UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

Programa de Pós-Graduação em Computação

Dissertação

Modelo em mesoescala para simulação de multidões de pedestres em situações de tráfego veicular urbano

Vagner Pinto da Silva

Pelotas, 2013

VAGNER PINTO DA SILVA

MODELO EM MESOESCALA PARA SIMULAÇÃO DE MULTIDÕES DE PEDESTRES EM SITUAÇÃO DE TRÁFEGO VEICULAR URBANO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Computação da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Ferreira Júnior

Pelotas, 2013

Dados Internacionais de Publicação (CIP)

S586m Silva, Vagner Pinto da
Modelo em mesoescala para simulação de multidões de pedestres em situação de tráfego veicular urbano / Vagner Pinto da Silva; Paulo Roberto Ferreira Júnior, orientador. – Pelotas, 2013.
67 f.

Dissertação (Mestrado em Computação), Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2013.

1.Multidões. 2.Modelo de forças sociais. 3.Modelo de densidades. I. Ferreira Júnior, Paulo Roberto, orient. II. Título.

CDD: 004

Catalogação na Fonte: Aline Herbstrith Batista CRB:10/1737
Universidade Federal de Pelotas

Banca examinadora:
Antonio Carlos da Rocha Costa
Marilton Sanchotene de Aguiar
Ricardo Matsumura de Araujo

Ao meu filho Rafael, minha esposa Aline e
meus pais Valdir e Vanda.

RESUMO

O foco neste trabalho foi desenvolver uma solução para modelar a movimentação de multidões de pedestres no simulador de trânsito veicular urbano ITSUMO, ferramenta utilizada no eixo de emergência do projeto Rede Estadual de Simulação Social (RS-SOC). Tendo em vista a diferença entre as escalas de um veículo e a de um pedestre neste simulador, foi proposto um modelo em mesoescala que tratasse da multidão como uma densidade de pedestres que ocupa os espaços de uma via pública ao longo do tempo, denominado modelo de Densidade de Pedestres. Este modelo é resultado das observações realizadas sobre o comportamento das densidades de pedestres produzidas por uma implementação do modelo de Forças Sociais, em ambientes cujo movimento se deu em um único sentido ou em contrafluxo. Para comprovar a aplicação do modelo proposto, ele foi posto em comparação com esta mesma implementação do modelo de Forças Sociais. A partir de uma análise criteriosa sobre os resultados produzidos pelos dois modelos ao longo do tempo, pode-se perceber que o modelo de Densidades de Pedestres é equivalente ao modelo de Forças Sociais quando se trata da densidade produzida por ambos.

Palavras-chave: Multidões. Modelo de forças sociais. Modelo de densidades.

ABSTRACT

The focus in this study was to develop a solution to model the movement of crowds of pedestrians in urban vehicular traffic Simulator ITSUMO, tool used in the emergency shaft State Network project of Social Simulation (RS-SOC). In view of the difference between the scales of a vehicle and a pedestrian in this simulator was proposed a mesoscale model to the crowd as a density of pedestrians that occupies the spaces of a public road over time, called Pedestrian Densities Model. This model is the result of observations about the behavior of pedestrian density produced by an implementation of the model of social forces, in environments whose movement took place in a single direction or in counter flow. To verify the application of the proposed model, he was put in comparison with this same model implementation of social forces. From a careful review of the results produced by the two models over time, one can realize that the pedestrian densities model is equivalent to the model of social forces when it comes to the density produced by both.

Keywords: Crowds. Social forces model. Densities model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Propriedades que descrevem um pedestre e as forças que atuam sobre ele.....28
Figura 2.2 Modelo de cálculo da velocidade média.....30
Figura 2.3 Interação entre dois pedestres.....33
Figura 2.4 Representação da interação do pedestre α com o obstáculo γ.....34
Figura 2.5 Densidade = 7 pessoas/m^2. 36
Figura 2.6 Densidade = 5 pessoas/m^2. 37
Figura 2.7 Densidade = 4 pessoas/m^2. 37
Figura 2.8 Densidade = 3 pessoas/m^2. 38
Figura 2.9 Densidade = 2 pessoas/m^2. 38
Figura 2.10 Densidade = 1 pessoas/m^2. 39
Figura 3.1 Distribuição das áreas de agentes em uma via pública de 30 m de comprimento.....43
Figura 4.1 Screenshot da movimentação unidirecional sem obstáculos, $t = 28{,}03\ s,\ Tep/s\ = 14\ pessoas/s$. 49
Figura 4.2 Comparação das densidades produzidas pelos dois modelos, visão toda via. 50
Figura 4.3 Comparação das densidades produzidas pelos dois modelos, visão área de agente.....51
Figura 4.4 Screenshot da movimentação bidirecional sem obstáculos, $t = 21{,}03\ s,\ Tde/s\ = 14\ pessoas/s$. 52
Figura 4.5 Comparação das densidades produzidas pelos dois modelos, visão toda via. 53
Figura 4.6 Comparação das densidades produzidas pelos dois modelos, visão área de agente.....54
Figura 4.7 Screenshot da movimentação unidirecional com obstáculo na área de agente dois, $t = 28{,}49\ s,\ Tde/s\ = 14\ pessoas/s$.....55

Figura 4.8 Comparação das densidades produzidas pelos dois modelos, visão toda via. 56
Figura 4.9 Comparação das densidades produzidas pelos dois modelos, visão área de agente 57
Figura 4.10 Screenshot da movimentação bidirecional, $t = 15{,}37\ s$, $Tde/s = 14\ pessoas/s$. 59
Figura 4.11 Comparação das densidades produzidas pelos dois modelos, visão toda via. 61
Figura 4.12 Comparação das densidades produzidas pelos dois modelos, visão área de agente 62

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Resumo de três trabalhos baseados no modelo Lattice-Gas. 27
Tabela 2.2 Resumo das principais forças e a notação base do modelo.....29
Tabela 2.3 Resumo dos componentes da Força de Desejo. 31
Tabela 2.4 Resumo das componentes da Força de Interação. 33
Tabela 2.5 Resumo das componentes da Força de Repulsão aos obstáculos. 35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ITSUMO	*Intelligent Transportation System for Urban Mobility*
RS-SOC	Rede Estadual de Simulação Social

SUMÁRIO

1. Introdução 13

2. Fundamentação teórica 16

2.1 Multidões Reais 17

2.1.1 Fenômenos Individuais em Multidões Reais 17

2.1.2 Fenômenos Grupais em Multidões Reais 19

2.2 Simulação de Multidões 21

2.3 Abordagem de Modelagem de Multidões 22

2.3.1 Abordagem Macroscópica de Modelagem de Multidões 22

2.3.2 Abordagem Microscópica de Modelagem de Multidões 23

2.4 Modelos de Abordagem Microscópica 23

2.4.1 Modelo de Autômato Celular 24

2.4.2 Modelo Lattice-Gas 26

2.4.3 Modelo de Forças Sociais 27

2.4.3.1 Descrição do Modelo Forças Sociais 27

2.4.3.2 Força Desejo 29

2.4.3.3 Força de Interação 31

2.4.3.4 Força de Repulsão 33

2.5 Taxas de Ocupação Típicas 35

2.6 Considerações Finais 39

3. Modelo de densidades de pedestres 41

3.1 Modelo de Agente 41

3.2 Descrição do Modelo 42
3.3 Total de Pedestres 43
3.4 Considerações Finais 46

4. Validação do modelo proposto 47
4.1 Movimentação Unidirecional sem Obstáculos 49
4.2 Movimentação Bidirecional sem Obstáculos 52
4.3 Movimentação Unidirecional com Obstáculos 55
4.4 Movimentação Bidirecional com Obstáculos 59

5. Conclusão e trabalhos futuros 64
5.1 Trabalhos Futuros 65

Referências 66

1. INTRODUÇÃO

A realização de grandes eventos, como a copa do mundo e as olimpíadas que acontecerão no Brasil nos próximos anos, demanda dos pesquisadores uma série de reflexões sobre os temas que se apresentam correlacionados a esse tipo de acontecimento. Entre eles, pode-se destacar a dinâmica da mobilidade urbana nas proximidades onde se realizam tais eventos, como a movimentação de multidões de pedestres nas vias públicas.

A movimentação de multidões de pedestres em vias públicas demanda das autoridades certo grau de planejamento. O estudo sistemático de situações reais, como o realizado pelo *U.S. Department of Transportation* (2007) sobre os eventos do onze de setembro, que culminou em uma política para evacuação de pedestres em áreas metropolitanas, apontam nessa direção.

Alternativamente, algumas autoridades buscam a realização de simulações reais. Porém, isso se torna oneroso. Primeiro, por se apresentar muito complexo e dispendioso lidar com um grande número de indivíduos em situações reais. Segundo, por ser arriscado para os indivíduos realizar ações objetivas, como, por exemplo, evacuar um estádio em chamas, bem como é antiético submetê-los a tais condições. Nesse cenário encaixam-se perfeitamente as simulações computacionais, humanamente pouco dispendiosas, quando comparadas a esse tipo de alternativa.

Embora o comportamento desse tipo de multidão seja alvo de estudos desde o fim do século XIX, ainda há escassez de estudos sistemáticos de tais comportamentos e de teorias quantitativas capazes de predizer a dinâmica de multidões (Bicho, 2009). Entretanto, alguns autores, como Henderson (1971), Helbing e Molnár (1995), e Still (2000), que se dedicaram a observar multidões de pessoas, identificaram algumas características qualitativas recorrentes de seu comportamento. Algumas delas relacionadas a fatores internos inerentes à conduta de cada indivíduo, outras, a padrões nas dimensões de espaço e tempo que

emergem na multidão, quando esta é observada como um todo.

Na tentativa de criar um modelo abrangente o suficiente para que respondesse a tais características, Helbing e Molnár (1995) propuseram como solução o modelo de Forças Sociais, um modelo contínuo no espaço e no tempo, capaz de considerar as forças de contato presentes na iteração entre os pedestres presentes na multidão.

Dois trabalhos recentes, o de Sabóia (2010) e Jorgensen (2010), se utilizam-se do modelo de forças sociais para simular a movimentação de pedestres, porém, ambos concentram-se em cenários com exclusividade para pessoas e em ambientes fechados, algo que este trabalho buscou modificar, partindo para cenários mais complexos, como as vias públicas, onde os veículos também podem ser considerados.

A ideia de expandir tais experiências para as vias públicas, nasceu da necessidade da modelagem de situações focadas no comportamento de multidões e sua evacuação/contensão, no eixo de emergência, do projeto Rede Estadual de Simulação Social (RS-SOC). Nesse contexto, na tentativa de incluir esse tipo de modelagem em uma das ferramentas desenvolvidas no RS-SOC, o ITSUMO (*Intelligent Transportation System for Urban Mobility*), buscou-se neste trabalho integrar o modelo de Forças Sociais a esse simulador, a partir da especificação de um agente multidão, para que este, naturalmente, também pudesse considerar em suas simulações, o deslocamento de multidões.

Embora esse fosse o principal objetivo, a aplicação pura e simples do modelo de Forças Sociais no simulador ITSUMO mostrou-se impraticável, tendo em vista, a necessidade de determinar os limites de cada via do mapa da simulação e a diferença de escala evidente entre um pedestre e um veículo. Nesse sentido, buscou-se, como alternativa, tratar do problema em uma escala intermediária, uma mesoescala, que se situasse entre a dimensão de um pedestre e a dimensão de um veículo, abordando-o a partir do atributo densidade de uma fração da multidão ao longo do espaço e do tempo, equivalente ao comprimento de um veículo no ITSUMO.

Sendo assim, este trabalho apresenta um modelo em mesoescala baseado no comportamento da densidade de pedestres observado em simulações com o modelo de Forças Sociais, em cenários que visam aparentar o modelo de grade do

ITSUMO, para deslocamentos em único sentido ou em contra-fluxo. Mais especificamente, buscou-se: identificar os principais fenômenos observados na movimentação de multidões de pessoas, de modo a dotar o modelo proposto da capacidade de reproduzi-los, a fim de validá-lo; reunir e resumir o atual estado da arte na simulação de multidões baseadas em Forças Sociais, no sentido de adquirir conhecimentos suficientes para propor um modelo que se aplique ao cenário pretendido, de vias públicas com a dinâmica veicular urbana; apresentar um novo modelo de movimentação de multidões de pedestres, capaz de adequar-se ao cenário escolhido; avaliar o novo modelo proposto, através da análise dos resultados obtidos com as simulações computacionais realizadas.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo dois é apresentada uma revisão da literatura, em que são trabalhados temas relevantes para o andamentos dos demais capítulos, como, multidões, modelagem de multidões, taxas de ocupação típicas e o modelo de Forças Sociais; no capítulo três é apresentado o modelo proposto; no capítulo quatro, as validações realizadas com este modelo e, ao final, no capítulo cinco, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A partir do que foi analisado em outros trabalhos na literatura atual, como em Saboia (2010) e Jorgensen et al. (2010), a modelagem e a simulação da movimentação de multidão de pedestres requer que se concentre no realismo dos aspectos comportamentais, de forma que os resultados possam ser condizentes com a realidade. Desse modo, para que o objetivo deste trabalho pudesse ser atingido, em um primeiro momento buscou-se compreender com mais profundidade quais são estes aspectos comportamentais e os fenômenos por eles desenvolvidos, abrindo caminho para a definição de uma abordagem.

Entre as abordagens estudadas, a microscópica é a que melhor descreve tais aspectos comportamentais, pois ela permite a inclusão de características próprias de cada indivíduo aproximando-se ainda mais da realidade desejada. Nesse aspecto, o modelo de Forças Sociais é o que tira melhor proveito disso, já que se trata de um modelo contínuo e, por isso, possui capacidades não encontradas em modelos discretos, entre elas, a de expressar forças de contato físico entre as pessoas na multidão.

Desse modo, este capítulo apresenta uma revisão de requisitos, organizado da seguinte forma: a seção 2.1 trata das multidões reais e os fenômenos nelas observados; a seção 2.2 aborda os tipos de simulações de multidões; a seção 2.3 observa as abordagens para modelagem de multidões; a seção 2.4 apresenta uma revisão dos modelos de abordagem microscópica mais tradicionalmente adotados até então para a modelagem da movimentação de multidões de pedestres, começando por uma breve revisão do modelo de Autômato Celular e o de Lattice-Gas, até chegar ao estudo aprofundado do modelo de Forças; por fim, a seção 2.5 traz um estudo sobre as taxas de ocupação típicas identificadas em multidões reais pelo Centro de Estudos e Pesquisa de Desastres, da Prefeitura do Rio de Janeiro. Um assunto necessário quando se pretende ser o mais realista possível.

2.1 Multidões Reais

Entende-se como multidão de pedestres um grande grupo de indivíduos em um mesmo ambiente físico, compartilhando um objetivo comum, podendo agir diferentemente do que quando estão sozinhos (SABOIA, 2010). Para Bicho (2009), tal fenômeno é decorrente das iterações e das influências que cada indivíduo estabelece com o meio durante sua tentativa de circulação.

Na movimentação de uma multidão de pedestres, se estabelece uma complexa inter-relação entre os fatores próprios de cada indivíduo, como, personalidade, motivação e percepção, e os fatores externos a eles, que são coexistentes na interação de elementos do ambiente com o indivíduo, como a estrutura física onde ocorre esta movimentação.

Alguns autores, como Still (2000), Henderson (1971), Helbing e Molnár (1995), que se dedicaram a observar multidões de pessoas, identificaram algumas características qualitativas recorrentes de seu comportamento. Umas relacionadas a fatores internos inerentes à conduta de cada indivíduo. Outras, a padrões nas dimensões de espaço e tempo que emergem na multidão quando esta é observada como um todo. As seções a seguir visam a descrever tais características.

2.1.1 Fenômenos Individuais em Multidões Reais

No que diz respeito aos fatores internos, comportamentos inerentes ao indivíduo são caracterizados, segundo Sabóia (2010), por procedimentos que o permitem dirigir-se ao seu destino. Outros estudos, como o de Bolton (2011), que analisa os acontecimentos do onze de setembro, nos Estados Unidos da América, apontam nesta mesma direção.

Still (2000) e Helbing et al. (1995, 2000 e 2001) analisaram as multidões e agruparam os fenômenos individuais observados em situações normais e situações de emergência.

Em **situações normais**:

- Pedestres normalmente escolhem o caminho mais rápido para seu próximo destino, mas não necessariamente o mais curto. Caso haja mais de um caminho com o mesmo comprimento, o pedestre escolherá aquele

que lhe permita se deslocar, variando o mínimo sua velocidade e sua orientação. Um pedestre sente uma forte aversão a mover-se na direção e sentido opostos ao seu destino, mesmo se o caminho direto estiver congestionado (STILL, 2000);

- Pedestres preferem caminhar com sua velocidade desejada. Isso corresponde à velocidade de caminhar com o menor consumo de energia, enquanto não for necessário mover-se mais rapidamente para alcançar o destino a tempo. Estudos mostram que as velocidades desejadas assumem uma distribuição Gaussiana com média de aproximadamente 1,34m/s e desvio padrão de aproximadamente 0,26 m/s. Entretanto, a velocidade média depende da situação, sexo e idade, hora do dia, motivo da caminhada, arredores, etc (STILL, 2000; HELBING e MOLNÁR, 1995);
- Pedestres mantêm certa distância de outros pedestres e de limites, como pistas de rolamento, paredes e obstáculos. Essa dinâmica é inversamente proporcional à pressa do pedestre e diminui com o aumento da densidade ao redor dele. Indivíduos parados são uniformemente distribuídos se eles não se conhecem. A densidade de pedestres aumenta, diminuindo as distâncias interpessoais, em lugares particularmente atrativos e diminui com o crescimento da variância da velocidade (HELBING e MOLNÁR, 1995);
- Pedestres normalmente não seguem sua trajetória comportamental em todas as situações, mas agem de forma quase automática, como um motorista experiente o faz. Isso fica claro quando eles causam atrasos ou obstruções como, por exemplo, ao tentar entrar em um elevador mesmo quando outras pessoas estão saindo (HELBING e MOLNÁR, 1995).

O comportamento do indivíduo muda em situações de emergência, surgindo correria e pânico. As pessoas, na multidão, comportam-se de forma diferente em relação a situações normais, havendo grande risco de tragédias, como, pisoteamento e esmagamento de indivíduos. O surgimento de tais comportamentos foi observado tanto em situações de risco de vida, a exemplo de incêndios em prédios, quanto em situações em que aparentemente não há nenhuma razão clara para correria e pânico, a exemplo de eventos que reúnem grandes aglomerados de pessoas, como, apresentações musicais e partidas de futebol (SABOIA, 2010).

Em **situações de emergência**, as características observadas foram as seguintes:

- Em situações de fuga em pânico, indivíduos ficam nervosos e tendem a agir de maneira irracional;
- As pessoas tentam se mover consideravelmente mais rápido que o normal;
- Indivíduos começam a empurrar uns aos outros e, consequentemente, aumenta o grau de interações entre eles, tornando-se de natureza física;
- A movimentação torna-se descoordenada, principalmente quando o ambiente torna-se um gargalo;
- A fuga se torna mais lenta devido aos obstáculos que surgem por pessoas caídas ou mais lentas, por estarem machucadas;
- As pessoas tendem a mostrar comportamento de rebanho, e passam a repetir o que as demais fazem;
- Saídas alternativas são frequentemente negligenciadas ou utilizadas de forma ineficiente em situações de fuga.

2.1.2 Fenômenos Grupais em Multidões Reais

Com relação aos padrões nas dimensões de espaço e tempo que emergem na multidão quando observada como um todo, pode-se afirmar que esses são auto-organizáveis. Essa auto-organização é um fenômeno em que padrões de grupo surgem espontaneamente e unicamente a partir de interações entre subunidades de um sistema (HELBING e MOLNAR, 2001). Still (2000) e Helbing et al. (1995, 2000 e 2001) também analisaram estas características e as agruparam como segue:

- **Formação de vias de pedestres**: em altas densidades, surgem fluxos bidirecionais quando grupos de pessoas se deslocam na mesma direção, mas em sentidos opostos (STILL, 2000; HELBING et al., 2000);
- **Formação de arcos**: em ambientes fechados, pedestres acabam aglomerando-se no espaço em torno do acesso à saída, reduzindo suas velocidades e aumentado a densidade nesse ponto. É possível observar que a distribuição das pessoas em volta da passagem lembra a forma geométrica de um arco. Quando os arcos se quebram, por aumento da pressão que as pessoas exercem em direção à saída, o número de

pedestres que deixam o local aumenta e a densidade diminui novamente (HELBING et al., 2000);

- **Efeito de gargalo**: esse pode ser observado, por exemplo, em um corredor que apresenta um afunilamento ao longo do caminho. Os indivíduos mais próximos do afunilamento tentam evitá-lo e isso provoca a redução da velocidade e o aumento da densidade nas regiões que o antecedem. Já em regiões posteriores a ele, a velocidade da multidão tende a aumentar, e a densidade a diminuir (STILL, 2000; HELBING et al., 2000);
- **Efeito de canto**: esse também pode ser observado em corredores que apresentam afunilamento. Em regiões após o afunilamento, e bem próximas a ele, os pedestres continuam percorrendo o espaço como se ainda estivessem na região mais estreita, ou seja, o espaço disponível depois do afunilamento não é completamente preenchido. Isso mostra que a dinâmica da multidão depende da geografia do local, onde a presença de obstruções influencia o comportamento individual do pedestre e, consequentemente, o fluxo da multidão como um todo. Como observado por Helbing et al. (2000), apesar de existir semelhanças entre a dinâmica de multidões e a dinâmica de fluidos, em tais situações é mais adequado fazer analogias com a dinâmica de sistemas granulares (STILL, 2000; HELBING et al., 2000);
- **Efeito de ondas *stop-and-go*:** fluxos longitudinalmente instáveis e temporariamente interrompidos surgem, na multidão, quando a densidade é alta e o fluxo cai abaixo de um valor crítico. Quando, para uma região, fluxos de entrada excedem fluxos de saída, a velocidade de um indivíduo à frente de outra é menor. Uma vez que os indivíduos que estão atrás também estão sendo movidos pela multidão e não podem parar, as pessoas da frente sofrem alta pressão e a propagam adiante. Isso leva os que os pedestres a se deslocar em movimentos que lembram ondas (HELBING et al., 2007);
- **Efeito turbulência:** fluxos irregulares ocorrem em regiões cuja pressão, isto é, a variância da velocidade multiplicada pela densidade local, excede um valor crítico na multidão. Surgem deslocamentos aleatórios e não

intencionais em todas as direções possíveis, que empurram os indivíduos de um lado para outro (HELBING et al., 2007);

2.2 Simulação de Multidões

Sabóia (2010) identificou na literatura diversos trabalhos com modelos e aplicações para simulações de multidões, classificando-os segundo Ulicny et al. (2006), de acordo com seu foco, um associado ao realismo dos aspectos comportamentais, outro ao realismo da visualização de alta qualidade. E os descreveu como segue:

- Trabalhos que se concentram no realismo dos aspectos comportamentais geralmente apresentam uma interface de visualização simples, em duas dimensões, como simulações de evacuação, modelos sociológicos de multidão ou modelos de dinâmica de multidão. Nessa área, o comportamento representado nas simulações é geralmente restrito à tarefa de validar quantitativamente a correspondência dos resultados com observações do mundo real, dentro de situações particulares. Idealmente, os resultados das simulações devem ser consistentes com conjuntos de dados coletados a partir de observações de campo ou de imagens de vídeo de multidões reais, realizadas por humanos ou por algum método automatizado de processamento de imagens. A visualização é usada para ajudar a compreender os resultados da simulação, mas não é fundamental, e na maioria dos casos, uma representação esquemática com pontos coloridos é utilizada. Às vezes, tais representações simples são até mesmo preferíveis, uma vez que permitem destacar informações importantes. Algumas aplicações, para fins de construção de projeto, necessitam de grandes multidões para medir tanto a taxa de fluxo total em diferentes partes do ambiente, quanto a porcentagem de pessoas que podem deixar o ambiente em um determinado período de tempo.
- A segunda área, por sua vez, concentra-se na visualização de alta qualidade e é direcionada, por exemplo, às produções de filmes e jogos de computador. Geralmente, o realismo do modelo de comportamento não é uma prioridade. O mais importante é o resultado visual convincente que é obtido em parte por modelos comportamentais, e em parte por intervenção humana no processo

de produção. Uma multidão virtual deve ter uma boa aparência e ser animada de maneira semelhante aos seres humanos, sendo que a ênfase da pesquisa está nos métodos de renderização e animação. Os membros da multidão são visualizados como figuras tridimensionais completamente animadas, texturizadas e iluminadas para adequar-se a um ambiente rico visualmente (LIMA et al., 2008). Aqui, modelos de comportamento não têm necessariamente o objetivo de casar quantitativamente com o mundo real. O principal propósito deles é facilitar o trabalho de animadores humanos, e ser capaz de responder a entradas no caso de aplicações interativas.

Entretanto, existem trabalhos que também atuam nos dois focos, tanto no realismo dos aspectos comportamentais quanto no realismo da visualização de alta qualidade, onde sistemas orientados à visualização estão tentando incorporar melhores modelos de comportamento para facilitar a criação de animações convincentes, enquanto modelos orientados a comportamento estão tentando alcançar uma melhor visualização, especialmente no domínio de simuladores de evacuação. Uma prova disso pode ser observada em *Crowd Dynamics* (2012).

2.3 Abordagem de Modelagem de Multidões

Comportamentos de multidões podem ser observados e descritos por meio de grandezas macroscópicas, como médias de velocidades, densidades, fluxos e pressão, ou por meio de grandezas microscópicas, como a exata posição e velocidade de cada indivíduo em um determinado momento. Na escala microscópica, o modo como as interações entre os indivíduos dá-se acaba afetando as grandezas macroscópicas. Consequentemente, existem duas filosofias fundamentalmente distintas para a modelagem do movimento de multidões, de acordo com as escalas de descrição mencionadas: abordagem macroscópica e abordagem microscópica (SABOIA, 2010).

2.3.1 Abordagem Macroscópica de Modelagem de Multidões

A abordagem macroscópica foi a primeira a ser utilizada no estudo de deslocamento de multidões. Em tal abordagem, os modelos não descrevem os pedestres individualmente, mas sim, a multidão como um todo, através de suas

grandezas macroscópicas. Esses modelos geralmente focam a otimização do fluxo de pedestres (KEBEL et al., 2002) e são usados para propósitos de animação, como em Sung et al. (2004), com o objetivo de prover a movimentação de uma multidão globalmente de modo convincente.

Saboia investigou alguns trabalhos nessa área, citando trabalhos como: Henderson (1971), que conjecturou que multidões de pedestres se comportam de forma similar a gases ou fluidos; Bradley (1993), que hipotetizou que as equações que governam o movimento dos fluidos, as equações de Navier-Stokes, podem ser utilizadas para descrever a movimentação de multidões em densidades muito altas; Hughes (2000, 2002 e 2003), que derivou equações de movimento que regem o fluxo bidimensional de pedestres e desenvolveu um modelo contínuo para descrever a multidão como um “fluido pensante”; Huang et al. (2009), que revisaram a proposta de Hughes e chegaram a conclusão, de que a demanda de pedestres é variável no tempo, enquanto a densidade, o fluxo e a velocidade da multidão são regidos por uma equação de conservação do fluxo, de forma similar aos sistemas.

2.3.2 Abordagem Microscópica de Modelagem de Multidões

Os modelos que seguem a abordagem microscópica descrevem a posição e a velocidade de cada indivíduo em um determinado momento. Eles permitem a inclusão de características próprias de cada indivíduo, o que possibilita modelar multidões heterogêneas, aproximando-se do mundo real. Nesses modelos, o comportamento da multidão é resultado de interações entre cada indivíduo, sendo as grandezas macroscópicas, como fluxo, densidade e pressão, resultado disso.

Existe uma grande quantidade de modelos que utilizam esta abordagem. Em sua maioria, esses podem ser baseados em regras, Autômato Celular e Lattice-Gas ou na resultante da iteração das forças de contato entre os pedestres, Forças Sociais. Diferenciando-se em dois aspectos: pela forma discreta ou contínua de modelar o espaço; e pelas variáveis de estado de cada indivíduo.

2.4 Modelos de Abordagem Microscópica

As seções a seguir apresentam uma revisão dos modelos mais tradicionalmente adotados até então para a modelagem da movimentação de

multidões de pedestres, começando por uma breve revisão do modelo de Autômato Celular e o de Lattice-Gas, até chegar ao estudo aprofundado do modelo no qual este trabalho se baseou, o modelo de Forças Sociais.

2.4.1 Modelo de Autômato Celular

Autômatos Celulares foram originalmente concebidos por Von Neumann e Ulam sob o nome de espaços celulares, como uma idealização matemática de sistemas biológicos com a finalidade específica de modelar a autorreprodução biológica.

Um Autômato Celular consiste de uma grade regular uniforme, com uma variável discreta em cada local. Seu estado é completamente especificado pelos valores das variáveis em cada célula e evolui em passos discretos de tempo. As variáveis em cada célula são atualizadas simultaneamente, com base nos valores das variáveis vizinhas no passo de tempo anterior e também em um conjunto de regras locais (WOLFRAM, 1983).

Modelos de Autômatos Celulares já foram aplicados com sucesso na simulação de vários sistemas complexos, tanto biológicos quanto físicos. Recentemente, modelos de Autômatos Celulares têm sido aplicados para descrever a dinâmica de multidões durante evacuações. Nesses modelos, o espaço bidimensional é dividido em uma grade uniforme, como se ele fosse uma espécie de grade ou tabuleiro (SABOIA, 2010).

De acordo com a definição formal de Autômatos Celulares dada por Weimar (1998), um Autômato Celular é uma quádrupla $A = (L, S, N, F)$, em que:

- L é um conjunto de índices ou sítios, chamados de células;
- S é um conjunto finito de estados, de forma que cada célula $c \in L$ tem um estado s $\in S$;
- N é um conjunto finito, de tamanho $n = |N|$, dos índices da vizinhança, de tal forma que $\forall \mathrm{i} \in N, \ \forall \mathrm{x} \in L : (x + i) \in L$;
- $F : S^n \rightarrow S$ é uma função de transição de local ou regra de atualização de A.

Como já mencionado, o Modelo de Autômatos Celulares já foi empregado em vários trabalhos que visavam descrever a dinâmica de multidões. Vários autores poderiam ser citados. Entre eles, Varas et al. (2007), que se utilizaram de um modelo de Autômato Celular bidimensional para simular o processo de evacuação

de pedestres em uma sala com obstáculos fixos. Nesse trabalho, eles descreveram a sala como uma grade bidimensional, na qual cada célula pode estar vazia ou ocupada, por um obstáculo ou por um pedestre, cuja dinâmica de pedestres é determinada por um campo estático do piso e por interações entre as pessoas.

O campo do piso é calculado de modo que o movimento em direção à porta de saída seja o preferido. Uma vez que a geometria da sala e a localização da porta são definidas, a cada célula é atribuído um valor constante que representa sua distância para a porta. Assim, valores baixos são atribuídos as células mais próximas da saída. Os passos a seguir são seguidos para atribuir o valor do campo de piso:

1. A sala é dividida em uma grade retangular e à porta de saída é atribuído o valor 1.
2. É atribuído um valor a todas as células adjacentes à atribuída anteriormente de acordo com as seguintes regras:
   a. Se a célula tem o valor N, então as células adjacentes, nas direções norte-sul e leste-oeste, recebem o valor $N + 1$. Já as células diagonalmente adjacentes recebem o valor $N + \lambda$, em que $\lambda > 1$ representa o fato de que a distância entre as células diagonalmente adjacentes é maior do que nas direções norte-sul e leste-oeste.
   b. Se houver conflitos na atribuição de um valor para uma determinada célula, sendo esta adjacente a célula com diferentes campos de piso, o valor atribuído a ela será o menor possível.
   c. Todas as células adjacentes àquelas atribuídas no passo anterior são calculadas.
   d. O processo é repetido até que todas as células tenham um valor.
   e. Células pertencentes a paredes e obstáculos recebem valores muito altos, de forma a garantir que os pedestres evitem ocupar tais células.

Com o campo de piso determinado, a dinâmica de pedestre torna-se simples. Um pedestre decide mover-se para a saída mais próxima, ou seja, escolhe, dentre as células adjacentes desocupadas, aquela que apresenta o menor valor de campo de piso. Como essa regra torna o modelo determinístico, os autores introduziram três maneiras de torná-lo não determinístico:

1. Se duas ou mais células vizinhas têm os mesmos menores valores de campo de piso, um número aleatório é usado para decidir qual célula o pedestre adotará no movimento.
2. Se dois pedestres desejam se mover para a mesma célula, o conflito é decidido por sorteio de número aleatório, sendo que apenas o vencedor se move para a célula.
3. Uma certa quantidade de pânico é introduzida, dada por uma probabilidade de o pedestre permanecer em sua posição, mesmo que ele possa se mover.

2.4.2 Modelo Lattice-Gas

Modelos baseados em Lattice-Gas podem ser vistos como um caso especial de Autômato Celular, que são utilizados com alguma frequência para estudar as características de multidões de pedestres por meio de probabilidade e estatística.

Em modelos Lattice-Gas, de uma forma geral, o espaço é dividido em células de dimensões quadradas e uma partícula de Gas representa um pedestre posicionado nessa grade. Cada pedestre realiza um passeio aleatório tendendo a uma direção preferida. Em cada célula pode haver somente uma partícula, em cada passo do tempo, e as regras que determinam a mudança de posição dos pedestres são especificadas por distribuições de probabilidade. Dessa maneira, na maioria das aplicações descritas na literatura, costuma-se definir todas as configurações possíveis para o próximo passo de um pedestre e, então, associa-se a cada uma delas a probabilidade de transitar para as células adjacentes. Em outras palavras, modelos baseados em Lattice-Gas lançam mão do conceito de deslocamento discreto probabilístico, com movimentos de célula a célula (SABOIA, 2010).

Entre as aplicações de modelos baseados em Lattice-Gas, destacam-se algumas propostas interessantes, como a de Muramatsu et al. (1999), Tajima e Nagatani (2001) e Guo e Huang (2008). A Tabela 2.1, apresenta um resumo destas três propostas.

Tabela 2.1 - Resumo de três trabalhos baseados no modelo Lattice-Gas.

Autores	Espaço (Posições adjacentes)	Aplicação
Muramatsu et al. (1999)	Grade fixa	Contra fluxo de corredor
Tajima e Nagatani (2001)	Grade fixa	Evacuação de sala
Guo e Huang (2008)	Grade móvel	Evacuação de sala

2.4.3 Modelo de Forças Sociais

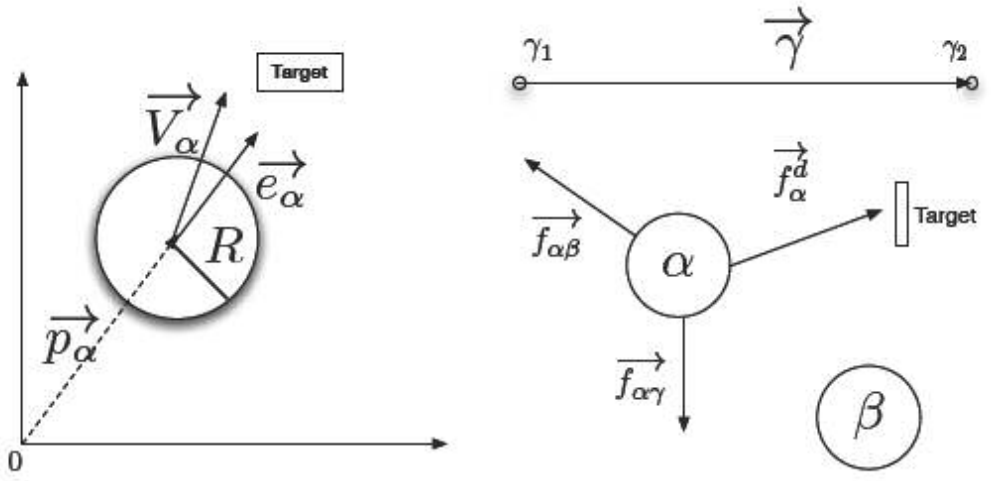
A origem do modelo de Forças Sociais teve inspiração no trabalho do psicólogo Lewin, que, entre outras coisas, identificou que o comportamento dos pedestres torna-se automático e previsível quando confrontados com situações de locomoção já vivenciadas. Admitindo isso, Helbing e Molnár (1995) propuseram um modelo teórico para descrever a locomoção de multidões de pedestres, como se estes estivessem sendo governados, um a um, por uma Força Social $\overrightarrow{f_\alpha}$ em um espaço bidimensional. De tal forma, que esta força pudesse representar o efeito do ambiente, como, por exemplo, a de outros pedestres e obstáculos sobre o comportamento do pedestre α.

Em termos físicos[1], a Força Social é na verdade a resultante da interação que surge da influência de uma série de forças, representadas por três forças principais: Força Desejo, Força de Interação e Força de Repulsão. A seguir, este capítulo visa apresentar formalmente cada uma destas forças, fundamentando-se no que está descrito em Jorgensen et al. (2010), uma modificação do modelo original reapresentado em Helbing et al. (2005).

2.4.3.1 Descrição do Modelo Forças Sociais

No modelo de Forças Sociais descrito em Jorgensen et al. (2010), um pedestre é representado por um círculo de raio R_α, na posição $\overrightarrow{p_\alpha}$ do espaço bidimensional, a uma velocidade $\overrightarrow{v_\alpha}$, com um objetivo de deslocamento $\overrightarrow{e_\alpha}$, Figura 2.7(a). Os obstáculos, por segmentos de linhas neste mesmo espaço $\overrightarrow{\gamma_\alpha}$, e os demais pedestres por β, Figura 2.7(b).

[1] Embora esse não seja um fenômeno genuinamente físico.



(a) (b)

Figura 2.1 - Propriedades que descrevem um pedestre e as forças que atuam sobre ele.
Fonte: JORGSEN et al., 2010, p.10.

A força resultante para o pedestre α, f_α, é resultado da soma das três principais forças:

$$\overrightarrow{f_\alpha} = \overrightarrow{f_\alpha^d} + \sum_{\beta \neq \alpha} \overrightarrow{f_{\alpha\beta}} + \sum_{\gamma} f_{\alpha\gamma} \tag{2.1}$$

onde, como pode ser observado na Figura 2.1, $\overrightarrow{f_\alpha^d}$ representa a Força de Desejo de deslocamento do pedestre α em direção ao seu objetivo, $\overrightarrow{f_{\alpha\beta}}$ a Força de interação com o pedestre β e $\overrightarrow{f_{\alpha\gamma}}$ a Força de Repulsão do obstáculo γ sobre o pedestre α. A Tabela 2.2 apresenta um resumo destas forças e da notação base aqui descrita para o modelo de Forças Sociais.

Tabela 2.2 - Resumo das principais forças e a notação base do modelo.

	Principais Forças
$\overrightarrow{f_\alpha^d}$	Força Desejo de deslocamento do pedestre α
$\overrightarrow{f_{\alpha\beta}}$	Força de Interação com o pedestre β
$\overrightarrow{f_{\alpha\gamma}}$	Força de Repulsão ao obstáculo γ

	Notação Base
$\overrightarrow{p_\alpha}$	Vetor posição do pedestre α
$\overrightarrow{V_\alpha}$	Velocidade do pedestre α
R_α	Raio do pedestre α
$\overrightarrow{e_\alpha}$	Vetor que aponta para o objetivo de deslocamento do pedestre α

2.4.3.2 Força Desejo

A Força Desejo ($\overrightarrow{f_\alpha^d}$) representa o interesse dos pedestres em mover-se em direção ao seu objetivo. Inicialmente, no instante t_0 e sem obstáculos, a ideia é que um pedestre se mova em direção ao seu alvo com uma velocidade de interesse dada como parâmetro no *setup* do modelo. Passado esse instante, a $\overrightarrow{f_\alpha^d}$ é dependente da intensidade da velocidade, dada por:

$$\overrightarrow{f_\alpha^d} = \frac{1}{\tau}\left(v_\alpha^d(t)\overrightarrow{e_\alpha} - \overrightarrow{v_\alpha}(t)\right) \tag{2.2}$$

onde, $v_\alpha^d(t)$ é a velocidade de desejo do pedestre α no instante (t), $\overrightarrow{e_\alpha}$ é um vetor que aponta para o objetivo de deslocamento do pedestre α e $\overrightarrow{v_\alpha}(t)$ é a velocidade atual do pedestre α no instante (t), sendo que a velocidade inicial $\overrightarrow{v_\alpha}(0)$ é assumida como zero.

τ é o tempo de relaxação que dimensiona a força, determinando o quão rápido um pedestre que muda a sua velocidade pela interação com obstáculos ou outros pedestres retorna a velocidade de desejo $v_\alpha^d(t)$. O tempo de relaxação também é um parâmetro do modelo, que, em princípio, pode variar para cada pedestre. No entanto, em Helbing et al. (2005), ele é assumido como o mesmo para todos os pedestres na simulação, o que levou Jorgensen et al. (2010) a tomar a

mesma postura em seu trabalho, colocando τ como um parâmetro de *setup* para todos os pedestres.

A velocidade de desejo do pedestre α, $v_\alpha^d(t)$, pode variar ao longo do tempo e é dada por:

$$v_\alpha^d(t) = \big(1 - n_\alpha(t)\big)v_\alpha^{di} + n_\alpha(t)v_\alpha^{max} \tag{2.3}$$

onde, v_α^{di} é a velocidade de desejo inicial, um parâmetro de *setup* do modelo, e v_α^{max} é a velocidade máxima de desejo do pedestre α, dada por: $v_\alpha^{max} = CV_\alpha^{di}$, em que C > 1, também dada como um parâmetro de *setup* do modelo. Essa velocidade é a velocidade máxima que o pedestre α vai poder conferir na tentativa de acelerar para compensar a desaceleração causada por obstáculos ou outros pedestres.

$n_\alpha(t)$ é um fator de impaciência para o pedestre α e é dado por:

$$n_\alpha(t) = 1 - \frac{\langle v_\alpha(t)\rangle}{v_\alpha^{di}} \tag{2.4}$$

onde, $\langle v_\alpha(t)\rangle$ é a velocidade média em direção ao objetivo (alvo) para todo instante (t), entre 0 ... t. $\langle v_\alpha(t)\rangle$ é calculada a partir da projeção do vetor produzido entre a posição inicial do pedestre p_α^i e a posição atual do pedestre p_α sobre um vetor que parte de p_α^i até o ponto alvo de desejo do pedestre α . O valor dessa projeção é dividido pelo tempo decorrido entre estes dois pontos para calcular a velocidade média $\langle v_\alpha(t)\rangle$. A Figura 2.2 demonstra como essa interpretação é realizada em Jorgensen et al. (2010).

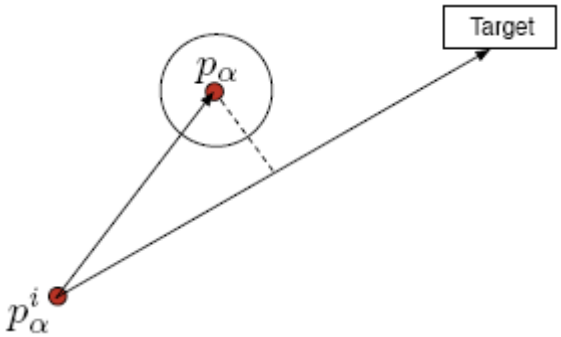


Figura 2.2 - Modelo de cálculo da velocidade média.
Fonte: JORGSEN et al., 2010, p.12.

A $v_\alpha^d(t)$ é indefinida em $t = 0$. Uma conjectura possível é assumir que $v_\alpha^d(0) = v_\alpha^{di}$, como fizeram Jorgensen et al. (2010), que definiram $v_\alpha^d(t)$ como segue:

$$v_\alpha^d(t) = \begin{cases} v_\alpha^{di} & se \quad t = 0 \\ \big(1 - n_\alpha(t)\big)v_\alpha^{di} + n_\alpha(t)v_\alpha^{max} & se \quad t > 0 \end{cases} \tag{2.5}$$

Analisando as equações 2.3 e 2.4 fica claro que a velocidade média aproxima-se da velocidade de desejo inicial v_α^{di}, uma vez que uma $\langle v_\alpha(t)\rangle \to v_\alpha^{di}$ implica em $n_\alpha(t) \to 0$, que implica $v_\alpha^d \to v_\alpha^{di}$. Correspondentemente, uma vez que uma $\langle v_\alpha(t)\rangle \to 0$ implica $n_\alpha(t) \to 1$, que implica $v_\alpha^d \to v_\alpha^{max}$ o que leva o pedestre α a acelerar em busca da sua velocidade de desejo inicial v_α^{di}.

Se a v_α^{max} é ajustada para ser maior do que v_α^{di}, significa que, à medida que a $\langle v_\alpha(t)\rangle$ sobe a v_α^d vai baixando. Quando a v_α^d é mais baixa que a $\overrightarrow{v_\alpha}(t)$, resulta em uma $\overrightarrow{f_\alpha^d}$ negativa devido à equação 2.2, e vice-versa. Uma interpretação disso é que a $\overrightarrow{f_\alpha^d}$ age como uma força estabilizadora, que acelera o pedestre quando ele está se movendo mais lento do que a sua v_α^{di}, e desacelera-o quando ele está se movendo mais rápido do que a v_α^{di}, permitindo velocidades de movimento até o limite estabelecido na v_α^{max} para "compensar" o tempo perdido pela ação de outras forças que agiram sobre ele. As componentes da Força Desejo estão resumidas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Resumo dos componentes da Força de Desejo.

Componentes da Força de Desejo	
$\overrightarrow{V_\alpha}(t)$	Velocidade do pedestre α no instante t
$\overrightarrow{V_\alpha^d}(t)$	Velocidade de Desejo do pedestre α no instante t
v_α^{di}	Velocidade de Desejo inicial do pedestre α
$\langle v_\alpha(t)\rangle$	Velocidade média do pedestre α
τ	Fator de relaxação

2.4.3.3 Força de Interação

A Força de Interação $\overrightarrow{f_{\alpha\beta}}$ sobre o pedestre α é uma força que age entre todos os pedestres do modelo. E representa a soma das forças de repulsão que outros

pedestres exercem sobre o pedestre α. Seu papel é garantir que o pedestre α mantenha-se afastado de outros pedestres.

A função para a força de interação entre os pedestres depende da posição e da velocidade de ambos, dada pela equação 2.6:

$$\overrightarrow{f_{\alpha\beta}}(t) = w(\theta_{\alpha\beta})\, \vec{g}\,(d_{\alpha\beta}\,(t)) \tag{2.6}$$

onde, $\theta_{\alpha\beta}$ é o ângulo entre a direção do movimento do pedestre α e o vetor que aponta do pedestre α para o pedestre β e $d_{\alpha\beta}$ é a distância entre o centro dos pedestres $\alpha\ e\ \beta$, como pode ser visto na Figura 2.9(a), mais a seguir. $w(\theta_{\alpha\beta})$ é dada como:

$$w(\theta_{\alpha\beta}) = \lambda + (1 - \lambda)\,\frac{1 + cos\theta}{2} \tag{2.7}$$

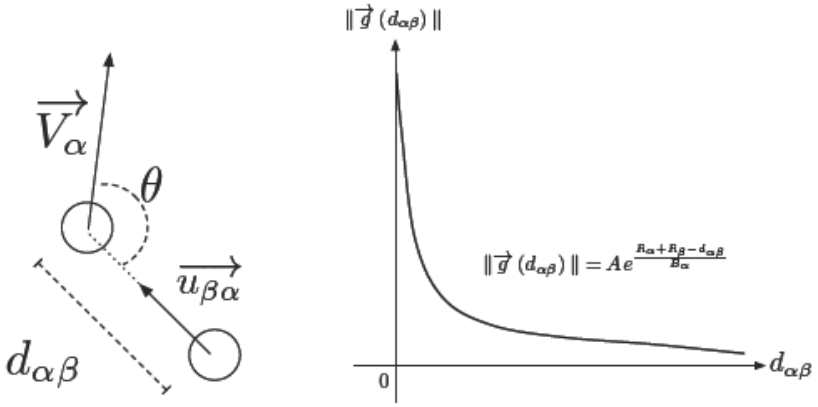
em que $0 \leq \lambda \leq 1$ e é um parâmetro de *setup* do modelo. Isso e o fato de que $-1 \leq \cos(\theta_{\alpha\beta}) \leq 1$, implica que $\lambda \leq w \leq 1$, então, w modifica a força dada por $\vec{g}\,(d_{\alpha\beta}\,(t))$ por um componente angular, quando $\lambda = 1$, $w = 1$, e nenhuma modificação angular é feita e quando $\lambda < 1$, a força é modificada por um peso determinado pelo ângulo, dando pesos maiores aos ângulos mais próximo de 0 e pesos menores aos ângulos mais próximos de π. O que corresponde ao pedestre prestar mais atenção aos demais, de forma a interagir mais fortemente com outros pedestres à frente dele do que com os que estão ao lado ou atrás. O parâmetro λ determina o quão anisotrópica é essa propriedade do modelo.

A força de interação $\vec{g}\,(d_{\alpha\beta}\,(t))$ é dada por:

$$\vec{g}\,\left(d_{\alpha\beta}\,(t)\right) = Ae^{\left(\frac{R_\alpha + R_\beta - d_{\alpha\beta}}{B}\right)}\overrightarrow{u_{\beta\alpha}} \tag{2.8}$$

onde, $\overrightarrow{u_{\beta\alpha}}$ é um vetor que aponta do pedestre β para o pedestre α, como pode ser observado na Figura 2.3(a), e A e B são parâmetros de *setup* do modelo que, em Jorgensen et al. (2010), são os mesmos para todos os pedestres. A interação entre dois pedestres, Figura 2.3(a), é governada pela distância entre os pedestres $d_{\alpha\beta}$, o vetor unitário $\overrightarrow{u_{\beta\alpha}}$ que aponta do pedestre β para o pedestre α, e o ângulo θ entre a direção do movimento do pedestre α e o vetor que aponta do pedestre β para o pedestre α.

A força repulsiva aumenta exponencialmente quanto mais o pedestre α se aproxima do pedestre β, como ilustra a Figura 2.3(b).



(a) (b)

Figura 2.3 - Interação entre dois pedestres.
Fonte: JORGSEN et al., 2010, p.14.

As componentes da Força de Interação estão resumidas na Tabela 2.4, a seguir:

Tabela 2.4 - Resumo das componentes da Força de Interação.

Componentes da Força de Interação	
$\theta_{\alpha\beta}$	Ângulo entre a direção de movimento do pedestre α e o vetor de β para α
$d_{\alpha\beta}$	Distância entre os pedestres α e β
$\overrightarrow{u_{\beta\alpha}}$	Vetor unitário apontando de β para α
λ	Parâmetro que controla a propriedade anisotrópica da interação
A	Parâmetro que regula a força da interação
B	Parâmetro que regula a magnitude da força repulsiva de interação

2.4.3.4 Força de Repulsão

A Força de Repulsão $\overrightarrow{f_{\alpha\gamma}}$ representa o anseio do pedestre α de manter-se afastado de obstáculos, como os limites de edificações em vias públicas. Ela é quem impede que o pedestre α transpasse estes obstáculos.

A Força de Repulsão $\overrightarrow{f_{\alpha\gamma}}$ para o obstáculo γ é dada por:

$$\overrightarrow{f_{\alpha\gamma}}(t) = -\nabla_{\overrightarrow{p_\alpha}} h\left(d_{\alpha\gamma}(t)\right) \tag{2.9}$$

onde, h é um potencial repulsivo e $d_{\alpha\gamma}(t)$ é a distância do pedestre α para o ponto mais próximo no instante *t*. $\nabla_{\overrightarrow{p_\alpha}}$ é o gradiente do potencial de repulsão em relação à posição do pedestre. A representação da interação do pedestre α com obstáculos pode ser observada na Figura 2.4, onde $p_{\gamma\alpha}$ é o ponto sobre o obstáculo γ mais próximo para o pedestre α e $d_{\alpha\gamma}(t)$ é a distância entre o pedestre α até este ponto.

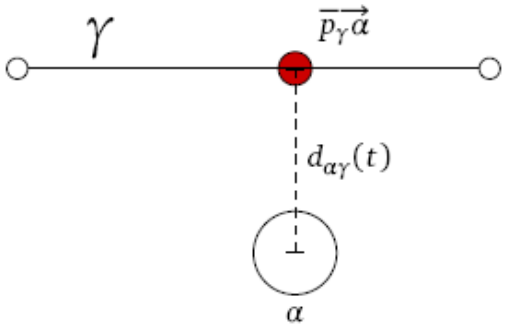


Figura 2.4 - Representação da interação do pedestre α com o obstáculo γ.
Fonte: JORGSEN et al., 2010, p.15.

A definição de *h* na Equação 2.9 não é dada em Helbing et al. (2005). No entanto, ela é resolvida em Johansson et al. (2007) como:

$$h\left(d_{\alpha\gamma}(t)\right) = Ue^{\frac{-d_{\alpha\gamma}(t)}{R_\alpha}} \tag{2.10}$$

onde, U é uma constante dada como parâmetro de *setup* do modelo.

Uma vez que $p_{\gamma\alpha}$ e p_α são conhecidos, o gradiente pode ser calculado apenas para a magnitude da força, adicionando a direção mais tarde. Dada essa interpretação, a força de interação com o obstáculo torna-se:

$$f_{\alpha\gamma}(t) = -\left(\frac{\partial}{\partial d_{\alpha\gamma}(t)} Ue^{\frac{-d_{\alpha\gamma}(t)}{R_\alpha}}\right)\overrightarrow{U_{\gamma\alpha}} \tag{2.11}$$

onde, $\overrightarrow{U_{\gamma\alpha}}$ é o vetor que aponta do obstáculo γ para o pedestre α.

Diferenciando isso, tem-se:

$$f_{\alpha\gamma}(t) = \frac{U}{R_\alpha}\, e^{\frac{-d_{\alpha\gamma}(t)}{R_\alpha}}\, \overrightarrow{U_{\gamma\alpha}} \tag{2.12}$$

Uma vez que a distância entre o pedestre α e o obstáculo γ não pode ser negativa, o termo exponencial da repulsão será sempre entre 0 e 1, se aproximando de 1 quando a distância diminui. Isso significa que $0 < \left|f_{\alpha\gamma}(t)\right| < \frac{U}{R_\alpha}$ cresce exponencialmente para $\frac{U}{R_\alpha}$ quando a distância entre o pedestre α e o obstáculo γ decresce. Como ocorre com a força de interação entre pedestres, isso significa que a repulsão dos obstáculos é insignificante quando a distância é grande, mas forte o suficiente para impedir que os pedestres caminhem sobre eles, mesmo quando não há forças físicas presente entre eles. O parâmetro U de *setup* do modelo determina exatamente o quão forte essa força repulsiva pode ser.

Os parâmetros da Força de Repulsão para os obstáculos podem ser resumidas como na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Resumo das componentes da Força de Repulsão aos obstáculos.

Componentes da Força de Repulsão	
$\overrightarrow{p_{\alpha\gamma}}$	Ponto sobre o obstáculo γ mais próximo do pedestre α
$d_{\alpha\gamma}$	Distância do pedestre α para o obstáculo γ
U	Constante que determina a magnitude da Força Repulsiva

2.5 Taxas de Ocupação Típicas

As taxas de ocupação típicas tratam da quantidade de pessoas por metro quadrado, que tipicamente são observadas em multidões de pedestres, em ambientes abertos ou confinados. O termo taxa de ocupação é adotado pelas autoridades da segurança pública brasileira, como, por exemplo, as polícias e as brigadas militares.

Segundo Rizzo (2006), considerando ambientes abertos e indivíduos adultos de estatura média, é praticamente impossível atingir a taxa de 10 pessoas/m^2. E as

densidades de 9 pessoas/m^2 e 8 pessoas/m^2 ocorrem, excepcionalmente, em veículos do transporte coletivo superlotados ou em condições extraordinárias, como na saída de estádios de futebol, por exemplo. Ambas densidades chegam a ser claustrofóbicas, incômodas e insuportáveis por um período prolongado, uma vez que as pessoas ficam completamente imobilizadas. Por isso, do ponto de vista do controle de uma multidão, essas taxas devem ser evitadas, pois qualquer incidente pode se transformar em um desastre. Tais taxas são tão difíceis de ser atingidas em áreas abertas que Rizzo salienta em seu trabalho não ser possível obter uma imagem.

Quando a taxa observada é de 7 pessoas/m^2, é possível notar que as pessoas ficam espremidas e sem mobilidade, e que é praticamente impossível aumentar a densidade. Esta constatação fica mais clara quando se observa a Figura 2.5, a seguir.

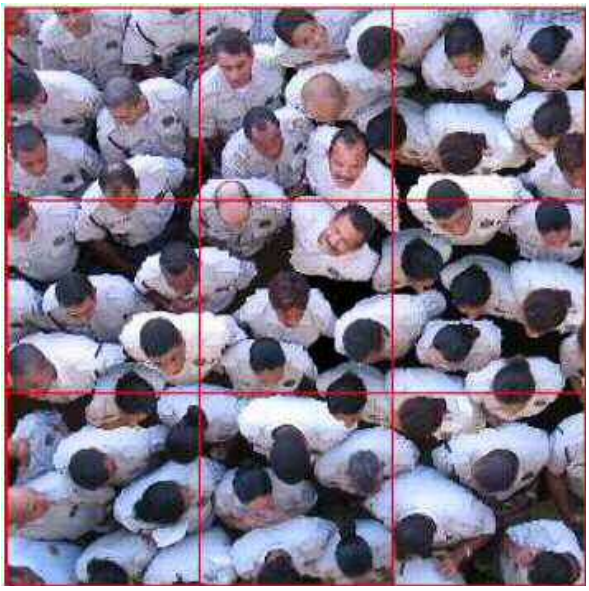


Figura 2.5 - Densidade = 7 pessoas/m^2.
Fonte: Rizzo, 2006, p.35.

A densidade de 6 pessoas/m^2 e 5 pessoas/m^2 é a ocorrência máxima observada em ambiente abertos. Porém, ela só ocorre em eventos concorridos, no cinturão de pessoas que formam o perímetro imediatamente adjacente ao acontecimento, não se sustentando em profundidade, ocorrendo em um perímetro máximo de cinco a dez metros. Quando a densidade atinge tais valores, o espaço entre as pessoas é reduzido, ficando a mobilidade extremamente restringida (RIZZO, 2006). A Figura 2.6 ilustra a imagem da densidade de 5 pessoas/m^2.

Figura 2.6 - Densidade = 5 pessoas/m^2.
Fonte: Rizzo, 2006, p.37.

A densidade de 4 pessoas/m^2 também é observada em shows e eventos que concentram grande quantidade de pessoas, porém, na faixa intermediária do público. Segundo Rizzo (2006), essa densidade dificilmente ocorre em deslocamento de multidões de pessoas. Pode-se notar na Figura 2.7, que ainda não há espaço que permita a passagem de pessoas, como, por exemplo, para socorro, mas já é possível constatar algumas áreas vazias.

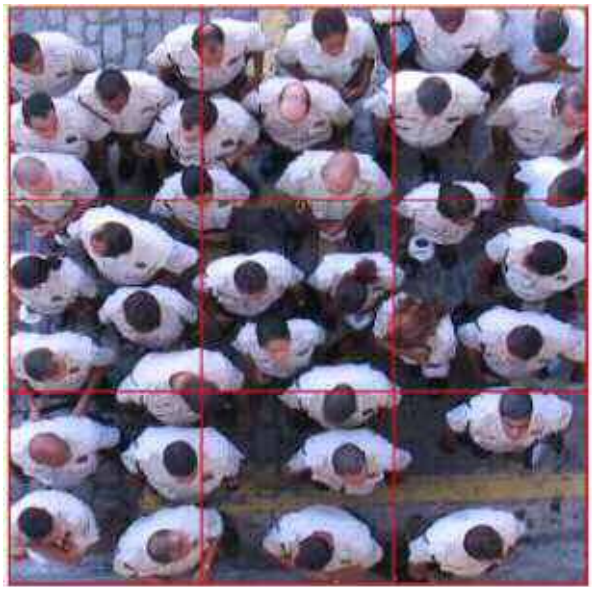


Figura 2.7 - Densidade = 4 pessoas/m^2.
Fonte: Rizzo, 2006, p.38.

A densidade de 3 pessoas/m^2 (Figura 2.8) é a densidade média mais frequente em shows e eventos que concentram grande público em áreas externas, e eventualmente são observadas em blocos de carnaval e outros eventos similares. Já as densidades de 2 pessoas/m^2 (Figura 2.9) e 1 pessoas/m^2 (Figura 2.10) ocorrem tipicamente em deslocamentos em ambientes abertos, como, passeatas, comícios e formaturas (RIZZO, 2006).

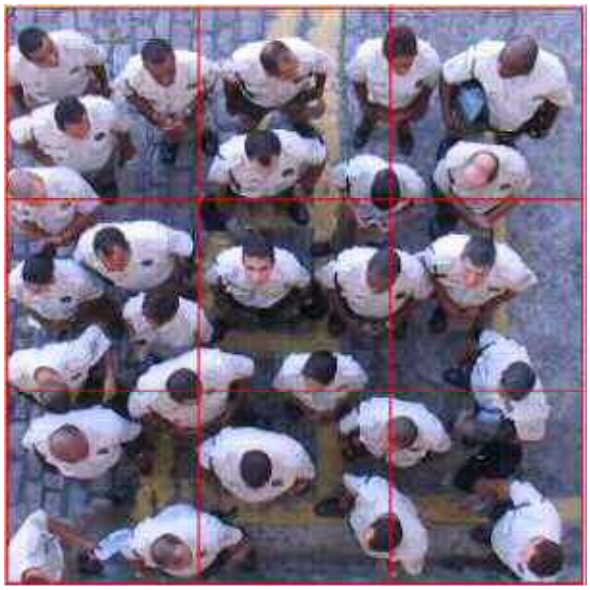


Figura 2.8 - Densidade = 3 pessoas/m^2.
Fonte: Rizzo, 2006, p.39.

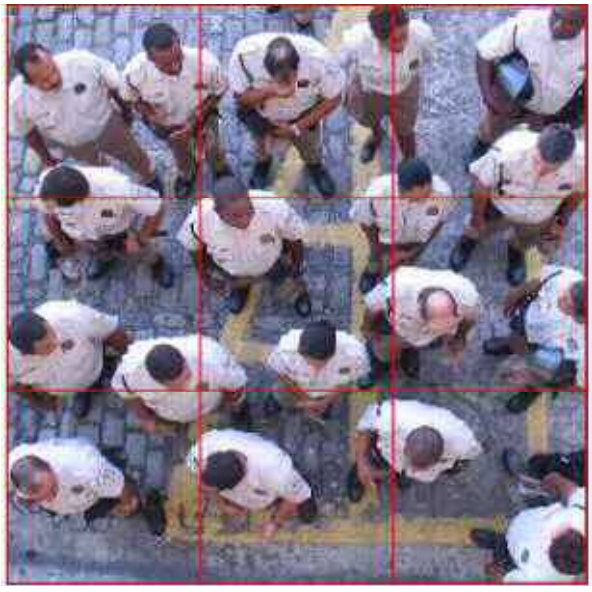


Figura 2.9 - Densidade = 2 pessoas/m^2.
Fonte: Rizzo, 2006, p.40.

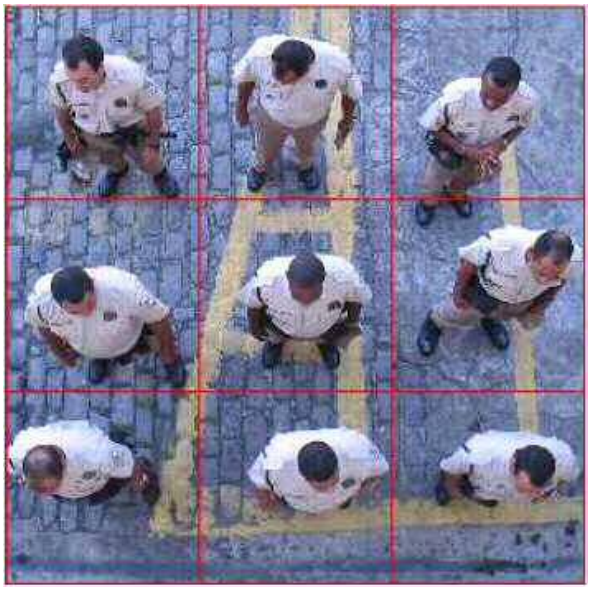


Figura 2.10 - Densidade = 1 pessoas/m^2.
Fonte: Rizzo, 2006, p.41.

É importante ressaltar que as taxas aqui apresentadas são dinâmicas. Por exemplo, uma passeata que durante o deslocamento tem um densidade entre 1 pessoa/m^2 e 2 pessoas/m^2, quando chega ao local do ponto de encontro se concentra, passando a assumir o comportamento de massa estática com densidade que chega a 3 pessoas/m^2 e no máximo 4 pessoas/m^2, como ressalta Rizzo (2006).

2.6 Considerações Finais

Como descrito na introdução desse capítulo, a modelagem e a simulação da movimentação de multidão de pedestres requer que se concentre no realismo dos aspectos comportamentais. Entre as abordagens estudadas foi possível identificar que a abordagem microscópica é a que melhor se aproxima de tal realidade.

Dos modelos de abordagem microscópica estudados, pode-se deduzir que os modelos baseados em Autômato Celular e Lattice-Gas são modelos em que o espaço e o tempo são discretos. Consequentemente, são muito úteis para simulações computacionais em grande escala. Como apresentado nesse capítulo, foram aplicados para modelagem de evacuações de pessoas em uma sala, a exemplo de Tajima e Nagatani (2001) e Guo e Huang (2008), que propuseram modelos para simular a dinâmica de saída de pessoas de uma sala, onde características proeminentes de evacuação real, como arqueamento e aglomeração,

foram observadas por simulações. Entretanto, forças de contato presentes em uma multidão não são consideradas em tais modelos.

Em contrapartida, modelos de Forças Sociais são modelos contínuos utilizados para descrever a dinâmica de pedestres, que além de reproduzirem muitos dos comportamentos observados em fluxo de pedestres, como a formação de linhas, aglomeração ou o arqueamento, são capazes de expressar forças de contato físico entre pessoas e entre essas e obstáculos em diversas situações.

Essa qualidade do modelo de Forças Sociais permitiu pensar em aplicá-lo em um simulador de trânsito baseado em autômatos celulares, como o ITSUMO, adicionando a esse mais uma funcionalidade, a de movimentação de multidão de pedestres. O problema é que tais simuladores, por definição, simplesmente não comportam a sua simples adição. Foi então que se pensou em desenvolver um modelo em mesoescala, capaz de capturar o comportamento da multidão se deslocando segundo as regras do modelo de Forças Sociais.

3. MODELO DE DENSIDADES DE PEDESTRES

Neste capítulo é apresentado um modelo de mesoescala para a movimentação de multidões de pedestres, adaptável aos simuladores baseados em autômatos celulares, capaz de se comportar como um agente multidão neste simulador, denominado modelo de Densidades de Pedestres ou simplesmente Modelo de Densidades.

Esse modelo buscou inspiração nos resultados produzidos pela implementação do modelo de Forças Sociais proposto por Jorgensen et al. (2010), para formalizar um modelo teórico capaz de reproduzir o comportamento da densidade de pedestres que se observou. Logo, ele é o resultado de uma análise quali-quantativa criteriosa sobre os resultados produzidos por essa implementação, considerando vias onde o cenário pode ou não conter a presença de obstáculos, com deslocamentos em um único sentido ou em contra-fluxo.

O modelo aqui apresentado é descrito por meio da seguinte organização: na seção 3.1 é apresentado o modelo de agente idealizado; a seção 3.2 dá sequência a essa exposição trazendo a descrição geral do Modelo de Densidades; e a seção 3.3 expõe, em detalhes, como se chega à componente dinâmica neste mesmo modelo, o total de pedestres.

3.1 Modelo de Agente

Um agente k no Modelo de Densidades é um tipo particular de agente reativo, ocupando o espaço A_k. Seu conjunto de variáveis de estado se divide em dois grandes grupos.

Variáveis atemporais:

- L_k - Largura do agente;
- C_k - Comprimento do agente;

- A_k - Área ocupada por um agente na via;
- $\langle v_p \rangle$ - Velocidade média dos pedestres em A_k.

Variáveis temporais e espaciais:

- $T_{pk(t)}$ - Total de pedestres em A_k;
- $D_{k\,(t)}$ - Densidade de pedestres em A_k;
- t_{ds} - Tempo necessário para que pedestres saiam de A_k;
- $Q_{ep(t)}$ - Quantidade de entrada de pedestres em A_k;
- $Q_{sp(t)}$ - Quantidade de saída de pedestres de A_k;
- $T_{ep/s(t)}$ - Taxa de entrada de pedestres por segundo;

A dinâmica destas variáveis está detalhada nas próximas seções, exceto t_{ds}, resolvido pela equação a seguir:

$$t_{ds} = \alpha_i \frac{C_k}{\langle v_p \rangle} \tag{3.1}$$

onde, α_k é o identificador da área que o agente k ocupa relativo a sua posição no sentido de deslocamento dos pedestres. Como por exemplo, se o agente ocupa a área sete da Figura 3.1, juntamente com o agente que ocupa a área um, é o primeiro da pista quando o sentido do movimento dos pedestres parte da esquerda para a direita. Logo, o identificador da área que o agente ocupa é $\alpha_k = 1$. Tomando a área de agente doze como referência, considerando o mesmo sentido, $\alpha_k = 6$, já que ela é a sexta área de agente neste mesmo sentido.

3.2 Descrição do Modelo

No Modelo de Densidades, um agente k é representado por um retângulo de densidade, de $L_k = 3{,}5\ m$ de largura por $C_k = 5{,}0\ m$ de comprimento. Sua largura compreende a medida do eixo da via pública até um de seus limites, superior ou inferior, enquanto que seu comprimento é a medida necessária para comportar um automóvel. Uma via pública pode ser constituída por, no máximo, n agentes de tais

dimensões. Sendo assim, se uma via estiver totalmente ocupada, o número total de agentes possíveis sobre a via (T_a) é calculado pela seguinte equação:

$$T_a = \frac{C_v}{C_k} \, x \, 2 \tag{3.2}$$

onde, C_v é o comprimento da via. Logo, uma via de $C_v = 30\,m$ comporta seis agentes por pista, totalizando doze agentes em toda via, distribuídos nas áreas de agentes, como ilustra a Figura 3.1.

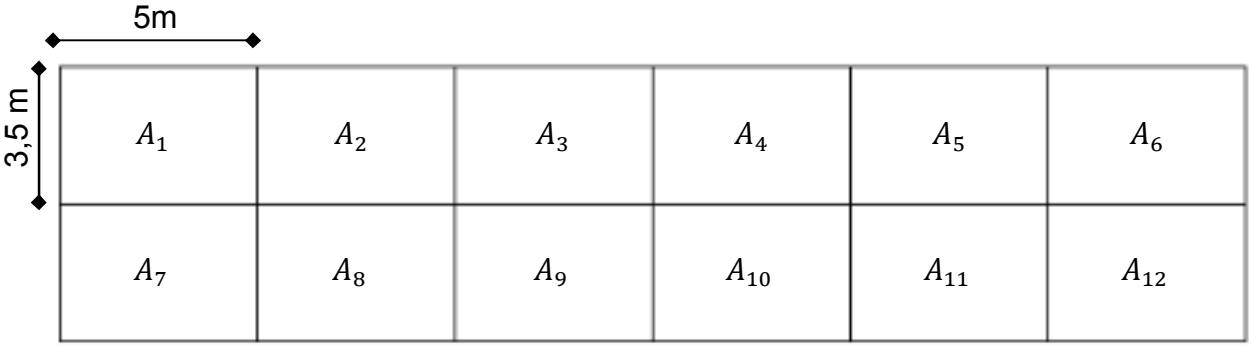


Figura 3.1 - Distribuição das áreas de agentes em uma via pública de 30 m de comprimento.

A densidade de um agente D_k , no instante, t é calculada por:

$$D_{k\,(t)} = \frac{T_{pk\,(t)}}{A_k} \tag{3.3}$$

onde, T_{pk} é o total de pedestres dentro da área que o agente k ocupa, sendo $A_k = L_k \, x \, C_k$.

3.3 Total de Pedestres

A quantidade total de pedestres $T_{pk(t)}$ é sensível ao ambiente. Em **vias onde a presença de obstáculos inexiste**, ela é calculada como:

$$T_{pk\,(t)} = \begin{cases} \left\lfloor \dfrac{t}{1/T_{ep/s}} \right\rfloor & se \quad t \leq t_{ds} \\ \left\lfloor T_{ep/s} \, * \, C_k \, / \, \langle v_p \rangle \right\rfloor & se \quad t > t_{ds} \end{cases} \tag{3.4}$$

onde, $T_{ep/s}$ é a taxa de entrada de pedestres por segundo em A_k, $\langle v_p \rangle$ é a velocidade média dos pedestres na multidão e t_{ds} é o tempo necessário para que um pedestre saia de A_k, passando, por exemplo, de A_1 para A_2.

Todo agente k recebe em um segundo a quantidade de pedestres prevista em $T_{ep/s}$, o que significa que cada agente k recebe, entre um segundo e outro, unidades pedestres até o valor definido para $T_{ep/s}$. Por exemplo, se $T_{ep/s}$ é igual a 7 pedestres/s, o agente k receberá um pedestre a cada 0,1428 s.

Baseado nisso, pode-se deduzir que todo agente k recebe uma entrada constante de pedestres. E se isso não for compensado com a saída de pedestres após t_{ds}, a densidade do agente k irá crescer indefinidamente. Desse modo, para compensar a $T_{ep/s}$, surge no agente k, passado seu t_{ds}, uma taxa de saída de pedestres de A_k por segundo, a $T_{sp/s}$, que em vias livres de obstáculos é $T_{sp/s} = T_{ep/s}$.

Nas **vias que apresentam a presença de obstáculos**, o cálculo do $T_{pk(t)}$ é dependente da posição do agente k em relação ao obstáculo, nas proximidades deste. Por exemplo, com um obstáculo em A_2, o agente presente em A_1 é anterior a esse obstáculo e, por isso, $T_{pk(t)}$ é calculado por:

$$T_{pk\,(t)} = \begin{cases} \left\lfloor \dfrac{t}{1/T_{ep/s}} \right\rfloor & se \quad t < t_{ds} \\ \left\lfloor T_{ep/s} * \dfrac{C_k}{\langle v_p \rangle} + \sum_{t_{ds}}^{t} Q_{ep} - Q_{sp} \right\rfloor & se \quad t \geq t_{ds} \quad e \quad t \leq t_{je} \\ \left\lfloor T_{ep/s} * C_k / \langle v_p \rangle \right\rfloor & se \quad t \geq t_{ds} \quad e \quad t > t_{je} \end{cases} \qquad (3.5)$$

onde, Q_{ep} é a quantidade de entrada de pedestres em A_k, Q_{sp} é a quantidade de saída de pedestres desta A_k e t_{je} é o tempo necessário para que haja estabilização da densidade no agente k, resultado do acúmulo de pedestres que surge na A_k desse agente quando há um obstáculo em $A_k + 1$.

Aplica-se a Equação 3.5 quando o agente k **está anterior a um obstáculo ou está vizinho deste anterior**, ajustando-se apenas a Q_{ep} e a Q_{sp} , segundo as equações 3.6 e 3.7, a seguir:

$$Q_{ep} = \frac{T_{pka(t)}/t_{ds}}{T_{ep/s}} * C_{le} \quad (3.6)$$

$$Q_{sp} = 1 * C_{ls} \quad (3.7)$$

onde, C_{le} é uma constante de localização aplicada à entrada de pedestres em A_k, e C_{ls} é uma constante de localização aplicada à saída de pedestres desta A_k. Sendo, ambas, diferentes para esses dois tipos de localizações. E $T_{pka(t)}$ é o total de pedestres em A_{k-1}, segundo o fluxo de pedestres definido para a via.

Quando o agente k **está é um vizinho a um obstáculo**, $T_{pk}(t)$ é dependente de $T_{pk-1}(t)$ e seu vizinho, sendo assim, ela é calculada por:

$$T_{pk\,(t)} = \begin{cases} \left\lfloor \frac{t}{1/T_{ep/s}} \right\rfloor & se \quad t \leq t_{ds} \\ \left\lfloor T_{ep/s} * C_k / \langle v_p \rangle * Q_{ep} \right\rfloor & se \quad t > t_{ds} \end{cases} \quad (3.8)$$

sendo que, $T_{sp/s} = T_{ep/s}$ e a C_{le} uma constante de localização aplicada à entrada de pedestres em A_k diferente da C_{le} aplicada na situação anteriormente citada (está anterior a um obstáculo ou está vizinho deste anterior), pois ela é dependente da localização do agente k em relação ao obstáculo.

Quando o agente k **está posterior a um obstáculo**, $T_{pk(t)}$ também é calculada pela equação 3.8. Porém, ela é dependente da quantidade de pedestres que recebe de seu vizinho e , por isso, a $T_{ep/s}$ é calculada por:

$$T_{ep/s} = \frac{T_{pkv(t)}}{t_{ds}} \quad (3.9)$$

onde, $T_{pkv(t)}$ é o total de pedestres no agente na área vizinha.

Excetuando-se as situações descritas até aqui, para todo agente k, independente de cenário (com ou sem obstáculo), determina-se a $T_{ep/s}$ em função de sua localização na via. Para aqueles que estão ocupando as primeiras áreas da

via, a $T_{ep/s}$ é uma constante definida em função das taxas de ocupação típicas apresentadas no capítulo dois. Para os demais, a $T_{ep/s}$ é dependente do total de pedestres no agente que ocupa a área anterior, dada por:

$$T_{ep/s} = \frac{T_{pka(t)}}{t_{ds}} \tag{3.10}$$

onde, $T_{pka(t)}$ é o total de pedestres no agente anterior segundo o fluxo de pedestres definido para a via.

3.4 Considerações Finais

O Modelo de Densidades captura a densidade de pedestres que emerge do movimento dos pedestres regidos por uma implementação do modelo de Forças Sociais. Em função disso, pode-se perceber que o Modelo de Densidades é baseado na quantidade de entrada de pedestres, por segundo, e na quantidade de saída de pedestres, por segundo, na área de agente do modelo, sensível ao ambiente. Isto é, a presença ou não de obstáculos na via é capaz de alterar o comportamento do agente do modelo, resultando na alteração destas quantidades.

4. VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

O modelo de Densidade de Pedestres apresentado no capítulo 3 toma por base as densidades de pedestres geradas ao longo do tempo por uma implementação do modelo de Forças Sociais descrito no capítulo 2. Logo, adotou-se como técnica para sua validação, confrontar quantitativamente o comportamento das densidades de pedestres produzidas ao longo do tempo pelas suas implementações.

Os cenários utilizados nas simulações consideraram o movimento da multidão em uma via pública de 30 m de comprimento por 3,5 m de largura, com e sem a presença de obstáculos, em uma única direção ou em contra fluxo, onde os obstáculos representam a presença ou não de veículos. A justificativa para a escolha desse cenário parte do princípio de funcionamento do simulador ITSUMO, que é seccionado em quadras e possui um nodo de ligação entre as vias, onde se encontram objetos do tipo *source* e *sink*, responsáveis pelo roteamento do tráfego de agentes veículos. Assim, imagina-se que os experimentos realizados em uma única quadra possam ser replicados pelos objetos *source* e *sink* para as demais quadras do ITSUMO, com a mesma $T_{ep/s(t)}$, ou alternativamente, com uma fração dessa, desde que as densidades da multidão de pedestres possam evoluir no tempo como agentes multidão (ou agentes *crowd*).

Os resultados produzidos pelo simulador são sensíveis aos valores determinados para as constantes de cada modelo. Sendo assim, para que os resultados aqui discutidos pudessem ser atingidos, no modelo de Forças Sociais os valores utilizados foram $A = 12,\ B = 0{,}20,\ U = 12,\ \lambda$ 1,00, $v_\alpha^{di} = 1{,}6\ m/s,\ C = 1$ e $\tau = 0{,}10$, e no modelo de Densidades de Pedestres foram $\langle v_p \rangle = 1{,}6\ m/s,\ t_{je} = 17\ s$, sendo que, para a C_{le} e a C_{ls} os valores foram determinados empiricamente, segundo a localização do agente em relação ao obstáculo.

Durante a janela de estabilização, aplicou-se a C_{le} e a C_{ls} das equações 3.6 e 3.7, quando o agente ocupou a área anterior a um obstáculo, $C_{le} = 1$ e $C_{ls} = 0{,}66$. Quando o agente ocupou uma área vizinha a esta área (diagonal anterior de uma área que contenha um obstáculo) a $C_{le} = 1{,}2$ e $C_{ls} = 1{,}1$. Passada a janela de estabilização, para as duas situações citadas anteriormente, aplicou-se a essas mesmas equações $C_{le} = 1$ e $C_{ls} = 1$. Nas demais situações, quando o agente ocupou uma área vizinha de uma área que continha um obstáculo $C_{le} = 1{,}5$, e quando o agente ocupou uma área imediatamente posterior a área que continha um obstáculo $C_{le} = 0{,}6$.

Com o intuito de comprovar a equivalência do modelo de Densidades de Pedestres com uma implementação do modelo de Forças Sociais, no que se refere ao atributo densidade, foram realizadas diversas rodadas de simulações com diferentes taxas de entrada de pedestres, $T_{ep/s(t)} = 14\ pessoas/s$, $T_{ep/s(t)} = 18\ pessoas/s$, $T_{ep/s(t)} = 22\ pessoas/s$, $T_{ep/s(t)} = 26\ pessoas/s$ e $T_{ep/s(t)} = 30\ pessoas/s$, em que os valores obedeceram às limitações apontadas por Rizzo (2006) em seu trabalho sobre as taxas típicas de densidade de pedestres em multidões, assunto tratado no capítulo 2.

A análise dos resultados se deu em duas partes bem distintas, com a presença ou não de obstáculos no cenário proposto. É importante notar que, dentro de cada uma destas partes, a análise é subdividida, em toda a pista, nesse caso, um retângulo de $L_k = 3{,}5\ m$ por $C_k = 30\ m$, e em área de agente, um retângulo de $L_k = 3{,}5\ m$ por $C_k = 5\ m$. Isto visa a eliminar eventuais ruídos gerados pela contabilização de um mesmo pedestre na divisa entre duas áreas de agentes vizinhas, efeito que é suprimido quando se considera o retângulo que forma a área de toda a pista.

Visando a apresentar a análise dos resultados obtidos na validação do modelo proposto, este capítulo está organizado da seguinte forma: Nas seções 4.1 e 4.2 são apresentados os resultados obtidos para a movimentação de pedestres unidirecional e bidirecional, sem a presença de obstáculos. E nas seções 4.3 e 4.4 são apresentados os resultados para esses mesmos tipos de movimentação, porém, com a presença de obstáculos.

4.1 Movimentação Unidirecional sem Obstáculos

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações unidirecionais, em que a via pública representada não possuí obstáculos, como ilustrado na Figura 4.1, na qual os pedestres são representados por círculos azuis, se deslocando da esquerda para a direita.

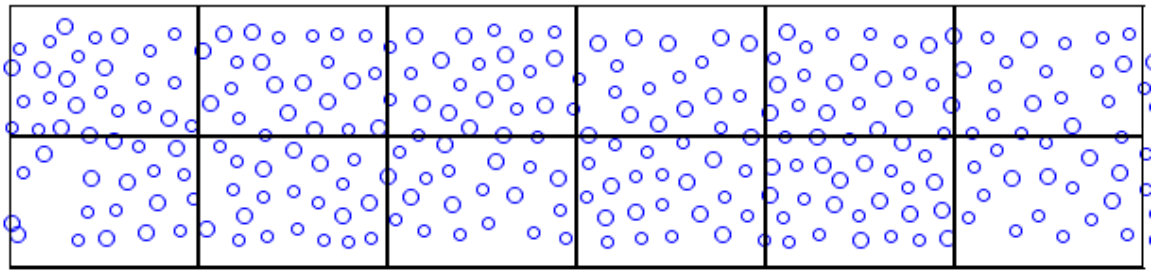


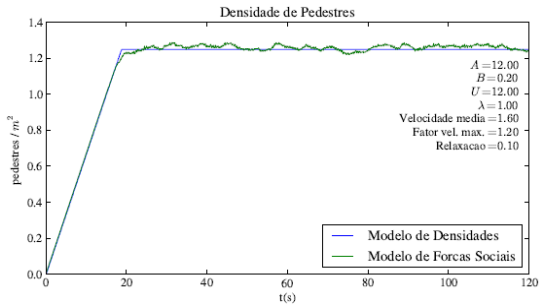
Figura 4.1 - Screenshot da movimentação unidirecional sem obstáculos, $t = 28{,}03\ s,\ T_{ep/s} = 14\ pessoas/s$.

Como pode ser observado nos gráficos da Figura 4.2, quando se toma por base a densidade produzida pelos dois modelos em toda a pista, o Modelo de Densidades acompanha a densidade do modelo de Forças Sociais, mesmo para diferentes taxas de entrada de pedestres na via. O que significa que o modelo expressado pelas equações 3.3 e 3.4, quando aplicado sobre cada agente do Modelo de Densidades, é equivalente ao do modelo de Forças Sociais.

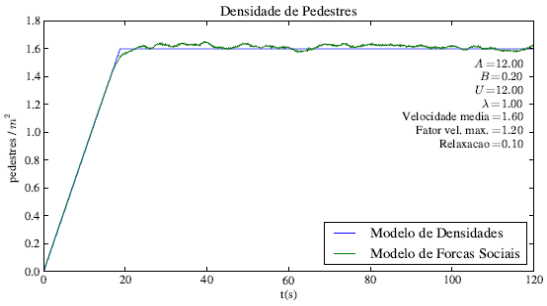
Esse mesmo comportamento também é observado em cada área de agente da simulação. A Figura 4.3 ilustra isso. As densidades nas áreas de agentes são praticamente as mesmas nos dois modelos. A diferença que se observa, como já citado na introdução desse capítulo, é resultado do ruído produzido ao se contabilizar os pedestres presentes em área de agente no modelo de Forças Sociais, onde um pedestre pode contar para duas áreas de agentes adjacentes. O que não acontece nos resultados apresentados na Figura 4.2, pois todos os pedestres presentes na simulação são contabilizados para uma mesma área, isto é, toda a via.

Ainda pode se notar que há uma outra diferença entre os valores plotados nos gráficos da Figura 4.3. No modelo de densidades, os valores são praticamente estáveis ao longo do tempo, passado t_{ds}, e no modelo de Forças Sociais não. Isso ocorre porque, na simulação do modelo de Forças Sociais, os pedestres são lançados na via de forma pseudo-aleatória, buscando aproximar-

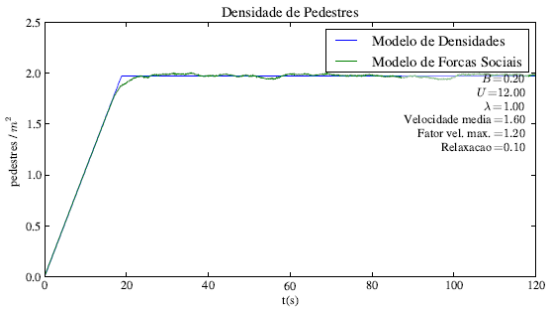
se da realidade. Logo, em uma mesma área de agente a quantidade de pedestres varia ao longo do tempo em uma pequena quantidade, ocasionando o sobe e desce da densidade de pedestres observada na coleta dos resultados desse modelo. Embora se soubesse de antemão que isso ocorreria, não se adotou a mesma abordagem para a implementação do modelo de Densidades, porque se imaginou prudente mantê-la constante ao longo do tempo, pois, assim, ter-se-ia certeza de não haver interferência de eventuais erros nos resultados produzidos por sua implementação.



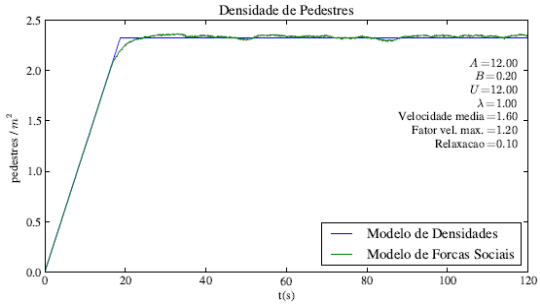
(a) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s



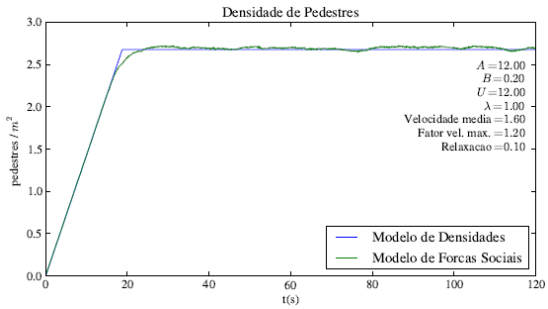
(b) $T_{de/s}$ = 18 pedestres/s



(c) $T_{de/s}$ = 22 pedestres/s

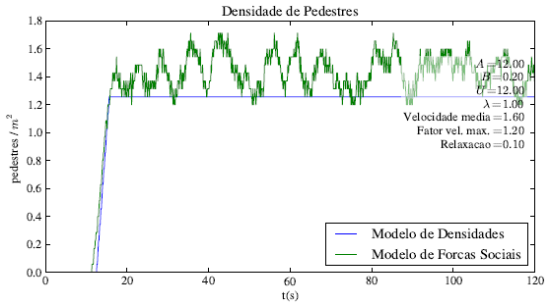


(d) $T_{de/s}$ = 26 pedestres/s

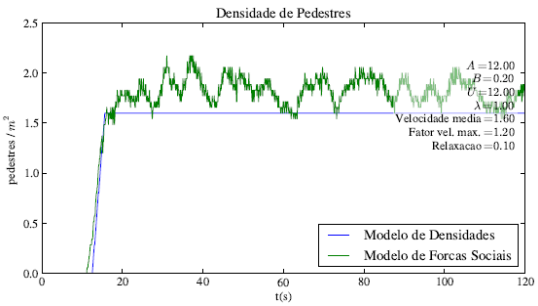


(e) $T_{de/s}$ = 30 pedestres/s

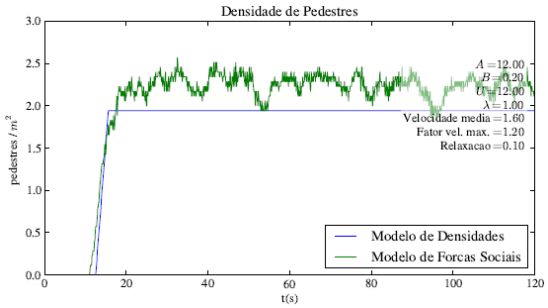
Figura 4.2 - Comparação das densidades produzidas pelos dois modelos, visão toda via.



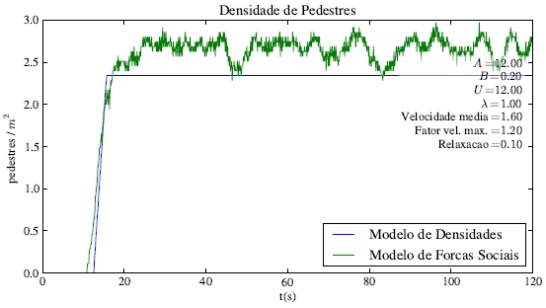
(a) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_5.



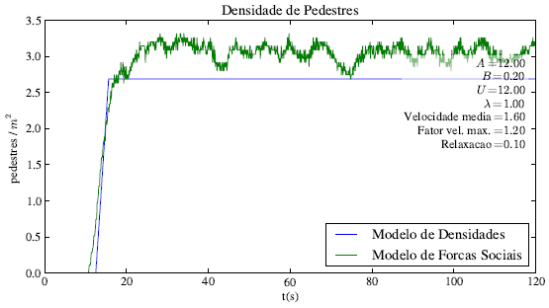
(b) $T_{de/s}$ = 18 pedestres/s na A_5.



(c) $T_{de/s}$ = 22 pedestres/s na A_5.



(d) $T_{de/s}$ = 26 pedestres/s na A_5.



(e) $T_{de/s}$ = 30 pedestres/s na A_5.

Figura 4.3 - Comparação das densidades produzidas pelos dois modelos, visão área de agente.

4.2 Movimentação Bidirecional sem Obstáculos

Na movimentação bidirecional, as multidões de pedestres são colocadas em contrafluxo, nesse caso, em uma via sem obstáculos, como ilustrado na Figura 4.4, em que os pedestres representados pelos círculos em verde estão se deslocando da esquerda para a direita e os pedestres em azul da direita para esquerda.

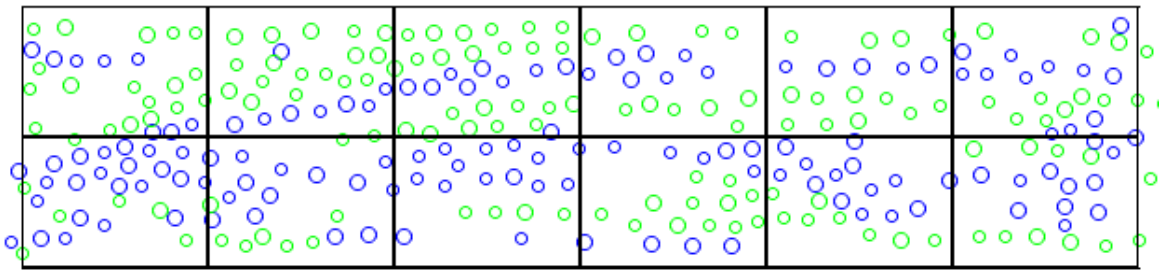
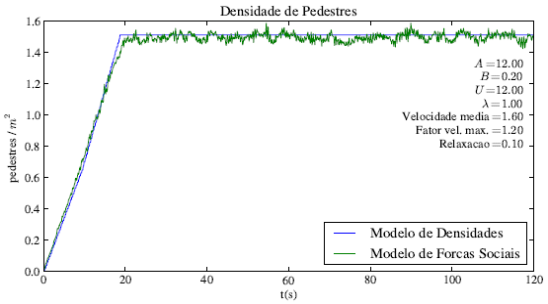


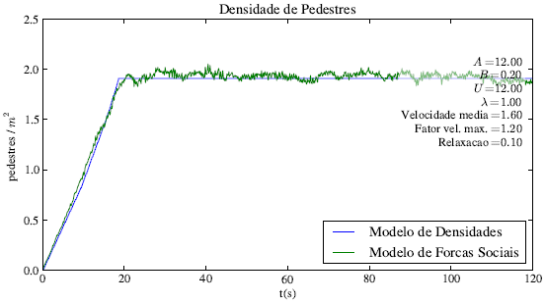
Figura 4.4 - Screenshot da movimentação bidirecional sem obstáculos, $t = 21{,}03\ s,\ T_{de/s} = 14\ pessoas/s$.

Como pode ser observado na comparação entre as séries dos gráficos da Figura 4.5, o modelo de Densidades de Pedestres acompanha os valores de densidade do modelo de Forças Sociais, mesmo para diferentes taxas de entrada de pedestres na via. Isso, a exemplo do cenário anterior, significa que o modelo expressado pelas equações 3.3 e 3.4 aplicadas sobre cada agente do modelo de Densidades de Pedestres, reflete a equivalência com as densidades produzidas pelo modelo de Forças Sociais.

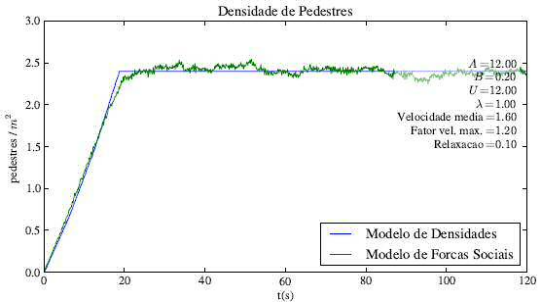
Esse mesmo comportamento também é observado em cada agente da simulação. A Figura 4.6 ilustra isso, as densidades nos agentes são praticamente as mesmas nos dois modelos. A diferença que se observa é atribuída ao ruído e à abordagem de implementação, o mesmo tipo de interferência já discutida na seção anterior.



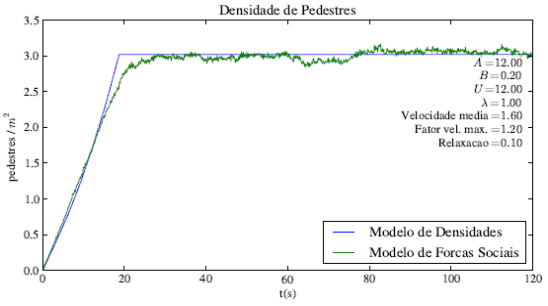
(a) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s



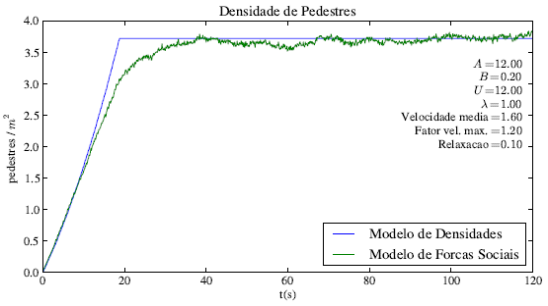
(b) $T_{de/s}$ = 18 pedestres/s



(c) $T_{de/s}$ = 22 pedestres/s

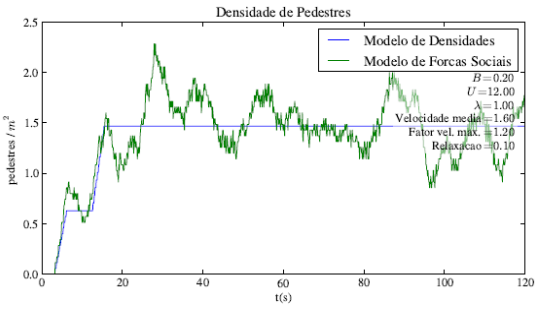


(d) $T_{de/s}$ = 26 pedestres/s

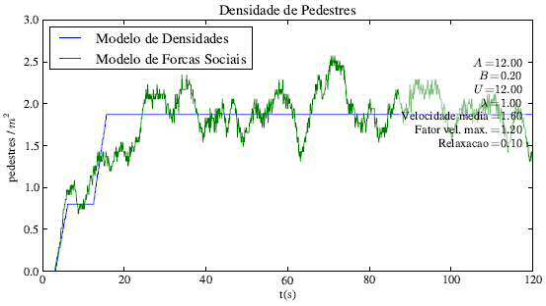


(e) $T_{de/s}$ = 30 pedestres/s

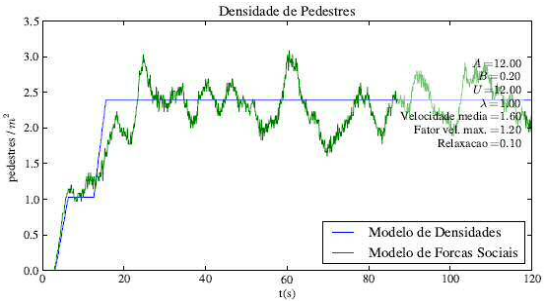
Figura 4.5 - Comparação das densidades produzidas pelos dois modelos, visão toda via.



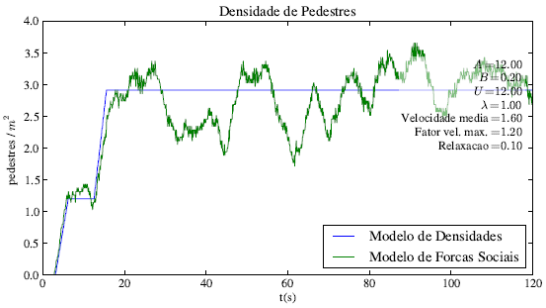
(a) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_5.



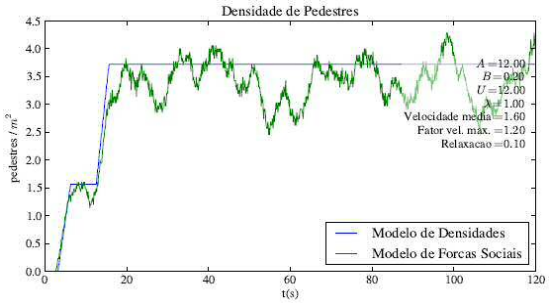
(b) $T_{de/s}$ = 18 pedestres/s na A_5.



(c) $T_{de/s}$ = 22 pedestres/s na A_5.



(d) $T_{de/s}$ = 26 pedestres/s na A_5.



(e) $T_{de/s}$ = 30 pedestres/s na A_5.

Figura 4.6 - Comparação das densidades produzidas pelos dois modelos, visão área de agente.

4.3 Movimentação Unidirecional com Obstáculos

Nesta seção há a introdução de um novo componente ao cenário do modelo, o obstáculo, como o que é ilustrado na Figura 4.7.

Um obstáculo tem intenção de representar a presença de veículos ou qualquer outro artefato em uma área de agente que impeça a locomoção da multidão de pedestres. A sua simples presença modifica o comportamento do modelo de Forças Sociais (porque impede o fluxo natural da multidão) trazendo consequências para o modelo de Densidades de Pedestres. Na prática, o Modelo de Densidades passa a se comportar pelas equações 3.3, 3.5 e 3,8, já que esaa última modela o comportamento dos agentes em conformidade com a presença de obstáculos.

Para validar a equivalência entre os dois modelos, foram feitas simulações com obstáculos em diferentes posições do cenário. Visando simplificar, é apresentado somente um desses, o da Figura 4.7, onde há um obstáculo na área de agente 2 e os pedestres são representados por círculos em azul, deslocando-se da esquerda para a direita.

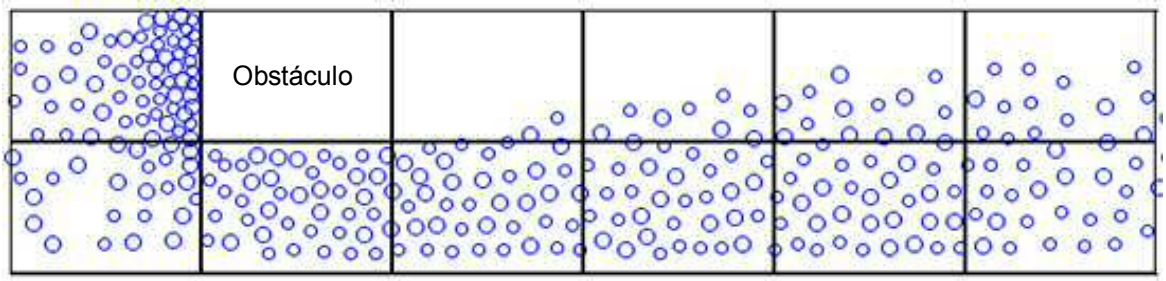
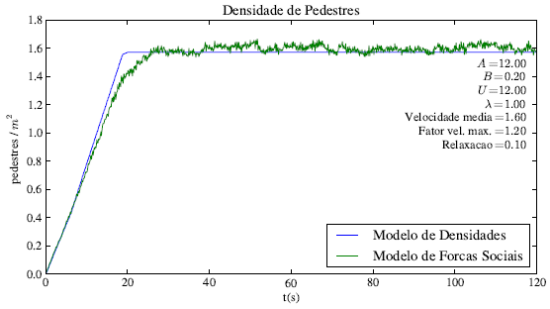
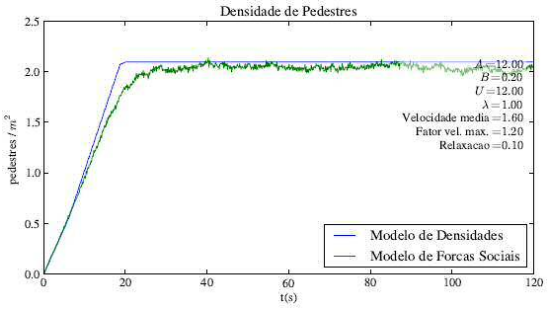


Figura 4.7 - Screenshot da movimentação unidirecional com obstáculo na área de agente dois, $t = 28{,}49\ s$, $T_{de/s} = 14\ pessoas/s$.

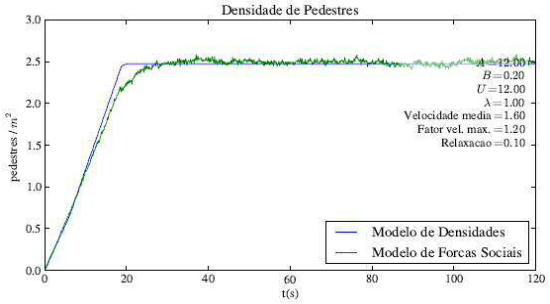
Como pode ser observado na comparação entre as séries dos gráficos da Figura 4.8, o Modelo de Densidades de Pedestres acompanha os valores de densidade do modelo de Forças Sociais, mesmo para diferentes taxas de entrada de pedestres na via, o que comprova a equivalência entre os dois modelos, quando aplicadas as equações 3.5 e 3.8.



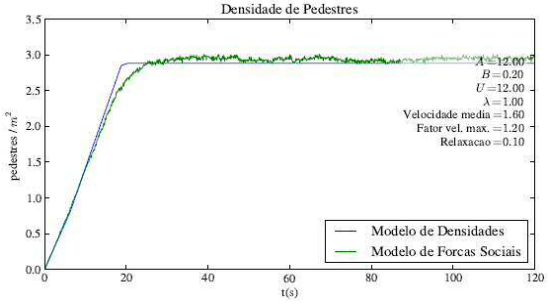
(a) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s



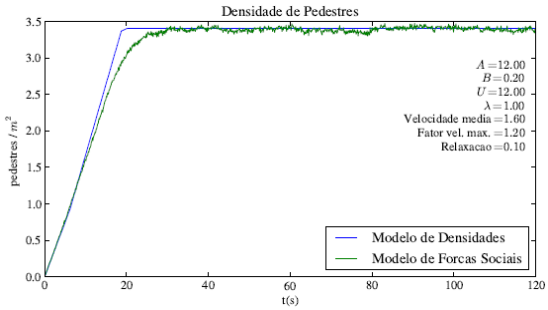
(b) $T_{de/s}$ = 18 pedestres/s



(c) $T_{de/s}$ = 22 pedestres/s

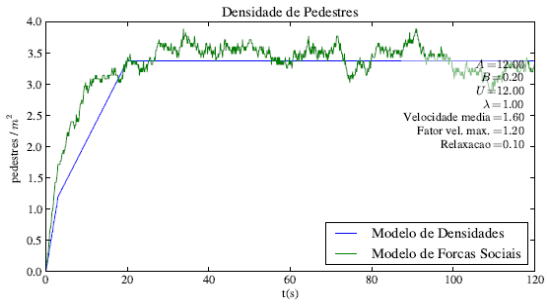


(d) $T_{de/s}$ = 26 pedestres/s

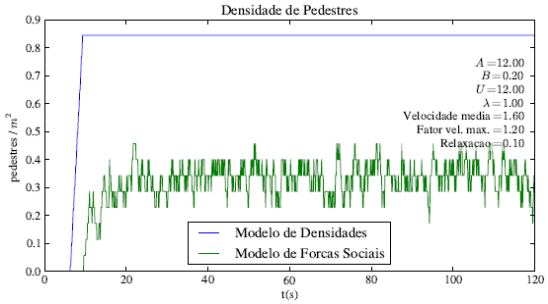


(e) $T_{de/s}$ = 30 pedestres/s

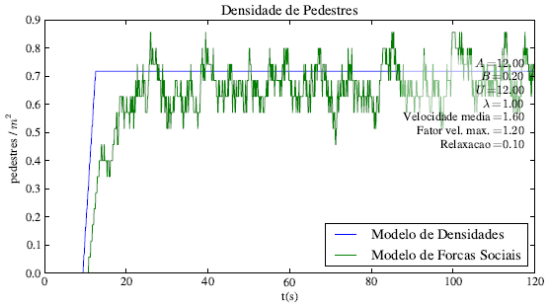
Figura 4.8 - Comparação das densidades produzidas pelos dois modelos, visão toda via.



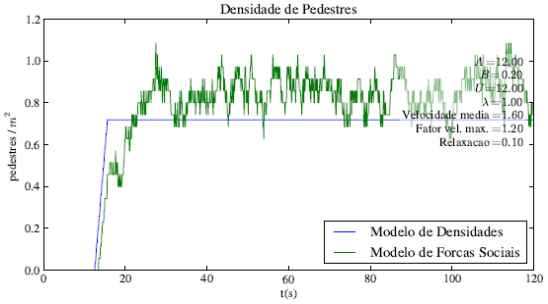
(a) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_1.



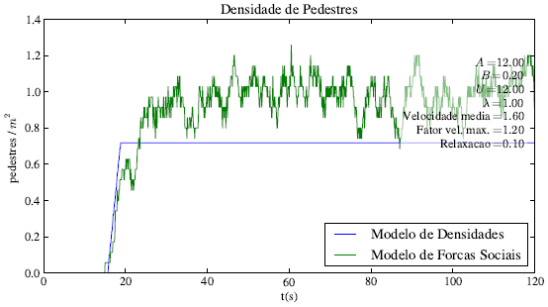
(b) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_3.



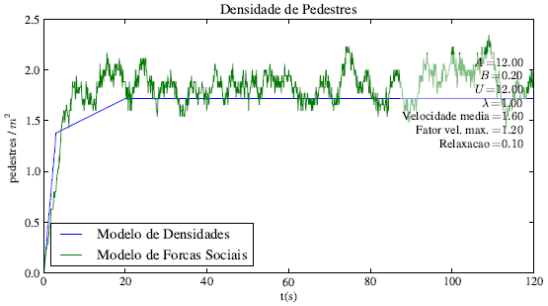
(c) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_4.



(d) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_5.

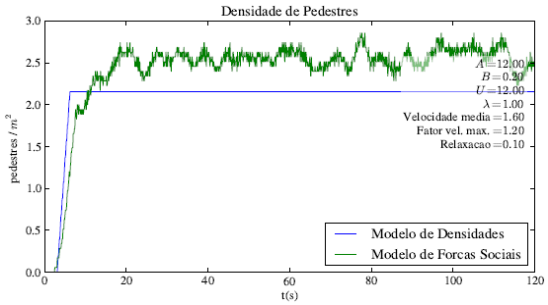


(e) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_6.

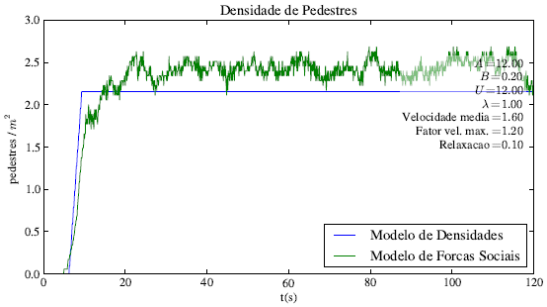


(f) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_7.

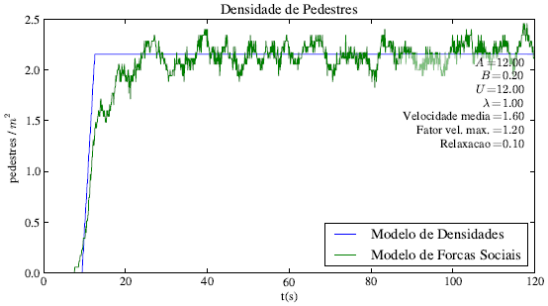
Figura 4.9 - Comparação das densidades produzidas pelos dois modelos, visão área de agente (parte 1/2).



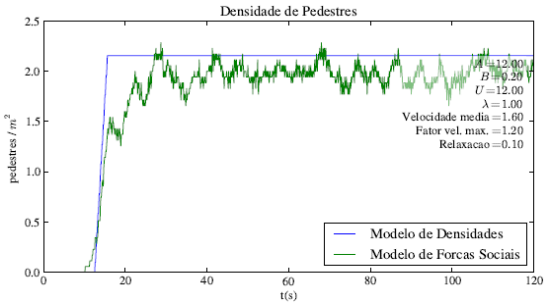
(g) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_8.



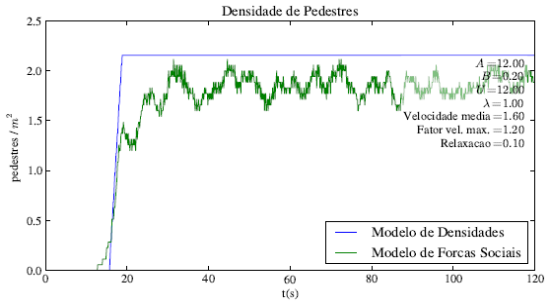
(h) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_9.



(i) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_{10}.



(j) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_{11}.



(k) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_{12}.

Figura 4.9 - Comparação das densidades produzidas pelos dois modelos, visão área de agente (parte 2/2).

A equivalência é um pouco comprometida ao se aplicar a das equações 3.5 e 3.8 no simulador, pois, no Modelo de Densidades de Pedestres, chega-se à densidade média ligeiramente antes do modelo de Forças Sociais. Porém, isso é aceitável, visto que, esse é um fator interligado ao ajuste das constantes do modelo aplicadas às Equações 3.6, 3,7 e 3.8 e ao ajuste do tamanho da própria janela de estabilização, ambos determinados de forma empírica. Além disso, como pode ser observado, isso causa uma diferença entre os dois modelos em um curto espaço de tempo, entre, aproximadamente, quinze segundos. Após

esse tempo, o comportamento dos dois modelos são praticamente idênticos, desprezados o ruído e a diferença na implementação.

Similarmente, para esse tipo de cenário, na comparação entre agentes da simulação o resultado é praticamente o mesmo, desde que se leve em consideração alguns aspectos inerentes à implementação das equações 3.5 e 3.8. Como pode ser observado nos gráficos da Figura 4.9, quando o obstáculo está posicionado na área de agente dois, o comportamento de cada um dos demais agentes é semelhante ao modelo de Forças Sociais, diferenciado-se apenas em módulo, principalmente para os agentes que se encontram após o obstáculo e na mesma pista deste, em que se decidiu, como critério, implementar a troca de densidade apenas entre a área de agente nove e a área de agente três, descartando outras trocas à jusante.

4.4 Movimentação Bidirecional com Obstáculos

A exemplo do que foi apresentado na seção anterior, a movimentação bidirecional com obstáculos também é sensível à presença desses. Logo, aqui se aplicam novamente as equações 3.3, 3.5 e 3.8 do Modelo de Densidades Pedestres.

O cenário escolhido para discussão dos resultados para esse tipo de movimentação é apresentado na Figura 4.10, na qual há um obstáculo na área de agente 2, e os pedestres representados pelos círculos, em verde, estão se deslocando da esquerda para a direita e os pedestres, em azul, da direita para esquerda.

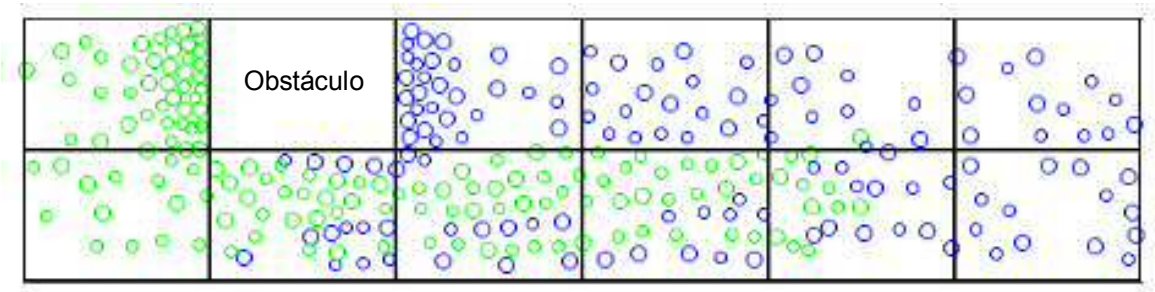
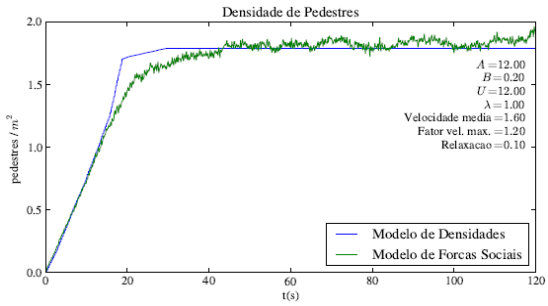


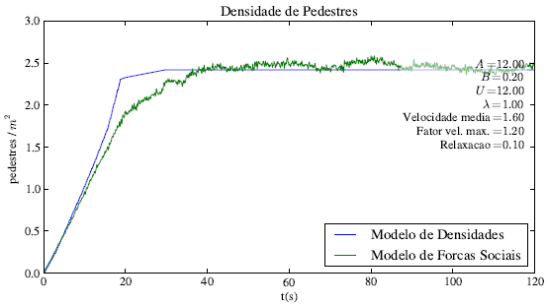
Figura 4.10 - Screenshot da movimentação bidirecional, $t = 15{,}37\ s$, $T_{de/s} = 14\ pessoas/s$.

Como pode ser observado na comparação entre as séries dos gráficos da Figura 4.11, a curva das amostras de densidades do Modelo de Densidades de Pedestres acompanha a curva das amostras de densidade do modelo de Forças Sociais, inclusive para diferentes taxas de entrada de entrada de pedestres na via. Isso comprova a equivalência entre os dois modelos quando são aplicadas as equações 3.3, 3.5 e 3.8. Porém, constata-se o mesmo problema da movimentação anterior, a densidade no modelo de Densidade de Pedestres atinge seu valor máximo um pouco antes que o modelo de Forças Sociais. Talvez um ajuste fino nas constantes do modelo pudessem gerar melhores resultados. Entretanto, o modelo é equivalente e praticamente acompanha o modelo de Forças Sociais em módulo, o que torna tal ajuste dispensável na comparação entre os resultados gerados pelos dois modelos.

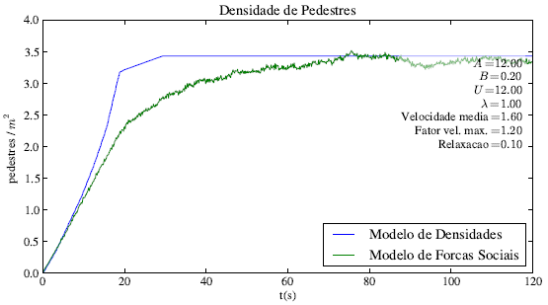
Os resultados apresentados em cada agente da simulação, como já discutido anteriormente, são mais suscetíveis a ruídos e as políticas de implementação. Desconsiderando esses fatores, pode-se observar nos gráficos da Figura 4.12 que os resultados produzidos pela implementação dos dois modelos, o de Forças Sociais e o de Densidade de Pedestres, podem ser considerados praticamente equivalentes.



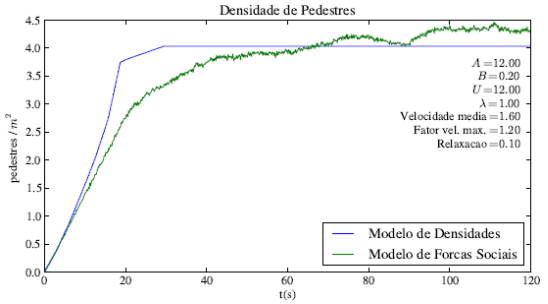
(a) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s



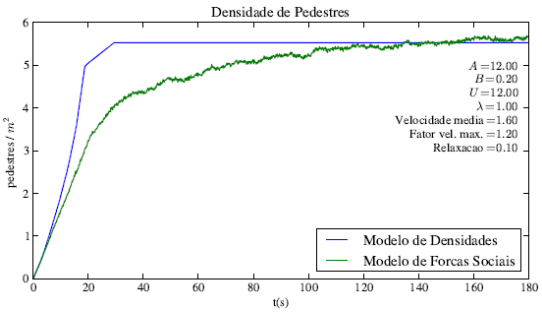
(b) $T_{de/s}$ = 18 pedestres/s



(c) $T_{de/s}$ = 22 pedestres/s

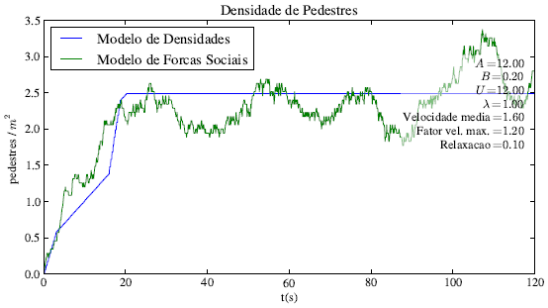


(d) $T_{de/s}$ = 26 pedestres/s

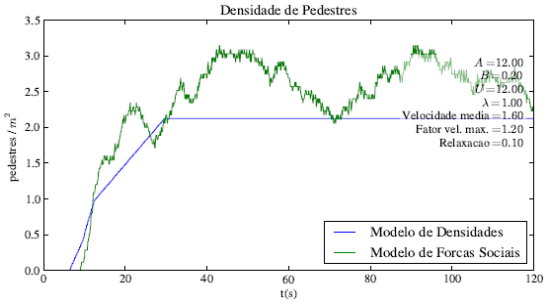


(e) $T_{de/s}$ = 30 pedestres/s

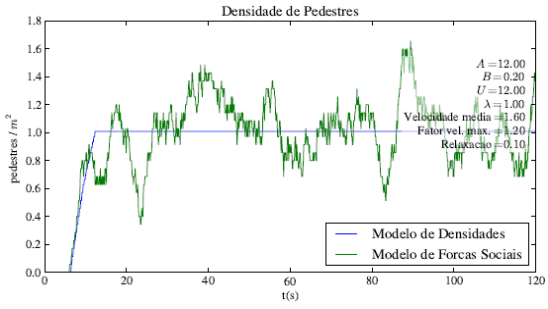
Figura 4.11 - Comparação das densidades produzidas pelos dois modelos, visão toda via.



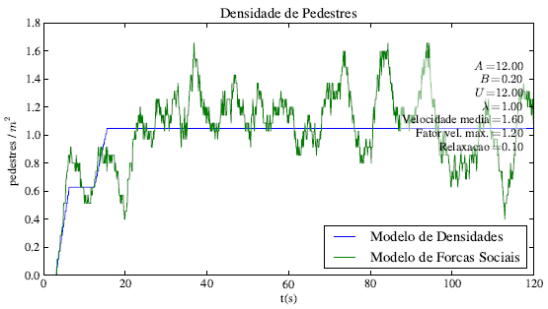
(a) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_1.



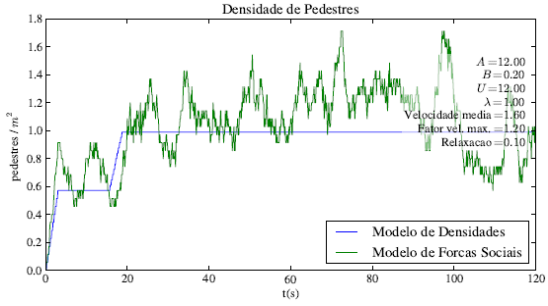
(b) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_3.



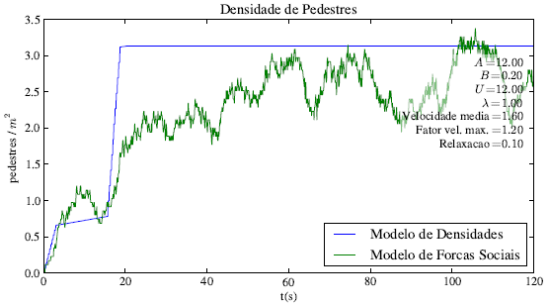
(c) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_4.



(d) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_5.

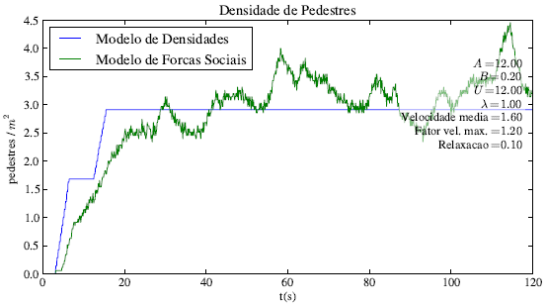


(e) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_6.

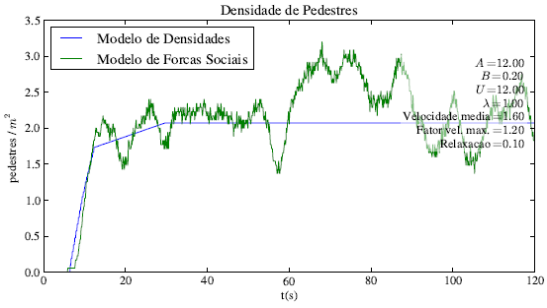


(f) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_7.

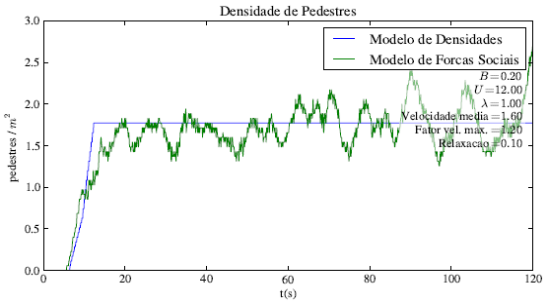
Figura 4.12 - Comparação das densidades produzidas pelos dois modelos, visão área de agente (parte 1/2).



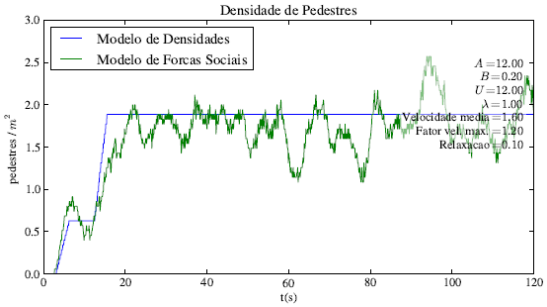
(g) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_8.



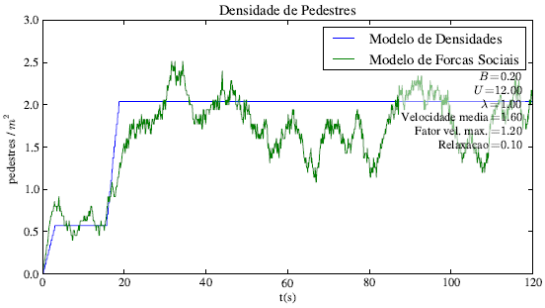
(h) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_9.



(i) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_{10}.



(j) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_{11}.



(k) $T_{de/s}$ = 14 pedestres/s na A_{12}.

Figura 4.12 - Comparação das densidades produzidas pelos dois modelos, visão área de agente (parte 2/2).

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O Modelo de Densidades de Pedestres proposto nesse trabalho se mostrou equivalente a uma implementação do modelo de Forças Sociais, em cenários com e sem a presença de obstáculos, para fluxos unidirecionais e bidirecionais. E revelou-se aplicável na simulação computacional da movimentação de multidões de pedestres em vias públicas.

Os modelos apresentaram-se mais equivalentes em situações nas quais não há a presença de obstáculos na via, pois, nessas circunstâncias, o modelo de Forças Sociais garante o afastamento necessário entre os pedestres para que esses se desloquem livremente, com a velocidade desejada, refletindo-se em um padrão no comportamento da densidade de pedestres mais facilmente modelável, menos sujeito a outras condições, como aumento ou diminuição da taxa de entrada ou saída de pedestres da área de agente.

Em contrapartida, o modelo revelou-se um pouco menos equivalente nas situações de movimentação em que há a presença de obstáculos na via, já que, neste tipo de cenário, o fluxo natural dos pedestres regido pelas Forças Sociais é interrompido, interferindo diretamente nas taxas de entrada e de saída de pedestres nas áreas de agentes. Mesmo assim, os resultados obtidos nesse tipo de situação podem ser considerados aceitáveis, visto que, passada a janela de estabilização, eles acompanham em módulo os resultados produzidos pelo modelo de Forças Sociais para diferentes taxas de entrada de pedestres.

A partir das observações feitas sobre os fenômenos produzidos pelos dois modelos, pode-se perceber, também, que no Modelo de Densidades de Pedestres é possível amenizar a "cegueira" dos pedestres, comum no modelo de Forças Sociais, e o efeito de canto produzido por sua implementação, aproximando ainda mais este modelo dos fenômenos grupais apontados por Helbing e Molnár (2001).

Por ser baseado em um modelo de agente capaz de se comportar como um agente do simulador ITSUMO, e por tê-lo testado sobre o mesmo tipo de grade do ITSUMO, pode-se afirmar que o modelo de Densidades de Pedestres é adaptável a esse tipo de contexto, o que o torna aplicável a simuladores como o ITSUMO.

Em relação aos objetivos específicos traçados no início deste trabalho, pode-se afirmar que foi possível obter, a partir de uma análise quali-quantitativa criteriosa sobre os valores de densidade produzidos no tempo pela implementação do modelo de Forças Sociais, um modelo teórico que captura a essência da aplicação desse modelo na movimentação de multidões de pedestres.

5.1 Trabalhos Futuros

Este trabalho está sendo pioneiro em sua abordagem, ao propor tomar por base um modelo de movimentação de multidões de pedestres já consagrado, como o de Forças Sociais, no intuito de extrair desse o comportamento das densidades de pedestres que emerge como resultado da iteração individual de cada pedestre com outros pedestres e obstáculos. Logo, embora sua intenção tenha sido tirar o melhor proveito possível disso, algumas melhorias ou até mesmo críticas ainda poderão ser identificadas. Por isso, recomenda-se que se dê continuidade a partir das seguintes sugestões de trabalhos futuros:

- Aplicar suas equações no simulador de trânsito ITSUMO, criando nesse um agente *crowd*;
- Melhorar a equivalência do modelo ao modelo de Forças Sociais em vias onde há a presença de obstáculos;
- Identificar as relações existentes entre a velocidade média, o tamanho da janela de estabilização e as constantes de localização aplicadas às Equações 3.6, 3.7 e 3.8;
- Criar uma aleatoriedade na taxa de entrada de pedestres, imitando, assim, as condições observadas no deslocamento de multidões reais.

REFERÊNCIAS

BICHO, A. L. **Da modelagem de plantas à dinâmica de multidões: um modelo de animação comportamental bio-inspirado**. PhD thesis - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

BRADLEY, G. E. **A proposed mathematical model for computer prediction of crowd movements and their associated risks**. In SMITH, R. A. e DICKIE, J. F., *Engineering for crowd safety*, p. 303-311. Amsterdam: Elsevier, 1993.

CROWD DYNAMICS. **Crowd Modeling & Analysis**. Disponível em: <http://www.crowddynamics.com/crowd-modelling-simulation.php>, acesso em março 2012.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Managing pedestrians during evacuation of metropolitan areas**. U.S . DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Elaborado por: Battelle. The Business of innovation - Center for human performance and safety. Seattle, março de 2007.

GUO, R. Y.; HUANG, H. J. **A mobile lattice gas model for simulating pedestrian evacuation**. *Physics Review A: Statistical Mechanics and its Applications*, p. 387(2-3):580-586, 2008.

HELBING, D.; MOLNÁR, P. **Social force model for pedestrian dynamics**. *Physics Review E: Statistical physics, plasmas, fluids and related interdisciplinary topics*, p. 51(5):4282-4286, maio 1995.

HELBING, D. et al. **Simulating dynamical features of espace panic**. *Nature*, 407(6803):487-490, setembro 2000.

HELBING, D. et al. **Self-organizing pedestrian movement**. *Environment and Panning B: Planning and Design*, p. 28(3):361-383, 2001.

HELBING, D. et al. **The dynamics of crowd disaster: An empirical study**. *Physical Rewiw E (Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics)*, 75(4), fevereiro 2007.

HENDERSON, L. F. **The statistics of crowd fluids**. *Nature*, 229(5284):381-383, fevereiro 1971.

HUANG, L. et al. **Revisiting Hughes's dynamic continuum model for pedestrian flow and the development of an efficient solution algorithm**. *Transportation Research Part B: Methodological*, 43(1):127-141, 2009.

HUGHES, R. L. **The flow of large crowds of pedestrians**. *Mathematics and Computers in Simulation*, 53(4-6):367-370, 2000.

HUGHES, R. L. **A continuum theory for the flow of pedestrians**. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(6):507-535, 2002.

HUGHES, R. L. **The flow of human crowds**. *Annual Review of Fluid Mechanics*, p. 35(1):169-182, 2003.

JORGENSEN, T. H. et al. **Crowd modeling**. *Modeling Project, Mathematics Department, Roskilde University*, Roskilde, 2010.

KEBEL, A. et al. **Microscopic simulation of pedestrian crowd motion**. In *Intelligent Transportation Systems Conference*, 2006. ITSC 06. IEEE, p. 193-202. Springer, 2002.

RIZZO, Bruno Engert. **IT CEPD 001 - Estimativa do quantitativo de indivíduos em multidões**. Centro de Estudos e Pesquisa de Desastres. Prefeitura do Rio - Defesa Civil, p. 33-42, 2006.

SABOIA, P. C. **Simulação de multidões com agentes brownianos e modelo de forças sociais modificado**. Dissertação de Mestrado - Instituto de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

STILL, G. K. **Crowd Dynamics**. PhD thesis, *Mathematics Department, Warwick University*, 2000.

SUNG, M et al. **Scalable behaviors for crowd simulation**. Volume 23, p. 519-528, setembro 2004.

TAJIMA, Y.; NAGATANI, T. **Scaling behavior or crowd flow outside a hall**. *Physics A: Statistical Mechanics and its Applications*, p. 292(1-4):545-554, 2001.

ULICNY, B. et al. **Real-time crowd simulation**. *EG 2006 Course on Populating Virtual Environments With Crowds*. Cap. *State-of-the-art*. Eurographics, 2006.

VARAS, A. et al. **Cellular automaton model for evacuation process with obstacles**. *Physics A: Statistical Mechanics and its Applications*, p. 382(2):631-642, 2007.

WEIMAR, J. R. **Simulation with cellular automata**. Logos-Verlang, 1998.