as complexidades, <i>fonte:</i> (<i>HELBING; MOLNÁR, 1995</i>) | 14 |
| Tabela 4.1: | Tempos de evacuação, <i>fonte:</i> (<i>BURSTEDDE et al., 2002</i>) | 33 |
| Tabela 4.2: | Parâmetros da Simulação, <i>fonte:</i> (<i>ZHANG; WANG; LI, 2003</i>) | 39 |
| Tabela 5.1: | Parâmetros estimados para a função de estresse, <i>fonte:</i> (<i>OSARAGI, 2004</i>) | 47 |
| Tabela 5.2: | Generalização do Modelo, <i>fonte:</i> (<i>OSARAGI, 2004</i>) | 50 |
| Tabela 6.1: | Dinâmica de Pedestres, aonde X - indica que não há dados suficientes para realizar uma afirmação a respeito. | 58 |

RESUMO

Modelar o fluxo de pedestres é uma tarefa desafiante e mais complexa do que modelar o fluxo de veículos. Simulações computadorizadas de dinâmica de pedestres permitem a observação de uma ampla gama de características observadas no fluxo real de pessoas e um maior entendimento de seus princípios básicos, permitindo que pesquisadores explorem os efeitos da implementação de novas regras de tráfego e mudanças na geometria de salas e edifícios, sem ter a necessidade de realizar experimentos perigosos e dispendiosos com o sistema de tráfego real.

Esse trabalho objetiva apresentar uma revisão bibliográfica e realizar uma comparação sobre os diversos modelos para simulação da dinâmica de pedestres, tais como: modelos contínuos, autômatos celulares e sistemas multiagentes.

Nos modelos contínuos os pedestres estão sujeitos a *forças* de atração a repulsão que determinam suas movimentações e as interações não lineares entre os pedestres determinam o comportamento emergente resultante.

Em seguida são apresentados os modelos baseados em autômatos celulares (AC), suas características, vantagens e desvantagens. Nesse tipo de modelo o comportamento macroscópico é resultado da interação entre os autômatos seguindo as regras do autômato celular.

Posteriormente um modelo baseado em sistema multiagentes que busca representar melhor a dinâmica de pedestres modelando os pedestres com diferentes características, como por exemplo idade, sexo e profissão é apresentado.

Ao final é a conclusão compara os diversos modelos ressaltando características e desvantagens de cada um.

Palavras-chave: Autômato Celular, Simulação de Movimentos de Pedestres, Dinâmica de pedestres.

A Review about Cellular Automata for Pedestrian Movements Simulation

ABSTRACT

Modeling pedestrian traffic is a challengeable task and even more complex than modeling vehicular traffic. Pedestrian dynamics computer simulations are capable of showing a huge number of characteristics that exists in real traffic and showing a better understanding of basics pedestrian traffic principles. This way, researches can explore the effects of the implementation of new traffic rules and changes in rooms geometry without having to do dangerous and expensive experiments with real traffic system.

The objective of this work is to present a bibliographic review about several models for pedestrian dynamics simulations, such as: continuous models, cellular automata and multiagents systems.

In the continuous models, pedestrians are submitted to an attraction and repulsion forces, which determines their movements. And the non-linear interactions among pedestrians are responsible for the emergent system behavior.

Hereinafter, characteristics, advantages and disadvantages of cellular automata models are presented. In this type of model the macroscopic system behavior is the result of the automata interactions following the cellular automata rules.

A multiagent system is then presented. In this model, pedestrians are represented with different characteristics, such as: age, sex and profession.

A conclusion that compares the characteristics, advantages and disadvantages of several types of models is also presented.

Keywords: Cellular Automata, Pedestrian Movimentos Simulation, Pedestrian Dynamics.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Apesar da área de simulação de fluxo de tráfego estar bem estabelecida, os pesquisadores descobriram que a tarefa de modelar fluxo de pedestres é desafiante (ADLER; BLUE, 1998), (SCHRECKENBERG; SHARMA, 2002).

De diversas maneiras o fluxo de pedestres é mais complexo do que o fluxo de veículos (ADLER; BLUE, 2002): corredores de pedestres podem ter diversas entradas e suportam movimentos em diversas direções, caminhos de pedestres não são regulados ordenadamente como as rodovias e ao contrário de rodovias, cujo fluxo é separado por direção, caminhos bi-direcionais são a norma no fluxo de pedestres. Além disso os pedestres variam a ocupação e a velocidade em qualquer parte do caminho.

Simulações computadorizadas de dinâmica de pedestres permitem a observação de uma ampla gama de características observadas no fluxo real de pessoas e um maior entendimento de seus princípios básicos. Além disso as simulações permitem que pesquisadores explorem os efeitos da implementação de novas regras de trânsito sem ter a necessidade de realizar experimentos perigosos e dispendiosos com o sistema de tráfego real (ZHANG; WANG; LI, 2003).

1.2 Objetivos

Esse trabalho objetiva estudar, avaliar e comparar as diversas abordagens e modelos para a simulação da dinâmica de pedestres. Pretende-se assim, analisar os sistemas em nível conceitual, de implementação e aplicabilidade, comparando as diversas abordagens.

Atenção especial é dada para os modelos baseados em autômatos celulares (AC), suas características, vantagens e desvantagens em relação a outros modelos.

1.3 Organização do Texto

Diversos tipos de modelos para simulação da dinâmica de pedestres são apresentados e comparados. O complexo fenômeno da dinâmica de pedestres e suas características são apresentados no capítulo 2. O capítulo 3 apresenta modelos contínuos baseados em equações diferenciais, similar a modelos de dinâmica de fluidos. Modelos baseados em autômatos celulares são descritos no capítulo 4 e simulação da dinâmica de pedestres utilizando sistemas multiagentes é abordada no capítulo 5. Finalmente o capítulo 6 apresenta conclusões e comparações entre os diversos modelos.

2 DINÂMICA DE PEDESTRES

A simulação da dinâmica de pedestres é desafiante e mais complexa do que a simulação de veículos (ADLER; BLUE, 1998). Os movimentos dos pedestres são mais complexos em diversas maneiras (ADLER; BLUE, 2002): pedestres são capazes de formar filas (*lanes*) dinamicamente, corredores de pedestres suportam movimentos em diversas direções, pedestres são capazes de mudar de velocidade rapidamente, em um segundo acelerando para velocidade máxima a partir do repouso ou parando rapidamente quando em velocidade máxima.

Além disso, a segurança e a prevenção de colisão são menos preocupantes para pedestres (ADLER; BLUE, 2000) do que para veículos. A medida que a densidade de pedestres aumenta, ocorrem diversas atividades, tais como: mudança de via (*sidestepping*), trocas de lugares, pequenos empurrões e mudanças de velocidade freqüentes incluindo a formação de fluxos de diversas larguras.

Muitas pessoas acreditam que o comportamento humano é *caótico* ou pelo menos irregular e não previsível (HELBING; MOLNÁR, 1995). Isso provavelmente é verdade para comportamentos encontrados em situações complexas, tal como em uma situação de pânico. Entretanto, pelo menos para situações relativamente simples, tais como simulação de uma multidão em um estádio ou evacuando uma sala, modelos de comportamento estocástico tem sido desenvolvidos com sucesso, como o modelo desenvolvido por Schadschneider em (SCHADSCHNEIDER, 2002) e (BURSTEDDE et al., 2002).

Em situações normais, não pânico, ocorrem fenômenos de auto-organização muito interessantes. Por exemplo nessas situações é possível observar a formação de filas de diversas larguras e direções. Outro fenômeno (SCHADSCHNEIDER, 2002) é que as interações entre pedestres são repulsivas para distâncias curtas. Uma pessoa mantém uma distância mínima dos outros para evitar trombar com os outros. Entretanto para longas distâncias a interação entre pedestres atrativa. Por exemplo, ao andar no meio de uma multidão é comum seguir o predecessor.

Todos esses padrões espaço-temporais de auto-organização surgem devido a interações não lineares entre pedestres (HELBING; MOLNÁR, 1995) e devem ser levados em conta por qualquer modelo de simulação da dinâmica de pedestres.

2.1 Modelos

Modelos de simulação da dinâmica de pedestres tem chamado a atenção por diversas razões (HELBING; MOLNÁR, 1995): primeiro, modelos de pedestres podem ser ferramentas importantes para o desenvolvimento e planejamento de áreas para pedestres, tais como metrô, estações de trens, edifícios e shopping centers. Segundo, em todos os modelos variáveis como posição e velocidade do pedestre são mensuráveis e portanto com-

paráveis com dados empíricos. Terceiro, existe uma quantidade razoável de informação sobre medidas, fluxos e vídeos sobre dinâmica de pedestres.

Em especial, simulações computacionais eficientes de grandes multidões, com centenas ou milhares de indivíduos, requerem modelos simples, mas que proporcionem uma descrição acurada da realidade, tal como os diversos tipos de modelos encontrados no livro (SCHADSCHNEIDER, 2002).

3 MODELOS CONTÍNUOS

Modelos contínuos são muito utilizados para simulação da dinâmica de fluidos e gases. Como a dinâmica de pedestres possui muitas analogias com esses sistemas, existem modelos que descrevem o comportamento de pedestres utilizando equações diferenciais não lineares. A seguir um modelo contínuo para simulação da dinâmica de pedestres é descrito.

3.1 Modelo de Forças Sociais para Dinâmica de Pedestres

Os movimentos dos pedestres podem ser descritos como se eles fossem sujeitos à Forças Sociais (*Social Forces*). Essas forças não são exercidas diretamente pelo ambiente nos pedestres, mas são uma medida das motivações internas dos indivíduos para realizarem determinadas ações/movimentos. O modelo de Helbing e Molnár, (HELBING; MOLNÁR, 1995), simula o movimento dos pedestres utilizando essas forças sociais.

3.1.1 Modelo

As mudanças comportamentais são direcionadas pelas chamadas forças sociais. A seguir é explicado como esse conceito se aplica a descrição dos comportamentos dos pedestres.

A figura 3.1 ilustra os processos que levam a mudanças comportamentais. De acordo com isso, um estímulo sensorial causa uma reação comportamental que depende dos objetivos pessoais e é escolhida dentro de um conjunto de alternativas com o objetivo de maximizar a utilidade do caminho a ser percorrido.

A tabela 3.1 sugere a classificação dos estímulos em situações simples/padrões e situações complexas/novas. As situações complexas/novas devem ser modeladas com modelos probabilísticos. Entretanto desde que o pedestre esteja acostumado com a situação com que ele for confrontado, sua reação é normalmente automática e determinada por suas experiências sobre qual reação tem o melhor resultado. Portanto é possível modelar essas regras de comportamento do pedestre em equações de movimento.

De acordo com essas equações, as mudanças temporais na velocidade preferencial do pedestre podem ser descritas por uma força vetorial a qual pode ser interpretada como uma força social.

Essa força representa o efeito do ambiente (outros pedestres e obstáculos) no comportamento do pedestre. Entretanto essa força não é exercida pelo ambiente no corpo do pedestre, na realidade essa força representa a motivação para agir. O comportamento do pedestre evoca forças de aceleração ou desaceleração em reação a informação do ambiente. Resumindo o pedestre age como se ele estivesse sujeito a forças externas.

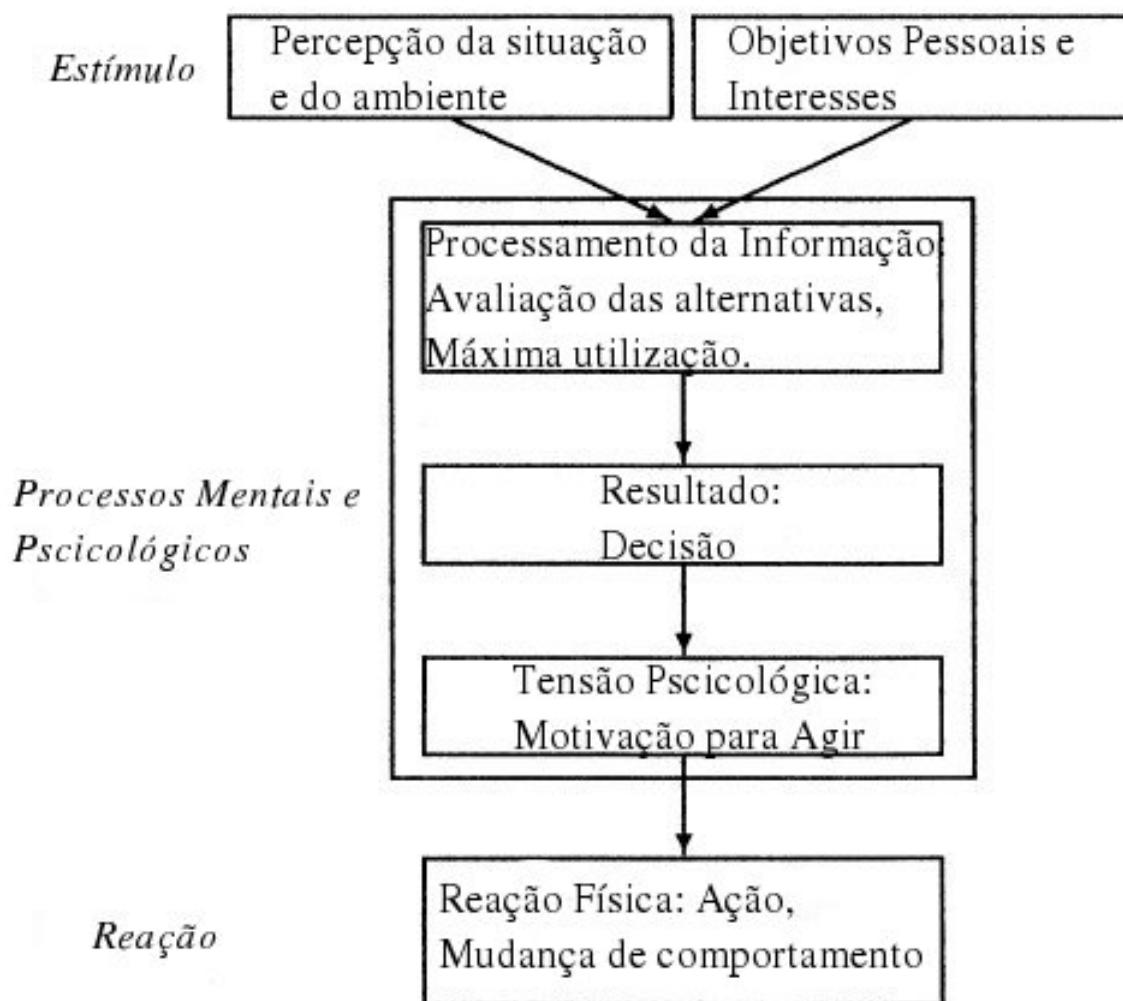


Figura 3.1: Representação esquemática dos processos que levam a mudanças comportamentais, fonte: (HELBING; MOLNÁR, 1995)

| | | |
|-----------------------|---------------------------------|--|
| Estímulo | Simples ou padrão | Complexo ou situações novas |
| Reações | Reações automáticas ou reflexos | Processos de decisão, resultados de avaliações |
| Caracterização | Bem previsível | Probabilístico |
| Modelo | <i>Social force Model</i> , etc | <i>Decision theoretical model</i> , etc |
| Exemplo | Movimento de pedestres | Escolha do destino do pedestre |

Tabela 3.1: Classificação dos comportamento segundo as complexidades, fonte: (HELBING; MOLNÁR, 1995)

3.1.2 Regras do Modelo

A seguir os principais efeitos que determinam os movimentos do pedestre α são descritos.

1. Um pedestre deseja alcançar o destino \vec{r}_α^0 da melhor maneira possível, portanto ele tomará o menor caminho possível. Esse caminho comumente terá a forma de um polígono com arestas $\vec{r}_\alpha^1, \dots, \vec{r}_\alpha^n = \vec{r}_\alpha^0$. Se \vec{r}_α^k é a próxima aresta a ser alcançada, a direção desejada \vec{e}_α do movimento será:

$$\vec{e}_\alpha = \frac{\vec{r}_\alpha^k - \vec{r}_\alpha(t)}{\|\vec{r}_\alpha^k - \vec{r}_\alpha(t)\|} \quad (3.1)$$

Onde $\vec{r}_\alpha(t)$ representa a posição do pedestre no tempo t .

Na realidade, os objetivos do pedestre são áreas ao invés de pontos \vec{r}_α^k . Nesse caso ele vai se dirigir para o ponto \vec{r}_α^k mais próximo da área correspondente.

Se o movimento do pedestre não for perturbado ele andarà na direção $\vec{e}_\alpha(t)$ com uma velocidade desejada v_α^0 . Um desvio, $\vec{v}_\alpha(t)$, da velocidade desejada $\vec{v}_\alpha^0(t) = v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha$ ocorre devido a necessidade de desaceleração ou desvio de obstáculos, o que leva a uma tendência de aproximar \vec{v}_α^0 dentro de um certo tempo τ_α . Isso pode ser descrito através de um termo de aceleração na forma:

$$\vec{F}_\alpha^0(\vec{v}_\alpha, v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha) = \frac{1}{\tau_\alpha} (v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha - \vec{v}_\alpha) \quad (3.2)$$

2. O movimento do pedestre α é influenciado por outros pedestres. Em particular α mantém uma certa distância dos outros pedestres, a qual depende da densidade de pedestres e da velocidade desejada v_α^0 .

Aqui a *esfera pessoal* de cada pedestre, que pode ser interpretada como um *efeito territorial*, tem um papel central. Um pedestre normalmente sente-se cada vez mais desconfortável quando se aproxima de uma pessoa estranha e pode reagir de uma maneira agressiva. Isso resulta em um efeito de repulsão a outros pedestres β que pode ser representado por uma quantidade vetorial:

$$\vec{f}_{\alpha\beta}(\vec{r}_{\alpha\beta}) = -\nabla_{\vec{r}_{\alpha\beta}} V_{\alpha\beta}[b(\vec{r}_{\alpha\beta})] \quad (3.3)$$

Assumiremos que o potencial repulsivo $V_{\alpha\beta}(b)$ é uma função monotônica decrescente de b com linhas equipotenciais tendo a forma de uma elipse que é orientada na direção do movimento.

A razão para isso é que um pedestre requer espaço para o próximo passo e isso é levado em consideração pelos outros pedestres.

b representa o eixo menor da elipse e é dado por:

$$2b = \sqrt{(\|\vec{r}_{\alpha\beta}\| + \|\vec{r}_{\alpha\beta} - v_\beta \Delta t \vec{e}_\beta\|)^2 - (v_\beta \Delta t)^2} \quad (3.4)$$

Onde $\vec{r}_{\alpha\beta} = \vec{r}_\alpha - \vec{r}_\beta$ e $s_\beta = v_\beta \Delta$ é da ordem do comprimento do passo do pedestre β . Apesar da simplicidade dessa abordagem, ela descreve os movimentos para evitar colisão dos pedestres de maneira realista.

Um pedestre também mantém uma certa distância de obstáculos, paredes e bordas de edifícios. Quanto mais perto do obstáculo, mais o pedestre sente-se desconfortável, pois ele tem que prestar mais atenção para evitar a colisão. Portanto um obstáculo B cria um efeito repulsivo que pode ser descrito da seguinte maneira:

$$\vec{F}_{\alpha B}(\vec{r}_{\alpha B}) = -\nabla_{\vec{r}_{\alpha B}} U_{\alpha B}(\|\vec{r}_{\alpha B}\|) \quad (3.5)$$

com um potencial repulsivo e monotonicamente decrescente $U_{\alpha B}(\|\vec{r}_{\alpha B}\|)$. Aqui o vetor $\vec{r}_{\alpha B} = \vec{r}_{\alpha} - \vec{r}_B^{\alpha}$ foi introduzido, aonde \vec{r}_B^{α} representa a parte do obstáculo B mais próximo do pedestre α .

3. As vezes, pedestres são atraídos por outras pessoas ou objetos. Esses *efeitos de atração* $\vec{f}_{\alpha i}$ nos lugares \vec{r}_i podem ser modelados por um potencial monotonicamente crescente $W_{\alpha i}(\|\vec{r}_{\alpha i}\|, t)$ de uma maneira similar ao efeito repulsivo:

$$\vec{f}_{\alpha i}(\|\vec{r}_{\alpha i}\|, t) = -\nabla_{\vec{r}_{\alpha i}} W_{\alpha i}(\|\vec{r}_{\alpha i}\|, t) \quad (3.6)$$

Onde $\vec{r}_{\alpha i} = \vec{r}_{\alpha} - \vec{r}_i$. A principal diferença é que a atração $\|\vec{f}_{\alpha i}\|$ é normalmente decrescente com o tempo t , já que o interesse é decrescente. Os efeitos atrativos são responsáveis pela formação de grupos de pedestres.

As fórmulas para a atração e a repulsão acima apenas cobrem situações percebidas na direção desejada $\vec{e}_{\alpha}(t)$ do movimento. Situações localizadas atrás do pedestre tem uma influencia menor c com $0 < c < 1$. Para levar a percepção em conta (o ângulo de visão efetivo 2φ) introduziu-se os pesos dependentes da direção:

$$w(\vec{e}, \vec{f}) = \begin{cases} 1 & \text{se } \vec{e} \cdot \vec{f} \geq \|\vec{f}\| \cos \varphi \\ c & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.7)$$

Os efeitos de atração e repulsão no comportamento do pedestre são resumidamente:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{\alpha\beta}(\vec{e}_{\alpha}, \vec{r}_{\alpha} - \vec{r}_{\beta}) &= w(\vec{e}_{\alpha}, -\vec{f}_{\alpha\beta}) \vec{f}_{\alpha\beta}(\vec{r}_{\alpha} - \vec{r}_{\beta}), \\ \vec{F}_{\alpha i}(\vec{e}_{\alpha}, \vec{r}_{\alpha} - \vec{r}_i, t) &= w(\vec{e}_{\alpha}, \vec{f}_{\alpha i}) \vec{f}_{\alpha i}(\vec{r}_{\alpha} - \vec{r}_i, t). \end{aligned} \quad (3.8)$$

É possível agora formular a equação do movimento total do pedestre $\vec{F}_{\alpha}(t)$. Como todos os efeitos mencionados anteriormente influenciam as decisão dos pedestres em todos os momentos, assume-se que o efeito total é resultado da soma de todos os efeitos, exatamente como no caso de forças reais. Isso resulta em:

$$\vec{F}_{\alpha}(t) = \vec{F}_{\alpha}^0(\vec{v}_{\alpha}, v_{\alpha}^0 \vec{e}_{\alpha}) + \sum_{\beta} \vec{F}_{\alpha\beta}(\vec{e}_{\alpha}, \vec{r}_{\alpha} - \vec{r}_{\beta}) + \sum_B \vec{F}_{\alpha B}(\vec{e}_{\alpha}, \vec{r}_{\alpha} - \vec{r}_B^{\alpha}) + \sum_i \vec{F}_{\alpha i}(\vec{e}_{\alpha}, \vec{r}_{\alpha} - \vec{r}_i, t). \quad (3.9)$$

O Modelo de Forças Sociais (*Social Force Model*) definido por:

$$\frac{d\vec{\omega}_{\alpha}}{dt} = \vec{F}_{\alpha}(t) + \text{flutuações} \quad (3.10)$$

O termo *flutuações* é adicionado para levar em conta variáveis aleatórias no comportamento. Essas flutuações ocorrem quando dois ou mais comportamentos são equivalentes, ou seja, quando por exemplo passar a esquerda ou a direita de um obstáculo possui o mesmo efeito.

Para tornar o modelo completo, a relação entre a velocidade atual $\vec{v}_\alpha(t)$ e a velocidade preferida $\vec{\omega}_\alpha(t)$ deve ser calculada. Já que a velocidade atual é limitada pela *velocidade máxima do pedestre* v_α^{max} , assume-se que o movimento realizado é dado por:

$$\frac{d\vec{r}_\alpha}{dt} = \vec{v}_\alpha(t) = \vec{\omega}_\alpha(t)g\left(\frac{v_\alpha^{max}}{\|\vec{\omega}_\alpha\|}\right) \quad (3.11)$$

com:

$$g\left(\frac{v_\alpha^{max}}{\|\vec{\omega}_\alpha\|}\right) = \begin{cases} 1 & \text{se } \|\vec{\omega}_\alpha\| \leq v_\alpha^{max} \\ \vec{v}_\alpha^{max} / \|\vec{\omega}_\alpha\| & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.12)$$

3.1.3 Experimentos de Simulação

Dois cenários, **cenário 1** e **cenário 2**, com um grande número de pedestres foram simulados utilizando o modelo de Forças Sociais (HELBING; MOLNÁR, 1995). A simulação assume que as velocidades desejadas v^0 são uma distribuição Gaussiana com média $v^0 = 1.34m/s$ e desvio padrão $\sqrt{\theta} = 0.26m/s$. As velocidades são limitadas a $v_\alpha^{max} = 1.3v_\alpha^0$. Aqueles que se movimentam da esquerda para a direita são representados por círculos cheios, enquanto aqueles que se movimentam da direita para esquerda são representados por círculos vazios, como pode ser visto nas figuras 3.2 e 3.4. O diâmetro do círculo é uma medida da velocidade atual $\|\vec{v}_\alpha\|$ de um pedestre α . Para simplificação, nenhum efeito atrativo $\vec{f}_{\alpha i}$ ou flutuação é levada em conta. Assume-se que os potenciais repulsivos decrescem exponencialmente:

$$\begin{aligned} V_{\alpha\beta} &= V_{\alpha\beta}^0 e^{-b/\sigma} \\ U_{\alpha\beta}(\|\vec{r}_{\alpha\beta}\|) &= U_{\alpha\beta}^0 e^{-\|\vec{r}_{\alpha\beta}\|/R} \end{aligned} \quad (3.13)$$

assume-se que os parâmetros do potencial repulsivo são $V_{\alpha\beta}^0 = 2.1m^2s^{-1}$, $\sigma = 0.3m$ e $U_{\alpha\beta}^0 = 10m^2s^{-2}$, $R = 0.2m$. Para Δt na fórmula 3.4, assumiu-se $\Delta t = 2s$ e os tempos τ_α assumiu-se $\tau_\alpha = 0.5s$. Valores menores de τ_α fazem os pedestres andarem mais agressivamente. Finalmente o ângulo de visão efetivo (que considera os movimentos da cabeça) foi escolhido como $2\phi = 200^\circ$. Para situações fora do ângulo de visão, assumiu-se que a influência é $c = 0.5$. Todos esses parâmetros do modelo foram escolhidos de maneira a serem compatíveis com dados empíricos.

Cenário 1 - corredor: a figura 3.2 mostra como resultado da simulação o que já foi comprovado com dados empíricos, ou seja que filas de pedestres andando na mesma direção se formam dinamicamente. Condições periódicas nas bordas transversais do corredor estabilizam as filas assim elas não são destruídas por pedestres entrando em posições aleatórias.

A figura 3.3 mostra que o número de filas formado depende do comprimento do corredor para uma densidade de pedestres de $0.3m^{-2}$. O efeito de formação de filas não é um resultado da configuração inicial dos pedestres, mas sim uma consequência da interação entre pedestres. A formação de filas leva a um fluxo mais eficiente de pedestres já que as manobras para evitar colisões ocorrem menos frequentemente.

Cenário 2 - porta: a figura 3.4 mostra momentos diferentes de dois grupos de pedestres tentando passar por uma porta em direções contrárias. Quando um pedestre passa pela porta, outros pedestres que se movem na mesma direção podem seguir mais facilmente, como pode ser visto na figura 3.4. Entretanto após algum tempo o fluxo de pedestres atravessando a porta é interrompido pela pressão do grupo de pedestres na direção oposta. Então a porta é capturada pelo grupo da direção oposta. Essa mudança de fluxo através da porta ocorre diversas vezes e é um fenômeno bem conhecido através de diversas observações empíricas.

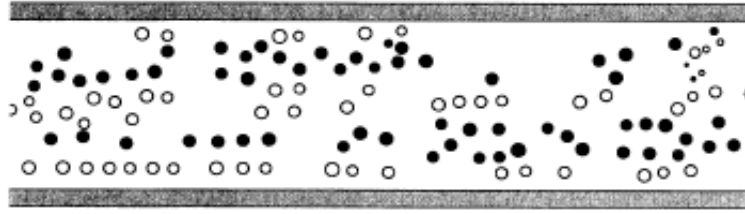


Figura 3.2: Acima de uma densidade crítica de pedestres é possível observar a formação de filas (*lanes*) com uma direção uniforme. Nessa figura é possível ver $N = 4$ filas em um corredor com $10m$ de largura e $50m$ de comprimento. Círculos vazios representam pedestres se movimentando em direção contrária a círculos cheios, *fonte: (HELBING; MOLNÁR, 1995)*

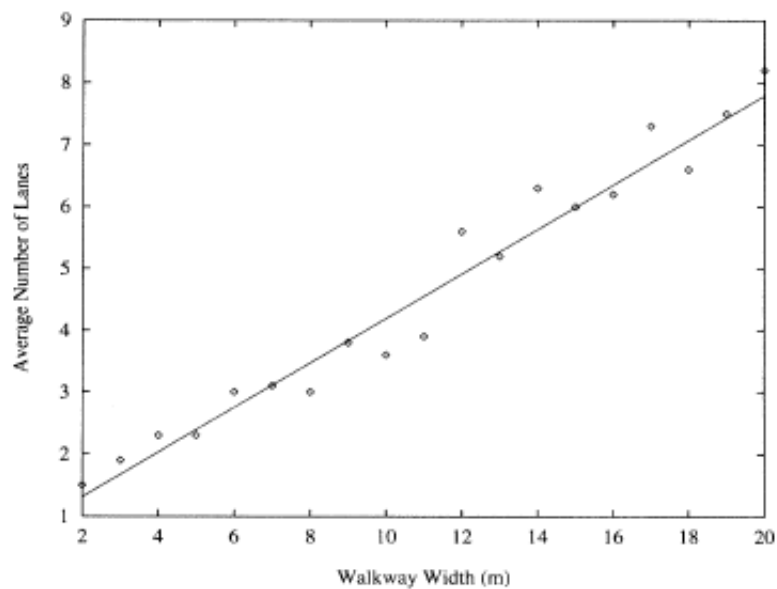


Figura 3.3: O número médio de filas N emergentes é linearmente dependente da largura W : $[N(W) = 0.36m^{-1}W + 0.59]$, *fonte: (HELBING; MOLNÁR, 1995)*

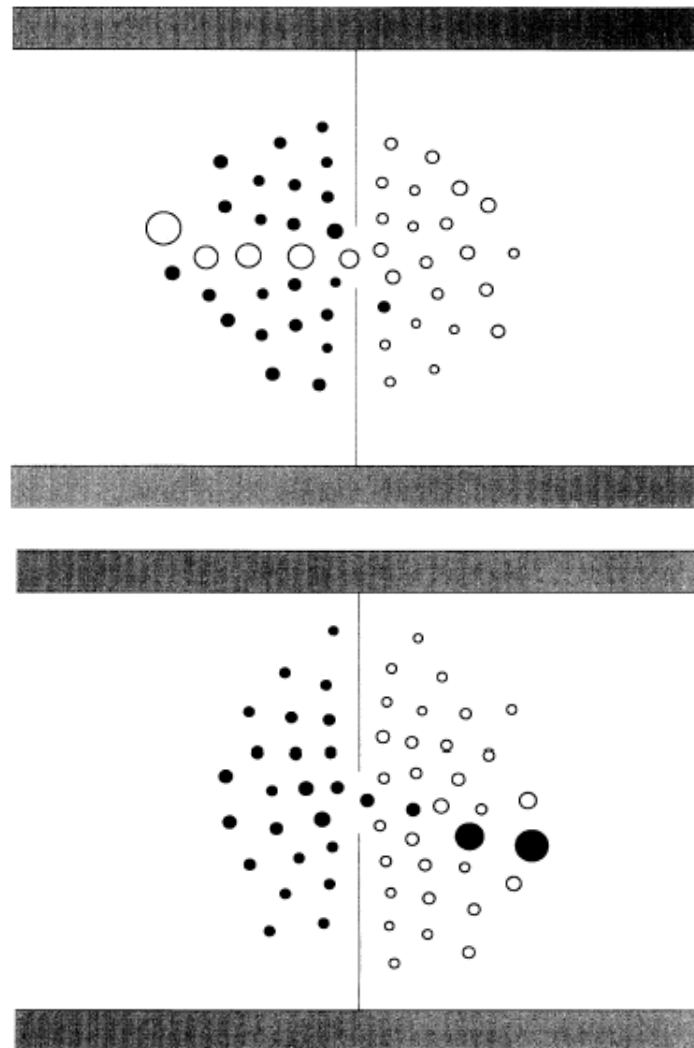


Figura 3.4: Se um pedestre é capaz de passar por uma porta estreita, outros pedestres com a mesma direção podem seguir facilmente, enquanto pedestres em direções contrárias tem que esperar. Após algum tempo o fluxo de pedestres para e a porta é capturada por indivíduos se movimentando na direção contrária. O diâmetros dos círculos representam a velocidade do movimento atual, *fonte: (HELBING; MOLNÁR, 1995)*

3.1.4 Análise do Modelo

Apesar do fato do Modelo de Forças Sociais, *Social Force Model*, ser muito simples, ele descreve muitos fenômenos observados de maneira realista, mostrando a capacidade de auto-organização da dinâmica de pedestres.

As simulações de computadores para grupo de pedestres mostraram: o desenvolvimento de filas de pedestres que andam na mesma direção e as mudanças oscilatórias de direção em passagens estreitas.

Esses padrões espaço-temporais surgem devido a interações não lineares entre pedestres. Eles não são um efeito das considerações estratégicas dos pedestres, já que assumiu-se que os pedestres agem de uma maneira *automática/reactiva*.

A investigação do comportamento dos pedestres é um ponto de partida ideal para o desenvolvimento de modelos comportamentais mais gerais, já que as variáveis do movimento de pedestres são facilmente mensuráveis e comparáveis com dados empíricos. Além disso um passo além seria estender o modelo para a escolha de rotas de pedestres.

4 AUTÔMATOS CELULARES

Microsimulação utilizando *Autômatos Celulares (AC)* é uma técnica efetiva para modelar comportamentos emergentes complexos. Esse tipo de simulação é caracterizado como uma abordagem de *Artificial Life* (ADAMI, 1998) para simulação de sistemas.

Os modelos de autômatos celulares são chamados assim devido ao princípio de que *automata* ou entidades, ocupam *células* baseado nas regras sobre o estado das células vizinhas. Suas regras descrevem o comportamento de cada autômato criando a aproximação do comportamento individual. As interações entre células vizinhas seguindo esse conjunto de regras é responsável pelo comportamento coletivo emergente e pelos resultados macroscópicos.

Fluxo de pedestres é inerentemente complexo, muito mais do que fluxo de veículos, assim modelos de autômatos celulares desenvolvidos para simulação de fluxo de veículos não são mais aplicáveis. Modelos de autômatos celulares criados para simulação de pedestres mostraram-se capazes de simular importantes características coletivas da dinâmica de pedestres a partir de um conjunto pequeno de regras.

A abordagem de autômatos celulares para simulação da dinâmica de pedestres é especialmente mais atrativa do que outros modelos, como visto em (ADLER; BLUE, 2000), devido a diversas características:

1. As interações entre os autômatos são baseadas em regras comportamentais facilmente compreensíveis.
2. O tempo, o espaço e as variáveis de estado são discretizadas o que torna o modelo ideal para simulações de alto desempenho.
3. Os autômatos celulares são facilmente implementados em computadores digitais e, comparados aos modelos de microsimulação baseados em equações diferenciais, são mais rápidos.

Nas seções a seguir alguns modelos de autômatos celulares para simulação da dinâmica de pedestres são abordados.

4.1 Modelo de Autômato Celular para o Comportamento Coletivo Bi-Direcional Emergente da Dinâmica de Pedestres

O modelo de V. J. Blue e J. L. Adler, (ADLER; BLUE, 2000), é um autômato celular para a simulação do comportamento emergente coletivo da dinâmica de pedestres. Esse autômato mostra que através de um pequeno conjunto de regras é possível capturar a complexidade da dinâmica de pedestres e simular três características essenciais do comportamento coletivo dos pedestres: **separated directional flows** - essencialmente são dois fluxos separados de pessoas, **interspersed directional flows** - apenas um fluxo de pessoas indo em direções contrárias (como se existisse apenas uma fila com dois sentidos), **dynamic multi-lane flows** - mostra a formação de diversos fluxos unidirecionais de pessoas que se cruzam.

4.1.1 Modelo

Ao criar um conjunto de regras para o autômato celular focado em regras que geram os comportamentos críticos, o modelo permite compreender melhor as características fundamentais da dinâmica de pedestres.

Com isso em mente, considerou-se que existem três elementos fundamentais que todo modelo microscópico de simulação de pedestres deve levar em conta: mudança de fila (dar um passo para o lado), movimento para frente (aceleração ou freagem) e resolução de colisões. Esse modelo foi criado levando em consideração esses três elementos e trabalha com duas atualizações síncronas para cada pedestre.

Na primeira atualização síncrona, **Mudança de Fila**, o conjunto de regras é aplicado para determinar qual fila mais favorece o movimento para frente para cada pedestre, assim que todos os pedestres tem suas novas filas determinadas ocorre a atualização das posições.

Na segunda atualização síncrona, **Movimento para Frente**, o conjunto de regras é aplicado para determinar o quanto o pedestre pode avançar. No caso de um pedestre vir na direção contrária duas coisas podem ocorrer: ambos os pedestres avançam até a metade do espaço disponível ou ambos avançam todo o espaço disponível. A segunda opção é possível, e ocorre com probabilidade p_{exchg} , pois leva em conta que em determinadas situações duas pessoas se comprimem e deslizam para seguir seus caminhos.

Isso faz com que apenas os pedestres na vizinhança imediata sejam afetados por um movimento de um pedestre P_n . O que apesar de ser uma visão míope para o pedestre P_n , é realista.

Outras características importantes para o modelo são:

1. Cada célula possui um tamanho de $0.47 \times 0.47 m^2$
2. Cada iteração representa 1 segundo
3. Cada pedestre pode ter uma velocidade de $2(0.8m/s)$, $3(1.3m/s)$ ou $4(1.8m/s)$ células por iteração.

4.1.2 Regras do Modelo

A seguir as regras do modelo são apresentadas em detalhes. Primeiro o **Procedimento de cálculo do gap** é realizado para cada pedestre. A seguir a atualização da posição dos

pedestres é realizada dois passos síncronos: **Mudança de Fila e Movimento para frente**

Procedimento de cálculo do gap

1. Mesma direção: Olhe para a frente o máximo de $(2 * \text{velocidade máxima})$ células.
 SE uma célula ocupada for encontrada na mesma direção
 ENTÃO gap_same é igual ao número de célula entre os pedestres
 SENÃO $gap_same = 2 * \text{velocidade máxima}$.
2. Direções opostas: Olhe para a frente o máximo de $(2 * \text{velocidade máxima})$ células.
 SE uma célula ocupada for encontrada com um movimento contrário
 ENTÃO gap_opp é igual a $INT(0.5 * \text{número de célula entre os pedestres})$
 SENÃO $gap_opp = \text{velocidade máxima}$.
3. Atribuir: $gap = MIN(gap_same, gap_opp, \text{velocidade máxima})$

Mudança de Fila - Primeira atualização paralela

1. Eliminação de conflitos: dois pedestres que são adjacentes não podem se mover de modo a colidirem.
 - Uma célula livre entre dois pedestres está disponível para um deles com uma chance de 50%.
2. Identificar gaps: A mesma fila ou fila adjacente é escolhida de maneira que maximiza a movimentação para frente até a velocidade máxima de acordo com o Procedimento de cálculo do gap.
 - Para *Dynamic Multiple Lane (DML)*
 - Saia de uma fila aonde há um pedestre na direção contrária alterando o valor de gap para 0 se o pedestre estiver dentro do campo de visão de $(2 * \text{velocidade máxima})$.
 - Se posicione atrás de um pedestre se movimentando na mesma direção ao evitar um pedestre vindo na direção contrária escolhendo qualquer fila aonde $gap_same = 1$ quando $gap = 1$.
 - Quando duas filas possuem o mesmo gap as disputas são resolvidas da seguinte maneira
 - Uma disputa entre duas filas adjacentes com o mesmo gap . Escolha uma das filas com 50% de chance.
 - Disputa entre a fila atual e uma fila adjacente, ambas com o mesmo gap , mantenha-se na fila atual.
 - Disputa entre 3 filas, mantenha-se na fila atual
3. Movimento: cada pedestre P_n se move 0, -1 ou +1 passos laterais após as etapas (1) até (2) tiverem sido completadas.

Movimento para frente - Segunda atualização paralela

1. Atualize a velocidade do pedestre P_n :
 $v(P_n) = gap$.

2. Trocas

SE $gap = 0$ ou ($gap = 1$ E $gap = gap_{opp}$)
 ENTÃO com uma probabilidade p_{excg} $v(P_n) = gap + 1$
 SENÃO $v(P_n) = 0$.

3. Cada pedestre P_n movimentado $v(P_n)$ célula a frente.

4.1.3 Experimento de Simulação

Como a velocidade de caminhada varia entre os pedestres, uma distribuição de velocidades é necessária. Para a simulação realizada considerou-se esses três grupos de pedestres:

Pedestres rápidos: velocidade máxima de 4 células por passo de simulação, aproximadamente $1.8m/s$.

Pedestres padrões: velocidade máxima de 3 células por passo de simulação, aproximadamente $1.3m/s$.

Pedestres lentos: velocidade máxima de 3 células por passo de simulação, aproximadamente $0.85m/s$.

Uma distribuição de 5% pedestres rápidos, 90% pedestres padrões e 5% pedestres lentos foi utilizada para representar a população de pedestres.

O espaço de caminhada dos pedestres foi simulado como uma grade toroidal de comprimento W e altura G . No começo da simulação os pedestres são criados e posicionados aleatoriamente na grade. A densidade de pedestres permanece constante durante toda a simulação.

O conjunto de experimentos realizados incluíam simulações com 19 densidades, variando de 0.05 até 0.95 em incrementos de 0.05. Para a obtenção de melhores resultados estáticos dez simulações para cada densidade foram realizadas.

Além de demonstrar que o modelo é capaz de simular características coletivas e de auto-organização encontrados em dinâmica de pedestres, o objetivo fundamental da experiência foi obter a relação *velocidade x densidade* e *fluxo x densidade*. Os resultados podem ser vistos nos gráficos 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5.

4.1.4 Análise do Modelo

O experimento de simulação mostrou que esse modelo é capaz de simular características fundamentais coletivas e de auto-organização encontradas em dinâmica de pedestres, tais como: *separated directional flows*, *interspersed directional flows* e *dynamic multi-lane flows*.

Um exemplo é a figura 4.1, que mostra o padrão emergente, *dynamic multi-lane flows*, após 100 segundos de tempo de simulação. Nessa figura as células pretas representam pedestres movimentando-se no sentido leste-oeste, enquanto células cinzas representam pedestres movimentando-se no sentido oeste-leste.

Além disso, diversos dados estatísticos sobre a densidade de pedestres foram coletados. As figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 representam dados para os seguinte tipos de fluxos:

Unidirecional: fluxo unidirecional de pessoas.

ISP 50/50: *interspersed direcional flow* com 50% de pedestres em direções opostas.

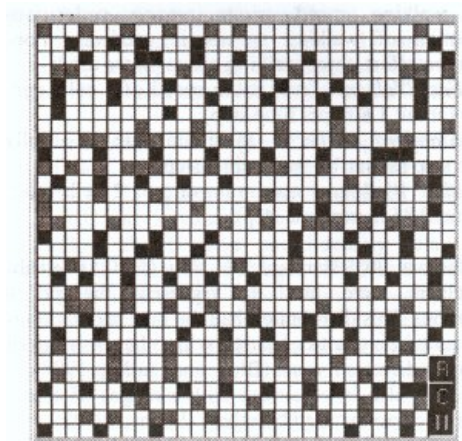


Figura 4.1: *Dynamic Multi-lane Flow*, fonte: (ADLER; BLUE, 2000)

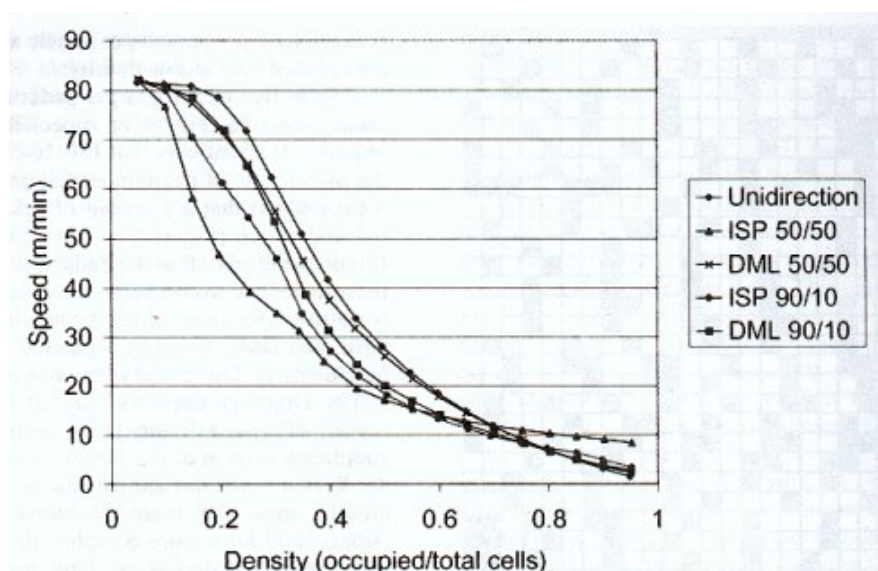


Figura 4.2: *Speed X density*, fonte: (ADLER; BLUE, 2000)

DML 50/50: *dynamic multi-lane flow* com 50% de pedestres em direções opostas.

ISP 90/10: *interspersed direcional flow* com 90% de pedestres em uma direção e 10% na direção contrária.

DML 90/10: *dynamic multi-lane flow* com 90% de pedestres em uma direção e 10% na direção contrária.

Cada figura/gráfico tem relações importantes de como a densidade de pedestres afeta o comportamento global da simulação.

A figura 4.2 mostra a relação *Speed X Density*. Como esperado, a velocidade média dos pedestre é inversamente proporcional a densidade.

A figura 4.3 mostra a relação *Flow X Density*. O fluxo de pedestre medido é em pedestres por minuto por largura da passagem. O fluxo de pedestre aumenta com o aumento da densidade até um máximo quando a densidade é igual a 0.3, a partir desse ponto

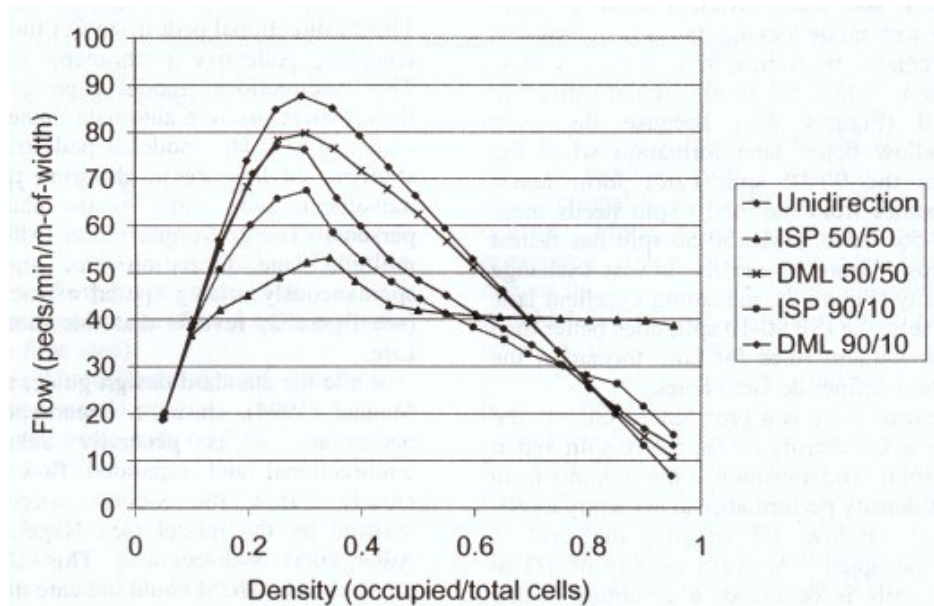


Figura 4.3: *Flow X density*, fonte: (ADLER; BLUE, 2000)

aumentos na densidade levam a uma redução no fluxo.

A figura 4.4 mostra a relação *Sidestep Rate X Density*. O *sidestep rate* é o número de mudanças de fila (*lane*) por pedestre por minuto. O *sidestep rate* aumenta com a densidade, atingindo um mínimo quando a densidade é de aproximadamente 0.3. A partir desse ponto aumentos na densidade levam a uma diminuição no *sidestep rate*.

A figura 4.5 mostra a relação *Exchange Rate X Density*. O *exchange rate* é o número de trocas de lugar por pedestre por minuto. Como é de se esperar, conforme o aumento da densidade o *exchange rate* (a taxa de trocas) aumenta.

Com essa informação, observa-se que para dois grupos de pedestres se movimentando em direções contrárias a simulação funciona bem, mas a implementação e a simulação de mais de dois grupos em direções diversas é uma característica interessante que não foi considerada.

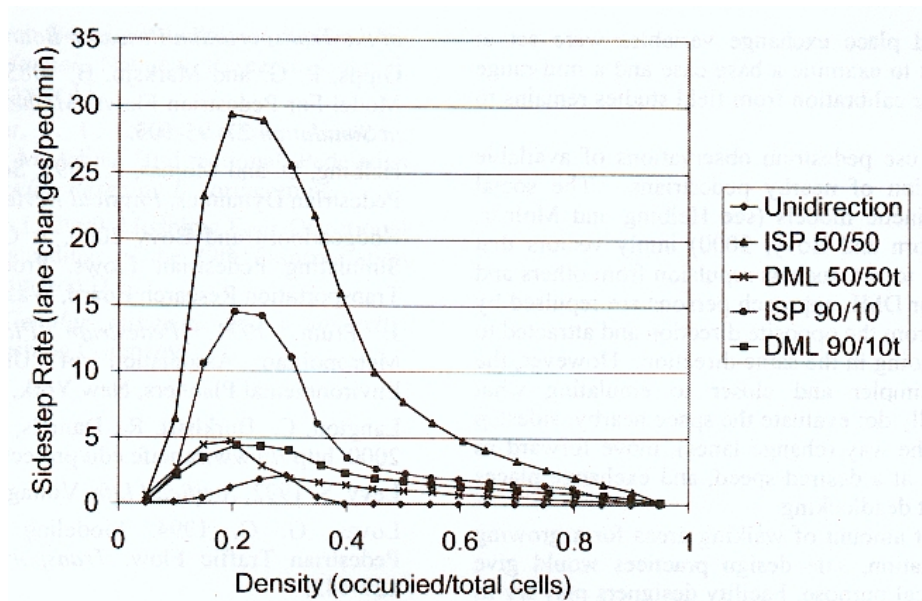


Figura 4.4: *Sidestep Rate X density*, fonte: (ADLER; BLUE, 2000)

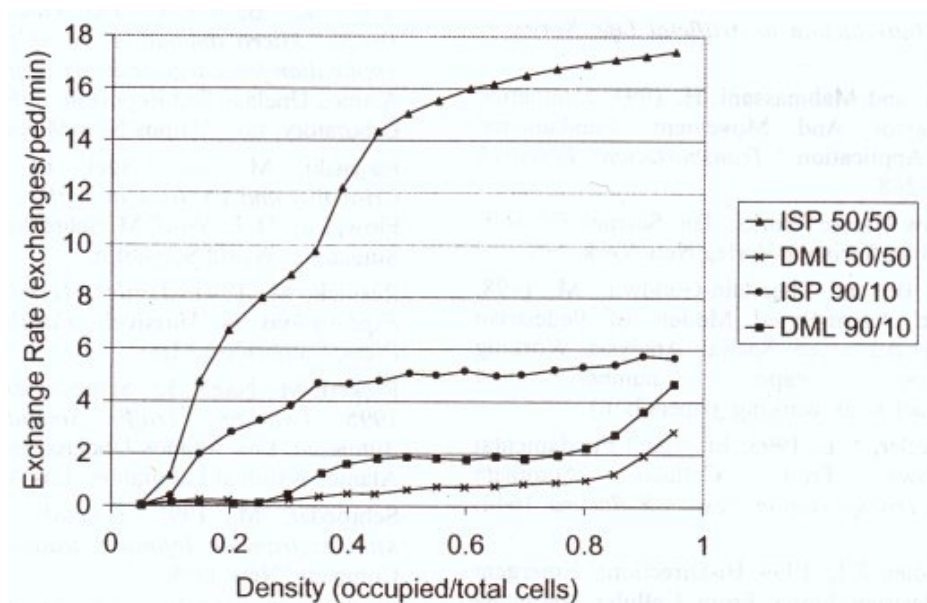


Figura 4.5: *Exchange Rate X density*, fonte: (ADLER; BLUE, 2000)

4.2 Modelo de Autômato Celular Estocástico para Simulação de Dinâmica de Pedestres

Para simular um comportamento complexo de uma maneira simples e elegante comumente recorre-se a uma descrição estocástica.

Uma situação realista raramente pode ser descrita de uma maneira determinística, pois eventos ligeiramente diferentes podem levar a comportamentos bastante diversos devido a complexidade das relações envolvidas. Isso fica claro no problema do movimento de pedestres, aonde por exemplo, no caso de pânico o comportamento das pessoas parece imprevisível.

Entretanto, em situações normais de movimentação de pedestres, um componente estocástico na dinâmica pode levar a uma descrição mais acurada do fenômeno complexo já que normalmente não se tem uma descrição completa sobre o estado do sistema e suas dinâmicas.

O modelo desenvolvido por Schadschneider (SCHADSCHNEIDER, 2002), (BURSTEDDE et al., 2002) é um autômato celular estocástico bi-dimensional para simulação da dinâmica de pedestres. Esse é extremamente eficiente e permite a simulação rápida de grandes multidões, reproduzindo características coletivas e de auto-organização de dinâmica de pedestres. Tais como formação de filas (*lanes*) fluxos em corredores largos e oscilações de fluxos encontrados em portas.

4.2.1 Modelo

O modelo (SCHADSCHNEIDER, 2002), (BURSTEDDE et al., 2002) usa o conceito de *floor field* para representar as interações de longa distância entre os pedestres, o qual tem sua própria dinâmica (difusão e decaimento) e isso modifica as taxas de transição das células e conseqüentemente o movimento dos pedestres.

Como a probabilidade de transição do pedestre depende apenas da ocupação das células e da força do *floor field* na sua vizinhança, isso permite uma implementação eficiente em computadores, já que todas as interações são locais.

Para manter o modelo simples, os pedestres são providos apenas de uma inteligência mínima para a formação de estruturas complexas e efeitos de auto-organização observados em dinâmica de pedestres. Ao contrário de outros modelos, nenhuma suposição é realizada a respeito do comportamento humano. Entretanto ainda assim o modelo capaz de reproduzir muitas características da dinâmica de pedestres.

As regras do autômato celular são descritas a seguir:

4.2.2 Regras do Modelo

Tamanho da célula: A velocidade média do pedestre em uma multidão é $1.3m/s$ e o espaço típico ocupado é $40 \times 40 cm^2$. Isso faz com que cada célula represente um quadrado de $40 \times 40 cm^2$ e cada iteração represente aproximadamente 0.3 segundos.

Matriz de Preferências: Cada partícula tem uma matriz 3×3 de preferências (figura 4.6) que representa a probabilidade do pedestre ir em cada uma das direções, a probabilidade da posição $M_{0,0}$ é a possibilidade do pedestre permanecer parado. A cada iteração assume-se que essa matriz de preferências é dada/calculada. Por exemplo, a matriz pode ser calculada a partir de um modelo de roteamento que designa rotas para cada um dos pedestres.

Em cada iteração a posição de cada pedestre é atualizada de acordo com essas

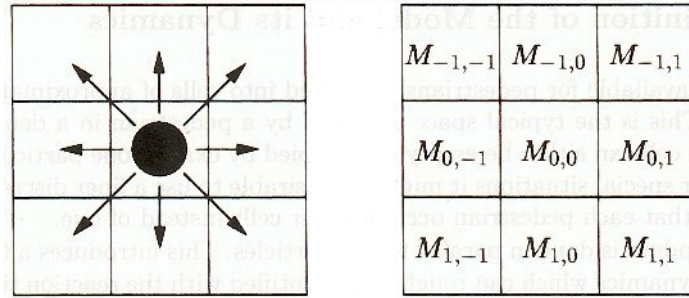


Figura 4.6: Matriz de Preferências, fonte: (SCHADSCHNEIDER, 2002)

probabilidades, isso realizado de maneira síncrona (paralela) para todas as pessoas. Se uma posição está ocupada o pedestre não se movimenta para aquela posição. Se a posição está livre o pedestre se movimenta para aquela posição. Se dois pedestres escolhem a mesma posição o pedestre com maior probabilidade muda de posição enquanto o outro mantém sua posição original.

Floor Field: Além da interação local, é necessário introduzir uma interação de longa distância para reproduzir os efeitos coletivos da dinâmica de pedestres. Entretanto a representação explícita da interação de longa distância é evitada por esse modelo. Ao invés disso a interação de longa distância é representada implicitamente pelo conceito de *floor field*. Esse conceito pode ser visto como uma segunda camada de células sob a camada de células ocupada pelos pedestres, que modifica as probabilidades de transição (matriz de preferência) dos pedestres. Existem dois tipos de *floor field*: *static floor field*, *dynamic floor field*.

Dynamic Floor Field: O *dynamic floor field* é utilizado para modelar a interação de longa distância entre os pedestres, ele representa a trilha virtual deixada pelos pedestres. A sua dinâmica, difusão e decaimento, muda conforme o tempo e é modificada pela passagem dos pedestres:

1. Se um pedestre deixa uma célula (x,y) o *dynamic floor field* dessa célula é aumentado em δD_{xy} . O incremento δD_{xy} é um parâmetro do modelo e pode ser discreto ou contínuo.
2. Para modelar a difusão, uma certa quantidade do campo δF é distribuída para as células vizinhas.
3. A força do campo em cada célula é diminuída por uma constante ω para simular o decaimento do campo.

No item 1 a trilha virtual é criada pelo movimento dos pedestres, o item 2 é necessário porque os pedestres não seguem exatamente o mesmo caminho dos outros e o item 3 implica que a trilha virtual tem um tempo de vida finito.

Static Floor Field: O *static floor field* não muda durante o tempo, nem é alterado pelo movimento dos pedestres, ele é utilizado para modelar regiões do espaço que são mais atrativas que outras, como saídas de emergência ou janelas.

Probabilidade de Transição: A probabilidade de transição P_{ij} na direção (i,j) depende agora de quatro contribuições:

1. A matriz de preferências M_{ij} que contém informação sobre a rota do pedestre.
2. O valor D_{ij} do *dynamic floor field* da célula (i, j) .
3. O valor S_{ij} do *static floor field*.
4. A ocupação n_{ij} da célula (i, j) . Um movimento na direção (i, j) apenas é permitido se a célula está vazia ($n_{ij} = 0$), se a célula estiver ocupada ($n_{ij} = 1$) o movimento é proibido.

Uma maneira simples de calcular a probabilidade de transição P_{ij} com base nessas quatro contribuições definir é:

$$P_{ij} = N \cdot M_{ij} \cdot D_{ij} \cdot S_{ij} \cdot (1 - n_{ij}) \quad (4.1)$$

com N sendo o fator de normalização para assegurar que $\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 P_{ij} = 1$, ou seja a soma das probabilidades sobre as nove células da matriz de preferências é 1.

Com os conceitos explicados (tamanho da célula, matriz de preferências, *dynamic floor field*, *static floor field*, probabilidade de transição), a seguir as regras do modelo são descritas. A atualização é realizada de maneira síncrona (ou paralela) para todos os pedestres, seguindo as regras de atualização

Regras de atualização: A seguir é apresentado um algoritmo para sumarizar as regras de atualização do movimento dos pedestres.

1. O *dynamic floor field* D é modificado de acordo com as regras de difusão e decaimento.
2. Para cada pedestre as probabilidades de transição P_{ij} para mover para um célula vazia vizinha calculado utilizando a matriz de preferências, o *dynamic floor field*, e o *static floor field*.
3. Cada pedestre escolhe uma célula para se mover baseado nas probabilidades de transição.
4. Os conflitos gerados por pedestres querendo mover para a mesma célula são resolvidos.
5. Os pedestres realizam suas movimentações.
6. Os pedestres alteram o *dynamic floor field* D_{xy} da célula (x, y) que eles ocupavam antes do movimento.

4.2.3 Experimentos de simulação

Como experimento, a simulação da evacuação de dois cenários foram criados: **cenário 1 - evacuação de uma sala grande**, **cenário 2 - evacuação de um auditório**. Além disso criou-se um experimento de **cenário 3 - otimização de tempo de evacuação**.

Cenário 1 - evacuação de uma sala grande: A figura 4.7 representa um sala grande. O comportamento de 100 pessoas posicionadas aleatoriamente deixando a sala foi simulado. Assumiu-se que as pessoas não tinham informações de onde era a saída, tal como em uma situação de emergência com muita fumaça ou sem luzes. O *static floor field* foi modelado de maneira a ter um valor máximo próximo a saída e ir decrescendo até atingir o valor 0 na parede oposta a saída.

Apenas isso já foi suficiente para gerar o comportamento de evacuação completo da sala. A figura 4.8 mostra a situação após diversos passos de simulação. A figura a es-

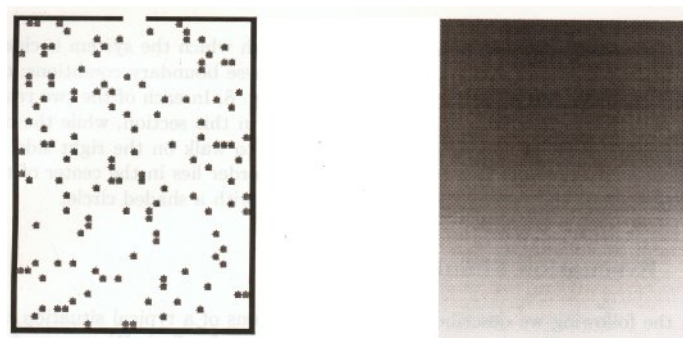


Figura 4.7: Evacuação de uma sala grande: a esquerda a representação da sala no momento inicial, a direita mostra a for do *static floor field*, quanto mais escuro mais forte o campo. Fonte: (BURSTEDDE et al., 2002)

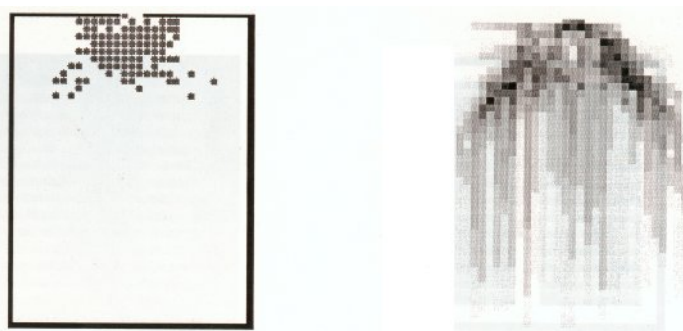


Figura 4.8: Evacuação de uma sala grande: a esquerda é mostrado uma configuração típica intermediária da simulação, a direita é mostrado o *dynamic floor field* criado pelas pessoas deixando a sala. Fonte: (BURSTEDDE et al., 2002)

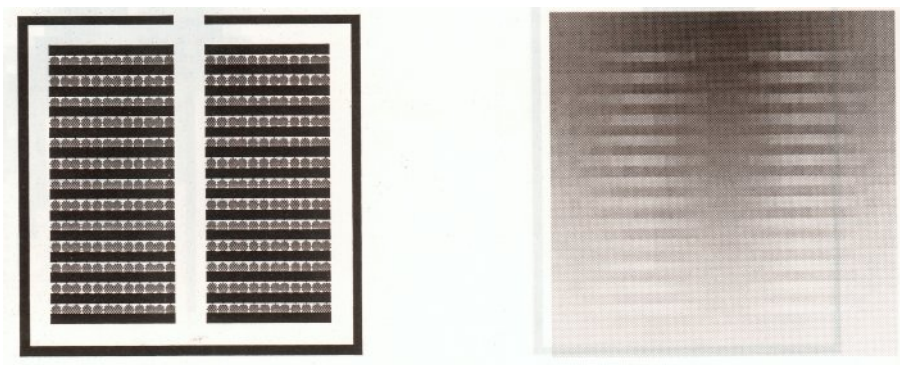


Figura 4.9: Evacuação auditório: a esquerda a configuração inicial, a direita o *static floor field*. Fonte: (BURSTEDDE et al., 2002)

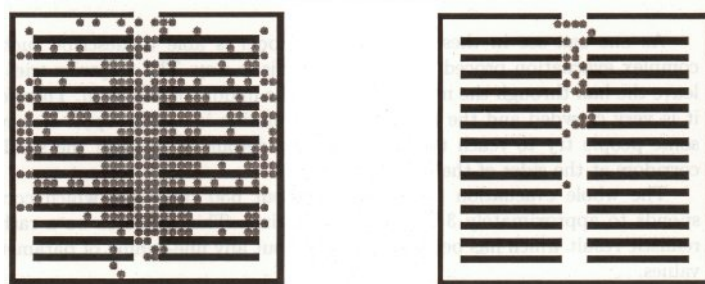


Figura 4.10: Evacuação auditório: Configurações típicas após algum tempo de simulação, fonte: (BURSTEDDE et al., 2002)

querda mostra as pessoas na frente da porta em uma típica formação semi-circulo, enquanto a figura a direita mostra o *dynamic floor field* gerado pelas pessoas deixando a sala.

Um resultado interessante da simulação é a interação atrativa entre pedestres. Descobriu-se que as flutuações nas medidas dos tempos de evacuação são muito menores se o *static floor field* for pequeno. Nesse caso o comportamento dominante é seguir o pedestre à frente na esperança de encontrar a saída.

Cenário 2 - evacuação de um auditório: Uma características dos auditórios é que eles são salas grandes com diversas fileiras de bancos que servem de obstáculos horizontais para a saída de pedestres, como pode ser visto na figura 4.9. As pessoas tem que sair do auditório pela porta frontal, mas antes devem sair das fileiras de bancos até atingir o corredor central ou os corredores laterais. A simulação é realizada com o auditório totalmente ocupado e apenas com o *static floor field* como mostrado na figura 4.9, sem os efeitos do *dynamic floor field*.

A figura 4.10 mostra um estágio típicos da simulação do cenários. É possível notar através das figuras que o modelo simula o complexo fenômeno da evacuação de salas de uma maneira muito realista. A maior parte das pessoas tentam sair do auditório pelo corredor central, portanto este um lugar bastante ocupado e sujeito a engarrafamentos. Entretanto algumas pessoas tentam alcançar a saída utilizando os corredores laterais, justamente como ocorre na realidade.

Cenário 3 - otimização de tempos de evacuação: Devido a alta velocidade do mo-

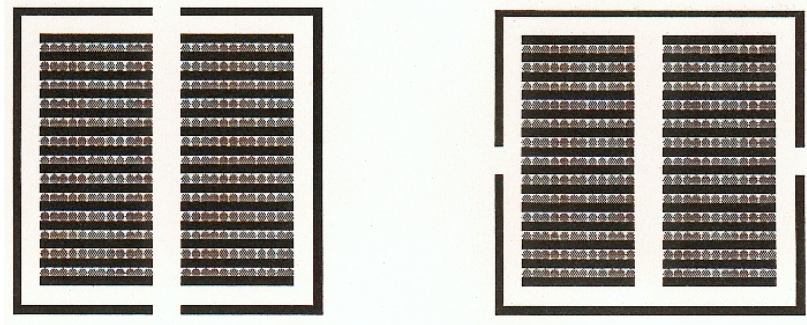


Figura 4.11: Otimização de evacuação: a esquerda o cenário A, a direita o cenário B, fonte: (BURSTEDDE et al., 2002)

| | Cenário A | Cenário B |
|----------|-----------|-----------|
| T | 560 | 363 |
| σ | 85 | 24 |

Tabela 4.1: Tempos de evacuação, fonte: (BURSTEDDE et al., 2002)

delo de simulação, é possível simular a evacuação de diversos cenários. Portanto é possível utilizar o modelo para realizar a simulação de prédios a respeito dos tempos de evacuação e flutuações para diversos cenários/geometrias.

Um exemplo para isso é a simulação de duas situações ligeiramente diferentes do auditório e a comparação do tempo de evacuação entre elas.

O cenário 3A é um auditório com duas portas, uma à frente e a outra aos fundos. No cenário 3B as portas estão à esquerda e à direita. Os cenários são mostrados na figura 4.11. O tempo de evacuação T e a variância σ forma medidos para ambos os cenários, como mostra a tabela 4.1. Apesar desse resultado parecer óbvio, esse exemplo mostra que o modelo é capaz de contribuir para a análise de risco nos processos de evacuação.

4.2.4 Análise do Modelo

Esse modelo é capaz de reproduzir os efeitos coletivos e de auto-organização conhecidos por ocorrerem na dinâmica de pedestres, tais como formação de múltiplas filas e corredores de pedestres. Logo esse é um bom modelo para aplicações realistas.

Além disso cenários complexos podem ser simulados, tais como cenários com mais de uma espécie de pedestre, cada tipo interagindo com seu própria conjunto de *floor field*. Outra característica interessante é a possibilidade de cada pedestre seguir uma rota estabelecida por um algoritmo de roteamento que determina a cada passo da iteração a matriz de preferência.

Através dos exemplos de simulação mostrou-se que o modelo capaz de simular complexos processos de evacuação, assim como contribuir para análise de risco nos processos de evacuação.

4.3 Modelo de Autômato Celular para Dinâmica de Pedestres atravessando um cruzamento

Vários modelos foram criados para simular e resolver conflitos entre pedestres, entretanto existem poucos modelos para simular e resolver conflitos entre pedestres e veículos, como por exemplo em um cruzamento. A seguir é apresentado um modelo, desenvolvido por (ZHANG; WANG; LI, 2003), de um autômato celular bi-dimensional que simula exatamente esse problema, pedestres atravessando uma estrada.

4.3.1 Modelo

A seguir estão descritas as características do movimento de pedestres e veículos que foram relevantes para a criação do modelo:

1. A velocidade média do pedestre é $1.2m/s$ e a velocidade máxima é $1.4m/s$ e a distribuição espacial média dentro de um fluxo de pedestres é um espaço de $0.4 \times 0.4m^2$.
2. Os movimentos dos pedestres em um cruzamento são bi-direcionais. A perda de tempo de um pedestre atravessar um outro pedestre passando na direção contrária é de $0.2s$ em média.
3. Os conflitos entre os pedestres não são apenas entre eles, mas também entre os pedestres e os veículos no cruzamento. Quando um pedestre encontra um veículo ele pára ou continua, dependendo da distância e da velocidade do veículo.
4. A chegada de pedestres ao cruzamento obedece, em média, uma distribuição de Poisson quando o fluxo bi-direcional de pedestres não é maior do que 1000 pessoas por hora.
5. Um impacto chamado *Efeito de Grupo* ocorre quando mais do que três pessoas se reúnem. Um pedestre se sentirá seguro no grupo e se moverá junto com ele prestando pouco ou quase nenhuma atenção ao intervalo de tempo entre os veículos. O tempo de julgamento de um pedestre é em média $1.5s - 2s$ e é reduzido para $1s - 1.2s$ quando ocorre o *Efeito de Grupo*.

4.3.2 Regras do autômato

A partir dessas características as hipóteses básicas do modelo foram criadas, tais como: duração do passo de simulação, tamanho das células, campo visual e o conceito de *stop point*.

Tempo do passo de simulação: O cenário da simulação é definido como um cruzamento entre pedestres e veículos. O tempo do passo da simulação tem que ser consistente com todo o fluxo de tráfego, incluindo os veículos motorizados e os pedestres, assim, o tempo é determinado como sendo 1 segundo.

Tamanho das células e velocidade: Os pedestres se movem em uma grade bi-dimensional com células de tamanho $48cm \times 24cm$. Portanto um pedestre ocupa duas células. É permitido para o pedestre mover 5 células a frente ou duas células para o lado por passo de simulação, assim a velocidade vertical do pedestre $1.2m/s$ e a velocidade horizontal $0.96m/s$. Os três movimentos possíveis de serem realizados são para

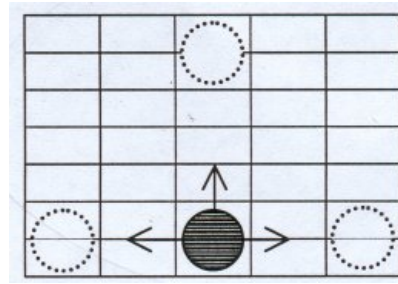


Figura 4.12: Movimentos possíveis dos pedestres, *fonte: (ZHANG; WANG; LI, 2003)*

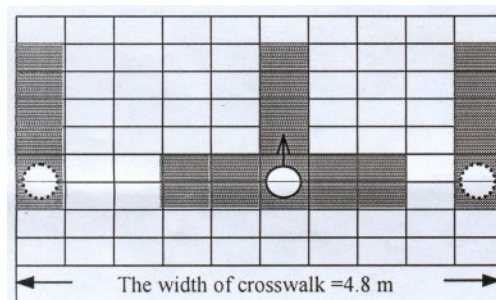


Figura 4.13: Campo visual do pedestre, *fonte: (ZHANG; WANG; LI, 2003)*

frente, para esquerda e para a direita, como mostrado na figura 4.12. O número exato de células ocupado por um veículo depende do seu tamanho (eg, um carro utilitário ocupa menos células que um caminhão).

Stop Point: O conceito de *stop point* foi criado para solucionar conflitos entre pedestres e veículos. O *stop point* está no meio do caminho aonde a estrada encontra o cruzamento de pedestres. E a área ativa de cada *stop point* depende da forma e da velocidade do veículo que está em conflito com o pedestre. Se o pedestre vai passar ou não o *stop point* depende do estado do *stop point*.

Campo visual: O campo visual de um pedestre inclui as células vizinhas em que ele pode chegar se deslocando em um passo da simulação. Quando o pedestre não puder ir para a frente, o campo visual incluirá células a sua esquerda e direita. A vizinhança de um pedestre é representada na figura 4.13. O círculo com linha sólida representa um pedestre e os círculos pontilhados representam dois pedestres virtuais.

A seguir o conjunto de regras do autômato celular é descrito. Em cada passo de simulação o movimento do pedestre é escolhido de acordo com uma transição de probabilidade, que está dividida em duas componentes, uma estática e uma dinâmica.

Componente Estática: 1. **Prioridade da próxima direção escolhida pelo pedestre**

D_{ij} . Movimento para frente é a primeira opção, assim sua probabilidade é de 0.5. Movimentos para esquerda e direita tem probabilidade de 0.25.

2. **O efeito da geometria G_{ij} .** A probabilidade de estar fora do cruzamento ou de objetos fixos é 0, para outras células a probabilidade é 1.

3. **O efeito de um pedestre vindo em sentido contrário.** Uma perda de 0.2s acontece toda vez que um pedestre tem que passar por outro vindo em sentido contrário. Essa perda de tempo é convertida em uma menor velocidade, o que reduzirá a velocidade vertical em uma célula.
4. **A existência de um refugio central CR_{ij} .** Quando um pedestre encontra um refugio central e o semáforo de pedestres esta vermelho, o pedestre vai esperar até o novo sinal verde para atravessar a rua. Portanto, CR_{ij} nas bordas do refugio central vai ser 0 nessa situação e 1 nas outras.

Componente Dinâmica: 1. **O efeito do semáforo de pedestres TL_{ij} .** Quando o semáforo muda para vermelho e o pedestre acabou de pisar na borda do cruzamento, $TL_{ij} = 0$ caso contrário $TL_{ij} = 1$.

2. **O número de ocupação n_{ij} da célula alvo.** Um movimento na direção (i,j) é permitido somente se a célula alvo estiver vazia e não houver obstáculos entre a posição original e a posição alvo. Assim o número de ocupação n_{ij} obtido da seguinte maneira:

$$\text{Se } (i, j) \text{ é permitido então } (n_{ij} = 1) \text{ senão } (n_{ij} = 0). \quad (4.2)$$

3. **O estado do stop point S_{ij} .** Se $S_{ij} = 0$ significa que o pedestre não pode se mover para essa célula e se $S_{ij} = 1$ significa que o pedestre pode mover para essa célula. O stop point possui dois efeitos: Um é o pedestre decidir parar ou passar da posição original para a próxima, o que pode ser definido como S_{ij}^1 . O outro é decidir a direção radial através do estado do stop point das células próximas as margens esquerda e direita, que pode ser definido como S_{ij}^2 . O estado do stop point pode ser obtido a partir de $S_{ij}^1 X S_{ij}^2$

Regra do stop point S_{ij} : A área de atuação do stop point depende da distância, forma e velocidade do veículo em conflito. A área de atuação pode se estender a espaços fora do cruzamento por causa do grande tamanho e velocidade dos veículos. Quando o campo visual de um pedestre em movimento se sobrepor a área de atuação, o estado de stop point das células na área que se sobrepõe depende da segurança do pedestre para atravessar o espaço entre os veículos.

Na situação de não existir semáforo no cruzamento, a segurança do pedestre atravessar o espaço entre os veículos pode ser calculada utilizando a equação.

$$\tau = D/v + R + L \quad (4.3)$$

com τ sendo o tempo necessário para o pedestre atravessar em segurança, D é o comprimento do espaço a ser percorrido, v é a velocidade do pedestre, R é o julgamento sobre o tempo do pedestre estimando as condições dos veículos e L é o tempo para atravessar o comprimento do veículo. Os testes mostraram que o valor médio de τ é de 4s. Assim o S_{ij}^1 pode ser calculado da seguinte maneira:

$$\text{Se } t \geq \tau \text{ então } S_{ij}^1 = 0 \text{ senão } S_{ij}^1 = 1 \quad (4.4)$$

Onde t é o tempo atual para atravessar o cruzamento.

Na situação de existir semáforo no cruzamento, mesmo quando este está verde, é possível haver conflitos entre pedestres e veículos que não respeitaram o sinal. De acordo com as regras de tráfego, pedestres tem vantagem nessa situação e o valor de τ é calculado como descrito na equação 4.3 e então reduzido em $2s$.

Suponha que um pedestre (i_0, j_0) não pode ir para frente para a posição (i, j) e $S_{1j}^1, S_{i_{max}j}^1$ de dois pedestres próximos a fronteira direita e a esquerda são conhecidos. S_{ij}^2 será calculado a seguir. Todos os valores preliminares de $S_{ij}^2 (i = 1 \dots i_{max}, j = 1 \dots j_{max})$ são iguais a 1. Logo:

- Se $S_{1j}^1 = 0$ e $S_{i_{max}j}^1 = 1$ e $S_{i_0+1j_0}^1 = 1$
- Então $S_{i_0-1j_0}^2 = 0$
- Senão se $S_{1j}^1 = 1$ e $S_{i_{max}j}^1 = 0$ e $S_{i_0-1j_0}^1 = 1$
- Então $S_{i_0+1j_0}^2 = 0$

Quando um pedestre não pode se mover para frente, a direção radial pode ser escolhida baseada no S_{ij}^2 das células perto da fronteira direita e esquerda. Além disso o estado S_{ij} das células da área sobreposta pode ser determinado por $S_{ij} = S_{ij}^1 X S_{ij}^2$.

Probabilidade Total: Uma simples probabilidade levando em conta a componente estática e a componente dinâmica é definida pela probabilidade p_{ij} na direção (i, j) por:

$$p_{ij} = N \cdot (D_{ij} \cdot G_{ij} \cdot CR_{ij}) \cdot (TL_{ij} \cdot n_{ij} \cdot S_{ij}) \quad (4.5)$$

com (i, j) sendo a posição alvo e N o fator de normalização para que $\sum_{ij} p_{ij} = 1$.

Processo de atualização: O processo de atualização dos pedestres e outros veículos é assíncrono, mas o processo de atualização entre os pedestres pode ser síncrono ou assíncrono. No modo síncrono existe a probabilidade de colisão, ou seja, significa que dois ou mais pedestres podem ocupar a mesma célula ao mesmo tempo. Para evitar tais situações procedimentos de resolução de conflitos devem ser criados.

No modo assíncrono de atualização de pedestres não existe o problema de colisão. Os pedestres são movimentados em uma ordem aleatória, mas apenas uma vez por passo da simulação.

4.3.3 Experimentos de Simulação

Um cenário de simulação de tráfego foi realizado utilizando o software *Urban Mixed Traffic Simulation and Analysis System - UMTSAS*, desenvolvido pelo *ITS Research Center of Zhejiang University* na China. O cenário de simulação foi uma rua com um cruzamento de pedestres sem semáforo como mostrado na figura 4.14. A figura 4.15 mostra a velocidade média, velocidade máxima e velocidade mínima dos pedestres versus o número de pedestres. A figura 4.16 mostra a velocidade média, máxima e mínima dos veículos versus o número de pedestres.

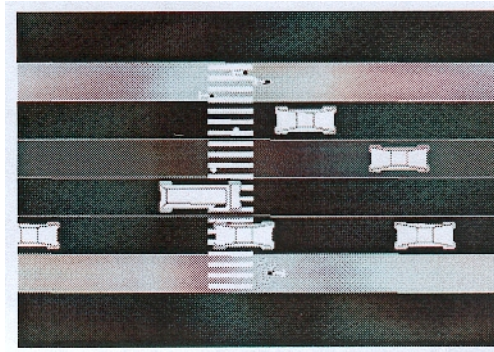


Figura 4.14: Cena da simulação, *fonte: (ZHANG; WANG; LI, 2003)*

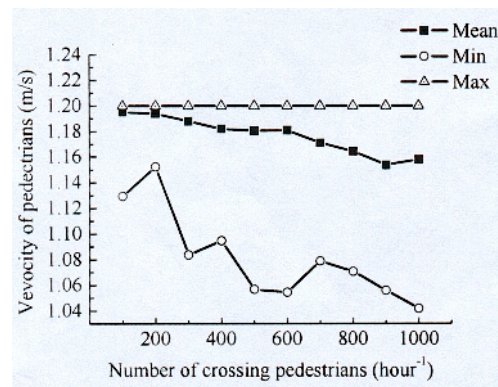


Figura 4.15: Velocidade média, máxima e mínima dos pedestres X número de pedestres, *fonte: (ZHANG; WANG; LI, 2003)*

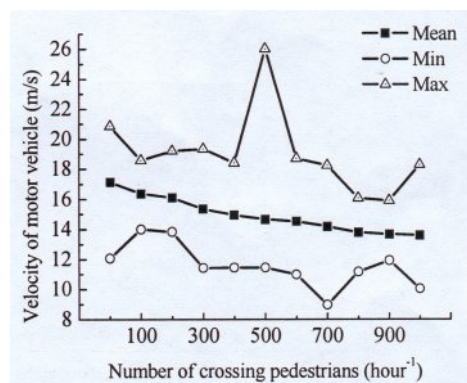


Figura 4.16: Velocidade média, máxima e mínima dos veículos X número de pedestres, *fonte: (ZHANG; WANG; LI, 2003)*

| Tamanho da Rodovia | Veículos Motorizados | Bicicletas | Pedestres |
|--|--------------------------------------|---|---|
| Rodovia bi-direcional, Comprimento: 600m, Largura 3.5m | Duas pistas para cada direção | Uma pista para cada direção | Um cruzamento |
| Um cruzamento no meio da rodovia, Comprimento: 4m | Fluxo bi-direcional: 800 por hora | Fluxo bi- direcional: 500 por hora | Fluxo bi- direcional 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 por hora |

Tabela 4.2: Parâmetros da Simulação, *fonte: (ZHANG; WANG; LI, 2003)*

O processo de atualização utilizado foi síncrono com a movimentação em uma ordem aleatória. Esse modelo simples foi escolhido, pois os conflitos existentes são apenas entre os pedestres e outros veículos, assim pode-se calcular facilmente o impacto dos pedestres no fluxo de carros. Os parâmetros da simulação são dados na tabela 4.2 e a chegada de veículos obedece a distribuição de Poisson. Todos os dados da simulação foram obtidos em 7200 segundos.

4.3.4 Análise do Modelo

As figura 4.15 e 4.16 mostram que as velocidades média dos pedestres e veículos diminuem quase linearmente com o aumento do número de pedestres. A velocidade média desse é a prevista no modelo, entretanto a velocidade mínima, a velocidade máxima e a mínima dos carros não parecem estar relacionadas ao número de pedestres.

A simulação mostrou que quando o número de pedestres excede mil por hora engarrafamentos ocorrem muito facilmente. Isso demonstra que o cruzamento, nessa situação, necessita de um semáforo.

Os resultados da simulação demonstram que o modelo representa as características do tráfego real bem qualitativamente. Entretanto os parâmetros não foram validados com dados reais, pois não foram encontrados dados a respeito da relação entre densidades de veículos e número de pedestres.

Apesar dos bons resultados obtidos com o modelo, algumas alterações e extensões poderiam ser realizadas para tornar o modelo mais completo e realista:

1. O *Efeito de grupo* poderia ser considerado. Quando se movendo em grupo o pedestre pode mudar o tempo que ele julga necessário para atravessar a rua, diminuindo de 1.5s – 2s para 1s – 1.2s. Além disso o tamanho do grupo também poderia influenciar a diminuição do tempo, quanto maior o grupo, maior a diminuição até um limiar, por exemplo.
2. O tempo de espera para o pedestre começar a atravessar a rua influencia o número de tentativas para a travessia. Quando o tempo de espera superar 40 segundos é muito provável que o pedestre assumirá o risco e tentará atravessar a estrada.
3. Existe a probabilidade de pessoas não obedecerem ao semáforo de pedestres e tentarem atravessar a rua mesmo com o sinal vermelho para pedestres.

4. As diferenças de idade, gênero, características socioeconômicas e status matrimonial podem influenciar o comportamento do pedestre.
5. O comportamento dos carros poderia ser melhor modelado. Quando um pedestre ignora o sinal vermelho para pedestres e atravessa o cruzamento ao invés do carro manter sua velocidade ele poderia diminuir.

5 SISTEMAS MULTIAGENTES

Simulações de dinâmica de pedestres são muito importantes para mostrar a relação entre comportamento de pessoas e o espaço físico. Elas permitem determinar as melhores geometrias para tornar mais eficiente o fluxo de um grande número de pessoas, como em uma estação de trem ou metrô, bem como, determinar a melhor geometria do ponto de vista do conforto dos pedestres.

Entretanto, na maioria dos modelos os pedestres são modelados de maneira uniforme e as suas diferentes características não são representadas. Os modelos baseados em sistemas multiagentes permitem o uso de parâmetros para simular os atributos individuais dos pedestres que permitem simular padrões individuais de comportamento.

5.1 Modelo de Comportamento de Pedestres

Na pesquisa de Toshihiro Osaragi, (OSARAGI, 2004), os pedestres possuem uma *área pessoal (personal space)*, atributos individuais e estão submetidos a um estresse mental quando outras pessoas ou objetos invadem essa *área pessoal*.

Dessa forma os pedestres são simulados de maneira que seu comportamento é individual e leva a diminuição desse estresse mental. Além disso, dados empíricos observados da dinâmica de pedestres foram utilizados para estimar os parâmetros do modelo, tornando o modelo mais realista e o comportamento de cada pedestre distinto.

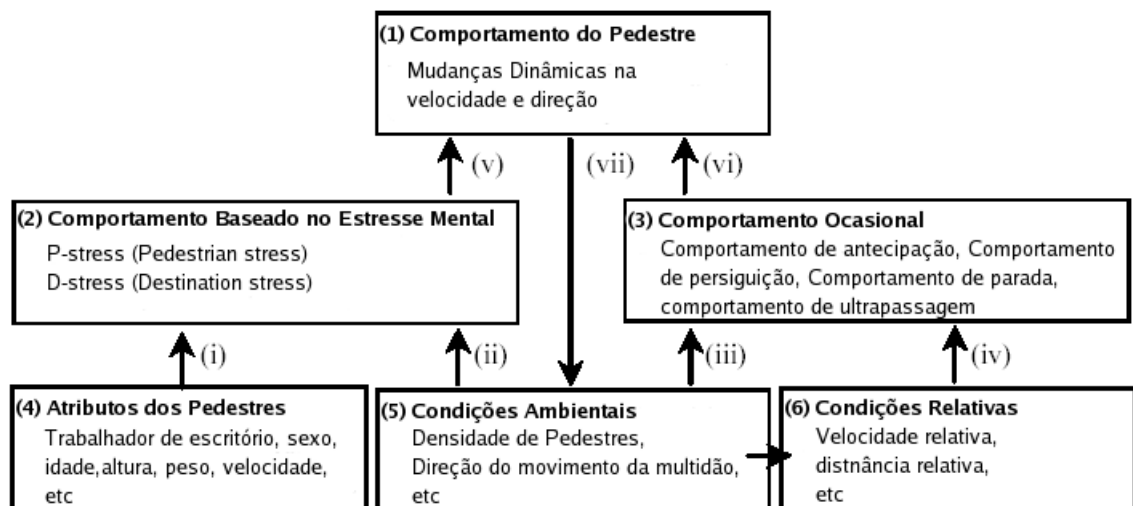
5.1.1 Modelo

O conceito desse modelo é mostrado na figura 5.1. Como se pode observar, o comportamento do pedestre é determinado com base no seu estresse mental e em condições ambientais. Por sua vez, o estresse mental que os pedestres recebem devido ao caminho percorrido é descrito por seus atributos e condições ambientais. O comportamento do pedestre é determinado pelas condições da multidão dentro da *área pessoal* do pedestre e o conjunto dos comportamentos individuais constitui o estado da multidão, o qual afeta o comportamento individual. Portanto o comportamento do pedestre é descrito recursivamente.

5.1.2 Regras do Modelo

O modelo possui regras para definição do estresse mental e para simular comportamentos de pedestres tais como: *comportamento de perseguição*, *comportamento de parada*, *comportamento de antecipação* e *comportamento de ultrapassagem*. Além desse comportamentos as seguintes regras do modelo são descritas a seguir.

Definição de Estresse: Pedestres recebem um tipo de estresse mental de outros pedestres



Exemplos de (i) - (vii)

- (i) Pessoas idosas recebem menos estresse que outras pessoas.
- (ii) O nível de estresse é dependente da densidade de pessoas.
- (iii) Pedestres perseguem outros pedestres no caso de alta densidade.
- (iv) Pedestres ultrapassam outros pedestres.
- (v) Pedestres se movimentam para lugares aonde o estresse é mínimo.
- (vi) Pedestres antecipam ações para caminharem eficientemente.
- (vii) O estado da multidão é determinado pelo comportamento de cada pedestre individualmente.

Figura 5.1: Conceito do modelo, fonte: (OSARAGI, 2004)

enquanto caminham. Esse tipo de estresse é chamado *P-stress* (*pedestrian stress*). Além disso, cada pedestre tem um destino. Se a pessoa não consegue ir pelo menor caminho até seu destino ela recebe um outro tipo de estresse chamado *D-stress* (*destination stress*). O estresse mental utilizado no modelo é composto pelo *P-stress* e o *D-stress* e os pedestres se movem para posições aonde seu estresse é minimizado, como mostra a figura 5.2.

Funções de Estresse: Uma função adequada é necessária para expressar o estresse mental. As quatro combinações de *P-stress* + *D-stress* foram examinadas, como mostra a figura 5.3:

1. Função exponencial + Função de potência
2. Função de potência + Função de potência
3. Função exponencial + Função exponencial
4. Função de potência + Função exponencial

A função de *P-stress* deve ser monótona e decrescente, com o valor máximo localizado na posição do outro pedestre, como pode ser visto na figura 5.3(a).

Alguns pedestres raramente recebem *D-Stress*, mesmo se obrigados a desviar muito da sua direção ótima. Entretanto, outros pedestres recebem um estresse muito grande, mesmo se obrigados a fazer pequenos desvios. Essas características são representadas pelos parâmetros α_1 , α_2 , γ , β_1 e β_2 da função de *D-stress* como pode ser visto na figura 5.3(b).

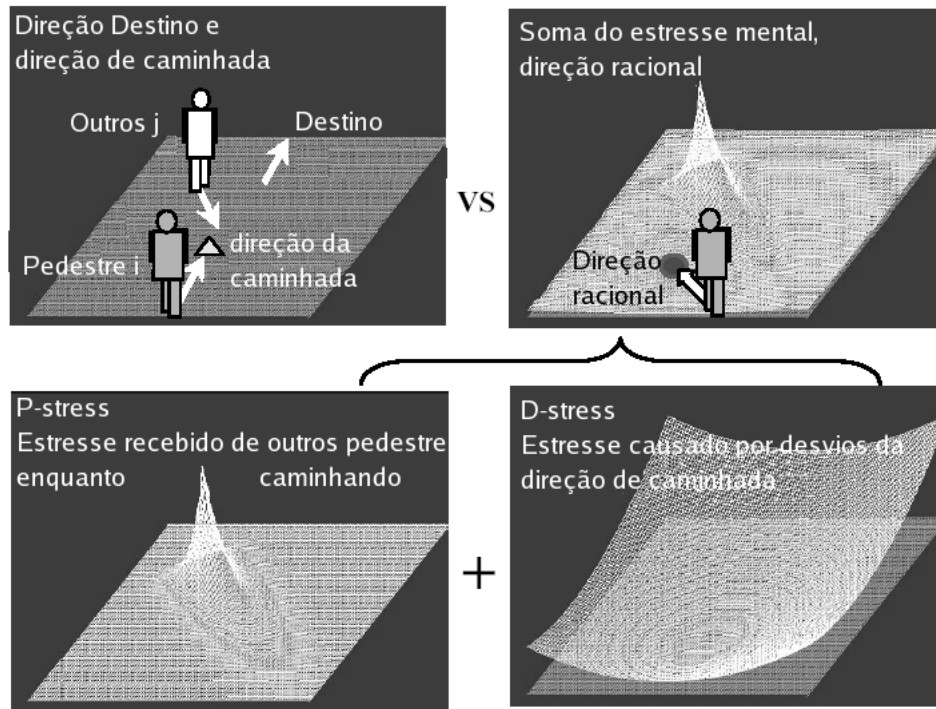


Figura 5.2: Comportamento do pedestre baseado no estresse mental, *fonte: (OSARAGI, 2004)*

Information space e walkable domain: Apesar dos pedestres estarem conscientes da presença de muitos outros pedestres enquanto estão andando, eles não prestam atenção para todas essas pessoas. Introduziu-se o conceito de *information space* para simular esse conceito. Assume-se que o pedestre recebe *P-stress* apenas de pedestres dentro de seu *information space* como pode ser visto na figura 5.4. Além disso, introduziu-se o conceito de *walkable domain*, que é a região aonde o pedestre pode realizar seu próximo movimento.

Através de observações do comportamento de pedestres estabeleceu-se que a dinâmica de pedestres não pode ser descrita apenas nos termos de estresse anteriores. Outros comportamentos foram incluídos no modelos, e são descritos a seguir, para que o modelo obtivesse resultados mais realistas.

Comportamento de Perseguição: Conforme a densidade de pedestres aumenta, uma pessoa persegue conscientemente outra pessoa na sua frente que esta andando na mesma direção. Esse comportamento é modelado como um *comportamento de perseguição* e é executado sob as seguintes condições:

1. Dois ou mais pedestres estão dentro de um domínio delimitado pela figura 5.5
2. Há pedestres na frente de um dado pedestre **P** andando na mesma direção de **P** dentro da região delimitada como mostra a figura 5.5.

Comportamento de Parada: Em grandes multidões, as vezes os pedestres param para evitar uma colisão com outro pedestre passando à sua frente. Como qualquer movimentação menor que 30cm não é observável no modelo (devido ao tempo de iteração de 0.3 segundos), esse espaço de 30X30cm² é definido como *intervalo de*

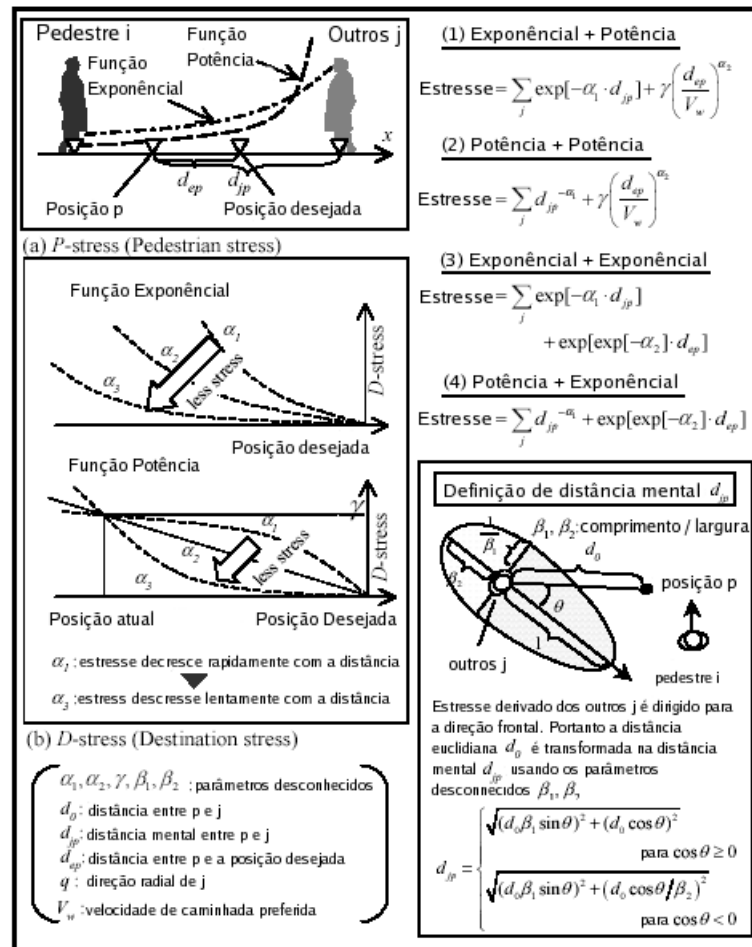


Figura 5.3: Variações das funções de estresse, fonte: (OSARAGI, 2004)

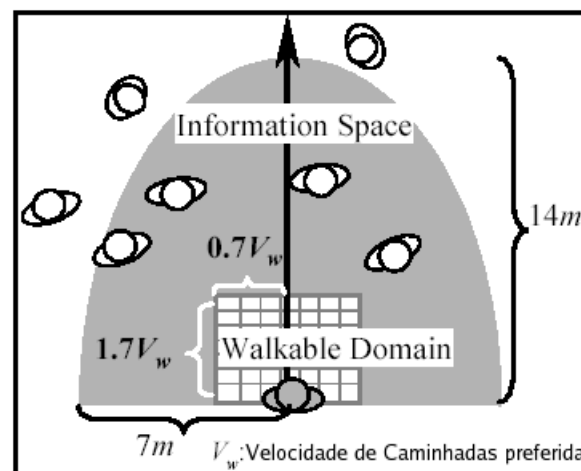


Figura 5.4: Information space e walkable domain, fonte: (OSARAGI, 2004)

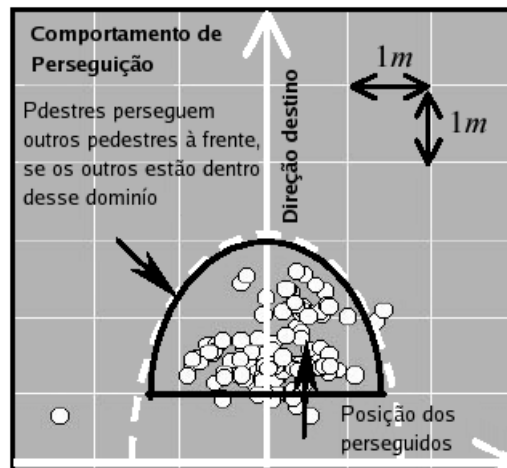


Figura 5.5: Condições para o comportamento de perseguição, *fonte: (OSARAGI, 2004)*

parada. Ou seja, se a próxima posição aonde o estresse é mínimo para o pedestre esta dentro do *intervalo de parada* é assumido que a pessoa adota o *comportamento de parada* e não se movimenta.

Comportamento de Antecipação: Para chegar de maneira eficiente no destino os pedestres estão sempre antecipando os próximos movimentos. Isso ocorre porque evitar outras pessoas e obstáculos influencia diretamente na eficiência da caminhada. Portanto o *comportamento de antecipação* é considerado no modelo e explicado na figura 5.6.

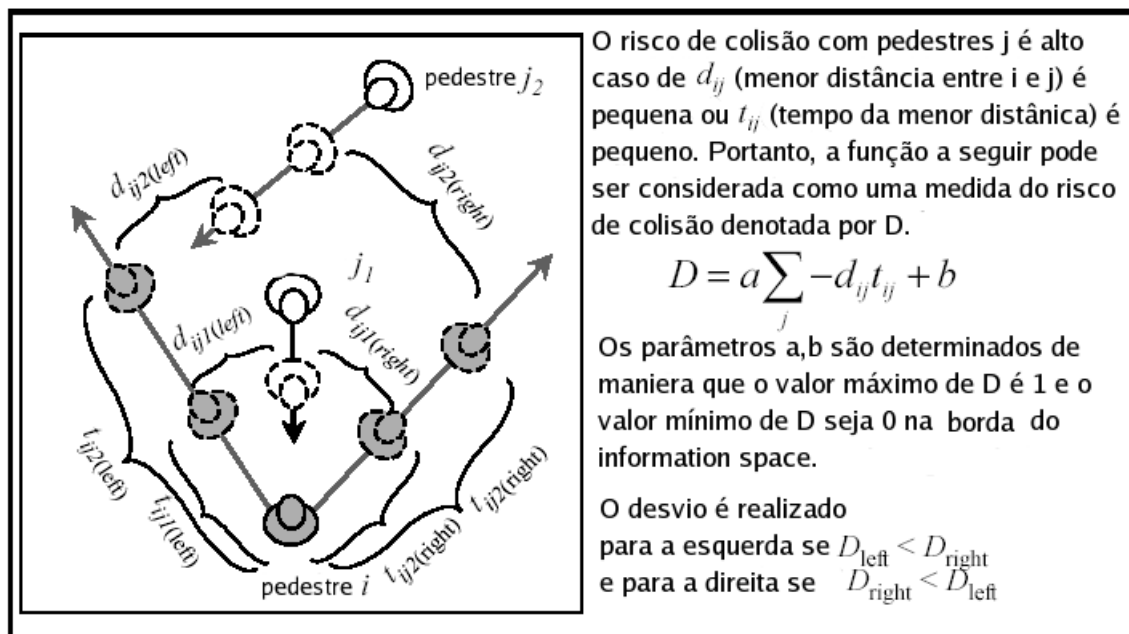


Figura 5.6: Risco de colisão e Comportamento de antecipação, *fonte: (OSARAGI, 2004)*

Comportamento de Ultrapassagem: Algumas vezes, pedestres ultrapassam as pessoas que estão na frente delas. Esse comportamento é chamado *comportamento de ultrapassagem* e ocorre nas condições explicadas da figura 5.7. O incremento na

velocidade é assumido como sendo $0.3m/s$ baseado em dados empíricos e o *comportamento de ultrapassagem* termina quando o pedestre passa do lado do pedestre a ser ultrapassado.

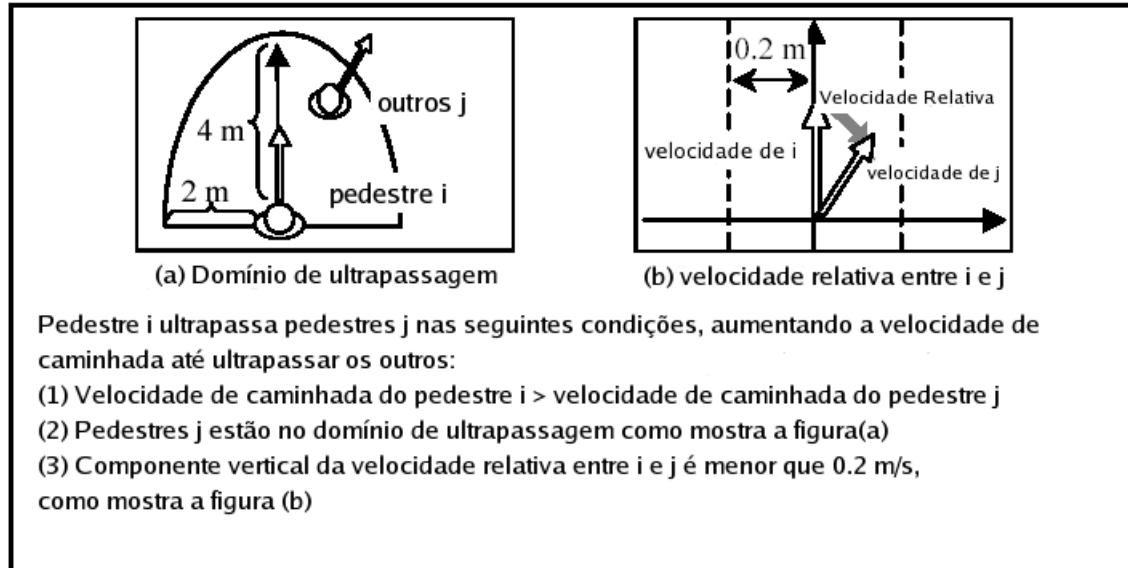


Figura 5.7: Condições para comportamento de ultrapassagem, *fonte: (OSARAGI, 2004)*

A validação e a calibração do modelo com dados empíricos são etapas importantes no processo de avaliação do modelo. A seguir, os processos de calibração, generalização e verificação da adequação do modelo são descritos.

Obtenção de dados reais da dinâmica de pedestres: A calibração dos parâmetros do modelo é realizada com dados reais. O comportamento dos pedestres é observado utilizando uma câmera de vídeo em uma estação de trem. As posições dos pedestres são determinadas, transformando a posição das cabeças do pedestre em coordenadas planares Y-X, como pode ser visto na figura 5.8. O erro obtido utilizando-se esse método é de aproximadamente mais ou menos $10cm$ na posição vertical e mais ou menos $5cm$ na posição horizontal.

Estimativa dos parâmetros da Função de Estresse: Os parâmetros desconhecidos da função de estresse α_1 , α_2 , γ , β_1 e β_2 são estimados assumindo-se que o estresse é mínimo nas posições das trajetórias reais dos pedestres e o grau de conformidade do modelo com os dados reais é medido através da distância entre as posições reais e as posições estimadas pelo modelo (*gap*). Os parâmetros são estimados utilizando o método do gradiente. Dessa forma o erro quadrado das distâncias entre as posições reais e as posições estimadas é minimizado e o tamanho da amostra é 40. A tabela 5.1 mostra os resultados obtidos para as 4 funções de estresse. Observe que a distância entre a posição real dos pedestres e a posição estimada pelo modelo (*gap*) está dentro de um intervalo de $10cm$.

Distância Crítica: Através da descrição algébrica das posições onde a função de estresse é mínima, é possível obter uma *distância crítica* entre o pedestre *i* e os outros pedestres *j*, como pode ser visto na figura 5.9. Isso representa a distância mais próxima

| Exponencial+Potência | | | | | | | |
|--------------------------------|------------|------------|----------|-----------|-----------|--------------|----------|
| N° Pedestres | α_1 | α_2 | γ | β_1 | β_2 | Obs: (m) | gap |
| 1 | 9.5 | 3.5 | 5.4 | 4.7 | 0.5 | 11.5 | 0.115 |
| 2 | 15.5 | 1.4 | 11.7 | 3.6 | 2.4 | 13.5 | 0.094 |
| 3 | 4.5 | 2.4 | 7.9 | 4.7 | 1.3 | 6.7 | 0.109 |
| \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots |
| 40 | 14.0 | 2.3 | 16.5 | 0.7 | 2.3 | 18.6 | 0.094 |
| | | | | | | Média | 0.114 |
| Potência+Potência | | | | | | | |
| N° Pedestres | α_1 | α_2 | γ | β_1 | β_2 | Obs: (m) | gap |
| 1 | 25.5 | 12.5 | 2.8 | 3.0 | 0.8 | 11.5 | 0.112 |
| 2 | 20.5 | 13.5 | 3.8 | 8.5 | 0.4 | 13.5 | 0.093 |
| 3 | 13.0 | 8.5 | 1.5 | 10.8 | 0.8 | 6.7 | 0.111 |
| \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots |
| 40 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.5 | 0.2 | 18.6 | 0.105 |
| | | | | | | Média | 0.115 |
| Exponencial+Exponencial | | | | | | | |
| N° Pedestres | α_1 | α_2 | | β_1 | β_2 | Obs: (m) | gap |
| 1 | 10.2 | 74.5 | | 9.3 | 0.5 | 11.5 | 0.110 |
| 2 | 14.4 | 41.2 | | 220.0 | 1.5 | 13.5 | 0.094 |
| 3 | 12.4 | 67.0 | | 11.0 | 1.5 | 6.7 | 0.107 |
| \vdots | \vdots | \vdots | | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots |
| 40 | 13.5 | 48.6 | | 24.0 | 1.6 | 18.6 | 0.099 |
| | | | | | | Média | 0.117 |
| Potência+Exponencial | | | | | | | |
| N° Pedestres | α_1 | α_2 | | β_1 | β_2 | Obs: (m) | gap |
| 1 | 8.5 | 1.0 | | 3.2 | 0.8 | 11.5 | 0.108 |
| 2 | 1.0 | 1.0 | | 5.0 | 0.5 | 13.5 | 0.095 |
| 3 | 1.5 | 0.8 | | 7.5 | 1.4 | 6.7 | 0.106 |
| \vdots | \vdots | \vdots | | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots |
| 40 | 21.0 | 1.0 | | 20.0 | 1.6 | 18.6 | 0.099 |
| | | | | | | Média | 0.117 |

Tabela 5.1: Parâmetros estimados para a função de estresse, *fonte: (OSARAGI, 2004)*

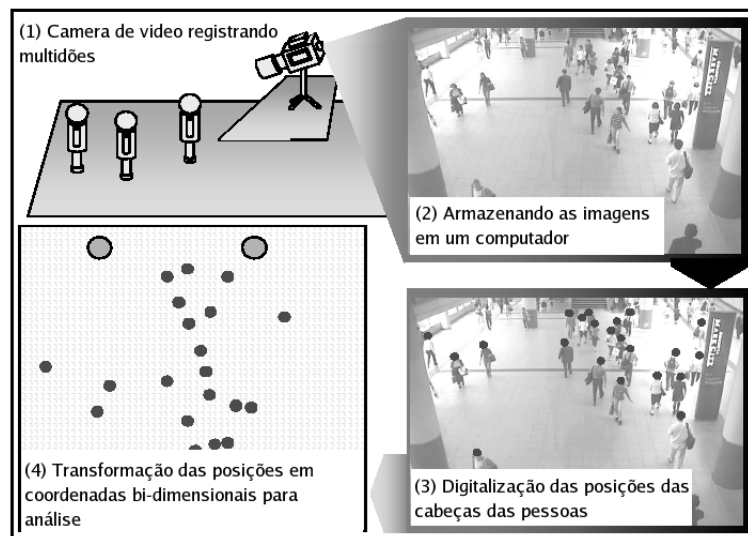


Figura 5.8: Observação de Pedestres, *fonte: (OSARAGI, 2004)*

que o pedestre i pode chegar dos outros pedestres. Logo essa *distância crítica* indica o tamanho da *área pessoal*.

O fato da *área pessoal* ser incorporado no modelo *Função exponencial + Função exponencial* mostra a superioridade desse modelo sobre os outros três. O tamanho da *área pessoal* é determinado pelos valores dos parâmetros α_1 , α_2 , β_1 e β_2 utilizados.

Comportamentos dependentes dos atributos dos pedestres: A estimativa dos outros parâmetros das funções de estresse é realizada analisando-se a relação entre as condições ambientais, os atributos dos pedestres e os parâmetros. Os seguintes atributos dos pedestres foram analisados: sexo, profissão (se o pedestre é um trabalhador de escritório ou não), se a pessoa está andando em um grupo ou não, idade presumida, altura e velocidade média do pedestre. Para as condições ambientais as características densidade de pedestres e a velocidade relativa do fluxo de pedestre foram examinados, como pode ser visto na figura 5.10.

Inicialmente as características do parâmetro α_1 são examinadas e, como pode ser visto na figura 5.11(a), a maior correlação do parâmetro α_1 é com a densidade de pedestres no *information space*. O valor de α_1 é maior quando a densidade de pedestres é alta e se o valor de α_1 é alto o estresse decresce rapidamente com a distância tornando a influência de pedestres distantes pequena, como pode ser visto na figura 5.3. Em outras palavras, o estresse recebido de pedestres distantes se torna pequeno conforme aumenta a densidade de pedestres, ou seja, cada pedestre presta atenção apenas nos pedestres de sua vizinhança. Esses resultados estão de acordo com observações experimentais.

Através da análise de α_1 e dos atributos de cada pedestre percebeu-se que pedestres homens prestam mais atenção em pessoas distantes que mulheres e que, além disso, trabalhadores de escritório prestam atenção em pessoas distantes mais do que pessoas que não trabalham em escritório.

Considerando-se que a *distância crítica* pode ser aproximadamente descrita por α_2/α_1 , como pode se visto na figura 5.9 e 5.11(b), a relação entre α_2/α_1 e os

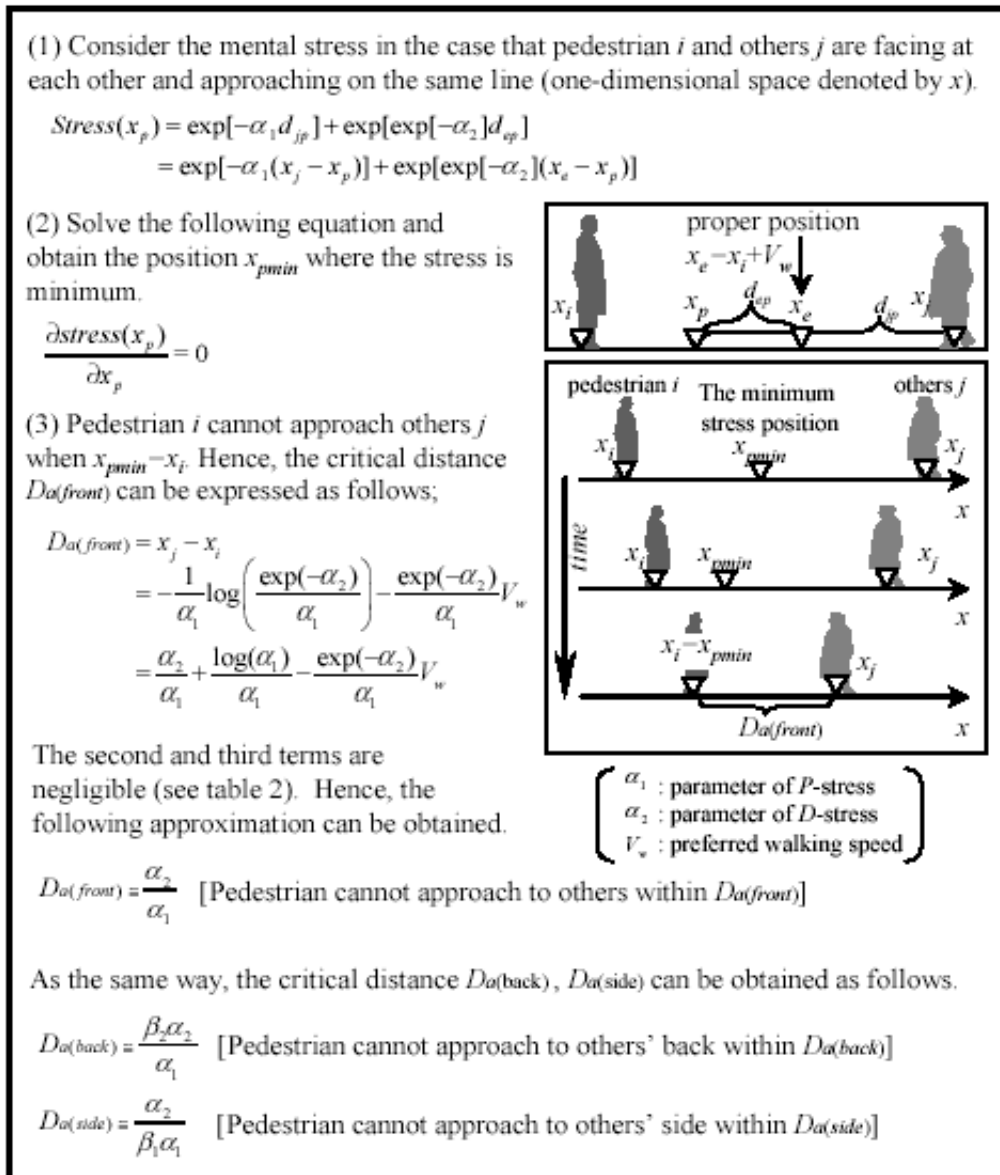


Figura 5.9: Relação entre a distância crítica e os parâmetros, *fonte: (OSARAGI, 2004)*

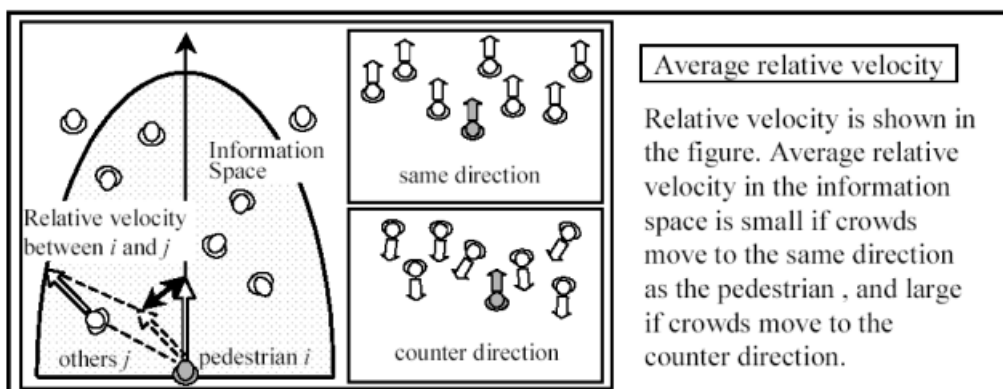


Figura 5.10: Velocidade Relativa do Fluxo de pedestre, *fonte: (OSARAGI, 2004)*

atributos dos pedestres é analisada. A *distância crítica* se torna menor conforme a densidade aumenta, especialmente no caso de pessoas idosas. Isso significa que o *comportamento de antecipação* não ocorre em condições de alta densidade, a não ser que o pedestre se aproxime muito. Esse fenômeno é mais visível em pessoas idosas do que em qualquer outro tipo de pessoa.

A velocidade relativa média expressa a direção e a velocidade das multidões. Se a multidão esta se movimentando na mesma direção do pedestre, a magnitude da velocidade relativa média é pequena. Se a multidão esta se movimentando em uma direção contrária, a magnitude da velocidade relativa média é grande. A figura 5.11(b) mostra que pedestres utilizam o *comportamento de antecipação* um pouco antes se a multidão esta se movimentando em direção contrária e se a magnitude da velocidade relativa média é alta.

Generalização do modelo: Análise de regressão linear é aplicada para explicar os valores estimados dos parâmetros em relação aos atributos dos pedestres e as condições ambientais. Os resultados são demonstrados na tabela 5.2.

| (1) α_1 | | R = 0.775 | |
|---|---------------|-----------------------|---------|
| Variáveis | Coefficientes | Coefficientes Padrões | t-value |
| Trabalhador de escritório | -0.2851 | -0.272 | 2.8929 |
| Densidade | 1.0700 | 0.8447 | 9.0427 |
| Constante | -1.0886 | | 0.7191 |
| (2) Da(font) α_2/α_1 | | R = 0.694 | |
| Variáveis | Coefficientes | Coefficientes Padrões | t-value |
| Velocidade relativa média | 1.7467 | 0.4115 | 2.8929 |
| Idade | -0.0259 | -0.1674 | 1.5746 |
| Trabalhador de escritório | -0.0259 | -0.1674 | 1.5746 |
| Densidade | -0.0967 | -0.3451 | 2.7806 |
| Masculino | 0.0108 | 0.0466 | 0.3231 |
| Constante | 1.6479 | | 1.4374 |
| (3) Da(side) $\alpha_1/\beta_1\alpha_1$ | | R = 0.590 | |
| Variáveis | Coefficientes | Coefficientes Padrões | t-value |
| Velocidade | 0.1338 | 0.2251 | 1.9028 |
| Idade | -0.0020 | -0.1727 | 1.4826 |
| Altura | 0.3479 | 0.3540 | 2.7458 |
| Densidade | -0.0089 | -0.4220 | 3.1962 |
| Constante | -0.3571 | | 1.9164 |
| (4) Da(back) $\beta_2\alpha_2/\alpha_1$ | | R=0.660 | |
| Variáveis | Coefficientes | Coefficientes Padrões | t-value |
| Trabalhador de escritório | -0.0687 | -0.2877 | 2.4989 |
| velocidade relativa média | 1.3758 | 0.3231 | 2.9961 |
| Densidade | -0.1034 | -0.3677 | 3.1454 |
| Constante | 1.5362 | | 1.4525 |

Tabela 5.2: Generalização do Modelo, *fonte: (OSARAGI, 2004)*

A seguinte equação de regressão linear é obtida para α_1 .

$$\alpha_1 = (-0.2851[\text{Trabalhador de escritório}] + 1.0700[\text{Densidade}] - 1.0885) \quad (5.1)$$

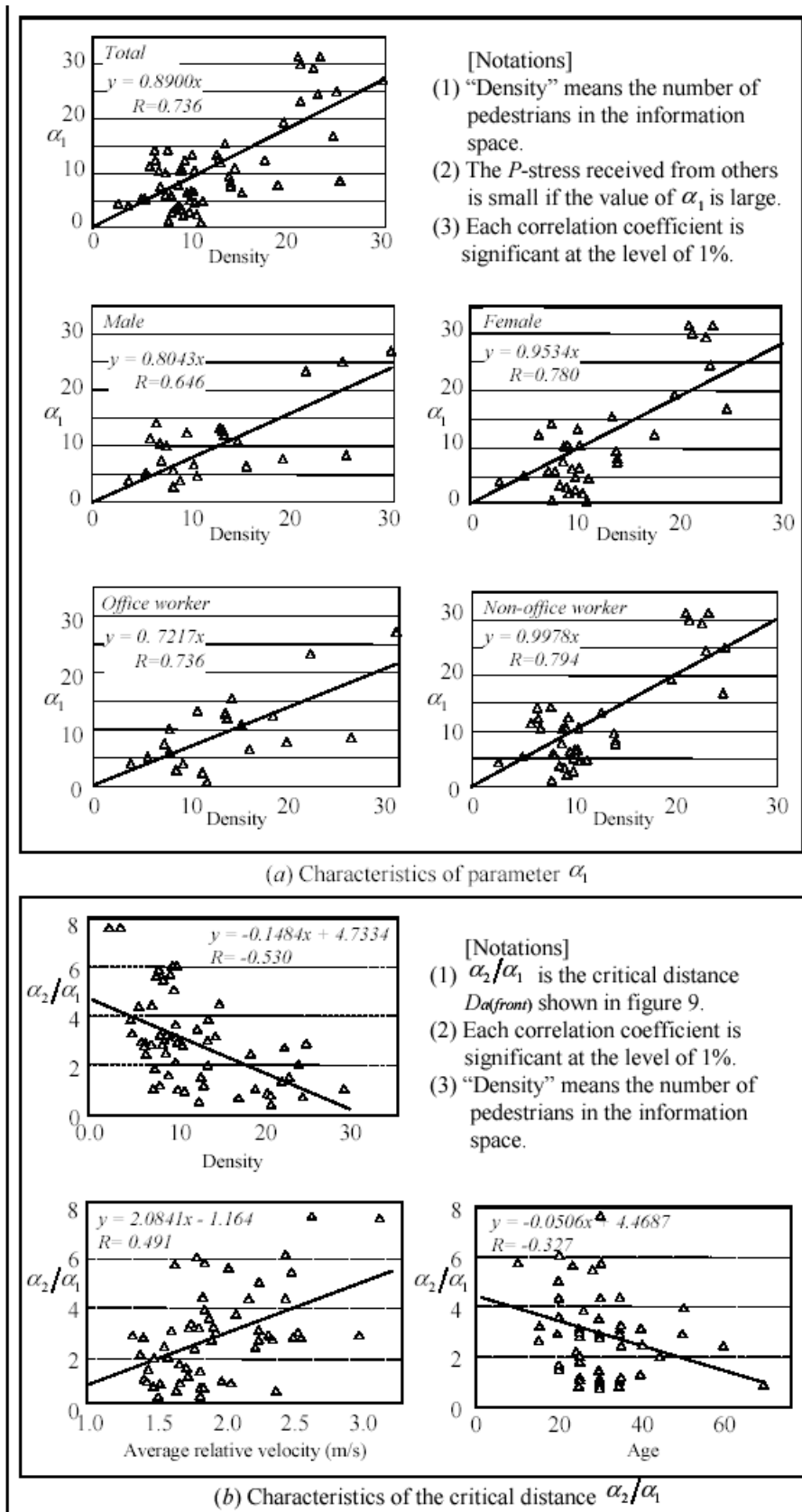


Figura 5.11: Atributos e comportamento dos pedestres, fonte: (OSARAGI, 2004)

com *[Trabalhador de escritório]* sendo uma variável que expressa se o pedestre trabalha no escritório ou não. Os coeficientes estimados mostram que quando a densidade é alta o estresse atribuído a pessoas na vizinhança torna-se dominante. Além disso, torna-se obvio que os trabalhadores de escritório prestam mais atenção a pessoas distantes já que o coeficiente de *[Trabalhador de escritório]* se torna negativo.

A seguir, a análise de regressão linear é aplicada para a combinação de α_1 , α_2 , β_1 e β_2 , como pode ser visto na tabela 5.2.

Inicialmente, a regressão linear do modelo descrevendo a *distância crítica frontal* $Da(font)$ é obtida:

$$Da(font) = \alpha_2/\alpha_1 = (0.01084[Masculino] - 0.0441[Trabalhador de escritório] - 0.09670)[Densidade] + 1.7848[Velocidade relativa média] - 0.02664[Idade] \quad (5.2)$$

com *[Masculino]* representando se o pedestre é do sexo masculino ou não.

Os coeficientes positivos grandes tornam a *distância crítica* maior, ou seja, fazem com que o pedestre realize o *comportamento de antecipação* mais cedo. Por exemplo, se a magnitude da velocidade relativa média aumenta, ou a densidade dentro do *information space* diminui, o *comportamento de antecipação* é executado mais cedo.

Similarmente, modelos lineares descrevendo os parâmetros β_1 e β_2 são construídos utilizando modelos de regressão linear que expressam a *distância crítica lateral* $Da(side)$ e a *distância crítica posterior* $Da(back)$ como a seguir:

$$\beta_1 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} (-0.0089[Densidade] - 0.002[Idade] + 0.3470[Altura] + 0.1338[Velocidade preferencial de caminhada] - 0.3571)^{-1} \quad (5.3)$$

$$\beta_2 = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \{ (-0.06869[Trabalhador de escritório] - 0.1034)[Densidade] + 1.3758[Velocidade relativa média] + 1.5362 \} \quad (5.4)$$

Validação da adequação do modelo: A distância entre as trajetórias reais e as trajetórias estimadas (*gap*) é utilizada para verificar a adequação do modelo. Os resultados mostram que o *gap* é relativamente pequeno (menor do que 11 cm). O *gap* médio (tabela 5.1) é o resultado da utilização de diferentes parâmetros para pedestres individuais. Portanto, apesar do modelo ser aperfeiçoado do ponto de vista de se tornar mais geral modelando pedestres individualmente e com características diferentes, suas qualidades descritivas são mantidas.

A seguir, a adequação do modelo é estudada comparando as trajetórias reais com as trajetórias estimadas. Por simplicidade, as trajetórias de um único pedestres são extraídos de uma multidão, como pode ser visto na figura 5.12. A figura 5.12(a) mostra a diferença entre a direção modelada e a direção real. A figura 5.12(b) mostra a distância entre as posições reais e as estimadas (*gap*).

Algumas vezes as trajetórias estimadas diferem claramente das trajetórias reais, como pode ser visto na figura 5.12 no exemplo 2. O pedestre do modelo evita as

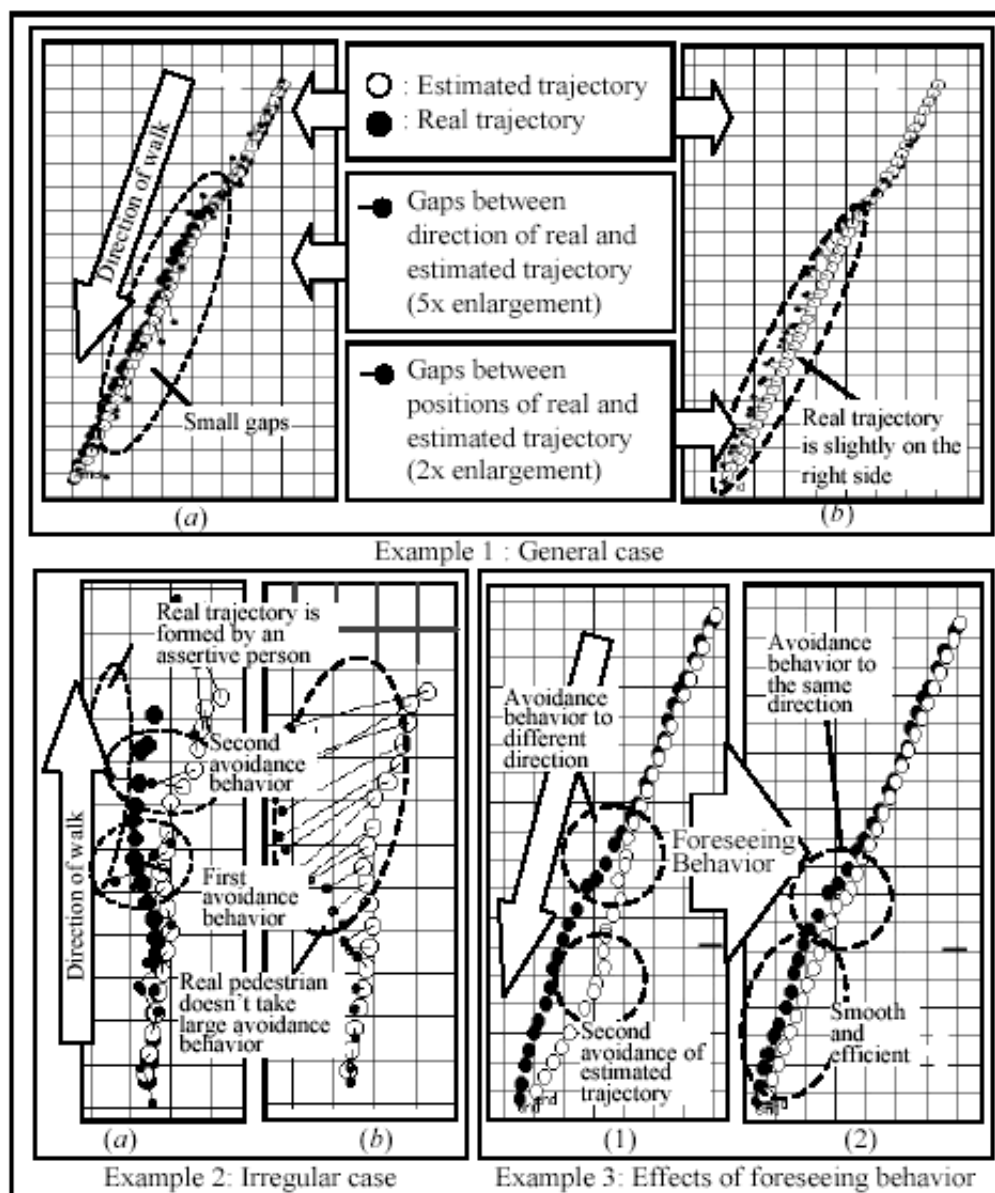


Figura 5.12: Verificação do Modelo, *fonte: (OSARAGI, 2004)*

pessoas a sua frente enquanto mantém uma distância adequada. Por outro lado, a pessoa real vai diretamente até seu destino.

Apesar de haver irregularidades, a adequação do modelo é geralmente boa como pode ser visto na figura 5.12 no exemplo 1. O efeito do *comportamento de antecipação* é mostrado na figura 5.12 no exemplo 3. No caso (1), sem o *comportamento de antecipação*, a eficiência da caminhada é baixa, já que o pedestre apenas evita os outros na direção contrária e tem que evitar uma segunda pessoa indo na mesma direção. No caso 2, entretanto, que inclui o *comportamento de antecipação*, o pedestre evita outros na mesma direção e caminha mais suavemente. Então pode-se perceber claramente que o *comportamento de antecipação* é importante para descrever a dinâmica de pedestres.

5.1.3 Experimentos de Simulação

Um pequeno grupo de pedestres, como definido na figura 5.13, é formado frequentemente quando a densidade de pedestres é alta. O aparecimento e desaparecimento repetidas vezes desse grupos é uma característica importante da dinâmica de pedestres e esse é um fenômeno reproduzido nas simulações desse modelo. Para analisar a influência da densidade no fluxo de pedestres o espaço mostrado na figura 5.14 é analisado.

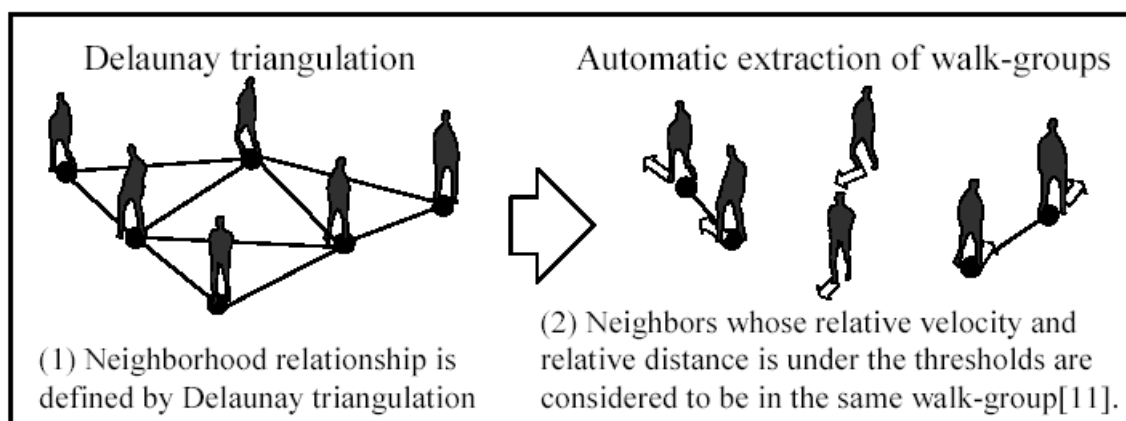


Figura 5.13: Extração de grupos de multidões, *fonte: (OSARAGI, 2004)*

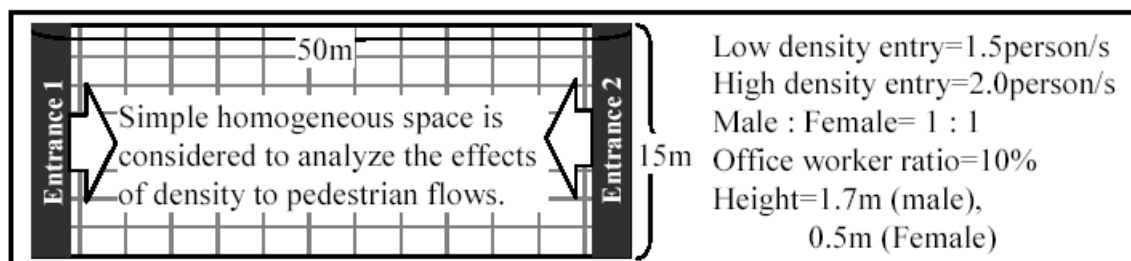


Figura 5.14: Condições utilizadas na simulação, *fonte: (OSARAGI, 2004)*

Alguns resultados da simulação são apresentados na figura 5.15. Os pedestres conectados por linhas indicam grupos e é possível perceber que os grupos se tornam maiores conforme a densidade aumenta.

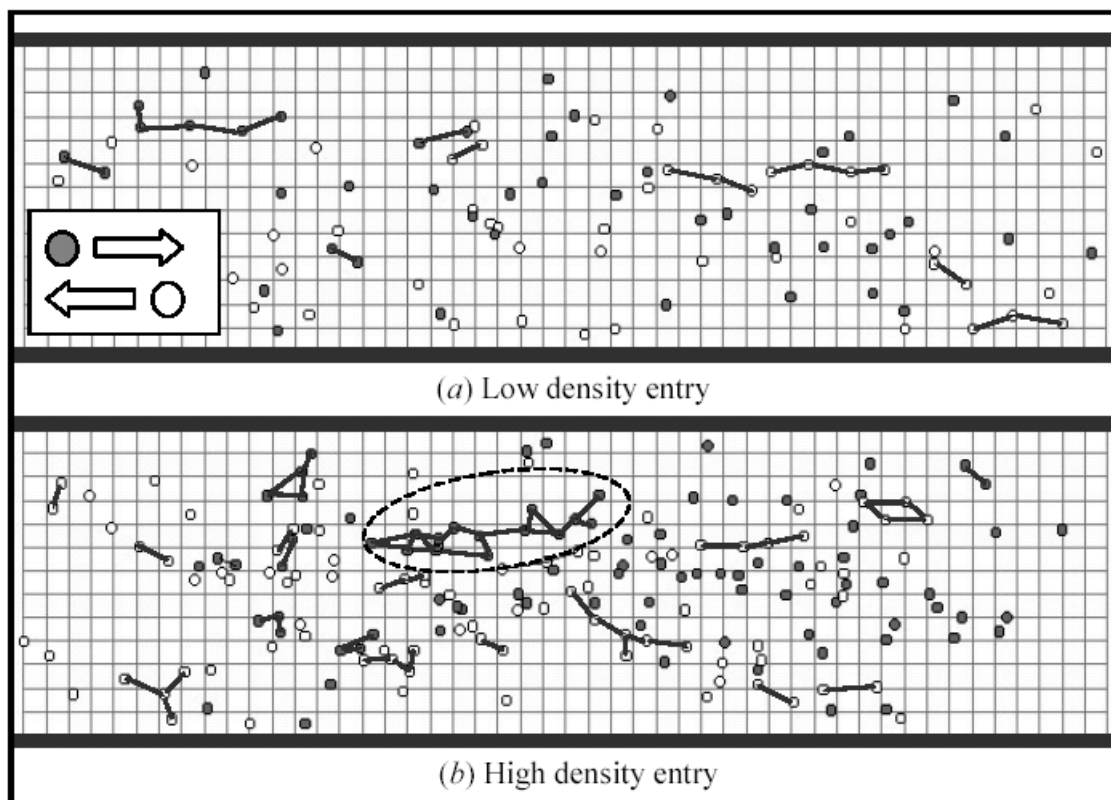


Figura 5.15: Efeitos da densidade nos grupos de pedestres, *fonte: (OSARAGI, 2004)*

Posteriormente, simulações para cada atributo forma realizadas com uma alta densidade por 100 passos de simulação (aproximadamente 30 segundos do tempo real de caminhada) e o número médio de pedestres formando grupos em cada passo de simulação foi contabilizado. A figura 5.16 mostra os resultados da simulação para mulheres e pessoas idosas. No caso de mulheres, grupos grandes e longos foram formados. Por outro lado, no caso de pessoas idosas grupos pequenos foram formados.

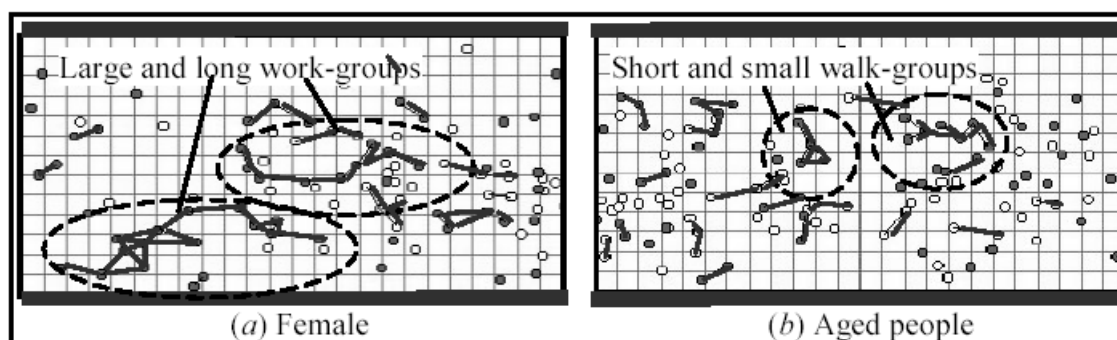


Figura 5.16: Atributos de pedestres e grupos, *fonte: (OSARAGI, 2004)*

5.1.4 Análise do Modelo

Nesse modelo, o comportamento do pedestre é baseado no conceito de estresse mental (*P-stress* e *D-stress*) que as pessoas recebem enquanto caminham. Outros comportamentos ocasionais baseados nas condições ambientais são considerados e incluídos no

modelo. Os parâmetros desconhecidos são estimados baseados nos dados observados e a relação entre as características dos pedestres e as condições ambientais são discutidas. Verificação do modelo é realizada comparando as trajetórias reais com as trajetórias estimadas pelo modelo. Além disso, é demonstrado que a formação de grupos na multidão é representada no modelo, que foi construído para simular o comportamento individual. O modelo proposto pode ser utilizado para obter informações básicas necessárias para o *design* efetivo da área de pedestres. É interessante notar que devido a abordagem, o modelo se torna melhor para analisar os ambientes dos pedestres com relação ao conforto das pessoas do que em relação ao fluxo de pessoas.

6 COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS E CONCLUSÃO

Nesse trabalho, estudou-se três classes de modelos: Modelos Contínuos, Autômatos Celulares e Sistemas Multiagentes. Cada um representa fenômenos importantes da dinâmica de pedestres. Entretanto cada modelo têm suas próprias características, vantagens e desvantagens.

Como as abordagens utilizadas por cada classe de modelo são bastante diversas e com o fim de realizar uma análise comparativa entre os diferentes modelos, um conjunto de características relevantes da dinâmica de pedestres e para a criação de um simulador foi determinado. Cada seção a seguir analisa uma dessas características para cada um dos modelos.

6.1 Dinâmica de Pedestres

Nessa característica analisou-se quais pontos relevantes da dinâmica de pedestres cada modelo consegue representar, especialmente se o modelo é capaz de simular e representar filas e cruzamentos de pedestres, bem como efeitos repulsivos e atrativos.

No Modelo de Autômato Celular para Dinâmica de Pedestres atravessando um cruzamento (ZHANG; WANG; LI, 2003) a formação de filas e cruzamentos não são padrões observáveis, nem um objetivo da simulação, logo essas características não são aplicáveis para análise desse modelo.

A tabela 6.1 sumariza a comparação entre os modelos pelas características relevantes da dinâmica de pedestres.

1. O Modelo de Forças Sociais (HELBING; MOLNÁR, 1995)
2. O Modelo de Comportamento de Pedestres (OSARAGI, 2004)
3. O Modelo de Autômato Celular para o Comportamento Coletivo Bi-Direcional Emergente da Dinâmica de Pedestres (ADLER; BLUE, 2000)
4. Modelo de Autômato Celular Estocástico para Simulação de Dinâmica de Pedestres (SCHADSCHNEIDER, 2002), (BURSTEDDE et al., 2002)
5. Modelo de Autômato Celular para Dinâmica de Pedestres atravessando um cruzamento (ZHANG; WANG; LI, 2003)

| Modelo | Efeitos atrativos | Efeitos Repulsivos | Filas | Cruzamento |
|--------|-------------------|--------------------|---------------|---------------|
| 1 | Sim | Sim | Sim | Sim |
| 2 | Sim | Sim | Sim | X |
| 3 | Sim | Não | Sim | X |
| 4 | Sim | Não | Sim | X |
| 5 | Sim | Sim | Não aplicável | Não aplicável |

Tabela 6.1: Dinâmica de Pedestres, aonde X - indica que não há dados suficientes para realizar uma afirmação a respeito.

6.1.1 Efeitos Atrativos e Efeitos Repulsivos

Forças e efeitos atrativos e repulsivos são muito importantes para a simulação da dinâmica de pedestres. Os padrões espaço-temporais da dinâmica de pedestres surgem devido a interações não lineares entre pedestres causados por forças atrativas e repulsivas.

O Modelo de Forças Sociais (HELBING; MOLNÁR, 1995) possui efeitos atrativos e repulsivos. As forças de atração surgem devido ao destino do pedestre é além disso quando ele é atraído por outra pessoa ou objeto. As forças de repulsão ocorrem pois o pedestre mantém uma certa distância dos outros pedestres e objetos para evitar colisões. Essa força repulsiva no modelo de forças sociais depende da densidade de pedestres e da velocidade que o pedestre deseja manter durante a caminhada.

O Modelo de Comportamento de Pedestres (OSARAGI, 2004) baseado em sistemas multiagentes consideram forças repulsivas e atrativas. O efeito atrativo é representado no objetivo do agente de minimizar o *destination stress* (*D-stress*), que é o estresse mental que o agente recebe se não consegue ir pelo menor caminho até o seu destino. A tentativa de minimizar o *pedestrian stress* (*P-stress*), que é o estresse que o pedestre recebe dos outros pedestres enquanto caminham é responsável pelo efeito repulsivo.

O Modelo de Autômato Celular para o Comportamento Coletivo Bi-Direcional Emergente da Dinâmica de Pedestres (ADLER; BLUE, 2000) representa através das regras do autômato apenas os efeitos atrativos, nenhum efeito repulsivo é representado.

Modelo de Autômato Celular Estocástico para Simulação de Dinâmica de Pedestres (SCHADSCHNEIDER, 2002), (BURSTEDDE et al., 2002) representa através do *dynamic floor field* e do *static floor field* efeitos atrativos, entretanto nenhum efeito repulsivo é representado.

Modelo de Autômato Celular para Dinâmica de Pedestres atravessando um cruzamento (ZHANG; WANG; LI, 2003) representa efeitos atrativos e repulsivos. Os efeitos atrativos estão contidos nas regras do autômato celular para a movimentação do pedestre e os efeitos repulsivos estão representados no conceito de *stop point* para evitar colisão com outros objetos.

6.1.2 Filas

Um dos padrões importantes e facilmente observável da dinâmica de pedestres que todos os quatro modelos: Modelo de Forças Sociais (HELBING; MOLNÁR, 1995), Modelo de Comportamento de Pedestres (OSARAGI, 2004), Modelo de Autômato Celular para o Comportamento Coletivo Bi-Direcional Emergente da Dinâmica de Pedestres (ADLER; BLUE, 2000) e o Modelo de Autômato Celular Estocástico para Simulação de Dinâmica de Pedestres (SCHADSCHNEIDER, 2002), (BURSTEDDE et al., 2002) possuem é a característica de apresentar a formação de filas durante a simulação.

É interessante observar que a formação de filas não é um resultado da configuração inicial dos pedestres, mas sim uma consequência da interação entre eles. A formação de filas leva a um fluxo mais eficiente de pedestres como pode ser visto na figura 6.1.

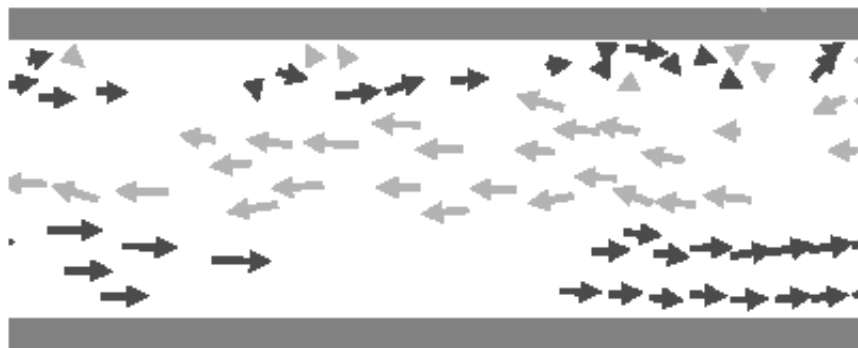


Figura 6.1: Formação de Filas, *fonte: (HELBIN; MOLNÁR P. AND FARKS; BOLAY, 2001)*

6.1.3 Cruzamentos

Os padrões que surgem em um cruzamento de pedestres (figura 6.2) é outra característica importante da dinâmica de pedestres.



Figura 6.2: Cruzamento de pedestres, *fonte: (HELBIN; MOLNÁR P. AND FARKS; BOLAY, 2001)*

O Modelo de Forças Sociais (HELBING; MOLNÁR, 1995) possui características necessárias para a criação dos padrões que surgem no cruzamento de pedestres. Um estudo mais aprofundado sobre padrões auto-organizáveis de movimento de pedestres pode ser encontrado em (HELBIN; MOLNÁR P. AND FARKS; BOLAY, 2001).

O Modelo de Autômato Celular para o Comportamento Coletivo Bi-Direcional Emergente da Dinâmica de Pedestres (ADLER; BLUE, 2000) apresenta os padrões que surgem no cruzamento. O autor chama esses padrões de *dynamic multi-lane flows*.

Não há nenhuma indicação de que o Modelo de Comportamento de Pedestres (OSARAGI, 2004) e o Modelo de Autômato Celular Estocástico para Simulação de Dinâmica de Pedestres (SCHADSCHNEIDER, 2002), (BURSTEDDE et al., 2002) sejam capazes de simular os padrões que surgem em um cruzamento, mais estudos sobre a simulação desses padrões devem ser realizados para realizar alguma afirmação a esse respeito.

6.2 Modelo de Pedestre

Simulação da dinâmica de pedestres é um problema complexo e diversos autores abordam a criação do modelo de perspectivas diferentes. Em alguns modelos os pedestres são tratados como partículas sujeitas a forças de atração e repulsão (HELBING; MOLNÁR, 1995), outros buscam inspiração em trilhas de feromônios de animais (SCHADSCHNEIDER, 2002) e ainda outros realizam experimentos visando simular o conforto do pedestres ao caminhar (OSARAGI, 2004). É interessante observar como cada abordagem prioriza um aspecto diverso da dinâmica de pedestres. A seguir compara-se os diversos tipos de modelos quanto ao modelo do comportamento individual do pedestres.

No Modelo de Forças Sociais (HELBING; MOLNÁR, 1995) os pedestres são tratados como partículas sujeitas a forças de atração e repulsão. Esse abordagem tem muito sucesso ao simular padrões de auto-organização espaço-temporais que surgem na dinâmica de pedestres, tais como filas e oscilações em passagens estreitas.

No Modelo de Autômato Celular para o Comportamento Coletivo Bi-Direcional Emergente da Dinâmica de Pedestres (ADLER; BLUE, 2000) e no Modelo de Autômato Celular para Dinâmica de Pedestres atravessando um cruzamento (ZHANG; WANG; LI, 2003) os pedestres são tratados como autômatos em uma grade que buscam maximizar seu movimento frontal.

No Modelo de Autômato Celular Estocástico para Simulação de Dinâmica de Pedestres (SCHADSCHNEIDER, 2002), (BURSTEDDE et al., 2002), os pedestres se movem influenciados por um trilha de feromônio.

No Modelo de Comportamento de Pedestres (OSARAGI, 2004) os pedestres são tratados como agentes que buscam minimizar seu estresse mental e assim melhorar seu conforto ao caminhar.

6.3 Aspectos de Implementação

Nessa seção compara-se os modelos quanto a implementação. Os critérios avaliados são desempenho e corretude da solução. Com corretude da solução avalia-se como o modelo foi implementado, quais aproximações foram realizadas para que a implementação do modelo fosse possível.

6.3.1 Desempenho

No Modelo de Forças Sociais (HELBING; MOLNÁR, 1995) cada pedestre deve ser comparado com todos os outros para o cálculo de forças atrativas e repulsivas. Além disso se houver uma parede ou qualquer outro tipo de barreira entre o pedestre A e o pedestre B haverá a anulação das forças repulsivas. Esse cálculo da barreira entre o pedestre A e o pedestre B é não trivial é consome tempo de simulação.

Modelos baseados em autômatos celulares tais como (ADLER; BLUE, 2000), (SCHADSCHNEIDER, 2002), (BURSTEDDE et al., 2002), (ZHANG; WANG; LI, 2003) são modelos discretos no tempo, espaço e variáveis de estado. Além disso as interações entre os pedestres são apenas em uma vizinhança local. Todos esses fatores tornam os autômatos celulares especialmente atraentes para a criação de simulações de alto desempenho, tais como evacuação de estádios com milhares de pessoas.

Por outro lado modelos baseados em sistemas multiagentes como (OSARAGI, 2004) tem a desvantagem de que em simulações com milhares de pessoas, onde cada pessoa representa um agente, deve utilizar agentes simples para não comprometer o desempenho do sistema. Se cada agente for complexo e demorar muito tempo para deliberar o tempo de simulação será muito longo.

6.3.2 Corretude da Solução

Os modelos de autômatos celulares (ADLER; BLUE, 2000), (SCHADSCHNEIDER, 2002), (BURSTEDDE et al., 2002), (ZHANG; WANG; LI, 2003), são discretos no tempo, espaço e variáveis de estado, por isso nenhuma ou poucas aproximações devem ser realizadas, pois essa discretização já levada em conta na definição do modelo e de suas dinâmicas. Portanto, segundo (SCHADSCHNEIDER, 2002), autômatos celulares que são extremamente simples são capazes de capturar a características essenciais de sistemas de complexidade extraordinária.

De maneira diversa, os modelos contínuos (HELBING; MOLNÁR, 1995) representam o comportamento do pedestre através de um conjunto de equações diferenciais, que freqüentemente não podem ser tratadas analiticamente. Para solucionar o problema é necessário fazer uma análise numérica e as equações devem ser discretizadas. Portanto, a solução numérica das equações diferenciais discretizadas é somente acurada quanto o tempo de iteração aproxima-se de zero.

Semelhantemente aos modelos contínuos, o modelo baseado em sistemas multiagentes de Osaragi (OSARAGI, 2004) precisa realizar uma análise numérica para minimizar as funções de estresse e também sua solução é apenas acurada quando o tempo de iteração aproxima-se de zero.

6.4 Contribuições futuras

Apesar de nos últimos anos os modelos contínuos serem bem sucedidos em modelar dinâmica de pedestres, em especial o Modelo de Forças Sociais (HELBING; MOLNÁR, 1995), um modelo baseado em autômato celular tem algumas características interessantes.

Como visto na seção 6.3.1 os autômatos celulares são especialmente úteis para simulações de alto desempenho. Além disso, segundo (WOLFRAM, 1986), os autômatos celulares funcionam como discretizações idealizadas de equações diferenciais parciais que descrevem fluxo de fluidos e permitem a simulação de interações entre eles que de outra maneira seriam intratáveis.

Além disso, segundo (SCHADSCHNEIDER, 2002), uma situação realista raramente pode ser descrita apenas por uma abordagem determinística, pois eventos pequenos podem levar a resultados e comportamentos bastante diversos devido a complexidade das interações envolvidas. Uma abordagem simples e elegante para simular um comportamento complexo é a utilização de uma descrição estocástica.

Assim um autômato celular estocástico como o proposto por Schadschneider em (SCHADSCHNEIDER, 2002), (BURSTEDDE et al., 2002) tem um alto desempenho

aliado com uma simulação da dinâmica de pedestres realista. Entretanto algumas características podem ser acrescentadas para tornar o modelo melhor. Por exemplo: o modelo de Schadschneider considera apenas efeitos atrativos, efeitos repulsivos devem ser considerados para melhorar a adequação do modelo com a realidade.

Outra característica interessante é que em sistema multiagentes cada pedestre é modelado individualmente e não de maneira uniforme como ocorre nos modelos baseados em autômatos celulares e modelos contínuos. Essa é uma boa abordagem para ser acrescentada a um modelo de autômato celular, pois leva a um comportamento mais adequado com a realidade se os parâmetro do modelo forem bem estimados em dados empíricos.

Uma última consideração final: é interessante notar que os modelos baseados em autômatos celulares (ADLER; BLUE, 2000), (SCHADSCHNEIDER, 2002), (BURSTEDDE et al., 2002), (ZHANG; WANG; LI, 2003), e o Modelo de Forças Sociais (HELBING; MOLNÁR, 1995) levam em conta a dinâmica de pedestres para modelar o fluxo eficiente de pessoas, enquanto o modelo baseado em sistemas multiagentes aborda o problema da simulação da dinâmica de pedestres levando em conta o conforto dos pedestres (tentando minimizar seu estresse mental). A abordagem que visa melhorar o conforto dos pedestres é tão importante quanto o do fluxo de pedestres, mas não foi explorado em modelos contínuos e de autômatos celulares.

Com essas considerações realizadas torna-se claro que há espaço para desenvolvimento de modelos de simulação de pedestres melhores e capazes de simular diversos tipos de situações com bom desempenho e comprometidos com uma descrição acurada da realidade.

REFERÊNCIAS

- ADAMI, C. **Introduction to artificial life**. [S.l.]: Springer-Verlag New York, Inc., 1998.
- ADLER, J. L.; BLUE, V. J. Toward the Design of Intelligent Traveller Information Systems. **Transportation Research Part C**, [S.l.], v.6, p.157–172, 1998.
- ADLER, J. L.; BLUE, V. J. Cellular Automata Model Of Emergent Collective Bi-Directional Pedestrian Dynamics. In: **Artificial Life VII**. [S.l.: s.n.], 2000. v.VII, p.437–445.
- ADLER, J. L.; BLUE, V. J. Flow Capacities from Cellular Automata Modeling of Proportional Splits of Pedestrian by Direction. In: **PEDESTRIAN AND EVACUATION DYNAMICS**, 2002. **Anais...** Springer-Verlag New York: Inc., 2002. p.115–121.
- BURSTEDDE, A.; KIRCHNER, A.; KLAUCK, K.; SCHADSCHNEIDER, A.; ZIT-TARTZ, J. Cellular Automaton Approach to Pedestrian Dynamics - Applications. In: **PEDESTRIAN AND EVACUATION DYNAMICS**, 2002. **Anais...** Springer-Verlag New York: Inc., 2002. p.87–97.
- HELBIN, D.; MOLNÁR, P. AND FARKS, I. J.; BOLAY, K. Self-organizing pedestrian movement. **Environment and Planning B - Planning and Design**, [S.l.], v.28, n.3, p.361–383, May 2001.
- HELBING, D.; MOLNÁR, P. Social force model for pedestrian dynamics. **Phys. Rev E**, [S.l.], v.51, n.5, p.4282–4286, 1995.
- OSARAGI, T. Modeling of Pedestrian Behavior and Its Applications to Spatial Evaluation. In: **AAMAS**, 2004. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2004. p.836–843.
- SCHADSCHNEIDER, A. Cellular Automaton Approach to Pedestrian Dynamics - Theory. In: **PEDESTRIAN AND EVACUATION DYNAMICS**, 2002. **Anais...** Springer-Verlag New York: Inc., 2002. p.75–85.
- SCHRECKENBERG, M.; SHARMA, S. D. **Pedestrian and Evacuation Dynamics**. Germany: Springer-Verlag New York, Inc., 2002.
- WOLFRAM, S. (Ed.). **Theory and Applications of Cellular Automata**. Singapore: World Scientific, 1986.
Collection of papers on CA's. Contains an extensive bibliography.
- ZHANG, J.; WANG, H.; LI, P. Cellular automata modeling of pedestrian's crossing dynamics. **Journal of Zhejiang University SCIENCE**, [S.l.], v.5, p.835–840, 2003.