

Teófilo Bezerra Dutra

***Um Modelo Híbrido para Simulação de Multidão
com Comportamentos Variados em Tempo Real***

Fortaleza

2011

Teófilo Bezerra Dutra

***Um Modelo Híbrido para Simulação de Multidão
com Comportamentos Variados em Tempo Real***

Dissertação apresentada ao Departamento de
Computação da Universidade Federal do Ceará
como requisito parcial para obtenção do título
de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador:

Joaquim Bento Cavalcante Neto

Coorientador:

Creto Augusto Vidal

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO
MESTRADO E DOUTORADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CRAB - COMPUTAÇÃO GRÁFICA, REALIDADE VIRTUAL E ANIMAÇÃO

Fortaleza

2011

Resumo

Simular uma multidão é uma tarefa custosa computacionalmente, onde há a necessidade de reproduzir o comportamento de vários (dezenas a milhares) agentes realisticamente em um ambiente bidimensional ou tridimensional. Os agentes precisam interagir entre si e com o ambiente, reagindo a situações, alternando comportamentos e/ou aprendendo novos comportamentos durante sua “vida”. Muitos modelos para simulação de multidão foram desenvolvidos nos últimos anos e podem ser classificados em dois grandes grupos (macroscópico e microscópico) de acordo com a forma como os agente são gerenciados. Existem alguns trabalhos na literatura baseados em modelos macroscópicos, onde os agentes são agrupados e guiados pelo campo potencial gerado para seu grupo. A construção desses campos é o gargalo desse tipo de modelo, sendo necessária a utilização de poucos grupos para que uma simulação execute a taxas de quadros interativas. Neste trabalho é proposto um modelo baseado em um modelo macroscópico, que tem como objetivo principal diminuir o custo do cálculo dos campos potenciais dos grupos, discretizando os mesmos de acordo com a necessidade do ambiente. Ao mesmo tempo é proposta a adição de grupos que podem dirigir os agentes de uma simulação a objetivos momentâneos, o que fornece à multidão uma maior variedade de comportamentos. Por fim, propõe-se a utilização de um modelo de forças sociais para a prevenção de colisões entre os agentes e entre agentes e obstáculos.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação de multidão, dinâmica contínua, forças sociais, comportamentos escaláveis.

Abstract

Crowd simulation is a computationally expensive task, where there is the need to reproduce the behavior of many (tens to thousands) agents in a two-dimensional or three-dimensional environment realistically. The agents need to interact to each other and with the environment, reacting to situations, alternating behaviors and/or learning new behaviors during his “lifetime”. Many models to simulate crowds have been developed over the years and can be classified into two big groups (macroscopic and microscopic) according to how the agents are managed. There are some works in the literature based on macroscopic models, where the agents are grouped and guided by the potential field of their group. The construction of these fields is the bottleneck of these models, so it is necessary to use few groups if it is needed for a simulation to run at interactive frame rates. In this work is proposed a model based on a macroscopic model, which aims mainly to reduce the cost of calculating the potential fields of the groups, by using groups discretized according to the needs of the environment. At the same time it is proposed the addition of groups that can steer the agents of a simulation to momentary goals, which gives the crowd a wider variety of behaviors. Finally, it is proposed the use of a social forces model to prevent collisions between agents and between agents and obstacles.

KEYWORDS: *Crowd simulation, continuum dynamics, social forces, scalable behaviors.*

Sumário

Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	viii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Organização do trabalho	3
2 Trabalhos Relacionados	4
2.1 Abordagens para simulação de multidão	4
2.2 Modelo baseado em agentes	5
2.3 Pedestres autônomos	6
2.4 Forças Sociais	7
2.5 Dinâmica contínua	8
2.6 Comportamentos escaláveis	9
2.7 Modelos Híbridos	10
2.8 Considerações finais	12
3 Modelos de Forças Sociais e Dinâmica Contínua	14
3.1 Modelo de Helbing	14
3.2 Modelo de Treuille	16
3.3 Considerações finais	20
4 Técnica Proposta	22

4.1	Visão geral	22
4.2	Agentes e grupos	24
4.3	Eventos	25
4.4	Comportamentos	26
4.5	Prevenção de colisão	26
4.6	Implementação	27
4.6.1	Campo de velocidade	28
4.6.2	Agentes e grupos	29
4.6.3	Gerenciamento de grupos	29
4.6.4	Prevenção de colisão	30
4.7	Considerações finais	32
5	Testes e Resultados	33
5.1	Aspectos técnicos	33
5.2	Comportamentos	33
5.2.1	Ambiente sem obstáculos	34
5.2.2	Ambiente com obstáculos	36
5.2.3	Ambiente com multidão densa	38
5.3	Desempenho	40
5.3.1	Ambiente com comportamentos secundários	41
5.3.2	Ambiente com grupos se cruzando	45
5.3.3	Ambiente aberto com obstáculos	47
5.3.4	Ambiente de evacuação	49
5.4	Considerações finais	51
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	52
6.1	Conclusões	52

<i>Sumário</i>	v
6.2 Trabalhos futuros	53
Referências Bibliográficas	56

Lista de Figuras

1.1 Exemplos de aplicação.	2
2.1 Simulação de <i>boids</i>	6
2.2 Pedestres autônomos na estação Pensilvânia (SHAO; TERZOPOULOS, 2007).	7
2.3 Modelos de forças sociais.	8
2.4 Encontro de dois grupos de agentes (TREUILLE et al., 2006).	8
2.5 Estrutura de ambientes baseada em blocos (JIANG et al., 2010).	9
2.6 Modelo híbrido (PELECHANO et al., 2007).	10
2.7 Pedestres utilizando um planejador de movimentos híbrido (YERSIN et al., 2008).	11
2.8 Multidões densas com milhares de agentes (NARAIN et al., 2009).	12
3.1 Visão geral da técnica. (TREUILLE et al., 2006)	19
3.2 Exemplos de jogos que utilizam o modelo de Treuille.	20
4.1 Grades discretizadas por necessidade: o círculo verde representa um agente, a área cinza representa um objetivo inativo, a área laranja representa um objetivo ativo e a área preta representa um objeto.	23
4.2 Um agente tem seu caminho alterado ao passar por um grupo de comportamento local (veja da esquerda para a direita e de cima para baixo).	24
4.3 Os agentes nas células pintadas de azul serão considerados no cálculo da força aplicada no agente verde.	31
4.4 Agente sendo influenciado pelas forças aplicadas pelas células vizinhas bloqueadas (células de cor cinza escuro).	32
5.1 Comportamento dos agentes em células grandes e pequenas.	35
5.2 Agentes desviando ao colidirem.	36
5.3 Agentes desviando de um obstáculo.	37

5.4	Exemplos de configurações de grupos de acordo com as posições dos obstáculos.	38
5.5	Efeito de entupimento.	39
5.6	Obstáculos sem aplicar força nos agentes.	39
5.7	Exemplo de utilização de grupos de desvio para gerar comportamentos específicos.	40
5.8	Cenários.	42
5.9	Configuração dos grupos.	42
5.10	Imagens das simulações.	44
5.11	Imagens da simulação com 1000 agentes.	46
5.12	Configurações dos obstáculos nas simulações.	47
5.13	Influência dos obstáculos nas simulações.	48
5.14	Ambientes utilizados para evacuação.	50
5.15	Agentes evacuando os ambientes com o modelo proposto.	51

Lista de Tabelas

5.1	Comparação entre as simulações (fps) executadas por (SHAO; TERZOPOULOS, 2007) ([1]) e pelo modelo proposto ([2]).	43
5.2	Simulação (fps) de agentes se cruzando em um ambiente aberto.	45
5.3	Dados relacionados a simulação (fps) de agentes em um ambiente aberto com vários obstáculos.	48
5.4	Simulação (fps) de agentes evacuando uma construção por uma saída.	49
5.5	Simulação (fps) de agentes evacuando uma construção por duas saídas.	50
5.6	Comparação entre modelos.	51

1 Introdução

Este capítulo está dividido em duas seções. Na Seção 1.1 são introduzidos conceitos sobre simulação de multidão, assim como sua aplicabilidade e a importância de seu uso em diversas áreas (animação, jogos, simulação de situações de emergência, etc.). Em seguida, na Seção 1.2, é apresentada a organização do trabalho.

1.1 Motivação

Simulação de Multidão é uma subárea da Ciência da Computação que consiste em simular o comportamento de vários (dezenas a milhares) agentes em um ambiente bidimensional ou tridimensional de forma realista.

Modelos que simulam multidões podem ser utilizados em filmes (Figura 1.1a), jogos (Figura 1.1b), simulações de situações de emergência (Figura 1.1c) ou simulações de comportamento de determinados objetos ou avatares em um determinado ambiente (humanos em uma estação de trem, peixes no oceano (Figura 1.1d), etc.).

Em uma simulação, os agentes devem ser capazes de interagir com o ambiente e entre si, seja reagindo a situações, alternando comportamentos e/ou aprendendo novos comportamentos durante sua “vida”.

Um modelo de simulação de multidão deve tratar a locomoção, comunicação (se houver) e os comportamentos naturais e reativos (tomadas de decisão (cognição)) dos agentes com relação a outros agentes e ao ambiente.

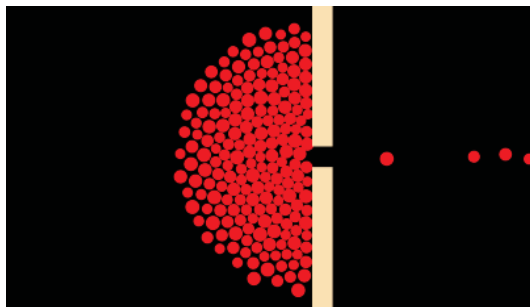
Conforme as necessidades descritas para um modelo de simulação de multidão, pode-se perceber que a simulação do comportamento de diversos agentes em um ambiente é um problema com um alto custo computacional. Quanto maior a realidade desejada, maior a necessidade de recursos computacionais para simular o comportamento dos agentes.



(a) Cena do filme “O Senhor dos Anéis” (NEW LINE CINEMA, 2001-2003).



(b) Jogo “Kameo” (RARE, 2005).



(c) Situação de emergência (HELBING et al., 2000).



(d) Peixes no oceano (REYNOLDS, 2006).

Figura 1.1: Exemplos de aplicação.

Os modelos descritos na literatura podem ser classificados em dois grandes grupos (microscópicos ou macroscópicos), de acordo com a forma como os agentes são gerenciados. Os modelos microscópicos são aqueles onde os agentes são caracterizados individualmente e, de acordo com suas interações entre si, fazem emergir comportamentos na multidão. Os modelos macroscópicos são aqueles que procuram simular uma multidão como um todo, onde, por exemplo, um modelo matemático é definido e a multidão é guiada através de sua solução.

Para aqueles que veem uma multidão real de longe, as pessoas parecem agir de forma aleatória; porém, cada pessoa possui suas necessidades e objetivos a seguir. Uma simulação de multidão realista deve tentar dar essa variabilidade de objetivos e comportamentos aos agentes. Em modelos microscópicos, adicionar essa variabilidade é uma tarefa fácil de se alcançar, porque os agentes podem ser modelados individualmente. No entanto, em modelos macroscópicos essa é uma tarefa difícil, porque nesse tipo de modelo os agentes são agrupados em grupos com características semelhantes, e, assim, adicionar individualidade significaria adicionar vários grupos, o que afetaria a performance da simulação podendo levar a aplicação a não executar a taxas de quadros interativas.

Geralmente, a complexidade dos algoritmos utilizados em modelos microscópicos é baseada na quantidade de agentes na simulação, enquanto em modelos macroscópicos é baseada no

tipo de discretização do ambiente (resolução de uma grade, por exemplo). A escolha de que tipo de modelo usar em uma aplicação irá depender do objetivo que se procura alcançar com a aplicação. Modelos microscópicos são muito utilizados para simular situações de emergência, dada a possibilidade de se reproduzir situações de pânico e se analisar condições reais como a pressão que as pessoas estão exercendo umas nas outras, por exemplo. Por outro lado, modelos macroscópicos têm provado serem mais adequados para jogos, aplicações de realidade virtual ou qualquer tipo de simulação que necessite reproduzir multidões em tempo real, suportando uma alta quantidade de agentes a taxas de quadros interativas e reproduzindo comportamentos adequados para esse tipo de aplicação.

Em (TREUILLE et al., 2006), foi proposto um modelo macroscópico que discretiza o ambiente em grades que representam grupos com características em comum; para cada grade é gerado um campo potencial que guia os agentes que pertencem a ela a um determinado objetivo especificado em uma área da grade. O alto custo para o cálculo de um campo potencial não permite que existam muitos grupos caso seja necessária uma aplicação que execute em tempo real. Dada essa limitação desse modelo, neste trabalho é proposto um modelo baseado no modelo de Treuille, que tem como objetivo principal diminuir o custo do cálculo dos campos potenciais dos grupos, mas discretizando os mesmos de acordo com a necessidade do ambiente. Ao mesmo tempo é proposta a adição de grupos que podem dirigir os agentes de uma simulação a objetivos momentâneos, o que fornece a multidão uma maior variedade de comportamentos. Por fim, propõe-se a utilização do modelo de forças sociais apresentado em (HELBING et al., 2000) para a prevenção de colisões entre os agentes e entre agentes e obstáculos.

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos. O Capítulo 2 relata os trabalhos relacionados à simulação de multidão. No Capítulo 3 são descritos dois modelos para simulação de multidão que são relevantes para o desenvolvimento do trabalho. Em seguida, no Capítulo 4, é apresentado o novo modelo que este trabalho propõe. Os testes executados e os resultados obtidos são apresentados no Capítulo 5. Por fim, no Capítulo 6, o trabalho é concluído e trabalhos futuros são discutidos.

2 *Trabalhos Relacionados*

Neste capítulo são apresentados trabalhos relacionados na área de simulação de multidão. Na Seção 2.1 são descritas as abordagens metodológicas para simulação de multidão que têm sido utilizadas com mais frequência na literatura. Nas seções seguintes são apresentados alguns trabalhos relacionados relevantes ao trabalho desenvolvido. E na Seção 2.8 é feita uma breve conclusão.

2.1 **Abordagens para simulação de multidão**

Na literatura existem diversas abordagens metodológicas para simular multidões. Em (ZHENG et al., 2009), os autores discutiram e classificaram diversos trabalhos sobre evacuação de multidões de edifícios baseado em suas características (abordagem, indivíduos/grupos, escala, espaço e tempo (SAT), situações e fenômenos típicos). Os autores listaram as seguintes abordagens metodológicas: autômato celular, *lattice gas*, forças sociais, dinâmica de fluidos, baseada em agentes, teoria dos jogos e experimentos com animais.

Autômatos celulares são sistemas dinâmicos discretos que consistem em uma grade regular de células. A abordagem evolui a cada passo de tempo discreto, com o valor da variável em uma célula sendo determinado pelos valores das células vizinhas. As variáveis em cada célula são simultaneamente atualizadas baseadas nos valores das células vizinhas do passo anterior e de acordo com um conjunto de regras locais.

Lattice gas é um caso especial de autômato celular. Em modelos de *lattice gas*, cada agente é considerado uma partícula ativa na grade. Esses modelos são frequentemente utilizados para estudo de características de uma multidão de pedestres por meio de probabilidade e estatísticas.

Em modelos de forças sociais o movimento de um agente é determinado pelos seguintes principais efeitos: ele procura alcançar um determinado destino; ele mantém uma certa distância dos outros agentes; ele também mantém uma certa distância das bordas de obstáculos como as paredes; ele pode ser atraído por outras pessoas ou objetos.

Modelos de dinâmica de fluidos descrevem o quanto a densidade e a velocidade se alteram durante o tempo com o uso de equações diferenciais parciais.

Modelos baseados em agentes são modelos que constroem estruturas sociais de forma *bottom-up*, simulando indivíduos como agentes virtuais, e criando organizações emergentes das regras que controlam as interações entre os agentes.

Nas situações onde o processo de decisão interativo de evacuação é racional, um abordagem de teoria dos jogos pode ser adotada para modelar o processo de decisão.

A abordagem baseada em experimentos com animais é uma abordagem para estudo de simulação de evacuação de multidão que começou a ser utilizada pela dificuldade de se realizar experimentos de fuga em pânico genuínos, especialmente com humanos, pelas preocupações éticas e legais possíveis.

Apesar da existência de diversas abordagens para simulação de multidões, os esforços principais recentes na literatura são baseados nas abordagens de forças sociais, contínuas (dinâmica de fluidos) e autômatos celulares, como reportado em (ZHENG et al., 2010).

2.2 Modelo baseado em agentes

Modelos baseados em agentes (ou baseados em regras) permitem caracterizar os agentes individualmente com comportamentos únicos, sendo simples modelar agentes heterogêneos. Esses agentes quando caracterizados com comportamentos de interação fazem emergir novos comportamentos na multidão. Reynolds (REYNOLDS, 1987) descreveu *boids* (contração de “*bird-oids*”) e fez com que eles reproduzissem o comportamento de um bando através da combinação de três comportamentos individuais simples: os *boids* em um bando deveriam evitar colisões, manter a mesma velocidade e ficar perto dos *boids* próximos no bando. Em (REYNOLDS, 1999), foram descritos comportamentos de direção para agentes autônomos (comportamento de fuga, busca, alinhamento, separação, coesão, dentre outros) e, em seguida, mostrado que esses comportamentos podem ser combinados para reprodução de novos comportamentos. Mais adiante, Reynolds desenvolveu simulações com agentes autônomos em um *PlayStation 2* (REYNOLDS, 2000) e em um *PlayStation 3* (REYNOLDS, 2006), aproveitando a arquitetura desses *hardwares* para simular grupos de centenas a milhares de agentes utilizando técnicas de divisão espacial no ambiente para reduzir o custo computacional relacionado à busca de um agente por sua vizinhança. Na Figura 2.1 podem ser vistas imagens de suas simulações. Esse tipo de modelo baseado em agentes possui a vantagem da facilidade de se modelar agentes heterogêneos, mas, geralmente, é computacionalmente mais caro do que outros tipos de modelos, como os

baseados em autômato celular, forças sociais e dinâmica de fluidos, por exemplo.



(a) Pombos em um parque (REYNOLDS, 2000).



(b) Peixes em um oceano (REYNOLDS, 2006).

Figura 2.1: Simulação de *boids*.

2.3 Pedestres autônomos

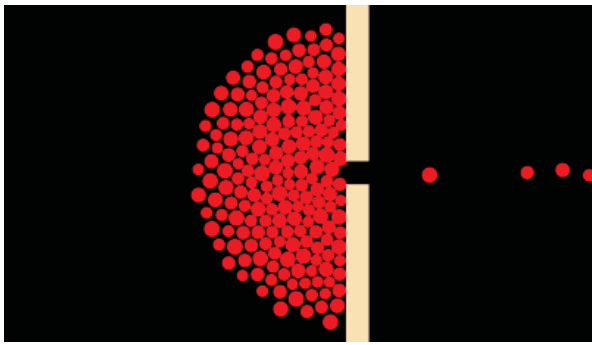
Shao & Terzopoulos (2007) propuseram um modelo baseado em agentes para simular multidões onde os agentes são totalmente autônomos, com suas próprias necessidades. Esses agentes podem sentir o ambiente, analisar situações, tomar decisões e se comportar naturalmente. Os autores representaram o ambiente usando uma coleção hierárquica de mapas, onde cada mapa foi criado para uma proposta e a combinação deles ajuda o gerenciamento da multidão de forma eficiente. O modelo compreende um mapa topológico que representa a estrutura topológica do mundo virtual, e, associados a esse mapa, estão os mapas de percepção que proveem informações relevantes às consultas de percepção e os mapas de caminho que permitem o planejamento de caminhos para a navegação dos agentes. Além disso, cada agente possui um estado mental interno que abrange as suas necessidades fisiológicas, psicológicas e sociais. Um agente pode interromper sua atividade atual para realizar outra, dependendo de seu estado mental. Nesse modelo, a busca por caminhos é feita por um algoritmo baseado no algoritmo de busca em grafos A^* (HART et al., 1968) com o auxílio dos mapas topológicos e de caminhos. Como estudo de caso, os autores simularam uma multidão na antiga estação Pensilvânia, em Nova Iorque (algumas imagens podem ser vistas na Figura 2.2). Esse modelo é a expansão de um trabalho anterior (FUNGE et al., 1999) que propôs uma modelagem de cognição, onde agentes tem conhecimento e podem aprender durante uma simulação não somente realizando ações reativas, mas também ações relacionadas às suas necessidades.



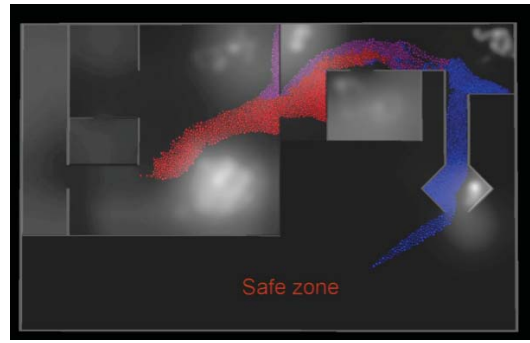
Figura 2.2: Pedestres autônomos na estação Pensilvânia (SHAO; TERZOPOULOS, 2007).

2.4 Forças Sociais

Em (HELBING; MOLNÁR, 1995), os autores propuseram um modelo de forças sociais onde um agente se locomove através de forças repulsivas (outros agentes, objetos, paredes, etc.) e atrativas (amigos, objetos, etc.) tentando alcançar um certo destino da maneira mais confortável possível. Esse modelo simula naturalmente a auto-organização dos agentes em fenômenos coletivos de forma realista. Combinando forças sócio-psicológicas e físicas, foi proposto em (HELBING et al., 2000) um modelo de forças sociais capaz de simular multidões em situações de pânico (Figura 2.3a). O modelo se mostrou capaz de reproduzir diversos fenômenos reais como: aumento da pressão entre os agentes, efeitos de entupimento em gargalos, uso ineficiente de saídas alternativas, dentre outros. Esse tipo de modelo pode ser adaptado a várias situações apenas adicionando novas forças de acordo com o comportamento esperado para a multidão, assim como foi feito em (COURTY; MUSSE, 2005), onde uma força de repulsão foi adicionada ao modelo de Helbing (HELBING et al., 2000) para que a multidão evitasse locais com fumaça enquanto tentava evacuar uma construção (Figura 2.3b). Nesse trabalho também foi adicionada “saúde” aos agentes, que é afetada pela inalação de gás ou fumaça durante uma simulação, onde a saúde de um agente afeta sua velocidade. Modelos de forças sociais são bastante adequados para simulação de situações de emergência, mas também podem ser adaptados para simulações de situações comuns como pode ser visto em (PELECHANO et al., 2007).



(a) Agentes evacuando a sala (HELBING et al., 2000).



(b) Agentes evacuando uma construção evitando a fumaça (COURTY; MUSSE, 2005).

Figura 2.3: Modelos de forças sociais.

2.5 Dinâmica contínua

Em (HUGHES, 2002) e (HUGHES, 2003), o autor descreveu um modelo baseado na teoria contínua (dinâmica de fluidos), onde são definidas equações diferenciais parciais que descrevem as dinâmicas de multidão. Esse modelo converte os agentes em um campo de densidade contínuo que é utilizado para a geração de um campo potencial que guia os agentes ao objetivo pelo melhor caminho possível. Inspirado pelo modelo de Hughes, foi proposto em (TREUILLE et al., 2006) um modelo também baseado na teoria contínua, onde várias melhorias foram feitas no trabalho de Hughes para que comportamentos de multidão mais realistas fossem alcançados. O modelo descrito por Treuille (TREUILLE et al., 2006) separa os agentes da simulação em grupos com objetivos comuns, onde esses grupos representam o ambiente discretizado em uma grade, e para cada grupo existente é calculado um campo potencial que guia os agentes daquele grupo. Esse modelo unifica o planejamento global e local de caminhos, e a prevenção de colisões. Os autores demonstraram ainda ser possível a integração do modelo com outras abordagens de simulação de multidão. Na Figura 2.4 pode ser visto o encontro de dois grupos diferentes em uma simulação.

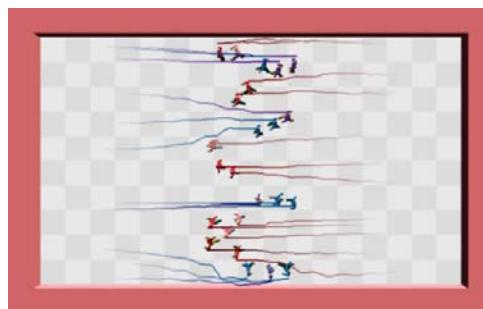


Figura 2.4: Encontro de dois grupos de agentes (TREUILLE et al., 2006).

Em (JIANG et al., 2010), os autores propuseram um modelo contínuo que apresentava melhorias ao modelo de Treuille (TREUILLE et al., 2006), tornando-o mais adequado para ambientes complexos. Nesse modelo foi apresentada uma estrutura de ambientes baseada em blocos (Figura 2.5), que ajuda a organização e simulação de multidões em cenários em grande escala, e proposta uma nova técnica para conversão da densidade, onde a densidade em uma célula irá depender também de seu tamanho, além dos agentes que estiverem nela. Os modelos baseados na teoria contínua tem como principal vantagem poderem simular realisticamente o comportamento de vários agentes em tempo real, mas possuem a desvantagem desses agentes terem de ser agrupados em alguns poucos grupos com objetivos comuns.

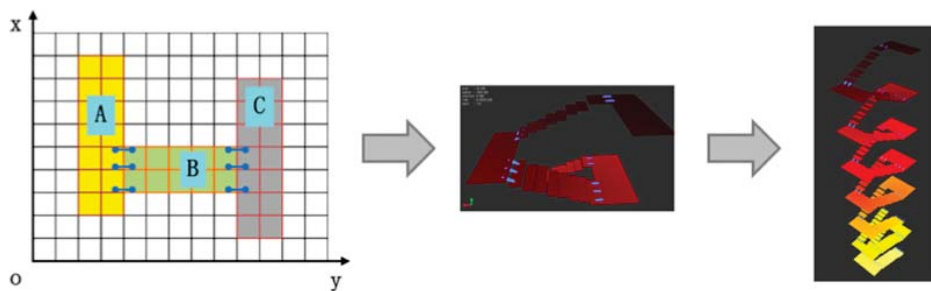


Figura 2.5: Estrutura de ambientes baseada em blocos (JIANG et al., 2010).

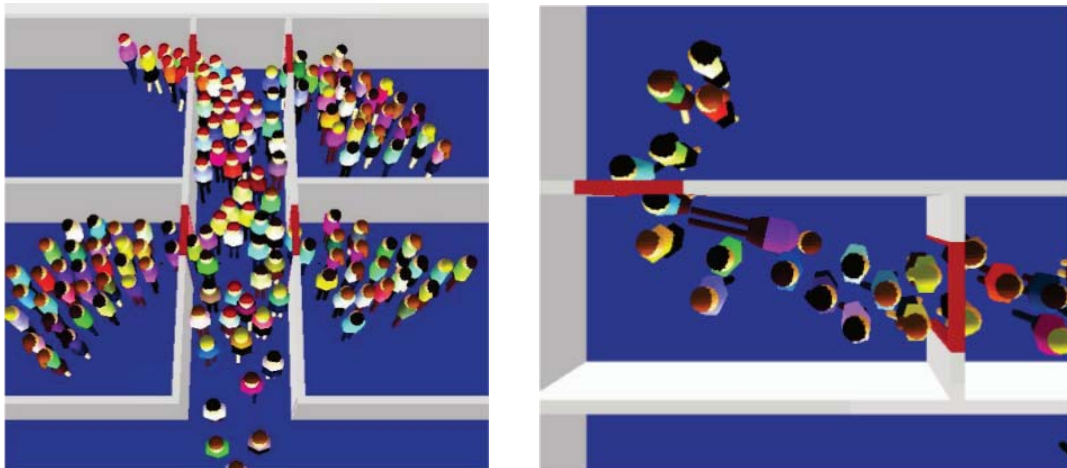
2.6 Comportamentos escaláveis

Em modelos microscópicos é simples introduzir comportamentos porque os agentes podem ser caracterizados individualmente; ao mesmo tempo isso pode se tornar uma tarefa tediosa se for necessária a caracterização de muitos agentes para dar alguma variedade de comportamentos a uma simulação. Além disso, a adição de muitos comportamentos aumenta a quantidade de dados necessária para cada agente. Em (SUNG et al., 2004), os autores propuseram uma abordagem baseada em situações para modelar o comportamento dos agentes em uma simulação. Em alto nível, uma abordagem baseada em situações é utilizada para prover um mecanismo escalável para o controle de comportamentos locais. No nível mais baixo do *framework* é utilizado um esquema de probabilidade que compõe a influência de vários comportamentos que serão usados para gerar comportamentos realistas. Nesse modelo, os agentes se comportam de acordo com o local onde eles estão. Eles possuem características e comportamentos básicos, mas ao entrarem em determinadas áreas adquirem comportamentos locais enquanto estiverem naquela área. Dessa forma, os dados armazenados neles são minimizados, sendo possível simular diversos agentes com comportamentos variados na multidão durante uma simulação. A combinação de comportamentos nesse modelo traz a desvantagem da necessidade de se arma-

zenar diversos estados passados.

2.7 Modelos Híbridos

Cada abordagem metodológica possui vantagens e desvantagens em certos aspectos, o que fez surgir o conceito de modelos híbridos, que são modelos que procuram combinar as melhores características dentre os vários tipos de modelos existentes. Em (PELECHANO et al., 2007), os autores capturaram os melhores aspectos de modelos baseados em regras e modelos baseados em forças sociais, e criaram um novo modelo que usava regras psicológicas, fisiológicas e geométricas combinadas com forças físicas para reproduzir agentes heterogêneos e guiar eles em um ambiente. O modelo proposto é um sistema multi-agente sem um controlador centralizado e cada agente possui seu próprio comportamento baseado em suas variáveis de personalidade que representam fatores fisiológicos e psicológicos observados em pessoas reais. O modelo é capaz de simular diversos comportamentos realistas, mas para a obtenção de alguns comportamentos o usuário deve ajustar alguns parâmetros manualmente; logo, o usuário deve ter conhecimento sobre as metodologias utilizadas no sistema. Algumas situações obtidas com o modelo podem ser vista na Figura 2.6. Um modelo que considerava fatores psicológicos, em um modelo de forças sociais, a fim de reproduzir agentes com comportamentos mais acreditáveis havia sido proposto anteriormente pelos autores em (PELECHANO et al., 2005) e serviu como base para esse novo trabalho.



(a) Vários agentes se empurrando para escapar de uma sala.

(b) Agentes desviando de um agente que desmaiou (obstáculo dinâmico).

Figura 2.6: Modelo híbrido (PELECHANO et al., 2007).

Modelos baseados na abordagem de dinâmica de fluidos são classificados como macroscópicos enquanto que, geralmente, os outros modelos são classificados como microscópicos.

Recentemente, modelos híbridos envolvendo esses dois tipos de modelos têm sido propostos. Esse tipo de modelo híbrido pode ser chamado de mesoscópico. Em (YERSIN et al., 2008), os autores propuseram uma arquitetura para simulação de multidão que divide o ambiente em três regiões de interesse (*regions of interest* (ROI)) e cada ROI é governado por uma técnica diferente de planejamento de movimento. Na região sem interesse, o planejamento de caminhos é governado por um grafo de navegação e as colisões não são evitadas; na região de menor interesse, o planejamento de caminhos é governado também por um grafo de navegação e usa uma abordagem similar a abordagem descrita em (REYNOLDS, 1999), e, nesse caso, os obstáculos são evitados; finalmente, nas regiões de maior interesse, o planejamento de caminhos e a prevenção de colisões são ambos governados por um algoritmo baseado em campos potenciais, similar ao de (TREUILLE et al., 2006). A divisão do ambiente em regiões de interesse faz com que as áreas que utilizam campos potenciais (áreas de maior interesse) não sejam tão grandes, sendo possível adicionar mais objetivos (grupos) a uma simulação em tempo real do que seria possível se o modelo utilizasse apenas um algoritmo baseado em campos potenciais no ambiente todo. Mesmo assim, o individualismo possível em modelos microscópicos ainda não pôde ser reproduzido no modelo em simulações em tempo real. Imagens de simulações utilizando o modelo podem ser vistas na Figura 2.7.



Figura 2.7: Pedestres utilizando um planejador de movimentos híbrido (YERSIN et al., 2008).

Em (XIONG et al., 2010), os autores propuseram uma arquitetura onde dois modelos (um macroscópico e um microscópico) coexistem em uma única simulação e trabalham de forma colaborativa, extraindo os benefícios de cada modelo quando necessário. O ambiente de uma simulação é dividido em partições e cada partição é governada por um modelo. Os dois modelos são executados para cada partição simultaneamente a cada passo da simulação: quando a multidão está estabilizada utiliza-se o modelo macroscópico; se o movimento da multidão se torna instável então o modelo microscópico é utilizado; e quando o movimento se torna estável

novamente o modelo macroscópico volta a ser utilizado. O modelo macroscópico somente é utilizado em uma partição quando os agentes contidos nela são homogêneos. Esse modelo se mostrou mais eficiente em termos de execução do que um modelo microscópico, assim como melhorou a qualidade da simulação em comparação a um modelo macroscópico. O modelo apresenta problemas relacionados à troca de informações sobre estado, pois essa troca por enquanto é unilateral (somente do modelo macroscópico para o microscópico).

Em (NARAIN et al., 2009), os autores apresentaram um modelo baseado em dinâmica contínua que não requer que os agentes sejam divididos em poucos grupos, além de suportar multidões densas, com milhares de agentes em tempo real. O trabalho descreve um modelo comportamental local que atua em conjunto com um planejador global, onde esse planejador pode ser baseado em *roadmaps* ou em campos potenciais, por exemplo. Primeiramente, se planeja o caminho dos agentes globalmente e atribui-se a velocidade desejada de cada agente; em seguida, localmente as velocidades dos agentes são adaptadas de acordo com a densidade da célula em que ele se encontra; após as velocidades serem definidas é garantida a distância mínima entre os agentes. Os vizinhos de um agente não são considerados no planejamento global; logo o campo das velocidades utilizado nessa etapa não precisa ser calculado em todas os passos da simulação, o que faz com que esse modelo seja muito eficiente, já que a obtenção desses campos é uma etapa de alto custo. Nesse modelo um agente somente tem conhecimento dos agentes adjacentes a ele, ou seja, eles só irão desviar uns dos outros quando estiverem bem próximos. Por fim, apesar de suportar multidões densas, esse modelo não é capaz de representar as condições enfrentadas por multidões densas reais, como é possível em modelos baseados na abordagem de forças sociais. Na Figura 2.8 podem ser vistos alguns exemplos de multidões simuladas pela técnica.



Figura 2.8: Multidões densas com milhares de agentes (NARAIN et al., 2009).

2.8 Considerações finais

A área de Simulação de Multidão possui diversos problemas em aberto, relacionados à assuntos variados. Em (THALMANN et al., 2009), os autores discutiram sobre alguns desafios atuais da

área para simulações em tempo real, e o que o está sendo feito para superá-los. Eles categorizaram desafios relacionados a: geração de agentes visualmente diferentes (por exemplo: forma, face, acessórios), animação de agentes de forma variada (por exemplo: forma do agente influenciando o caminhar), interface para modelagem de cenários com multidões, planejamento de movimentos (por exemplo: global, local, prevenção de colisões), comportamentos (por exemplo: intra grupo, extra grupo, social) e renderização de vários agentes (por exemplo: nível de detalhes, *patches*).

Nesta dissertação são abordados desafios relacionados a comportamentos e a planejamento de caminhos. Relacionado a planejamento de caminhos são feitas contribuições ao modelo proposto em (TREUILLE et al., 2006) visando a diminuição de seu custo computacional através da utilização de grades discretizadas de acordo com a necessidade local. Dessa forma, é proposta a utilização de grades menos discretizadas para comportamentos globais e grade mais discretizadas em situações locais (por exemplo: presença de objetos, passagens estreitas). E, ainda, para evitar colisões, é proposta a utilização de um modelo de forças sociais baseado no modelo descrito em (HELBING et al., 2000), sendo assim possível considerar o modelo apresentado nesta dissertação como híbrido. Com relação a comportamentos, é proposta a adição de comportamentos locais ao modelo apresentado utilizando uma abordagem baseada em situações, assim como em (SUNG et al., 2004), através da adição de grupos pequenos locais que desviam momentaneamente o caminho dos agentes, dando assim heterogeneidade de comportamentos ao modelo proposto.

Neste capítulo foram brevemente apresentadas as principais abordagens metodológicas utilizadas atualmente para simulação de multidões. E, em seguida, alguns trabalhos de maior relevância para a área e para o trabalho proposto foram apresentados. No Capítulo 3, os modelos propostos em (TREUILLE et al., 2006) e (HELBING et al., 2000) são descritos com mais detalhes, devido a importância deles para o desenvolvimento do modelo proposto.

3 Modelos de Forças Sociais e Dinâmica Contínua

Neste capítulo são descritos com maiores detalhes os trabalhos propostos em (HELBING et al., 2000) e (TREUILLE et al., 2006). Esses trabalhos servem como base para o modelo que será descrito no próximo capítulo. Na primeira seção é apresentado o modelo microscópico de Helbing que será utilizado pelo modelo proposto para dar movimentos naturais aos agentes quando estiverem próximos de outros agentes ou obstáculos. Na segunda seção é apresentado o modelo macroscópico proposto por Treuille que serve como base para o planejamento de movimentos locais e globais do modelo proposto por este trabalho. Por fim, na Seção 3.3, é feita uma breve conclusão para o capítulo.

3.1 Modelo de Helbing

No trabalho proposto em (HELBING et al., 2000), após estudarem cuidadosamente trabalhos sócio-psicológicos relacionados, os autores listaram as seguintes características de situações de pânico onde se deve escapar de uma construção:

1. Pessoas se movem ou tentam se mover consideravelmente mais rápido que o normal.
2. Indivíduos começam a empurrar, e as interações entre as pessoas se tornam de natureza física.
3. Movimentos e, em particular, passagem por gargalos se tornam descoordenados.
4. Nas saídas, arqueamentos e entupimentos são observados.
5. Congestionamentos vão se acumulando.
6. As interações físicas na multidão congestionada aumentam e causam pressões perigosas acima de 4450 Newtons por metro, que podem dobrar barras de aço ou demolir paredes de tijolo.

7. Fuga é ainda atrasada por pessoas caídas ou feridas que se tornam "obstáculos".
8. Pessoas exibem uma tendência de comportamento massivo como, por exemplo, fazendo o que as outras pessoas fazem.
9. Saídas alternativas são frequentemente negligenciadas ou não usadas de forma eficiente em situações de fuga.

Essas observações levaram ao desenvolvimento do modelo deste trabalho para fenômeno de fuga em pânico inspirado nos sistemas de partículas auto-dirigidos.

A simulação de multidão de pedestres dinâmicos é baseada em um modelo de forças generalizado, que é particularmente adequado para descrever o acúmulo fatal de pressão observado durante situações de pânico. Assume-se uma mistura de fatores sócio-psicológicos e forças físicas que influenciam o comportamento da multidão.

No modelo, cada pedestre i possui uma massa m_i e possui uma certa velocidade desejada v_i^0 em uma certa direção \vec{e}_i^0 , e portanto tende a adaptar de forma correspondente sua velocidade \vec{v}_i atual em um certo tempo τ_i . Simultaneamente, o pedestre tenta manter uma distância, dependente da velocidade, dos outros pedestres j e das paredes W . Isso pode ser modelado pelas "forças de interação" \vec{f}_{ij} e \vec{f}_{iW} , respectivamente. Assim, a mudança de velocidade no tempo t pode ser obtida pela equação da aceleração

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t) \vec{e}_i^0(t) - \vec{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} \vec{f}_{ij} + \sum_W \vec{f}_{iW} \quad (3.1)$$

enquanto a mudança de posição $\vec{r}_i(t)$ pode ser obtida pela velocidade $\vec{v}_i(t) = \frac{d\vec{r}_i}{dt}$.

Então, tem-se que

$$\vec{f}_{ij} = \{A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i] + kg(r_{ij} - d_{ij})\} \vec{n}_{ij} + \kappa g(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ji}^t \vec{t}_{ij}, \quad (3.2)$$

onde A_i , B_i , k e κ são constantes, r_{ij} é a soma dos raios dos indivíduos, d_{ij} é a distância entre os centros de massa dos pedestres, \vec{n}_{ij} é o vetor normalizado apontando de j para i , Δv_{ji}^t é a diferença de velocidade tangencial, \vec{t}_{ij} é a direção tangencial e $g(x)$ é uma função que retorna 0 se os agentes se tocam e x caso contrário. De forma análoga tem-se, para as paredes, que

$$\vec{f}_{iW} = \{A_i \exp[(r_i - d_{iW})/B_i] + kg(r_i - d_{iW})\} \vec{n}_{iW} + \kappa g(r_i - d_{iW}) (\vec{v}_i \cdot \vec{t}_{iW}) \vec{t}_{iW}. \quad (3.3)$$

Esse modelo foi capaz de representar algumas situações como:

1. Aumento da pressão.

2. Efeitos de entupimento nos gargalos.
3. Congestionamentos em alargamentos.
4. O "efeito mais rápido é mais lento".
5. Uso ineficiente de saídas alternativas.
6. Início de pânico por contra-fluxos e impaciência.

E ainda se mostrou capaz de simular situações de escassez de recursos e estimar as casualidades. Dessa forma, de acordo com os resultados, os autores mostraram que o modelo pode ser usado para testar a adequabilidade de construções às situações de emergência. O modelo serve tanto para avaliar situações normais como situações de emergências, bastando alterar o parâmetro de pânico.

3.2 Modelo de Treuille

Em (TREUILLE et al., 2006) foi apresentado um modelo para simulação de multidão em tempo real baseado na dinâmica contínua. Nesse modelo, um campo potencial dinâmico integra navegação global, navegação local e a prevenção de colisões de forma eficiente para lidar com o movimento de multidões em larga escala. O modelo é, basicamente, derivado de quatro hipóteses:

Hipótese 3.1 *Cada agente está tentando alcançar um objetivo geográfico $G \subseteq R^2$.*

Hipótese 3.2 *Agentes se movem na maior velocidade possível. Isso pode ser expressado como um campo de velocidade máxima f tal que um agente na posição \mathbf{x} que se move na direção θ tem velocidade:*

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \theta) \mathbf{n}_\theta, \quad (3.4)$$

onde nesse trabalho, $\mathbf{n}_\theta = [\cos \theta, \sin \theta]^T$ representa o vetor unitário apontando na direção θ .

Hipótese 3.3 *Existe um campo de desconforto g tal que, em condições iguais, agentes irão preferir estar em um ponto \mathbf{x} ao invés de um \mathbf{x}' se $g(\mathbf{x}') > g(\mathbf{x})$.*

Hipótese 3.4 *Dado o conjunto de todos os caminhos Π de \mathbf{x} para algum ponto no objetivo G , assumindo um campo de velocidade f e um campo de desconforto g , uma pessoa no local \mathbf{x} deve escolher o caminho $P \in \Pi$ que minimiza*

$$\underbrace{\alpha \int_P 1 ds}_{\text{Tamanho do caminho}} + \underbrace{\beta \int_P 1 dt}_{\text{Tempo}} + \underbrace{\gamma \int_P g dt}_{\text{Desconforto}} . \quad (3.5)$$

As variáveis α , β e γ são pesos para termos individuais. Como $ds = f dt$, usando essa igualdade, a equação (3.5) pode ser reescrita como

$$\int_P C ds, \quad \text{onde } C \equiv \frac{\alpha f + \beta + \gamma g}{f} \quad (3.6)$$

é o campo de custo unitário.

Uma função potencial ϕ que fornece o custo em qualquer lugar para o caminho ótimo para o objetivo foi definida. Então, sendo $\phi = 0$ no objetivo, um agente deve se mover na direção oposta ao gradiente dessa função. Nos locais fora do objetivo, ϕ satisfaz a *equação eikonal*:

$$\| \nabla \phi(\mathbf{x}) \| = C, \quad (3.7)$$

onde o custo unitário C é avaliado na direção do gradiente $\nabla \phi(x)$. No sistema desenvolvido, os agentes se movem na direção oposta ao gradiente, escalado pela velocidade no ponto:

$$\dot{\mathbf{x}} = -f(\mathbf{x}, \theta) \frac{\nabla \phi(\mathbf{x})}{\| \nabla \phi(\mathbf{x}) \|}, \quad (3.8)$$

onde $\dot{\mathbf{x}}$ denota a velocidade, e $f(\mathbf{x}, \theta)$ é avaliada na direção do movimento.

O processo de obtenção de um campo potencial pode ser custoso para a busca de um caminho ótimo. Baseado nessa possibilidade, os autores fazem uma simplificação que justifica esse método. A simplificação consiste no agrupamento de agentes em grupos que compartilham as mesmas características (objetivo, desconforto e velocidade). Dessa forma, para cada grupo será necessário o cálculo de somente um campo potencial a fim de guiar os agentes contidos nele ao objetivo.

O campo de velocidade f necessário para calcular C é dependente da densidade, sendo necessário então calcular antes o *campo de densidade da multidão* ρ . Para isso, cada agente é convertido em um campo de densidade individual, chamado de ρ_i para o i -ésimo agente. A densidade máxima de um campo de densidade individual está na posição do agente e diminui radialmente. A densidade da multidão ρ é a soma dos campos de densidade individuais. Ao

mesmo tempo que esse campo é calculado, calcula-se o *campo de velocidade média* $\bar{\mathbf{v}}$ que escala a densidade de cada agente por sua velocidade, indicando a velocidade global e direção do fluxo da multidão:

$$\rho = \sum_i \rho_i, \quad \text{e} \quad \bar{\mathbf{v}} = \frac{\sum_i \rho_i \dot{\mathbf{x}}_i}{\rho}. \quad (3.9)$$

Aqui $\dot{\mathbf{x}}_i$ indica a velocidade do i -ésimo agente. Ambas somas são feitas para todas as pessoas em todos grupos.

Cada agente influencia o campo de velocidade próximo. O campo de velocidade f mede a velocidade máxima permitida em cada direção em cada ponto. A velocidade é então calculada baseada na densidade do local onde o agente se encontra. Em regiões de densidade muito baixa ($\rho \leq \rho_{min}$ para algum ρ_{min}), a velocidade f é igual a *velocidade topográfica* f_T . Assumindo a existência de uma limitação de inclinação mínima s_{min} e máxima s_{max} no terreno, a velocidade varia inversamente com a inclinação:

$$f_T(\mathbf{x}, \theta) = f_{max} + \left(\frac{\nabla h(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{n}_\theta - s_{min}}{s_{max} - s_{min}} \right) (f_{min} - f_{max}), \quad (3.10)$$

onde $\nabla h(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{n}_\theta$ é a inclinação do campo de alturas h na direção θ .

Em regiões de densidade muito alta ($\rho \geq \rho_{max}$ para algum ρ_{max}), a velocidade f é igual a *velocidade de fluxo* $f_{\bar{\mathbf{v}}}$:

$$f_{\bar{\mathbf{v}}}(\mathbf{x}, \theta) = \bar{\mathbf{v}}(\mathbf{x} + r\mathbf{n}_\theta) \cdot \mathbf{n}_\theta. \quad (3.11)$$

A velocidade de fluxo $f_{\bar{\mathbf{v}}}$ é essencialmente a velocidade média $\bar{\mathbf{v}}$ avaliada a uma distância r da posição \mathbf{x} . Essa velocidade é controlada para não ser negativa, implicando que a multidão pode diminuir a velocidade dos agentes, mas nunca carregá-los para trás.

Em densidades médias ($\rho_{min} < \rho < \rho_{max}$), obtém-se f pela interpolação linear das velocidades topográfica e de fluxo:

$$f(\mathbf{x}, \theta) = f_T(\mathbf{x}, \theta) + \left(\frac{\rho(\mathbf{x} + r\mathbf{n}_\theta) - \rho_{min}}{\rho_{max} - \rho_{min}} \right) (f_{\bar{\mathbf{v}}}(\mathbf{x}, \theta) - f_T(\mathbf{x}, \theta)). \quad (3.12)$$

No trabalho foi mostrado que o modelo pode ser adaptado para que os agentes tenham uma predição do futuro. Uma das formas descritas é através do *desconforto preditivo*, onde é adicionado desconforto nas regiões que estão alguns passos de simulação a frente de objetos/agentes em movimento. Dessa forma, os agentes podem com antecedência desviar de obstáculos, produzindo movimentos mais suaves.

Baseado na teoria apresentada, foi desenvolvido o algoritmo do simulador, onde o ambiente é discretizado em uma grade e cada célula mantém os dados necessários para o cálculo do

campo potencial. No começo da simulação todos os agentes são convertidos em um campo de densidade, então para cada grupo é construído o campo de velocidade, o campo de custo e, finalmente, o campo potencial. O cálculo de campo potencial é a tarefa mais cara desse modelo, e, por esse motivo, os agentes com objetivos e características em comum são agrupados em alguns poucos grupos. Uma visão geral da técnica pode ser vista na Figura 3.1.

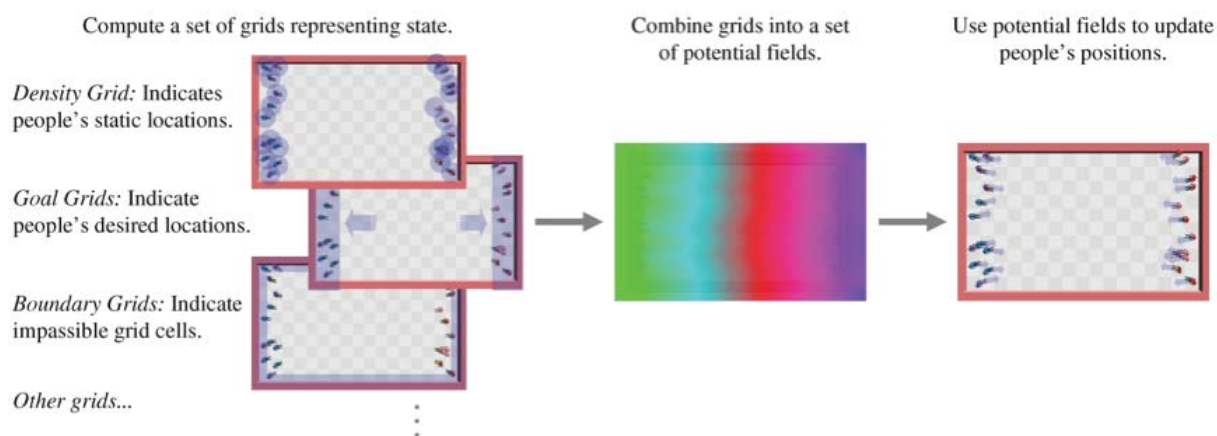


Figura 3.1: Visão geral da técnica. (TREUILLE et al., 2006)

O cálculo do campo potencial é uma tarefa custosa porque a equação (3.7) que o define não pode ser calculada diretamente. Porém, existem métodos eficientes para resolver esse tipo de equação. No trabalho, os autores optaram por utilizar o *fast marching method* (TSITSIKLIS, 1995), um algoritmo similar ao algoritmo de Dijkstra para caminho de custo mínimo em grafos. No algoritmo, inicialmente, atribui-se ao campo potencial ϕ o valor de 0 nas células dentro do objetivo, e as inclui na lista de células *conhecidas*; todas as outras células são *desconhecidas* e inicializadas como ∞ . As células *desconhecidas* adjacentes às *conhecidas* são incluídas na lista de células *candidatas* e tem os seus valores em ϕ aproximados pela solução de uma aproximação de diferenças finitas para a equação (3.7). A célula *candidata* com o menor valor potencial é então incluída nas células *conhecidas*, e seus vizinhos são introduzidos no conjunto de *candidatas* sendo seus valores potenciais reaproximados. Esse processo é repetido, propagando as células *conhecidas* até todas as células serem definidas. O algoritmo pode ter tempo de execução $O(N \log N)$, onde N é a quantidade de células da grade, se for utilizada uma estrutura de dados como a *heap* para manter a lista de células candidatas de forma eficiente.

Para calcular a aproximação de diferenças finitas é necessário, para dada uma célula M , encontrar as células adjacentes menos custosas nos eixos x e y :

$$m_x = \arg \min_{i \in \{W,E\}} \{\phi_i + C_{M \rightarrow i}\} \quad m_y = \arg \min_{i \in \{N,S\}} \{\phi_i + C_{M \rightarrow i}\},$$

onde $C_{M \rightarrow i}$ representa o custo de ir da célula M para a célula i .

Após a obtenção dessas células, calcula-se ϕ_M , que será o maior valor dentre as soluções da equação quadrática

$$\left(\frac{\phi_M - \phi_{m_x}}{C_{M \rightarrow m_x}}\right)^2 + \left(\frac{\phi_M - \phi_{m_y}}{C_{M \rightarrow m_y}}\right)^2 = 1. \quad (3.13)$$

Se m_x ou m_y for indefinido, diminui-se uma dimensão da equação (3.13). Com ϕ_M calculado é então possível obter $\nabla\phi$ nas direções apropriadas e computar o campo de velocidade v naquela célula. Por fim, as posições dos agentes são atualizadas pela interpolação do campo de velocidade e a distância mínima entre os agentes é verificada e garantida.

O modelo apresentado neste trabalho se mostrou bastante eficaz na reprodução de vários (centenas a milhares) de agentes em tempo real com comportamento realista. Apesar da desvantagem da necessidade do agrupamento de agentes em alguns poucos grupos com características comuns (para que não comprometa a performance da simulação), o que provoca de certa forma uma limitação a comportamentos heterogêneos como os possíveis de se modelar em modelos microscópicos, o modelo foi bem aceito, sendo bastante referenciado na literatura e utilizado em áreas onde existe a necessidade de simular multidões em tempo real, como na área de jogos. Diversos jogos utilizam o modelo proposto, como os recentes *Supreme Commander 2* (SQUARE ENIX, 2010) (Figura 3.2a) e *StarCraft 2* (BLIZZARD ENTERTAINMENT, 2010) (Figura 3.2b).



(a) *Supreme Commander 2* (SQUARE ENIX, 2010). (b) *StarCraft 2* (BLIZZARD ENTERTAINMENT, 2010).

Figura 3.2: Exemplos de jogos que utilizam o modelo de Treuille.

3.3 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados dois trabalhos importantes para o desenvolvimento do modelo proposto, um modelo microscópico (HELBING et al., 2000) e outro macroscópico

(TREUILLE et al., 2006), que irão atuar juntos para simular multidões de forma realista em tempo real no modelo apresentado neste trabalho. No capítulo seguinte é apresentada a técnica proposta, assim como sua implementação e suas contribuições à área de simulação de multidão.

4 *Técnica Proposta*

Neste capítulo é apresentado o modelo para simulação de multidão proposto por este trabalho. O capítulo está dividido em 7 seções. Na primeira seção é apresentada uma visão geral da técnica. Na Seção 4.2, os agentes e os grupos são caracterizados. Em seguida, na Seção 4.3, é apresentada a forma como os agentes podem passar a interagir com os grupos. Na Seção 4.4 é descrito como comportamentos podem ser obtidos utilizando grupos secundários. Na Seção 4.5 é apresentado como um modelo de forças sociais foi integrado ao modelo para tratar da colisão entre os agentes e outros obstáculos. Na seção seguinte é descrito o algoritmo proposto e em suas subseções são apresentadas as principais diferenças relacionadas ao modelo contínuo de Treuille (TREUILLE et al., 2006). Por fim, na Seção 4.7 são feitas algumas considerações finais para o capítulo.

4.1 **Visão geral**

Comportamentos individuais em um modelo baseado na teoria contínua em geral requerem construir um campo potencial para cada agente na multidão, o que pode ser uma tarefa muito cara e não adequada a simulações em tempo real. Para evitar isso, nesse tipo de modelo os agentes são agrupados em alguns poucos grupos que compartilham as mesmas características. Esses grupos dão à simulação comportamentos globais (por exemplo: ir de um local *A* para um local *B*), que misturados simulam bem uma multidão, mas excluem comportamentos locais (por exemplo: ir a bilheteria antes de ir ao teatro, parar para observar algo), que dariam mais realismo e heterogeneidade a uma multidão.

Dada essa limitação desse tipo de modelo, nesse trabalho é proposto um modelo que abrange duas ideias que visam a diminuição da carga envolvida no cálculo dos campos potenciais, ao mesmo tempo que permitem uma maior variabilidade de comportamentos aos agentes. O modelo proposto é baseado no modelo de Treuille. Naquele modelo, os grupos são representados por grades discretizadas de mesmo tamanho que envolvem o ambiente, e a discretização dessas grades depende da complexidade desse ambiente. Nesse tipo de modelo quanto mais

discretizadas forem as grades maior será o custo para calcular seus campos potenciais. Baseado nessa observação, é proposto neste trabalho a discretização das grades de um ambiente de acordo com a necessidade local, através da utilização de várias grades (grupos) pouco discretizadas com células de tamanhos variados. Para movimentações globais utilizam-se grades pouco discretizadas com células grandes, e, por exemplo, próximo a objetos ou portões (locais que necessitam de movimentos mais suaves), utilizam-se grades pouco discretizadas com células menores de acordo com o objeto ou local por onde os agentes devem passar. Na Figura 4.1 poder ser visto um exemplo de como ficaria um cenário simples com um objeto.

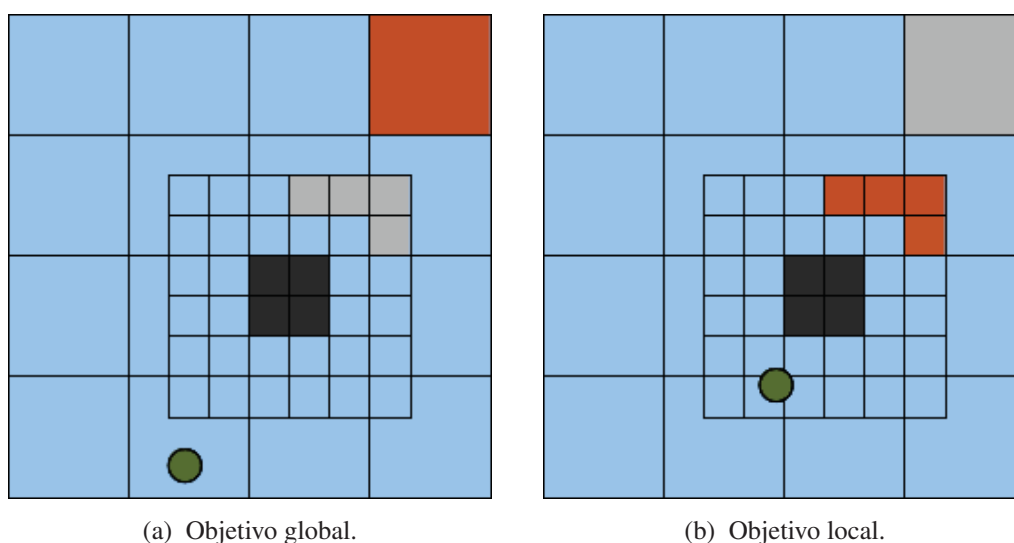


Figura 4.1: Grades discretizadas por necessidade: o círculo verde representa um agente, a área cinza representa um objetivo inativo, a área laranja representa um objetivo ativo e a área preta representa um objeto.

Na Figura 4.1a pode ser observado que o agente segue o objetivo de seu grupo principal que é utilizado para sua movimentação global, e ao passar próximo ao objeto (Figura 4.1b) ele passar a seguir o objetivo do grupo que o objeto se encontra; ao atingir esse objetivo local, o agente volta ao seu objetivo global.

Essa técnica reduz bastante a quantidade células por grupo, permitindo a utilização de mais grupos em uma simulação em tempo real, tornando possível a introdução de vários comportamentos. Porém, esses comportamentos continuam sendo globais. Visando diminuir essa limitação é proposta a introdução de comportamentos locais, baseados em situações, ao modelo, através da utilização de grupos pequenos espalhados pelo ambiente que podem desviar momentaneamente ou permanentemente o caminho dos agentes. A Figura 4.2 demonstra essa ideia.

Por fim, a utilização de células com tamanhos variados faz com que a vantagem da uti-

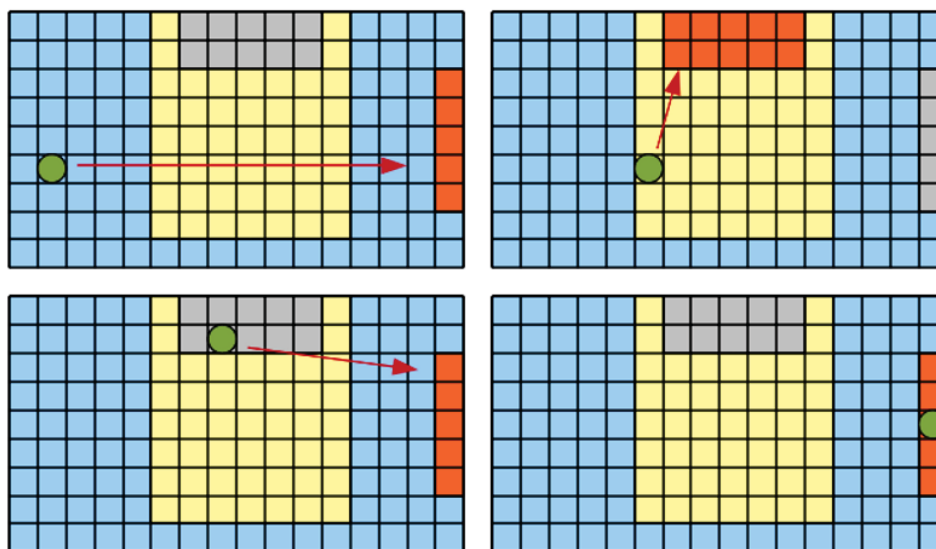


Figura 4.2: Um agente tem seu caminho alterado ao passar por um grupo de comportamento local (veja da esquerda para a direita e de cima para baixo).

lização de desconforto para que os agentes possam desviar com antecedência uns dos outros obtida com o modelo de Treuille seja perdida; então, para tratar da colisão entre agentes, o trabalho propõe a utilização do modelo de forças de Helbing (HELBING et al., 2000) que produz movimentos realistas para situações comuns e de pânico.

4.2 Agentes e grupos

No modelo original, os agentes são agrupados em grupos com características (velocidade, objetivo, desconforto) em comum. Se forem necessários agentes com o mesmo objetivo, mas velocidades diferentes, grupos diferentes devem ser criados. No modelo proposto, cada agente possui uma velocidade máxima, os grupos continuam controlando a velocidade dos agentes, mas essa velocidade é limitada pela velocidade máxima permitida para o agente. Dessa forma, em um mesmo grupo é possível ter agentes com velocidades máximas variadas. Os agentes devem possuir ainda massa e raio.

Nesse trabalho houve a necessidade de classificar os grupos, de acordo com seus objetivos, em três tipos: principal, de desvio e secundário. Um grupo principal é um grupo utilizado para movimentação global, que leva os agentes aos seus objetivos principais. Esse tipo de grupo deve ser pouco discretizado e possuir células grandes.

Um grupo de desvio é um grupo pequeno que está sempre associado a um grupo principal (ou secundário); ele é utilizado para fazer com que os agentes passem por locais que exijam

desvios suaves (proximidade a objetos, por exemplo). Esse tipo de grupo deve ser discretizado de acordo com a complexidade do local (tamanho de um objeto, por exemplo) e seu tamanho deve ser escolhido de acordo com o comportamento desejado para os agentes. Um grupo de desvio, assim como um grupo principal (ou secundário), possui uma área de objetivo, mas esse objetivo deve ser escolhido de acordo com a posição do objetivo do grupo principal (ou secundário) associado, pois deve fazer com que os agentes se movam em direção ao objetivo desse grupo principal (ou secundário), como pode ser observado no exemplo da Figura 4.1.

Grupos secundários são grupos preferencialmente pequenos, construídos da mesma forma que os grupos principais, mas que são utilizados para guiar agentes a objetivos secundários. Esse tipo de grupo não está associado a nenhum grupo principal, mas pode ter outros grupos hierarquicamente associados, dependendo do tipo de comportamento modelado. O objetivo desses grupos é dar objetivos secundários aos agentes durante uma simulação, para que a multi-dão apresente comportamentos realistas variados (parem para observar locais, se dirijam a lojas, sentem em bancos para descansar, etc.).

Os grupos em uma simulação nem sempre possuirão agentes ativos. Então, neste trabalho, somente tem seu campo potencial calculado os grupos que possuem agentes ativos no passo atual da simulação, ou seja, somente os grupos necessários no momento são processados. Dessa forma, evita-se o cálculo desnecessário dos campos potenciais de grupos não utilizados.

4.3 Eventos

Os três tipos de grupos apresentados são ativados por eventos diferentes. Os grupos principais e de desvio sempre são ativados quando possuem agentes dentro deles, mas os grupos de desvio tem prioridade sobre os grupos principais, ou seja, um agente ativo em um grupo principal ao entrar em um grupo de desvio passa a agir por este grupo, e somente ao atingir o objetivo do grupo de desvio retorna ao seu grupo principal.

Quando um agente passa dentro de um grupo secundário, ele pode se tornar ativo para esse grupo de duas formas. A primeira forma, e a mais simples, é randomicamente escolher se um agente irá se tornar ativo para aquele grupo ao passar por ele. A segunda maneira é através das necessidades internas do agente, como é feito em (SHAO; TERZOPOULOS, 2007), onde um agente pode sentir sede e ir comprar uma bebida, por exemplo. Um agente pode ainda não ser ativável por um grupo secundário. Grupos de desvio também tem prioridade sobre os grupos secundários.

Se eventualmente um agente sair da área de um grupo de desvio ou secundário onde está

ativo (ao desviar de outros agentes, por exemplo), então ele volta a se comportar de acordo com o seu grupo principal associado.

4.4 Comportamentos

Conforme dito anteriormente, este trabalho procura dar maior variedade de comportamentos a multidões em simulações em tempo real, utilizando um modelo macroscópico, através do uso de vários grupos pouco discretizados. A utilização de poucas células diminui o custo do cálculo dos campos potenciais e permite que mais grupos possam ser utilizados. Dessa forma, mais grupos (objetivos) podem ser adicionados às simulações. Além disso, uma maior variedade de comportamentos locais pode ser obtida utilizando os grupos secundários, descritos na seção anterior.

A execução de algumas ações simples ao se atingir um objetivo secundário pode resultar em comportamentos visualmente plausíveis para uma simulação. Um agente ao atingir um objetivo secundário pode esperar por alguns segundos, passar a seguir um outro objetivo principal ou secundário, ou simplesmente voltar a seguir seu objetivo principal. A combinação dessas ações pode gerar diversos tipos de comportamentos simples ou complexos, dependendo da criatividade de quem modelar os comportamentos.

Um comportamento simples seria, por exemplo, um agente ser direcionado a uma máquina de refrigerantes ao passar pelo grupo associado a esse comportamento e ao atingir o objetivo do grupo esperar o tempo necessário para “comprar e pegar o refrigerante”. Outro comportamento, um pouco mais complexo seria, por exemplo, um agente ao passar em frente a um teatro querer “assistir a peça em cartaz”. Nesse caso, o agente seria direcionado a bilheteria pelo grupo secundário associado a esse movimento e, ao chegar no objetivo desse grupo, havendo ingresso disponível, ele “compraria” e teria seu grupo trocado pelo grupo secundário que o dirigiria à entrada do teatro; caso contrário, o agente retornaria ao seu objetivo principal.

4.5 Prevenção de colisão

No modelo de Treuille os agentes teoricamente não devem colidir e ainda algumas medidas são tomadas para que os agentes possam desviar com antecedência de agentes e obstáculos em movimento. Naquele modelo é possível desviar antecipadamente de agentes e obstáculos através da utilização dos campos de desconforto. Isso é feito adicionando desconforto na frente dos agentes e obstáculos em movimento, nas posições onde eles devem estar depois de alguns

passos da simulação. Porém, apesar dessas medidas, é possível que dois agentes ocupem uma mesma célula em determinado momento, e quando isso acontece são causados alguns artefatos visualmente desagradáveis. Esse problema é tratado garantindo-se uma distância mínima entre os agentes de uma simulação. Dada essa característica desse modelo, pode-se perceber que ele não é adequado para utilização quando se trabalha com multidões muito densas, pois, nesse caso, várias células seriam compartilhadas por mais de um agente, deixando os agentes com comportamentos não realistas.

No modelo proposto, conforme dito anteriormente, as células dos grupos podem ter tamanhos variados e, dessa forma, em alguns grupos onde as células podem conter muitos agentes a utilização de desconforto para predição de movimento pode não ter o efeito desejado. No modelo, frequentemente vários agentes compartilharão uma mesma célula. Nesse caso, somente garantir uma distância mínima entre eles tornaria o comportamento da multidão visualmente desagradável e não realista.

Para solucionar esse problema, o presente trabalho propõe a utilização do modelo de forças sociais apresentado por Helbing (HELBING et al., 2000) para tratar da relação local de agentes entre si e obstáculos. Esse modelo foi escolhido por ser capaz de representar comportamentos realistas em situações normais e de pânico, podendo ainda ser utilizado em situações com alta densidade de agentes. A descrição detalhada do modelo pôde ser vista na Seção 3.1.

Um agente, no modelo proposto, será afetado pelas forças de repulsão dos agentes e objetos próximos. A velocidade obtida pela interpolação do campo de velocidade v obtida pelo modelo contínuo substituirá $v_i^0(t)e_i^0(t)$ na expressão $v_i^0(t)e_i^0(t) - \vec{v}_i(t)$ da equação (3.1). Assim, sendo \vec{x}_i a velocidade do i -ésimo agente obtida pelo modelo contínuo, equação ficará

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = m_i \frac{\vec{x}_i - \vec{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} \vec{f}_{ij} + \sum_W \vec{f}_{iW}. \quad (4.1)$$

Dessa maneira, os agentes apresentarão comportamentos realistas, desviando uns dos outros e dos obstáculos naturalmente independente da densidade da multidão.

4.6 Implementação

O algoritmo proposto nesse trabalho tem em alto nível passos similares ao algoritmo de Treuille, mas algumas diferenças podem ser listadas. Primeiramente, os grupos possuem tamanhos variados com células de tamanhos variados; logo não faz mais sentido eles compartilharem o mesmo campo de densidade, somente em alguns casos, onde grupos possuem características dimensio-

nais equivalentes. Nesse modelo, o campo potencial de um grupo é construído somente se ele possuir agentes ativos. O passo que garantia a distância mínima entre os agentes no modelo original foi removido: essa garantia é feita pelo modelo de forças no passo que atualiza as posições dos agentes. Por fim, existe um novo passo onde os grupos são gerenciados. O algoritmo pode ser visto abaixo:

Para cada passo de tempo:

Para cada grupo:

Se o grupo possui agentes ativos:

- Constrói o campo de densidade.
 - Constrói o campo de custo unitário.
 - Constrói o campo potencial.
- Atualiza as posições dos agentes.
 - Gerencia os grupos.

Nas próximas subseções será apresentado como as ideias propostas por este trabalho foram implementadas, e as modificações que foram necessárias em alguns passos do modelo original para que se adequasse ao modelo proposto.

4.6.1 Campo de velocidade

O campo de velocidade é um campo que depende da densidade da multidão, conforme explicado na Seção 3.2. O cálculo desse campo depende ainda de limites inferiores e superiores para velocidade (f_{max} e f_{min}) e densidade (ρ_{max} e ρ_{min}). No modelo original, como os grupos possuem células de mesmo tamanho, todos compartilham os mesmos limites de densidade. Porém, no modelo proposto existem diversos grupos com células de tamanhos variados. Dessa forma, cada grupo deve possuir limites de densidades ρ_{max} e ρ_{min} adequados ao tamanho de suas células.

De acordo com o que foi dito na Seção 4.2, no modelo desenvolvido no presente trabalho os agentes mantêm seus limites de velocidade, diferentemente do modelo original, onde os limites são atribuídos pelo grupo. Com essa modificação, os agentes em um grupo podem possuir velocidades diferentes representando diferentes tipos de pessoas (crianças, idosos, etc.) em um grupo que compartilha o mesmo objetivo. Os grupos continuam possuindo seus limites inferiores e superiores, e o campo continua sendo calculado de acordo com eles, mas, no passo

onde a velocidade de cada agente é obtida, o agente limita sua velocidade de acordo com suas características.

4.6.2 Agentes e grupos

Um agente no modelo proposto deve manter, além das características já apresentadas (limites de velocidade, massa, peso, etc.), informações sobre dois grupos, o grupo associado ao seu objetivo principal e o grupo no qual ele está ativo no momento. No começo da simulação o grupo onde o agente está ativo é o grupo que possui seu objetivo principal, obviamente. É necessário manter o grupo do objetivo principal, pois sempre que cumprir o objetivo de um grupo secundário ou de desvio o agente deve voltar ao seu objetivo principal.

Conforme a Seção 4.2, os grupos estão classificados em três tipos. Essa classificação é necessária porque, além dos grupos possuírem algumas características diferentes, alguns aspectos são considerados apenas para um determinado tipo de grupo durante o gerenciamento desses grupos.

Grupos principais e de desvio sempre devem ser considerados pelos agentes, não existindo restrições quanto a ativação de agentes neles. Todos os grupos devem manter a quantidade de agentes ativos neles e os grupos secundários podem possuir um limite para a quantidade de agentes ativos. Essa limitação de agentes pode ser utilizada para modelar comportamentos onde seja permitida somente uma determinada quantidade de agentes ativos.

Os agentes e grupos podem ainda possuir relações de acordo com as necessidades ou caracterização dos agentes. Essa restrição serve para que se possa modelar comportamentos de interesse somente para determinados agentes. Um agente que representa uma mulher pode ter vontade de observar uma vitrine ao passar por uma loja, enquanto um que representa um homem pode não ter esse interesse, ou ainda, um agente com o estado de *apressado*, não deve ser ativado por objetivos secundários, por exemplo. De forma simples, pode-se manter uma lista de estados nos agentes e uma lista de requisitos nos grupos, onde um agente se tornará ativo para um grupo secundário somente se preencher seus requisitos.

4.6.3 Gerenciamento de grupos

Neste novo passo é verificado se os agentes alcançaram seus objetivos atuais, se entraram na área de algum grupo e se, conseqüentemente, devem ser ativados para esse grupo. Se um agente alcançou seu objetivo, as ações relacionadas ao objetivo do grupo, cujo objetivo foi alcançado, são realizadas de acordo com o comportamento modelado, conforme a Seção 4.4. Se o grupo

cujo objetivo foi alcançado por um grupo de desvio, o agente tem seu grupo atual alterado para o seu grupo principal.

Caso o agente não esteja no objetivo, é verificado se ele entrou em algum grupo de desvio ou secundário. Se o agente estiver dentro de um grupo de desvio, seu grupo atual é trocado para o grupo de desvio. Se ele estiver dentro de um grupo secundário, será necessário analisar suas condições internas (estados, necessidades, etc.) e as condições da área (agentes ativos, requisitos, etc.) para saber se é possível tornar este agente um agente ativo desse grupo secundário, existindo também a possibilidade de ativar um agente em um grupo randomicamente, conforme dito na Seção 4.3. Se o agente se tornar ativo, então seu grupo atual passa a ser o grupo secundário em questão. Sempre que um agente se torna ativo para um grupo, ou cumpre o objetivo de um grupo, a quantidade de agentes desse grupo é atualizada.

4.6.4 Prevenção de colisão

Diferentemente do modelo original, no modelo apresentado por este trabalho não há a necessidade de um passo para garantir uma distância mínima entre os agentes. Essa distância é garantida pela utilização do modelo de forças de Helbing (Seção 3.1). O modelo de forças foi aplicado localmente; assim um agente será influenciado pelos agentes e objetos próximos, reagindo naturalmente.

Esse modelo de forças serve para movimentação local, sendo necessária a utilização de um planejador de movimentos global para que esse modelo possa ser utilizado em simulações em ambientes complexos. No entanto, no modelo proposto o modelo contínuo atua como planejador global e local através de seus grupos principais e de desvio. O modelo de forças é utilizado para evitar colisões e dar comportamentos naturais aos agentes ao se aproximarem de outros agentes ou objetos. A utilização do modelo de forças torna ainda o modelo proposto adequado para simular multidões com alta densidade de agentes.

Para aplicar o modelo de forças localmente utilizou-se uma grade envolvendo o ambiente, onde cada célula dessa grade armazena os agentes que se encontram nela em cada passo da simulação. Dessa forma é possível saber a vizinhança de um agente somente consultando os agentes em sua célula e nas suas células vizinhas, se necessário.

O tamanho das células nessa grade é definida pelo usuário conforme este achar conveniente. Quanto maiores as células, maior o custo para calcular as forças aplicadas em um agente (se essas células possuírem muitos agentes) e mais preciso será o cálculo dessas forças. Quanto menores forem as células, menos preciso será o cálculo das forças aplicadas em um agente.

Segundo a literatura (QUINN et al., 2003), forças aplicadas por agentes a uma distância maior do que aproximadamente 2 metros podem ser ignoradas por não influenciarem de forma significativa a força que será aplicada no agente; assim, a utilização de valores maiores do que esse para o tamanho das células pode não apresentar diferenças significativas à simulação, apenas incrementando seu custo computacional.

Os agentes na célula em que um agente se encontra sempre serão utilizados para calcular a força aplicada nele, obviamente. Entretanto, os agentes das células vizinhas poderão ser utilizados ou não, dependendo de algumas condições estabelecidas. A utilização de células vizinhas irá depender do tamanho escolhido para as células da grade que armazena os agentes. Se $d_{ib_x} \leq 2 * METRO$, onde d_{ib_x} representa a distância entre o agente i e a borda b na direção x (leste, norte, oeste, sul) da célula em que ele se encontra, então a célula na direção indicada será utilizada para o cálculo da força aplicada no agente. Caso nenhuma célula vizinha seja escolhida, somente a célula do agente será considerada (Figura 4.3a). E ainda, se a condição for verdadeira para bordas em direções perpendiculares (por exemplo: norte e leste), considera-se a célula na diagonal entre elas além das células das direções indicadas (Figura 4.3b).

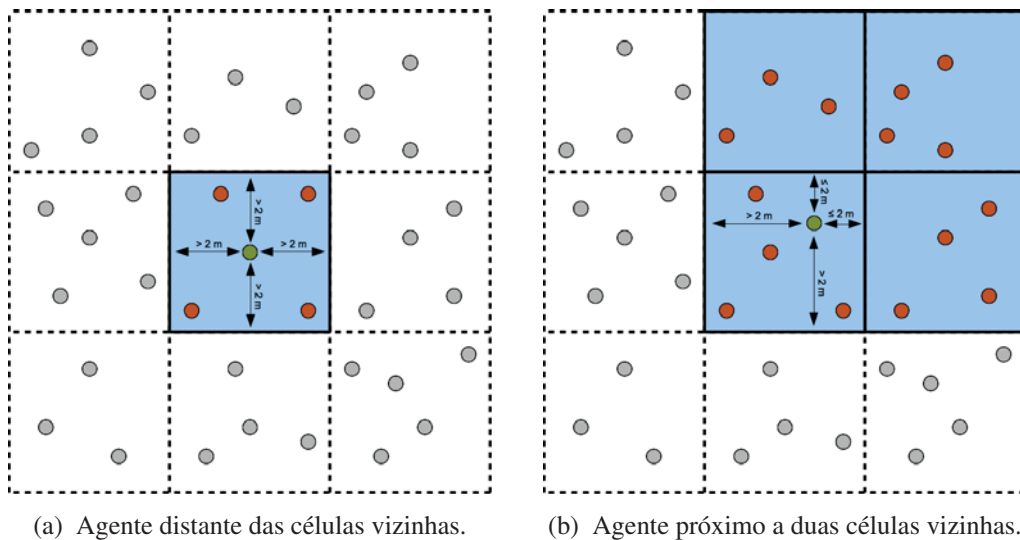


Figura 4.3: Os agentes nas células pintadas de azul serão considerados no cálculo da força aplicada no agente verde.

O modelo contínuo garante que um agente não se dirigirá a uma célula que está bloqueada. Porém, a adição do modelo de forças sociais para tratar da colisão entre os agentes pode fazer com que um agente ao desviar de outro entre em uma célula bloqueada. Para evitar situações desse tipo utiliza-se também o modelo de forças para manter os agentes afastados dos obstáculos.

A força aplicada pelos obstáculos em um agente é calculada de acordo com as células

adjacentes à célula em que o agente se encontra. Nesse caso, são analisadas as células do grupo em que o agente se encontra e não as células da grade utilizada para tratar da colisão entre os agentes. As células vizinhas (nas oito direções possíveis) que representam obstáculos são utilizadas no cálculo da força. Dessa forma, adiciona-se à força aplicada em um agente as forças aplicadas por todas as arestas posicionadas entre a célula do agente e as células adjacentes bloqueadas (Figura 4.4a), assim como as forças aplicadas pelas pontas das células bloqueadas nas diagonais (Figura 4.4b).

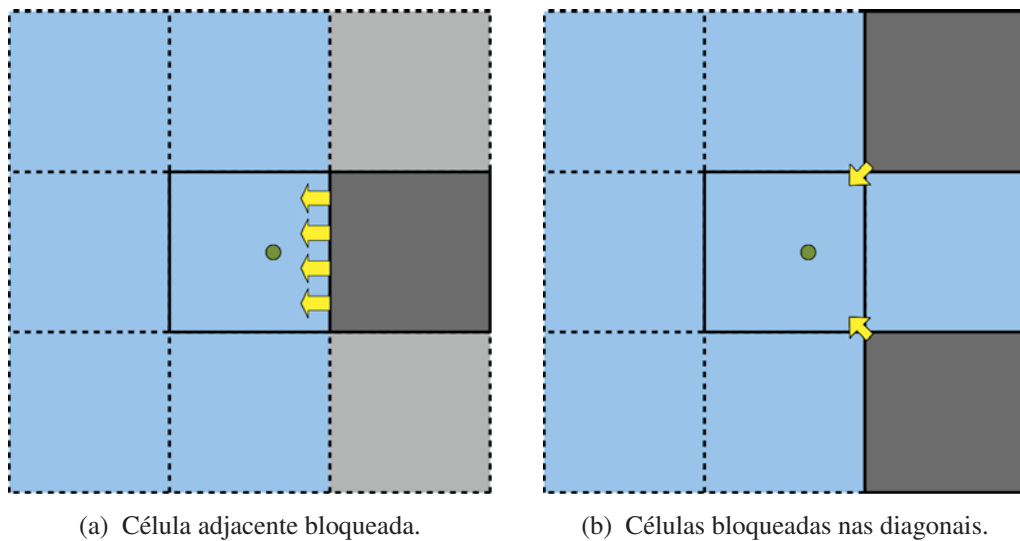


Figura 4.4: Agente sendo influenciado pelas forças aplicadas pelas células vizinhas bloqueadas (células de cor cinza escuro).

4.7 Considerações finais

Neste capítulo foi descrita a técnica proposta por este trabalho, assim como alguns aspectos importantes para sua implementação. No próximo capítulo serão apresentados os teste executados e os resultados obtidos.

5 *Testes e Resultados*

Neste capítulo são apresentados e analisados os testes realizados. O capítulo está dividido em quatro seções. Na primeira seção são apresentados os aspectos técnicos envolvidos nos testes, como os ambientes onde os testes foram executados e as características da implementação do modelo proposto e dos cenários utilizados. Na seção seguinte são analisados os comportamentos dos agentes em situações específicas e como o modelo proposto se comporta em comparação ao modelo original de Treuille em algumas dessas situações. A Seção 5.3 analisa o desempenho do modelo em cenários similares a cenários apresentados em outros trabalhos. Por fim, são feitas considerações finais na Seção 5.4.

5.1 Aspectos técnicos

Os testes desenvolvidos para avaliação do modelo proposto por este trabalho foram executados em um MacBook com processador 2.13 GHz Intel Core 2 Duo, 2.0 GB de RAM e uma placa de vídeo NVidia GeForce 9400M (256 MB de RAM). O algoritmo foi implementado em C/C++ utilizando o conjunto de ferramentas de código aberto para gráficos 3D em alta performance *OpenSceneGraph* (OSG, 2011). Como modelo foi utilizado um modelo disponível no projeto de código aberto *ReplicantBody* (SUNNA et al., 2011), que foi produzido em Cal3D (CAL3D, 2011), e possui algumas animações interessantes. Para dar variedade visual aos indivíduos na multidão, manipulou-se a textura e forma do modelo utilizado. Os ambientes foram modelados no Blender (BLENDER, 2011). O código é multiplataforma, sem restrições relacionadas à sistemas operacionais.

5.2 Comportamentos

Nesta seção é analisado o comportamento dos agentes na multidão em algumas situações específicas onde o modelo demonstra comportamentos diferentes do modelo original de Treuille. A seção está dividida em 3 subseções. Na Subseção 5.2.1 é analisado como os agentes se com-

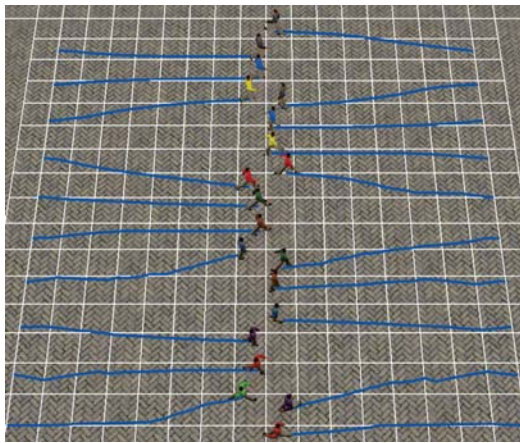
portam em ambientes sem obstáculos. Na subseção seguinte é analisado como os agentes se comportam em ambientes com obstáculos. Por fim, na Subseção 5.2.3 é analisado o comportamento dos agentes em multidões densas.

5.2.1 Ambiente sem obstáculos

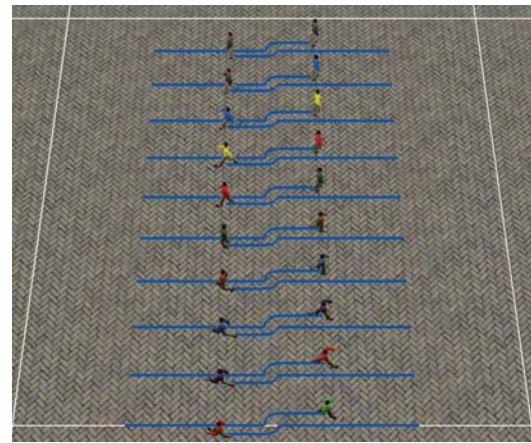
Uma das ideias proposta por este trabalho, que é o uso de grades discretizadas de acordo com a complexidade do ambiente, traz benefícios em ambientes sem obstáculos pela possibilidade da utilização de grades com poucas células. No modelo original de Treuille, independente da complexidade do ambiente, as grades devem manter um certo nível de discretização que permita os agentes desviarem uns dos outros de acordo com o desconforto aplicado nelas e também possam evitar células com alta densidade de agentes. No modelo proposto no presente trabalho, independente do tamanho das células os agentes desviarão uns dos outros naturalmente graças ao modelo de forças utilizado.

A movimentação dos agentes no modelo proposto é similar a movimentação dos agentes em um modelo de forças, porém possuindo as particularidades proporcionadas pela parte macroscópica do modelo, onde os agentes são afetados por áreas com alta densidade de agentes, áreas de desconforto, dentre outras características do modelo.

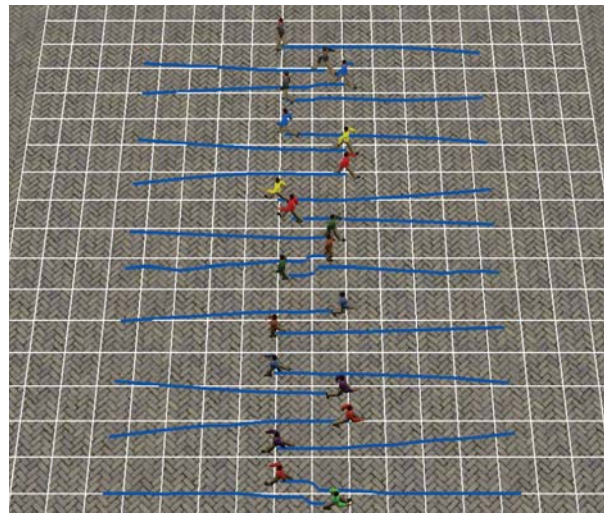
Na Figura 5.1a, os agentes são guiados pelo modelo de Treuille e os grupos estão bem discretizados: pode-se perceber que eles desviam com antecedência uns dos outros. Na Figura 5.1b, os agentes são guiados pelo modelo proposto e estão todos em uma mesma célula: é possível perceber que eles agem de acordo com o modelo de forças, e somente desviam uns dos outros quando se encontram. E na Figura 5.1c, os agentes são guiados pelo modelo proposto, mas utilizando grades discretizadas da mesma forma que na primeira figura: dessa forma os agentes tanto desviam antecipadamente uns dos outros como de forma natural quando estão próximos.



(a) Modelo de Treuille.



(b) Modelo proposto, agentes na mesma célula.



(c) Modelo proposto, grades com células pequenas.

Figura 5.1: Comportamento dos agentes em células grandes e pequenas.

Conforme dito anteriormente, agentes no modelo de Treuille, que se encontram em uma mesma célula, ao colidirem irão ser repelidos, fazendo com que na simulação os agentes ao colidirem pareçam deslizar enquanto desviam uns dos outros, o que é visualmente desagradável e não realista. No modelo proposto, os agentes em uma mesma célula ao se aproximarem mudam de direção de forma realista para que possam desviar uns dos outros, como pode ser visto na Figura 5.2.

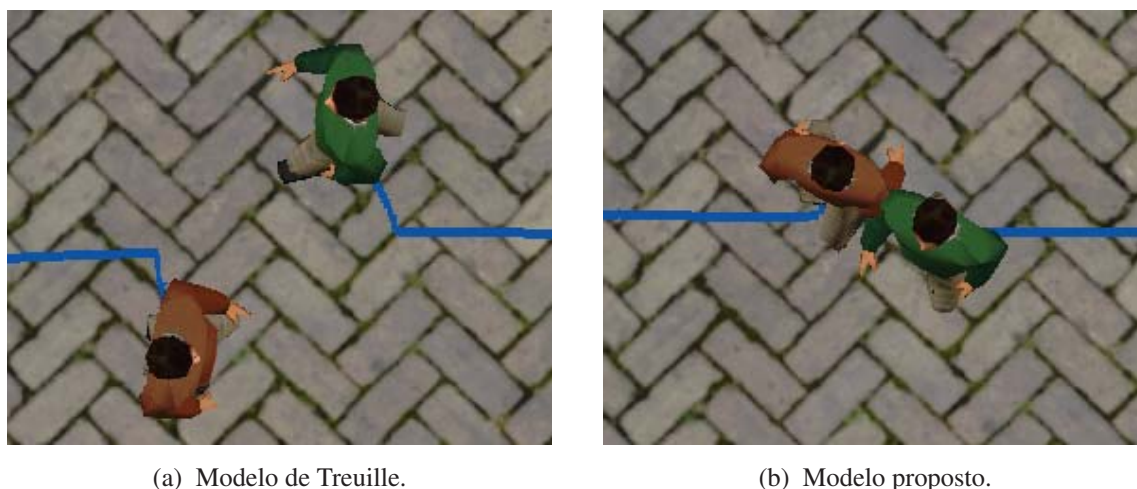


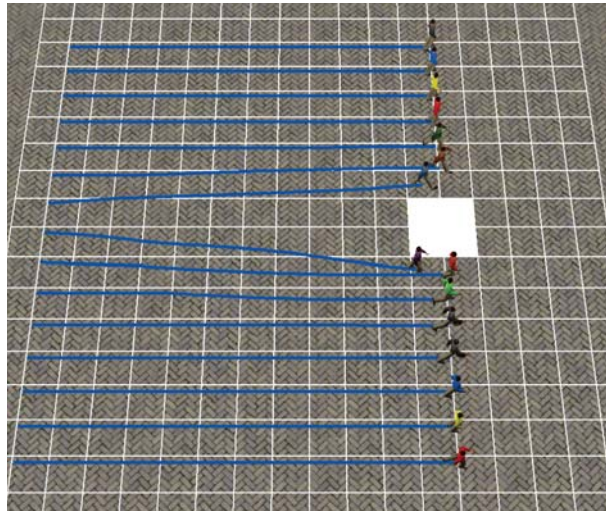
Figura 5.2: Agentes desviando ao colidirem.

5.2.2 Ambiente com obstáculos

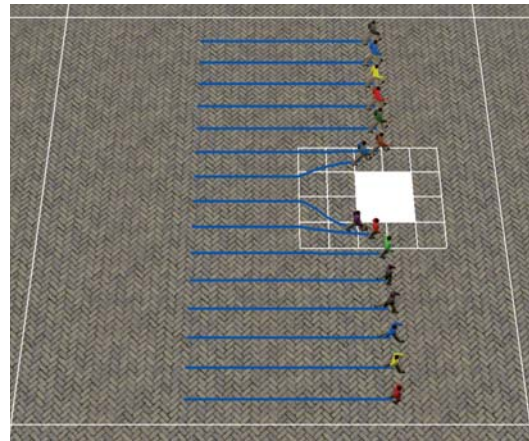
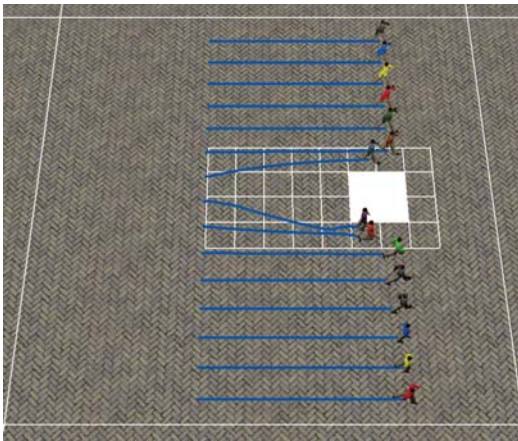
No modelo proposto, um ambiente complexo pode utilizar diversos grupos para fazer com que os agentes desviem de obstáculos ou passem por locais estreitos, como portões por exemplo. Independente do nível de discretização do grupo que leva um agente a seu objetivo global, um agente conseguirá passar por obstáculos graças aos grupos de desvio.

No modelo de Treuille, os agentes desviam com antecedência de obstáculos em um ambiente, pois os grupos são bem discretizados e abrangem todas as peculiaridades do ambiente. Assim, os campos potenciais gerados já consideram todos obstáculos do cenário fazendo os desvios antecipadamente. No modelo proposto, o comportamento dos agentes relacionado aos desvios irá depender de como são configurados os grupos de desvio no ambiente.

Na Figura 5.3a, os agentes são guiados pelo modelo de Treuille e desviam do obstáculo com bastante antecedência. Na Figura 5.3b, os agentes são guiados pelo modelo proposto e o grupo de desvio utilizado tem muitas células em sua frente, o que faz com que os agentes desviem com uma certa antecedência. A diminuição da área utilizada na frente do obstáculo faz com que o desvio ocorra mais próximo ao obstáculo, como pode ser visto na Figura 5.3c.



(a) Modelo de Treuille: desvio com bastante antecedência.

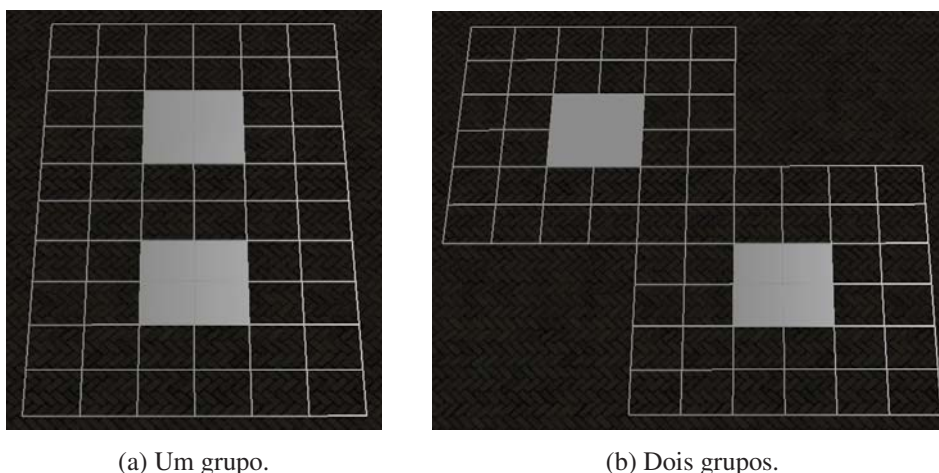


(b) Modelo proposto: desvio distante do obstáculo. (c) Modelo proposto: desvio próximo do obstáculo.

Figura 5.3: Agentes desviando de um obstáculo.

A melhor configuração das grades de desvio em um ambiente, assim como a utilização delas de forma otimizada, irá depender da modelagem das grades feita pelo usuário do modelo. No modelo proposto, o usuário pode configurar as grades de acordo com o comportamento de desvio desejado, o que não é possível no modelo de Treuille.

Ao criar grupos de desvio, o usuário deve ficar atento à melhor forma de configuração dos grupos, evitando células sobrepostas que podem, em alguns casos, desnecessariamente incrementar o custo do cálculo dos campos potenciais dos grupos envolvidos no desvio. Por exemplo, na Figura 5.4a, a proximidade e o alinhamento dos obstáculos torna adequada a utilização de um único grupo de desvio, enquanto na Figura 5.4b, pode-se observar que para essa situação é mais adequada a utilização de dois grupos.



(a) Um grupo.

(b) Dois grupos.

Figura 5.4: Exemplos de configurações de grupos de acordo com as posições dos obstáculos.

5.2.3 Ambiente com multidão densa

Modelos macroscópicos possuem, entre suas vantagens, a de suportarem milhares de agentes em simulações em tempo real, algo que já foi discutido neste trabalho em capítulos anteriores. Porém, alguns modelos desse tipo, apesar de suportarem diversos agentes, não se comportam bem quando existem diversos agentes que estão muito próximos, ou seja, em locais de alta densidade.

O modelo de Treuille apresenta essa desvantagem, ou seja, o aumento da quantidade de agentes em uma mesma célula faz com que os agentes se comportem de forma não realista ao ocorrerem colisões entre eles. Outros modelos macroscópicos propostos recentemente tratam melhor multidões mais densas como em (JIANG et al., 2010) e em (NARAIN et al., 2009). Porém, no primeiro é necessário utilizar células pequenas, menores que o diâmetro de um agente, o que aumenta a quantidade de células utilizadas nas grades e consequentemente aumenta o custo do cálculo dos campos potenciais. O segundo propõe um método bastante eficiente para multidões densas, mas continua a tratar as colisões entre agentes apenas afastando os agentes envolvidos. Conforme discutido anteriormente, esse afastamento é visualmente não realista, fazendo com que os agentes “deslizem” para desviar uns dos outros ao colidirem.

No modelo proposto, os agentes irão desviar uns dos outros e se comportar naturalmente, independente do tamanho da célula ou da densidade dentro de uma célula, graças ao modelo de forças. A utilização de um modelo de forças faz com que os agentes sintam a pressão da multidão quando sua densidade aumenta e dessa forma possam reagir de forma realista à situação.

A adequabilidade do modelo a esse tipo de situação permite sua utilização para simulação

de situações de emergência. Na Figura 5.5 é exibida uma multidão tentando passar por um corredor: pode-se perceber que os agentes se comportam da mesma forma que no modelo de Helbing, causando um entupimento na entrada do corredor, ao mesmo tempo que procuram alcançar o objetivo de seus grupos atuais. Conforme dito na Seção 4.6.4, aplica-se nos agentes as forças exercidas pelos obstáculos próximos; sem a utilização dessas forças, utilizando apenas as forças aplicadas pelos agentes entre si, os agentes tenderiam a entrar nos obstáculos, como pode ser visto na Figura 5.6.

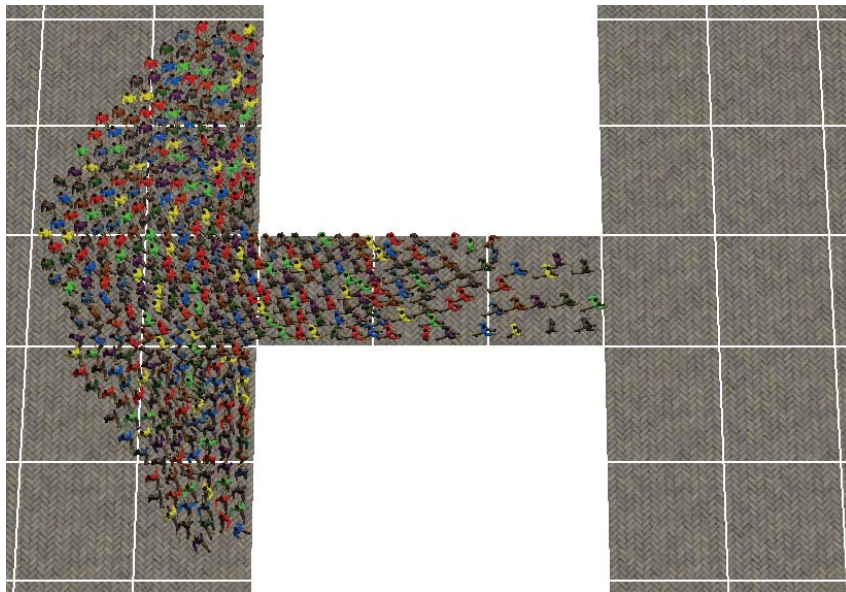


Figura 5.5: Efeito de entupimento.

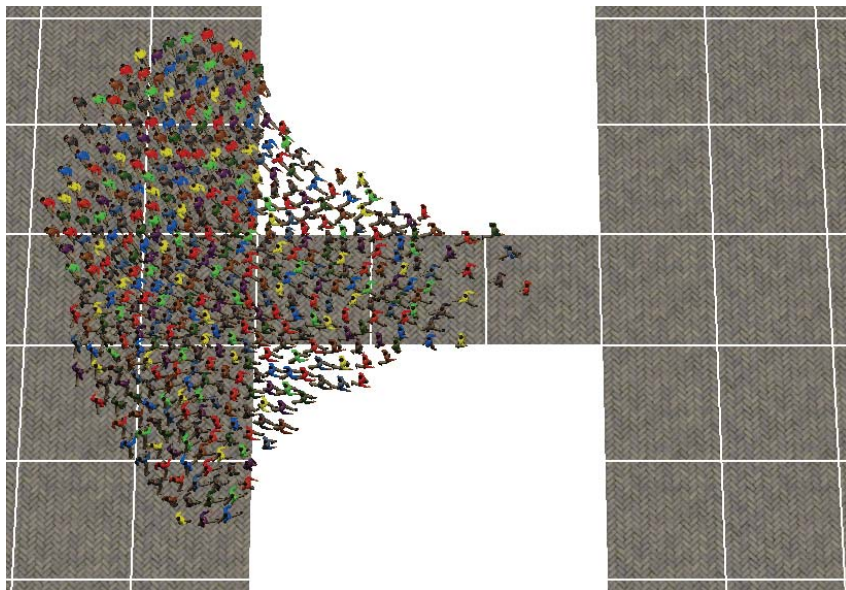


Figura 5.6: Obstáculos sem aplicar força nos agentes.

Em algumas situações o usuário pode desejar que a multidão densa tenha comportamentos

mais específicos, os quais modelos macroscópicos podem fornecer. Esse tipo de comportamento específico pode ser obtido utilizando grades de desvio para adicionar desconforto em determinados locais. Por exemplo, em um ambiente com um corredor, o usuário pode querer que os agentes que estão em um sentido procurem ficar na parte superior do corredor, enquanto os agentes no sentido oposto devem procurar ficar na parte inferior. Na Figura 5.7a pode ser visto um corredor e nele foram posicionados dois grupos: em um foi adicionado desconforto nas linhas superiores e no outro foi adicionado desconforto nas linhas inferiores; dessa forma os agentes em sentidos opostos tendem a se manter nas áreas sem desconforto de seus grupos, o que pode ser visto na Figura 5.7b. Na Figura 5.7c, pode-se ver como os agentes se comportariam sem a utilização dos grupos de desvio.

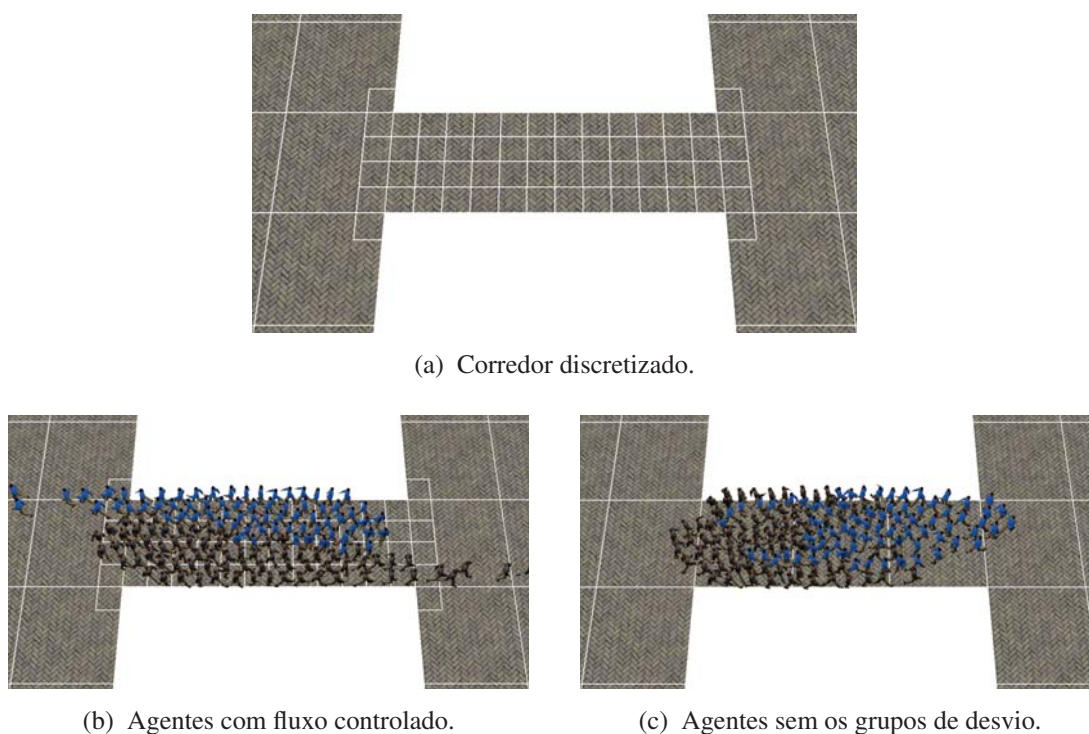


Figura 5.7: Exemplo de utilização de grupos de desvio para gerar comportamentos específicos.

5.3 Desempenho

Nesta seção é analisado o desempenho do modelo em alguns cenários específicos. A seção está dividida em 4 subseções. Na Subseção 5.3.1 é analisado um cenário com vários objetivos secundários. Em seguida, na Subseção 5.3.2, é analisado desempenho do modelo ao se colocar vários agentes para se encontrar em um ambiente aberto onde ocorrem muitas colisões. Na Subseção 5.3.3 é analisado o desempenho do modelo ao se adicionar obstáculos em um ambiente aberto. E, por fim, na Subseção 5.3.4 é analisado o desempenho do modelo em situações de evacuação.

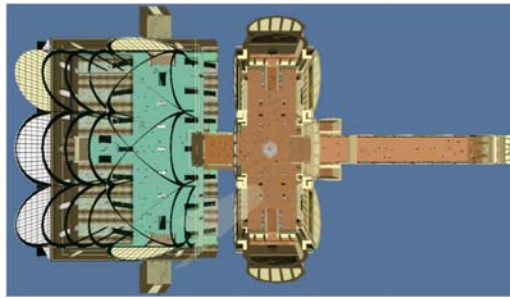
5.3.1 Ambiente com comportamentos secundários

Modelos macroscópicos baseados na teoria contínua podem interagir com outros tipos de modelos como os baseados em agentes. Assim, sugere-se que, quando houver a necessidade de um agente com comportamento específico na multidão, utilize-se agentes que se comportem por um modelo microscópico para que seus comportamentos possam ser individualmente modelados. Quando são poucos os agentes nessa condição (necessidade de comportamentos específicos), essa técnica pode ser suficiente para a simulação desejada, mas quando existe a necessidade de simular uma multidão onde vários agentes podem ter comportamentos variados, essa técnica pode comprometer a performance da simulação, assim como tornar complexa a caracterização de diversos agentes.

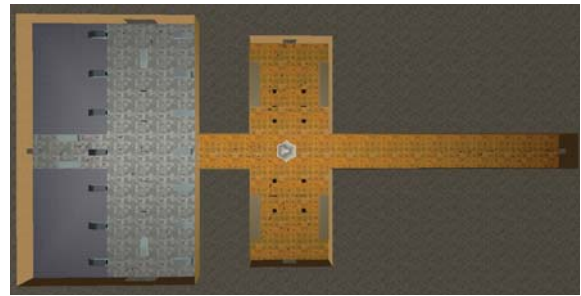
A ideia da utilização de grupos secundários para a adição de comportamentos locais proposta por este trabalho permite que os agentes em uma multidão possam ter comportamentos variados sem a necessidade da utilização de modelos microscópicos, onde os grupos secundários ficam encarregados de alterar momentaneamente ou permanentemente os comportamentos do agentes de acordo com seus desejos e necessidades.

Para analisar a eficiência da técnica, nesta subseção foi reproduzido um cenário similar ao desenvolvido no trabalho de Shao & Terzopoulos (2007), onde foi simulado o comportamento de diversos agentes em uma estação de trem. No trabalho original, os agentes podem executar diversos comportamentos baseados em suas necessidades. Um agente ao entrar na estação deve comprar seu bilhete; pode se sentir cansado e se sentar; pode sentir sede e ir comprar bebida; pode parar para assistir um artista de rua se não estiver apressado; dentre outros.

O ambiente não pôde ser reproduzido fielmente, pois o modelo tridimensional original utilizado não está disponível. Então, foi modelado um cenário geometricamente similar ao original, que permitiu que a maioria dos comportamentos simulados no trabalho original pudessem ser reproduzidos, com algumas poucas exceções devido a limitações do modelo tridimensional utilizado para representar os agentes (não possui algumas animações como, por exemplo, “sentar”). Na Figura 5.8 pode ser visto o cenário original (Figura 5.8a) e o cenário similar (Figura 5.8b).



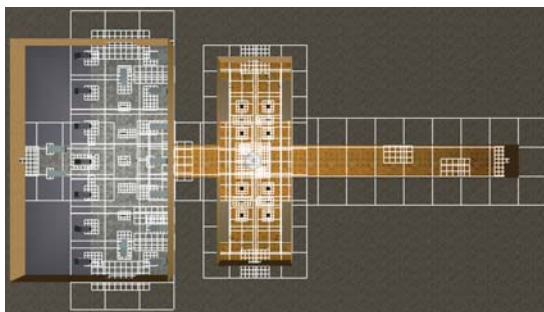
(a) Cenário apresentado no trabalho original.
(SHAO; TERZOPOULOS, 2007)



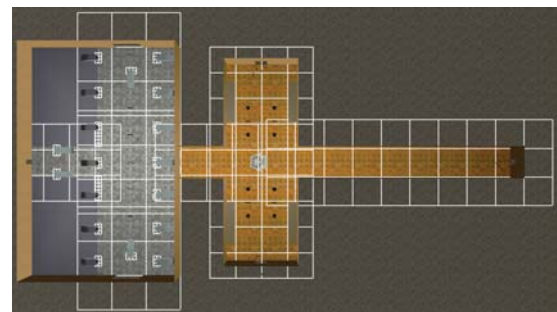
(b) Cenário similar desenvolvido.

Figura 5.8: Cenários.

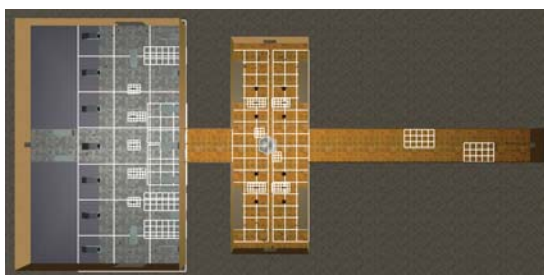
No ambiente que utiliza o modelo proposto, os agentes podem: ao entrar na estação, se dirigir a bilheteria e comprar um bilhete caso não possuam ainda; se dirigir ao salão de embarque, caso possuam um bilhete; parar para observar placas com panfletos (onde haviam bancos no cenário original); parar para observar a fonte; parar para observar vitrines; se dirigir a um portão de embarque; deixar a estação ao desembarcar. Para reproduzir esses comportamentos foram utilizados 98 grupos e um total de 1718 células. O grupo mais discretizado possui uma resolução de 12×12 e é utilizado para que os agentes desviem da fonte. A configuração dos grupos pode ser vista na Figura 5.9, onde na Figura 5.9a estão todos os grupos, na Figura 5.9b os grupos principais, na Figura 5.9c os grupos secundários e na Figura 5.9d os grupos de desvio.



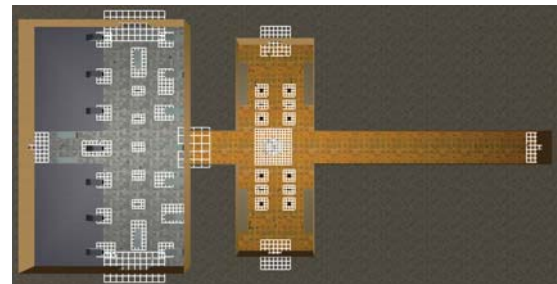
(a) Todos os grupos.



(b) Grupos principais.



(c) Grupos secundários.



(d) Grupos de desvio.

Figura 5.9: Configuração dos grupos.

As simulações de Shao e Terzopoulos foram executadas em um PC com um processador Intel Xeon de 2.8 GHz, 1 GB de RAM e uma placa de vídeo NVidia GeForce 6800 GT AGP8X com 256 MB de RAM. As simulações utilizando o modelo proposto foram executadas na máquina descrita no começo desse capítulo. O trabalho de Shao e Terzopoulos visa retratar com realismo o comportamento de pessoas em uma estação de trem antiga; por isso procurou-se reproduzir diversos comportamentos possíveis em uma estação, assim como a variedade de pessoas que podem passar por ela. E, conforme dito anteriormente, o trabalho proposto procura demonstrar a possibilidade de reproduzir diversos comportamentos utilizando um modelo macroscópico. Os dois trabalhos possuem propostas um pouco diferentes, mas que não impedem a possibilidade de comparação entre eles. Os testes foram executados na mesma condição do trabalho original, onde cada simulação foi executada durante 20 minutos.

Na tabela abaixo são exibidos os resultados (em *frames* por segundo (fps)) obtidos nos dois trabalhos. Como pode ser visto, a simulação do modelo proposto executa a uma taxa de *frames* por segundo (fps) interativa mesmo com 500 agentes. Com 500 agentes o algoritmo leva aproximadamente 9.8 milissegundos ((1 segundo)/(101.4 fps)) para calcular e atualizar as posições dos agentes. Uma animação é agradável a visão humana quando é executada a pelo menos 15 fps; aplicações interativas, como jogos, geralmente executam a pelo menos 30 fps. Considerando a taxa de 30 fps como ideal para uma aplicação interativa, tem-se, nesse caso, que um *frame* deve ser processado em aproximadamente 34 ms. Logo, pode-se perceber que na simulação com 500 agentes, o cálculo das novas posições dos agentes levaria 28% do tempo necessário para processar o *frame*, sobrando ainda 24.2 ms para renderização e outras tarefas que sejam necessárias. Para os testes não foram utilizadas técnicas para renderização de multidões; logo, pode-se perceber que a simulação é bastante afetada quando a renderização é levada em consideração. Na Figura 5.10 podem ser vistas algumas imagens da simulação.

Nº de Agentes	0		100		200		300		400		500	
Modelo	[1]	[2]	[1]	[2]	[1]	[2]	[1]	[2]	[1]	[2]	[1]	[2]
Simulação	n/a	n/a	64.4	200.8	32.2	163.6	23.0	135.5	16.9	117.3	12.3	101.4
Renderização	21.0	59.8	12.5	51.9	9.2	28.0	7.6	18.8	6.0	14.5	5.4	11.9
Ambos	21.0	59.8	10.5	39.9	7.2	23.2	5.7	16.3	4.4	12.7	3.8	10.4

Tabela 5.1: Comparação entre as simulações (fps) executadas por (SHAO; TERZOPOULOS, 2007) ([1]) e pelo modelo proposto ([2]).



(a) Agentes se dirigindo à área de embarque.



(b) Agentes no primeiro salão.



(c) Agentes na área de embarque.

Figura 5.10: Imagens das simulações.

5.3.2 Ambiente com grupos se cruzando

A utilização do modelo de forças faz com que o custo do algoritmo aumente quanto mais densas forem as células da grade que armazena os agentes na simulação. Esse custo adquirido é compensado pela utilização das grades menos discretizadas. Nos testes realizados nesta subseção foram utilizados 4 grupos, onde cada grupo possui como objetivo um de seus 4 cantos (acima-esquerda, acima-direita, abaixo-esquerda, abaixo-direita) e está discretizado em uma resolução de 10 x 10 células.

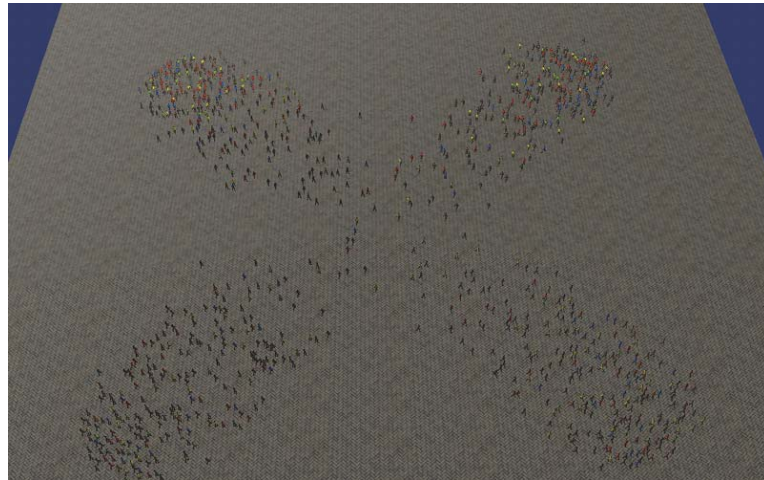
Os agentes são posicionados inicialmente no canto oposto ao objetivo do seu grupo. Dessa forma, os agentes em grupos diferentes irão se cruzar no centro do ambiente, onde ocorrerão várias colisões. Os testes foram executados com a quantidade de agentes variando de 4 a 6000 (4, 375, 750, 1500, 3000, 6000) e cada teste durou 10 minutos. Na tabela abaixo podem ser vistos os resultados (em *frames* por segundo) das simulações sem renderização.

Nº de Agentes	4	375	750	1500	3000	6000
Simulação (fps)	502.9	217.0	108.4	29.7	18.0	5.4

Tabela 5.2: Simulação (fps) de agentes se cruzando em um ambiente aberto.

Em (NARAIN et al., 2009), os autores fizeram uma simulação similar de agentes se cruzando, mas utilizaram grupos com 40 x 40 células. A simulação apresentada por eles executou a 60.6 fps (sem renderização). O modelo de Narain foi desenvolvido para suportar multidões em situações de alta densidade; ele apresenta um bom desempenho mesmo com milhares de agentes, pois considera-se que o ambiente não muda, logo os campos potenciais não precisam ser recalculados a cada passo da simulação. Os agentes em seu modelo irão ter suas direções e velocidades adaptadas localmente de acordo com os agentes adjacentes. Esse modelo tem um apelo visual, sendo a longa distância agradável visualmente, mas pode-se perceber ao se observar os agentes a curta distância que eles não possuem comportamento realista ao desviar uns dos outros. Nesse modelo também não é possível reproduzir situações reais de pânico em multidões densas, pois condições físicas não são consideradas, como acontece em um modelo de forças. A característica de calcular o campo potencial somente quando necessário pode se tornar ainda uma desvantagem para esse modelo, pois se o ambiente for alterado durante a simulação haverá uma queda no desempenho da simulação ao se recalcularem o campo potencial dessa grade, se ela for bastante discretizada. O modelo proposto possui um desempenho pior (5.4 fps com 6000 agentes) do que o modelo de Narain (60.6 fps com 6000 agentes), mas trata a multidão de maneira realista, considerando os aspectos físicos. Os agentes no modelo proposto irão ainda evitar as células com alta densidade, assim como acontece no modelo de Treuille. A queda no desempenho acontece, porque quanto mais densa for a multidão, mais os agentes

interagirão uns com os outros; dessa forma, mais forças serão calculadas, e esses cálculos não são triviais. Na Figura 5.11 podem ser vistas algumas imagens da simulação realizada.



(a) Agentes se dirigindo ao centro do ambiente.



(b) Agentes se encontrando (câmera distante).



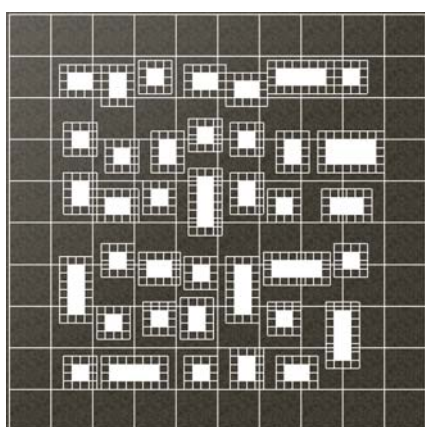
(c) Agentes se encontrando (câmera próxima).

Figura 5.11: Imagens da simulação com 1000 agentes.

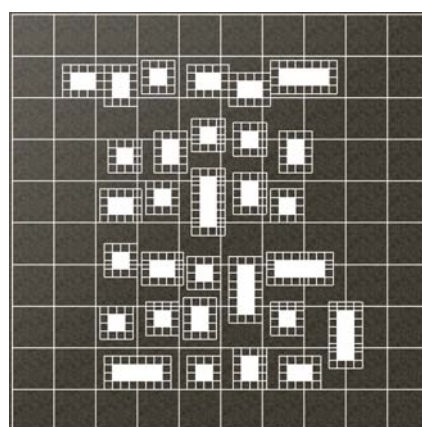
5.3.3 Ambiente aberto com obstáculos

Nesta subsecção é analisado o desempenho do modelo proposto relacionado à quantidade de obstáculos em um ambiente aberto. O ambiente desenvolvido pode representar um centro de exposições, onde os obstáculos são estandes; ou um centro comercial e os obstáculos representam lojas, por exemplo. O ambiente possui o equivalente a $40000 m^2$. No ambiente foram colocados 4 grupos principais com resolução de 10×10 , onde cada célula possui $400 m^2$. Cada grupo principal leva os agentes contidos neles a atravessarem o ambiente em um sentido e direção (norte/sul, sul/norte, leste/oeste, oeste/leste).

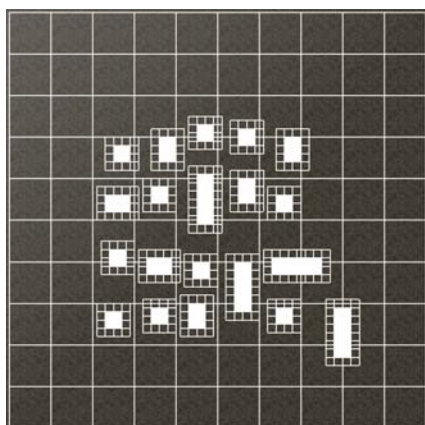
Conforme dito na Seção 4.2, o objetivo de um grupo de desvio deve ser posicionado de acordo com o grupo principal associado. Ou seja, nesse caso, cada obstáculo possui quatro grupos de desvio, um para cada grupo principal. Os grupos de desvio possuem células de $16 m^2$, com resolução mínima de 4×4 e máxima de 4×8 (ou 8×4). Os cenários com as diferentes configurações dos obstáculos utilizados nos testes podem ser vistos na Figura 5.12.



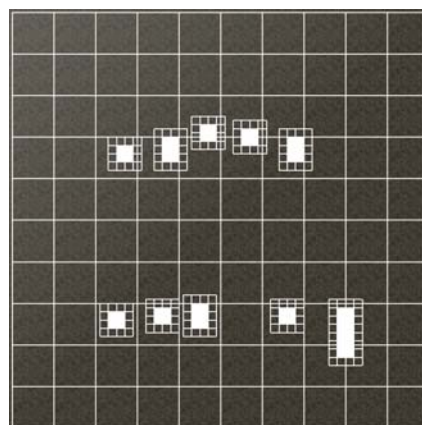
(a) 38 obstáculos.



(b) 30 obstáculos.



(c) 20 obstáculos.



(d) 10 obstáculos.

Figura 5.12: Configurações dos obstáculos nas simulações.

Os testes foram executados com a quantidade de agentes variando de 4 a 5000 agentes e a quantidade de obstáculos variando de 0 a 38. Cada teste foi executado por 10 minutos. Na tabela abaixo e na Figura 5.13, podem ser vistos os dados (fps) relacionados com as simulações (sem renderização) realizadas.

Nº de Agentes	4	1000	2000	3000	4000	5000
Sem obstáculos	526.1	111.9	59.2	36.1	24.2	14.6
10 obstáculos (44 grupos)	500.5	88.4	47.4	29.4	20.1	12.8
20 obstáculos (84 grupos)	477.9	71.9	39.3	25.8	17.7	11.7
30 obstáculos (124 grupos)	471.1	60.9	33.9	22.0	15.5	10.4
38 obstáculos (156 grupos)	457.8	54.1	30.5	20.1	14.3	9.6

Tabela 5.3: Dados relacionados a simulação (fps) de agentes em um ambiente aberto com vários obstáculos.

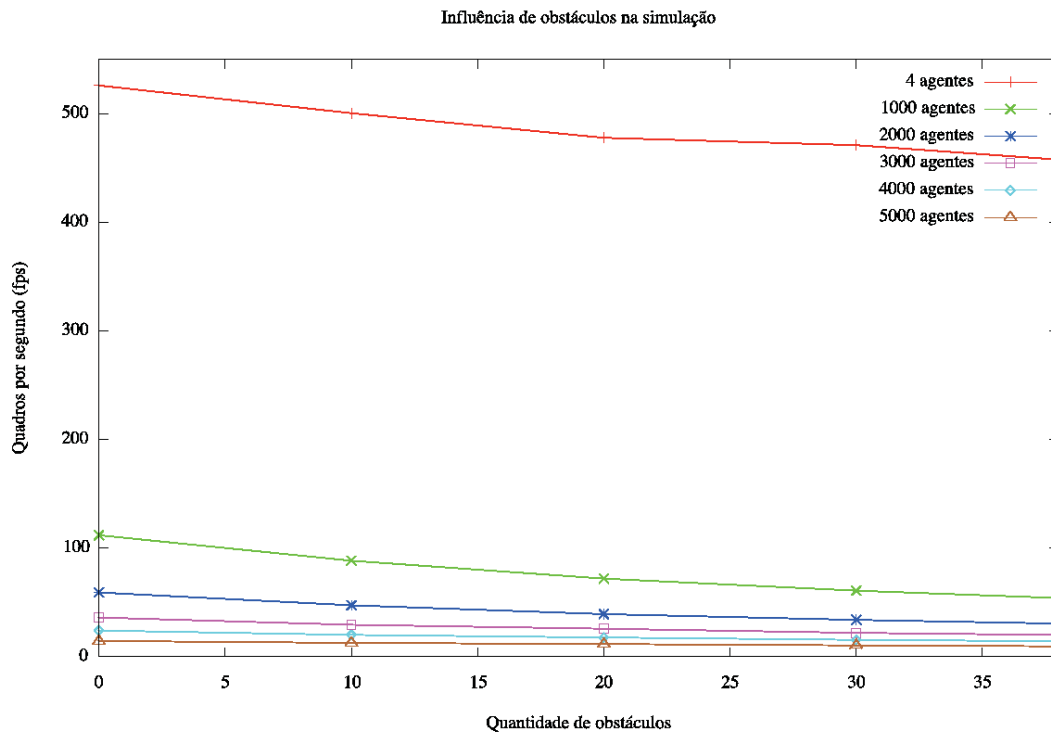


Figura 5.13: Influência dos obstáculos nas simulações.

Os resultados exibidos na tabela mostram que é possível adicionar diversos grupos pouco discretizados a uma simulação sem que seu desempenho seja comprometido. Ao se adicionar agentes pode-se perceber que o desempenho da simulação passa a ser afetado mais pelas relações entre os agentes do que pelo cálculo dos campos potenciais; com 1000 agentes, a simulação sem obstáculos teve uma diferença de 57.8 fps para a simulação com 38 obstáculos, enquanto que com 5000 agentes essa diferença caiu para 5 fps. Ainda de acordo com os dados da tabela é possível perceber que com 4000 agentes as simulações executam a taxas interativas de *frames* por segundo com vários obstáculos, em alguns casos.

5.3.4 Ambiente de evacuação

Conforme dito anteriormente, o modelo proposto por este trabalho pode ser utilizado para simular evacuação de construções. Nesta subseção é analisado o desempenho do modelo em um ambiente com 4 salas, onde 900 agentes devem evacuar a construção. Cada sala foi discretizada em 10 x 9 células e os dois corredores que levam à única saída possuem 11 x 3 e 3 x 7 células, ou seja, um total de 414 células. O desempenho do modelo original de Treuille também foi analisado no ambiente (apesar do modelo não ser adequado a situação, o teste foi feito para se analisar o custo do cálculo do campo potencial); nesse caso, utilizou-se um único grupo discretizado em 22 x 20 células (440 células). Em seguida analisou-se o modelo proposto utilizando apenas o grupo que foi utilizado pelo modelo de Treuille. A performance de cada simulação foi medida até o primeiro agente conseguir alcançar a saída. Na tabela abaixo podem ser vistos os resultados (fps) obtidos nas simulações sem renderização.

Modelo	Proposto	Treuille	Proposto (1 grupo)
Simulação	43.3	51.1	28.7

Tabela 5.4: Simulação (fps) de agentes evacuando uma construção por uma saída.

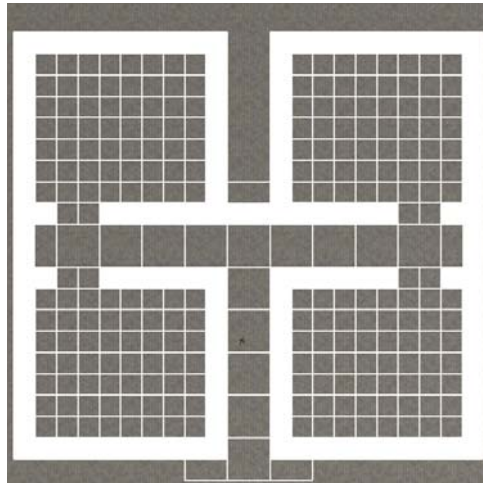
O resultados mostram o modelo de Treuille com um desempenho melhor que o modelo proposto nos dois casos. O modelo de Treuille foi beneficiado nesse caso, pois na simulação desenvolvida todos agentes possuem o mesmo objetivo sendo necessário somente um grupo, cujo cálculo do campo potencial não afetou o desempenho da simulação. O modelo proposto utilizando o mesmo grupo que o utilizado na simulação com o modelo de Treuille obteve um baixo desempenho, pois o cálculo das forças aplicadas nos agentes é custoso e em situações de evacuação os agentes tendem a se aglomerar deixando a multidão densa, ou seja, as forças serão frequentemente calculadas. No entanto, pode-se observar que na simulação do modelo proposto que utiliza vários grupos, o custo do cálculo das forças é compensado pelo baixo custo do cálculo dos campos potenciais desses grupos.

O bom desempenho do modelo proposto pode ser observado quando se adiciona outra saída no ambiente anterior. Essa outra saída faz com que na simulação com o modelo de Treuille seja adicionado outro grupo de 22 x 20 células que leve os agentes a essa outra saída, enquanto que na simulação com o modelo proposto deve ser adicionado somente um grupo de 3 x 6 células representando o novo corredor. Na tabela abaixo podem ser vistos os resultados das simulações com duas saídas. Nesse teste, o novo grupo adicionado a simulação com o modelo proposto não afetou seu desempenho. A simulação manteve performance similar a do teste anterior, enquanto as outras simulações tiveram o desempenho reduzido ao utilizarem dois grupos bem discretizados cobrindo todo o ambiente. Na Figura 5.14 podem ser vistos os ambientes com os

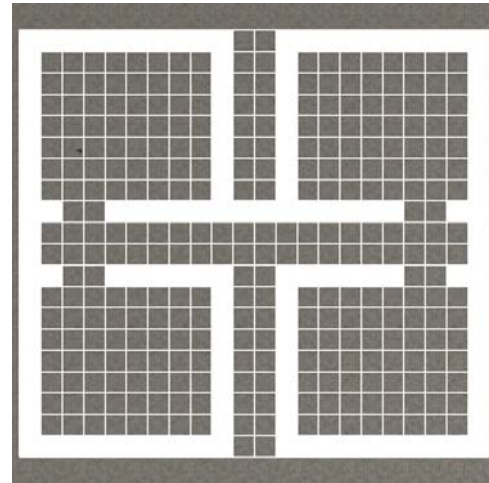
grupos utilizados e na Figura 5.15 imagens das simulações com o modelo proposto.

Modelo	Proposto	Treuille	Proposto (2 grupos)
Simulação	43.9	26.1	19.8

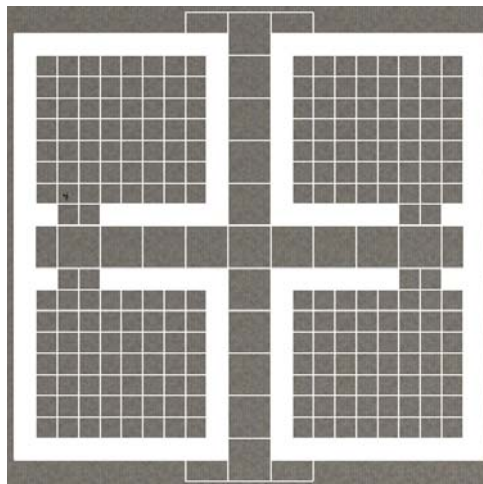
Tabela 5.5: Simulação (fps) de agentes evacuando uma construção por duas saídas.



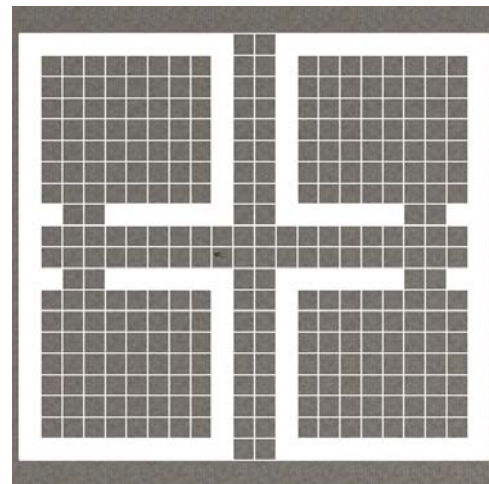
(a) Ambiente com 1 saída e 6 grupos.



(b) Ambiente com 1 saída e 1 grupo.



(c) Ambiente com 2 saídas e 7 grupos.



(d) Ambiente com 2 saídas e 2 grupos.

Figura 5.14: Ambientes utilizados para evacuação.

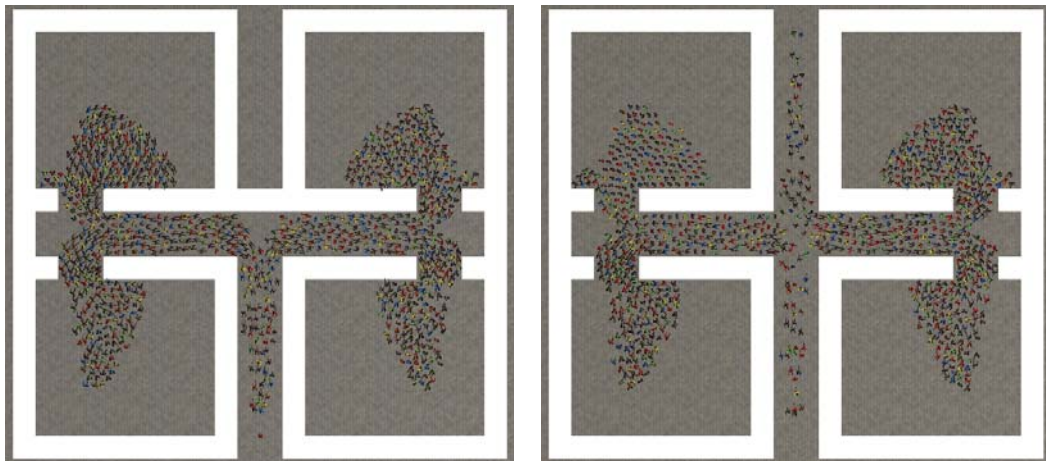


Figura 5.15: Agentes evacuando os ambientes com o modelo proposto.

5.4 Considerações finais

Neste capítulo alguns testes foram realizados para validar o modelo proposto por este trabalho, apresentando suas vantagens e desvantagens. O modelo proposto suporta milhares de agentes em tempo real, suporta situações com alta densidade de agentes, considera aspectos físicos e permite comportamentos secundários. Na tabela abaixo é feita uma comparação entre o modelo apresentado neste trabalho e o modelo de Treuille, no qual ele é baseado. Por fim, no capítulo seguinte são apresentadas as conclusões para este trabalho, assim como trabalhos futuros.

Características	Milhares de agentes em tempo real	Alta densidade	Aspectos físicos	Comportamentos secundários
Modelo proposto	Sim	Sim	Sim	Sim
(TREUILLE et al., 2006)	Sim	Não	Não	Não

Tabela 5.6: Comparação entre modelos.

6 *Conclusões e Trabalhos Futuros*

6.1 **Conclusões**

Nesta dissertação foi apresentado um modelo híbrido para simulação de multidão com comportamentos variados visando execução de simulações em tempo real. O modelo é baseado no modelo macroscópico apresentado por Treuille em (TREUILLE et al., 2006). Primeiramente, para diminuir a carga do algoritmo, foi proposta a discretização dos grupos de acordo com a necessidade do ambiente. Para movimentações globais são utilizados grupos pouco discretizados, e em locais onde há uma maior necessidade de atenção aos movimentos (proximidade de objetos, por exemplo) são utilizados grupos discretizados de acordo com a necessidade local. Essa técnica apesar de aumentar a quantidade de grupos, diminui a quantidade de células em uma simulação, diminuindo assim o custo computacional para o cálculo dos campos potenciais. A vantagem da utilização de desconforto para que os agentes possam desviar uns dos outros antecipadamente (que o modelo original propõe) foi perdida nos casos onde os grupos possuem células grandes, ou seja, no modelo proposto, frequentemente os agentes irão compartilhar suas células com outros. Para prevenir de forma realista as colisões que eventualmente irão acontecer entre eles foi utilizado o modelo de forças sociais apresentado por Helbing em (HELBING et al., 2000). Assim, são tratadas localmente não somente as colisões entre agentes, como as colisões entre agentes e obstáculos.

No trabalho foi mostrado ainda que é possível diversificar os comportamentos em uma multidão utilizando um modelo macroscópico sem um grande impacto na performance da simulação através da adição de grupos secundários sobre os grupos que guiam os agentes a seus objetivos principais. Esses grupos podem alterar o caminho dos agentes, e seus objetivos são formados por ações que combinadas podem gerar diversos comportamentos diferentes aos agentes.

Nos testes foram demonstradas as características principais obtidas com o modelo proposto. A utilização de grades de desvio permitem que o usuário estabeleça como deseja que os agentes desviem dos obstáculos, apenas aumentando ou diminuindo a quantidade de células entre os

agentes e o obstáculo. Essas grades permitem também que o usuário obrigue os agentes a manterem formações preestabelecidas. A integração dos modelos de Treuille e de Helbing permite que os agentes possam desviar naturalmente uns dos outros quando se encontram em uma mesma célula, independente do tamanho da célula. Se as células forem pequenas pode-se ainda ser utilizado desconforto para que os agentes desviem com antecedência, da mesma forma que é feito no modelo de Treuille. O uso do modelo de forças tornou o modelo apto a suportar multidões com alta densidade de agentes; os agentes irão se evitar e ainda evitarão de forma natural os obstáculos definidos nos grupos em que se encontram.

Para avaliar o desempenho do modelo procurou-se reproduzir simulações propostas em alguns outros trabalhos. A simulação apresentada em (SHAO; TERZOPOULOS, 2007) foi reproduzida de forma similar. A intenção do teste foi demonstrar que o modelo proposto permite através dos grupos secundários que os agentes em uma multidão possam ter vários comportamentos diferentes durante uma simulação em tempo real. Assim, demonstrou-se que é possível reproduzir um ambiente similar ao de Shao e Terzopoulos, onde os agentes se comportam naturalmente em uma estação de trem e podem possuir ações relacionadas ao local em que se encontram e/ou suas necessidades. O teste demonstra ainda que a utilização de grupos pouco discretizados permite que vários grupos sejam utilizados. O modelo foi testado em situações onde milhares de agentes se cruzam em um ambiente aberto, apresentando bons resultados. O desempenho do modelo relacionado a quantidade de obstáculos em um ambiente também foi analisada, mostrando que é possível colocar vários obstáculos em um cenário se estes obstáculos forem representados por grupos com poucas células. E, por fim, verificou-se a adequabilidade do modelo em situações de evacuação, sendo analisado ainda o ganho de performance do modelo quando o ambiente apresenta mais de um objetivo.

6.2 Trabalhos futuros

Conforme relatado na Seção 2.8, ainda existem muitos problemas em aberto na área de Simulação de Multidão. Modelos macroscópicos baseados na teoria contínua representaram um grande avanço à área, mas ainda possuem muitos aspectos a serem aperfeiçoados e estudados. O modelo desenvolvido neste trabalho apresentou contribuições visando tornar o modelo de Treuille mais leve computacionalmente para que possam existir mais grupos em uma simulação, e que assim se possa aumentar a heterogeneidade de comportamentos na multidão. Esse modelo apresenta alguns pontos que podem ser aperfeiçoados; nos próximos parágrafos esses pontos serão discutidos, assim como alguns trabalhos futuros.

No modelo desenvolvido, os grupos que levam os agentes aos seus objetivos principais ou secundários podem possuir diversos outros grupos associados, dependendo da complexidade do ambiente. Na versão atual do modelo há a necessidade da utilização de uma estrutura hierárquica para manutenção desses grupos de forma mais eficiente. E, assim como no trabalho de Sung (SUNG et al., 2004), dependendo da complexidade do comportamento secundário modelado pode haver a necessidade de armazenar os comportamentos executados anteriormente, pois eles podem influenciar o comportamento atual.

O modelo possui uma limitação relacionada aos comportamentos secundários. Um agente deve sempre passar dentro de um grupo secundário para poder interagir com ele, ou seja, se um agente sente sede, ele somente irá comprar uma bebida se ele passar dentro de um grupo secundário que o dirija a uma máquina de refrigerantes, por exemplo. Como trabalho futuro será investigada uma maneira de dirigir os agentes aos grupos secundários que eles desejam ir.

Os grupos de desvio devem, obviamente, ter regiões de objetivo para que seus campos potenciais sejam calculados, assim como são calculados os campos potenciais dos grupos principais ou secundários. Esses objetivos devem estar posicionados de uma forma que leve os agentes a passarem pelo local com desvio seguindo a direção do objetivo de grupo principal ou secundário associado. Na versão atual do modelo, esses objetivos são posicionados manualmente; como trabalho futuro está a atribuição desses objetivos de forma automática, através da análise de quais células do grupo de desvio “enxergam” as células marcadas como objetivo do grupo principal ou secundário onde o grupo de desvio está localizado.

Nesse tipo de modelo, os grupos são discretizados em grades regulares de acordo com a complexidade do ambiente. Em ambientes com arquiteturas regulares baseadas em blocos, os grupos se encaixam de forma satisfatória, mas em ambientes com arquiteturas irregulares pode acontecer de algumas células serem perdidas (sendo processadas, mas não utilizadas) ou não se adaptarem a geometria local. Esse problema pode ser resolvido pela utilização de células e grades irregulares que se adaptem a geometria do ambiente. Essa é uma solução teoricamente simples, porém deve ser investigado como realizar o cálculo dos campos potenciais e como obter as velocidades das células em grades desse tipo.

A performance de uma simulação com esse modelo pode ser melhorada ainda através da utilização de GPGPU (*General-Purpose computation on Graphics Processing Units*). Como nesse modelo diversos grupos são utilizados e eles são independentes entre si, é possível processar cada um deles em um processador da GPU, melhorando assim a performance das simulações.

Os agentes no modelo desenvolvido não possuem relacionamentos interpessoais, ou seja,

não podem representar, por exemplo, um grupo de turistas ou uma família. Como trabalho futuro está a análise da possibilidade de adição desse tipo de comportamento aos agentes no modelo proposto.

A renderização de milhares de agentes é uma tarefa bastante custosa computacionalmente. Na literatura existem diversos trabalhos relacionados à solução desse problema; como trabalho futuro está a pesquisa sobre os métodos existentes, assim como o desenvolvimento de um método para renderização de multidões a ser utilizado em conjunto com o modelo proposto.

Modelar manualmente grupos e cenários pode ser uma tarefa relativamente cansativa, dependendo da complexidade do ambiente e dos comportamentos desejados. Disso, surge a necessidade de uma interface para modelagem de cenários. E, por fim, como trabalho futuro está o desenvolvimento de um algoritmo onde, dados um ambiente tridimensional e as posições de seus objetivos globais, ele seja capaz de gerar de forma otimizada e automática todas as grades necessárias para uma simulação nesse ambiente.

Referências Bibliográficas

BLENDER. “Blender”. 2011. Disponível em: <http://www.blender.org/>.

BLIZZARD ENTERTAINMENT. “StarCraft 2: Wings of Liberty”. 2010. <Http://www.starcraft2.com/>. Visitado em: 6 de Dezembro de 2010.

CAL3D. “3D Character Animation Library”. 2011. Disponível em: <http://gna.org/projects/cal3d/>.

COURTY, N.; MUSSE, S. “Simulation of large crowds in emergency situations including gaseous phenomena”. In: *Computer Graphics International 2005*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 206 – 212. ISSN 1530-1052.

FUNGE, J.; TU, X.; TERZOPOULOS, D. “Cognitive modeling: knowledge, reasoning and planning for intelligent characters”. In: *SIGGRAPH '99: Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1999. p. 29–38. ISBN 0-201-48560-5.

HART, P.; NILSSON, N.; RAPHAEL, B. “A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths”. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, v. 4, n. 2, p. 100–107, 1968. ISSN 0536-1567.

HELBING, D.; FARKAS, I.; VICSEK, T. “Simulating dynamical features of escape panic”. *Nature*, [London: Macmillan Journals], 1869-, v. 407, n. 6803, p. 487–490, 2000.

HELBING, D.; MOLNÁR, P. “Social force model for pedestrian dynamics”. *Physical Review E*, American Physical Society, v. 51, n. 5, p. 4282–4286, 1995.

HUGHES, R. L. “A continuum theory for the flow of pedestrians”. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 36, n. 6, p. 507 – 535, 2002. ISSN 0191-2615.

HUGHES, R. L. “The flow of human crowds”. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 35, n. 1, p. 169–182, 2003.

JIANG, H.; XU, W.; MAO, T.; LI, C.; XIA, S.; WANG, Z. “Continuum crowd simulation in complex environments”. *Computers & Graphics*, v. 34, n. 5, p. 537 – 544, 2010. ISSN 0097-8493.

NARAIN, R.; GOLAS, A.; CURTIS, S.; LIN, M. C. “Aggregate dynamics for dense crowd simulation”. *ACM Transactions on Graphics*, ACM, New York, NY, USA, v. 28, p. 122:1–122:8, 2009. ISSN 0730-0301.

NEW LINE CINEMA. “The Lord of the Rings”. 2001–2003. <Http://www.lordoftherings.net/>. Visitado em: 10 de Setembro de 2010.

OSG. “OpenSceneGraph”. 2011. Disponível em: <http://www.openscenegraph.org>.

PELECHANO, N.; ALLBECK, J. M.; BADLER, N. I. “Controlling individual agents in high-density crowd simulation”. In: *SCA '07: Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2007. p. 99–108. ISBN 978-1-59593-624-4.

PELECHANO, N.; O'BRIEN, K.; SILVERMAN, B.; BADLER, N. “Crowd simulation incorporating agent psychological models, roles and communication”. In: *1st Int'l Workshop on Crowd Simulation*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 21–30.

QUINN, M. J.; METOYER, R. A.; HUNTER-ZAWORSKI, K. “Parallel implementation of the social forces model”. In: *in Proceedings of the Second International Conference in Pedestrian and Evacuation Dynamics*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 63–74.

RARE. “Kameo: Elements of Power”. 2005. <Http://www.rare.com/>. Visitado em: 10 de Setembro de 2010.

REYNOLDS, C. W. “Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model”. *SIGGRAPH Computer Graphics*, ACM, New York, NY, USA, v. 21, n. 4, p. 25–34, 1987. ISSN 0097-8930.

REYNOLDS, C. W. “Steering behaviors for autonomous characters”. In: *Game Developers Conference 1999*. [S.l.: s.n.], 1999. p. 763–782.

REYNOLDS, C. W. “Interaction with groups of autonomous characters”. In: *Game Developers Conference 2000*. [S.l.: s.n.], 2000. p. 449–460.

REYNOLDS, C. W. “Big fast crowds on ps3”. In: *Sandbox '06: Proceedings of the 2006 ACM SIGGRAPH symposium on Videogames*. New York, NY, USA: ACM, 2006. p. 113–121. ISBN 1-59593-386-7.

SHAO, W.; TERZOPOULOS, D. “Autonomous pedestrians”. *Graphical Models*, v. 69, n. 5-6, p. 246 – 274, 2007. ISSN 1524-0703.

SQUARE ENIX. “Supreme Commander 2”. 2010. <Http://www.supremecommander2.com/>. Visitado em: 6 de Dezembro de 2010.

SUNG, M.; GLEICHER, M.; CHENNEY, S. “Scalable behaviors for crowd simulation”. *Computer Graphics Forum*, v. 23, n. 3, p. 519–528, 2004. ISSN 1467-8659.

SUNNA, P.; BACKMAN, A.; SJÖLIE, D. “ReplicantBody”. 2011. Disponível em: <http://www.vrlab.umu.se/research/replicantbody>.

THALMANN, D.; GRILLON, H.; MAIM, J.; YERSIN, B. “Challenges in crowd simulation”. In: *Proceedings of the 2009 International Conference on CyberWorlds*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2009. (CW '09), p. 1–12. ISBN 978-0-7695-3791-7.

TREUILLE, A.; COOPER, S.; POPOVIĆ, Z. “Continuum crowds”. In: *SIGGRAPH '06: ACM SIGGRAPH 2006 Papers*. New York, NY, USA: ACM, 2006. p. 1160–1168. ISBN 1-59593-364-6.

TSITSIKLIS, J. “Efficient algorithms for globally optimal trajectories”. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, v. 40, n. 9, p. 1528 –1538, 1995. ISSN 0018-9286.

XIONG, M.; LEES, M.; CAI, W.; ZHOU, S.; LOW, M. Y. H. “Hybrid modelling of crowd simulation”. *Procedia Computer Science*, v. 1, n. 1, p. 57 – 65, 2010. ISSN 1877-0509.

YERSIN, B.; MAÏM, J.; MORINI, F.; THALMANN, D. “Real-time crowd motion planning: Scalable avoidance and group behavior”. *Visual Computer*, Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA, v. 24, n. 10, p. 859–870, 2008. ISSN 0178-2789.

ZHENG, X.; LI, W.; GUAN, C. “Simulation of evacuation processes in a square with a partition wall using a cellular automaton model for pedestrian dynamics”. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 389, n. 11, p. 2177 – 2188, 2010. ISSN 0378-4371.

ZHENG, X.; ZHONG, T.; LIU, M. “Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches”. *Building and Environment*, v. 44, n. 3, p. 437 – 445, 2009. ISSN 0360-1323.