



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

DOUGLAS BANDEIRA IVO

**UM MODELO PARA REPRESENTAÇÃO FLEXÍVEL DE GRUPOS SOCIAIS EM
SIMULAÇÃO DE MULTIDÃO**

FORTALEZA

2021

DOUGLAS BANDEIRA IVO

UM MODELO PARA REPRESENTAÇÃO FLEXÍVEL DE GRUPOS SOCIAIS EM
SIMULAÇÃO DE MULTIDÃO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciência da Computação. Área de Concentração: Computação Gráfica

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Bento Cavalcante-Neto

Coorientador: Prof. Dr. Creto Augusto Vidal

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- I1m Ivo, Douglas Bandeira.
Um modelo para representação flexível de grupos sociais em simulação de multidão / Douglas Bandeira Ivo. – 2021.
90 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Joaquim Bento Cavalcante-Neto.
Coorientação: Prof. Dr. Creto Augusto Vidal.
1. Comportamento de Grupo Social. 2. Simulação de Multidão. 3. Modelagem Flexível de Grupo. I. Título.
CDD 005
-

DOUGLAS BANDEIRA IVO

UM MODELO PARA REPRESENTAÇÃO FLEXÍVEL DE GRUPOS SOCIAIS EM
SIMULAÇÃO DE MULTIDÃO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciência da Computação. Área de Concentração: Computação Gráfica

Aprovada em: 19 de fevereiro de 2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Joaquim Bento
Cavalcante-Neto (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Creto Augusto Vidal (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Gilvan Rodrigues Maia
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Soraia Raupp Musse
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do
Sul (PUCRS)

Dedico este trabalho a Deus, por me abençoar e me dar força e sabedoria para realizar este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ivo e Terezinha, por terem me dado amor, educação e as condições necessárias para me tornar quem sou hoje. À minha esposa Raquel, pelo seu amor, compreensão e apoio dados sempre e, em especial, durante meu mestrado. Às minhas filhas Ana Júlia e Ana Luísa, que me dão força e alegria para seguir em frente.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Joaquim Bento Cavalcante-Neto e Prof. Dr. Creto Augusto Vidal, que contribuíram muito com meu trabalho, acreditaram no meu potencial, me motivaram e me estimularam a fazer um trabalho cada vez melhor. Ao Prof. Dr. José Gilvan Rodrigues Maia, por ter aceitado participar da minha banca examinadora e pelas suas contribuições durante as defesas da minha proposta de dissertação e da minha de dissertação. À Profa. Dra. Soraia Raupp Musse, por ser uma referência na área de simulação de multidão, por também ter aceitado participar da minha banca examinadora e por suas contribuições durante minha defesa de dissertação.

Ao Departamento de Computação e ao Programa de Mestrado e Doutorado em Ciência da Computação (MDCC) da Universidade Federal do Ceará, pela oportunidade.

Ao Dr. Ednardo Moreira Rodrigues e ao Alan Batista de Oliveira, pela adequação do *template* utilizado neste trabalho, para que o mesmo ficasse de acordo com as normas da biblioteca da Universidade Federal do Ceará (UFC).

RESUMO

O comportamento de grupos sociais, como amigos, casais e famílias, é um aspecto bastante importante em simulação de multidão. As abordagens existentes de modelagem de grupos oferecem pouca flexibilidade de customização da estrutura dos grupos e das relações entre seus membros, limitando o seu poder de representação. Essas abordagens também costumam ter limitações relacionadas à capacidade de representação dos tamanhos dos grupos e a aspectos relacionados à coesão desses grupos, como a capacidade de seus membros andarem juntos e seguirem as mesmas rotas. Este trabalho propõe um novo modelo que suporta a criação de grupos com estruturas distintas, podendo possuir zero, um ou mais líderes e sublíderes. A abordagem também pode representar grupos de tamanhos diversos, inclusive contendo subgrupos, e representar níveis distintos de relacionamentos entre seus membros. O modelo também possibilita a representação de grupos com maior coesão ou com membros de maior autonomia na prevenção de colisão e na escolha de rotas, além da capacidade de reagrupamento caso um ou mais de seus membros fiquem para trás. O modelo também inclui um novo fator de personalidade que representa o nível de insistência dos indivíduos de se deslocarem em direção aos seus destinos caso estejam tendo dificuldade de fazê-lo. A abordagem é baseada em conjuntos de estados que os agentes podem assumir com base em seus perfis e no modelo de forças sociais.

Palavras-chave: Comportamento de grupo social. Simulação de multidão. Modelagem flexível de grupo.

ABSTRACT

The behavior of pedestrian social groups, such as friends, couples and families, is a very important aspect in crowd simulation. Existing group modeling approaches offer little flexibility in customizing the structure of the groups and the relationships between their members, limiting their power of representation. These approaches also often have limitations related to the ability to represent groups of any size and to aspects related to the cohesion of these groups, such as the ability of their members to walk together and follow the same routes. This work proposes a new model that allows the creation of groups with different structures, with zero, one or more leaders and subleaders. The approach can also represent groups of different sizes, including containing subgroups, and represent different levels of relationships between its members. The model also allows the representation of groups with greater cohesion or with members with greater autonomy in the collision avoidance and in the choice of routes, in addition to the ability to regroup if one or more of its members are left behind. The model also includes a new personality factor that represents the level of individuals' insistence on moving towards their destinations if they are having difficulty to do it. The approach is based on states that the agents can assume based on their profiles and on the social forces model.

Keywords: Social group behavior. Crowd simulation. Flexible group modeling.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Exemplo de multidões virtuais em um filme | 14 |
| Figura 2 – Exemplo de multidões virtuais em um jogo eletrônico | 15 |
| Figura 3 – Exemplo de multidões virtuais em realidade virtual | 15 |
| Figura 4 – Exemplo de problemas típicos durante tumultos em multidão | 16 |
| Figura 5 – Exemplos de simulação de multidão em situações com alta concentração de indivíduos | 17 |
| Figura 6 – Formação de grupos com base em altruísmo e dependência | 22 |
| Figura 7 – Distribuição dos tamanhos dos grupos observados em duas populações | 23 |
| Figura 8 – Exemplo de grupos com subgrupos e se desviando entre si | 25 |
| Figura 9 – Exemplo de evacuação de multidão com grupos usando um método baseado em autômato celular | 26 |
| Figura 10 – Exemplo de formações de grupos de três pessoas em situações de densidade baixa (esquerda), média (meio) e alta (direita) | 27 |
| Figura 11 – Exemplo de grupos grandes com capacidade de se desviarem entre si | 28 |
| Figura 12 – Quadro comparativo das abordagens baseadas em grupos de pedestres | 29 |
| Figura 13 – Perfis de agentes em grupos | 31 |
| Figura 14 – Exemplo de grupo <i>sem líder</i> , representando um grupo de colegas | 32 |
| Figura 15 – Exemplo de grupo <i>com líder</i> , representando um grupo de amigos | 33 |
| Figura 16 – Exemplos de grupos <i>com hierarquia de liderança</i> , representando uma família (a) e um grupo escolar (b) | 34 |
| Figura 17 – Exemplo de grupos <i>mistos</i> , representando um grupo de amigos com dois subgrupos (a) e um grupo turístico (b) | 35 |
| Figura 18 – Visão geral do modelo proposto | 36 |
| Figura 19 – Exemplo dos estados que os membros do grupos podem assumir | 38 |
| Figura 20 – Estados dos agentes e suas transições | 40 |
| Figura 21 – Exemplo de indivíduo tentando passar por um fluxo denso de pedestres | 42 |
| Figura 22 – Exemplo de forças de atração de intensidades diferentes entre os membros de um grupo | 44 |
| Figura 23 – Exemplo da força de desvio sendo aplicada | 45 |
| Figura 24 – Cenários dos experimentos realizados | 47 |
| Figura 25 – Tipos de grupos utilizados nos experimentos | 50 |

| | |
|---|----|
| Figura 26 – Experimento A1: simulação de grupos <i>sem líder</i> , do tipo <i>GT1</i> , utilizando o modelo proposto, no cenário de <i>corredor de fluxo bidirecional</i> | 52 |
| Figura 27 – Experimento A2: simulação de grupos usando o modelo de Moussaïd <i>et al.</i> (2010) no cenário de <i>corredor de fluxo bidirecional</i> | 53 |
| Figura 28 – Experimento A3: simulação de grupos <i>com líder</i> , do tipo <i>GT2</i> , utilizando o modelo proposto no cenário de <i>corredor de fluxo bidirecional</i> | 54 |
| Figura 29 – Experimento A4: simulação de grupos <i>com hierarquia de liderança</i> , utilizando o modelo proposto, no cenário de <i>corredor de fluxo bidirecional</i> | 55 |
| Figura 30 – Sala com obstáculos e suas dimensões | 57 |
| Figura 31 – Grupo <i>sem líder</i> , do tipo <i>GT1</i> , utilizado nos experimentos B2 e B3 | 58 |
| Figura 32 – Experimento B1: simulação de um grupo de indivíduos usando o modelo de Moussaïd <i>et al.</i> (2010), no cenário de <i>sala com obstáculos</i> | 59 |
| Figura 33 – Experimento B2: simulação de um grupo de indivíduos usando o modelo proposto, sem a aplicação do fator de insistência, no cenário de <i>sala com obstáculos</i> | 60 |
| Figura 34 – Experimento B3: simulação de um grupo de indivíduos usando o modelo proposto, com a aplicação do fator de insistência, no cenário de <i>sala com obstáculos</i> | 61 |
| Figura 35 – Experimento C1: simulação de um grupo de indivíduos usando o modelo de Moussaïd <i>et al.</i> (2010), no cenário de <i>sala com obstáculos</i> | 63 |
| Figura 36 – Tipos de grupos utilizado nos experimentos C2, C3 e C4, respectivamente | 64 |
| Figura 37 – Experimento C2: simulação de um grupo <i>sem líder</i> , do tipo <i>GT1</i> , usando o modelo proposto, no cenário de <i>sala com obstáculos</i> | 64 |
| Figura 38 – Experimento C3: simulação de um grupo de amigos representado como um grupo <i>com líder</i> , do tipo <i>GT2</i> , usando o modelo proposto, no cenário de <i>sala com obstáculos</i> | 66 |
| Figura 39 – Experimento C4: simulação de uma família, representada como um grupo <i>com hierarquia de liderança</i> , do tipo <i>GT3</i> , usando o modelo proposto, no cenário de <i>sala com obstáculos</i> | 67 |
| Figura 40 – Tipos de grupos utilizado nos experimentos C5 e C6, respectivamente | 68 |

| | |
|--|----|
| Figura 41 – Experimento C5: simulação de um grupo <i>misto</i> de amigos, do tipo <i>GT5</i> , contendo 2 subgrupos, usando o modelo proposto, no cenário de <i>sala com obstáculos</i> | 68 |
| Figura 42 – Experimento C6: simulação de um grupo <i>misto</i> , do tipo <i>GT6</i> , representado um grupo de guia com turistas, usando o modelo proposto, no cenário de <i>sala com obstáculos</i> | 70 |
| Figura 43 – Cenário de cruzamento com bifurcação e suas dimensões | 72 |
| Figura 44 – Tipos de grupos utilizado nos experimentos D1 (a), D2 (a) e D3 (b) | 73 |
| Figura 45 – Experimento D1: gráfico da simulação de um grupo de colegas <i>sem líder</i> , do tipo <i>GT1</i> , com $R_{ij} = 0,1$, usando o modelo proposto, no cenário de <i>cruzamento com bifurcação</i> | 74 |
| Figura 46 – Experimento D1: simulação de um grupo de colegas <i>sem líder</i> , do tipo <i>GT1</i> , usando o modelo proposto, no cenário de <i>cruzamento com bifurcação</i> | 75 |
| Figura 47 – Experimento D2: gráfico da simulação de um grupo de amigos <i>sem líder</i> , do tipo <i>GT1</i> , com $R_{ij} = 0,2$, usando o modelo proposto, no cenário de <i>cruzamento com bifurcação</i> | 76 |
| Figura 48 – Experimento D3: gráfico da simulação de um grupo de amigos <i>com líder</i> , do tipo <i>GT2</i> , com $R_{ij} = 0,2$, usando o modelo proposto, no cenário de <i>cruzamento com bifurcação</i> | 77 |
| Figura 49 – Experimento D3: simulação de um grupo de amigos <i>com líder</i> , do tipo <i>GT2</i> , com $R_{ij} = 0,2$, usando o modelo proposto, no cenário de <i>cruzamento com bifurcação</i> | 77 |
| Figura 50 – Tipos de grupos utilizado nos experimentos D4 (a) e D5 (b) | 79 |
| Figura 51 – Experimento D4: gráfico da simulação de um grupo com hierarquia de liderança, representando um grupo escolar de professor com alunos em fila, usando o modelo proposto, no cenário de <i>cruzamento com bifurcação</i> | 80 |
| Figura 52 – Experimento D5: gráfico da simulação de um grupo <i>misto</i> , do tipo <i>GT6</i> , representando um grupo turístico, usando o modelo proposto, no cenário de <i>cruzamento com bifurcação</i> | 81 |
| Figura 53 – Experimento D5: simulação de um grupo turístico <i>misto</i> , do tipo <i>GT6</i> , usando o modelo proposto, no cenário de <i>cruzamento com bifurcação</i> | 82 |
| Figura 54 – Tipo de grupo utilizado no experimento E1 | 84 |

Figura 55 – Experimento E1: simulação de uma família *com hierarquia de liderança*, do tipo *GT3*, usando o modelo proposto, no cenário de *cruzamento com bifurcação* com densidade bastante elevada 85

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Quadro comparativo dos experimentos A1, A2, A3 e A4 | 56 |
| Tabela 2 – Quadro comparativo dos experimentos B1, B2 e B3 | 61 |
| Tabela 3 – Quadro comparativo dos experimentos C1, C2, C3, C4, C5 e C6 | 71 |
| Tabela 4 – Quadro resumo dos experimentos D1, D2 e D3 | 78 |
| Tabela 5 – Quadro resumo do experimento D4 | 80 |
| Tabela 6 – Quadro resumo do experimento D5 | 82 |
| Tabela 7 – Quadro comparativo dos experimentos D1, D2, D3, D4 e D5 | 83 |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 2 | TRABALHOS RELACIONADOS | 21 |
| 2.1 | Abordagens de modelagem de grupos de pedestres | 21 |
| 2.2 | Comparativo das abordagens | 28 |
| 3 | MÉTODO PROPOSTO | 30 |
| 3.0.1 | <i>Perfis dos agentes</i> | 30 |
| 3.1 | Tipos de grupos | 30 |
| 3.1.1 | <i>Grupo sem líder</i> | 31 |
| 3.1.2 | <i>Grupo com líder</i> | 32 |
| 3.1.3 | <i>Grupo com hierarquia de liderança</i> | 32 |
| 3.1.4 | <i>Grupo misto</i> | 33 |
| 3.2 | Modelo | 34 |
| 3.2.1 | <i>Representação dos agentes</i> | 36 |
| 3.2.2 | <i>Estados e transições</i> | 37 |
| 3.2.3 | <i>Cálculo da rota</i> | 40 |
| 3.2.4 | <i>Modelo de Forças</i> | 40 |
| 3.2.5 | <i>Cálculo da velocidade</i> | 45 |
| 4 | EXPERIMENTOS E RESULTADOS | 47 |
| 4.1 | Corredor de fluxo bidirecional | 51 |
| 4.2 | Sala com obstáculos | 56 |
| 4.2.1 | <i>Sala com obstáculos - Fator de insistência</i> | 57 |
| 4.2.2 | <i>Sala com obstáculos - Flexibilidade de rotas</i> | 62 |
| 4.3 | Cruzamento com bifurcação | 71 |
| 4.3.1 | <i>Cruzamento com bifurcação - densidade alta</i> | 72 |
| 4.3.2 | <i>Cruzamento com bifurcação - densidade muito alta</i> | 83 |
| 5 | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 86 |
| | REFERÊNCIAS | 87 |

1 INTRODUÇÃO

Uma multidão pode ser definida como um grande grupo de indivíduos dentro do mesmo espaço ao mesmo tempo, cujos movimentos são, por um período de tempo prolongado, dependentes de interações predominantemente locais (DUIVES *et al.*, 2013). Em uma multidão, as pessoas tendem a agir de forma diferente da maneira que agiriam se estivessem sozinhas, perdendo parte de suas individualidades e adotando o comportamento da multidão (BRAUN *et al.*, 2003). A simulação de multidão é uma área de estudo que possui um conjunto extenso de aplicações em diversos campos, como por exemplo em entretenimento, realidade virtual, computação gráfica, arquitetura, ciência da segurança, física, robótica e sociologia, dentre outros (DICKINSON *et al.*, 2018; ULICNY; THALMANN, 2002; TURNER; PENN, 2002; HELBING *et al.*, 2005; FARKAS *et al.*, 2002; MOLNAR; STARKE, 2001; JAGER *et al.*, 2001).

Na área de entretenimento, podem-se encontrar diversos filmes (Figura 1) e jogos eletrônicos (Figura 2) que representam multidões em suas cenas e animações, inclusive de personagens não humanos. Poderia ser muito caro e complicado, por exemplo, colocar milhares de pessoas em um ambiente para gravar algumas cenas de um filme, e isso pode ser substituído por simulação computacional.

Figura 1 – Exemplo de multidões virtuais em um filme



Fonte: O Hobbit: A Batalha dos Cinco Exércitos (Warner Bros. Pictures, 2014).

Na área da realidade virtual (Figura 3), pode-se ter o avatar de um usuário interagindo com avatares de outros usuários ou com avatares autônomos, e estes também podem interagir

Figura 2 – Exemplo de multidões virtuais em um jogo eletrônico



Fonte: Age of Empires: Definitive Edition (Microsoft Studios, 2018).

com outros avatares autônomos, sendo que todos devem agir da forma mais realista possível, a fim de melhorar a sensação de imersão.

Figura 3 – Exemplo de multidões virtuais em realidade virtual



Fonte: Dickinson *et al.* (2018).

Na área de segurança, podem-se citar alguns casos de grandes desastres cujos impactos poderiam ter sido minimizados caso o ambiente tivesse sido melhor estruturado e se os responsáveis houvessem adotado um conjunto de medidas para melhorar a segurança dos locais. Pode-se citar, por exemplo, a tragédia de Hillsborough em 1989, com 96 mortes e mais

de 700 feridos¹, o incêndio na boate Kiss, que acabou com mais de duas centenas de mortos² e o rompimento da barragem de Brumadinho, com mais de 240 vítimas fatais³. Na Figura 4, podemos visualizar alguns problemas típicos de tumultos em multidões, como a pressão aumentando a um nível doloroso e potencialmente letal, a ponto de dobrar barreiras de aço, e pessoas em pânico atropelando outras e sendo empilhada umas em cima das outras.

Figura 4 – Exemplo de problemas típicos durante tumultos em multidão



Fonte: Helbing *et al.* (2005)

Desastres como esses podem ser simulados computacionalmente (Figura 5), prevendo possíveis impactos de tumultos, incêndios e outras situações que possam pôr em risco a vida das pessoas. Com o uso de simulação, pode-se identificar a necessidade de mudar a arquitetura do ambiente, de criar rotas de emergência, de aumentar o tamanho de saídas para facilitar a evasão do local, de melhorar a sinalização, dentre outros itens que poderiam aumentar a segurança das pessoas no ambiente. No tocante à prevenção de desastres e segurança em locais com grande quantidade de pessoas, a simulação de multidão possui um papel muito importante.

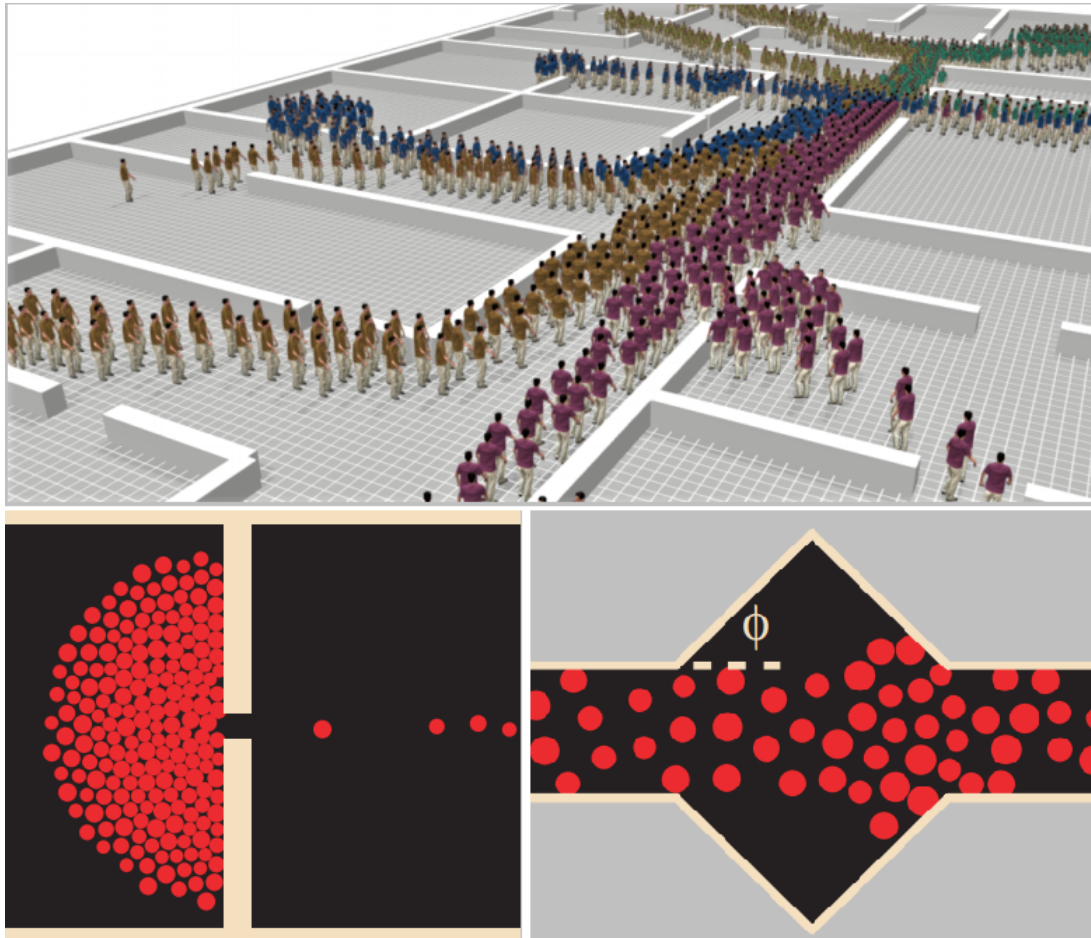
A simulação de multidão pode possuir foco diferente de acordo com a característica da aplicação. Existem basicamente duas áreas principais: a que foca em *realismo comportamental*

¹ <https://globoesporte.globo.com/futebol/futebol-internacional/futebol-ingles/noticia/tragedia-de-hillsborough-faz-30-anos-relembra-os-erros-as-mudancas-e-a-busca-por-justica.ghtml>

² <https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2019/01/seis-anos-depois-incendio-na-boate-kiss-acumula-vitimas-entre-os-pais.shtml>

³ <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/05/25/brumadinho-sobe-para-242-o-numero-de-mortos-identificados-no-rompimento-de-barragem-da-vale.ghtml>

Figura 5 – Exemplos de simulação de multidão em situações com alta concentração de indivíduos



Fonte: Karamouzas *et al.* (2017) (parte superior) e Helbing *et al.* (2000) (parte inferior).

e a que foca em *alta qualidade de visualização* (THALMANN; MUSSE, 2013). A primeira área está mais preocupada em simular o comportamento da forma mais realista possível, através de validações qualitativas e quantitativas realizadas com base em observações do mundo real. Nessa área, geralmente a visualização fica em segundo plano, sendo feita normalmente em 2D. Um exemplo de aplicação que costuma ter essas características é a evacuação de ambientes. A segunda área tende a focar no resultado visual, não se preocupando tanto com o realismo de comportamento. Nela, geralmente a interatividade é um aspecto importante, sendo comumente exigido desempenho de tempo real. Alguns exemplos de aplicações que costumam ter essas características são os filmes e os jogos eletrônicos. Esta dissertação é focada no aspecto de realismo comportamental. Neste trabalho, as denominações pedestres, indivíduos e agentes são usadas com o mesmo significado.

Diversos estudos têm sido realizados recentemente de forma a se tentar compreender e reproduzir melhor o comportamento das pessoas em coletividade (DONG *et al.*, 2020;

HAGHANI, 2020; ZHU *et al.*, 2020; VARGHESE; THAMPI, 2020; RUDENKO *et al.*, 2020; MARTINEZ-GIL *et al.*, 2017). Considerando o estudo da dinâmica de multidões, observou-se que grande parte das multidões é, em geral, composta por grupos (como por exemplo famílias, amigos e colegas) e que esses grupos causam impacto relevante na dinâmica da multidão como um todo (MOUSSAÏD *et al.*, 2010). Como um exemplo do impacto de grupos em uma multidão, pode-se perceber claramente que o comportamento de uma pessoa em uma multidão pode ser bastante diferente caso ela esteja sozinha ou esteja com sua família ou com amigos. Alguns trabalhos destacam que o comportamento de grupos é um fator que deve ser levado em consideração nos modelos de simulação de fluxos de pedestres (DONG *et al.*, 2020), que ainda não foi suficientemente explorado (MARTINEZ-GIL *et al.*, 2017) e que tem ganhado relevância nos últimos anos (HAGHANI, 2020).

A maioria dos trabalhos existentes de simulação de grupos de pedestres possui pouca flexibilidade na modelagem desses grupos, por exemplo (MOUSSAÏD *et al.*, 2010; KOUNTOURIOTIS *et al.*, 2014; HE *et al.*, 2016a; LIU *et al.*, 2018). De acordo com a situação e com a característica dos grupos, pode ser necessário representá-los sem líder, com líder, com níveis hierárquicos de liderança ou com forma mista, mesclando características desses outros tipos de grupos. Como exemplo de grupo sem líder, pode-se citar um grupo de colegas em que não há alguém tão influente sobre os outros a ponto de se tornar um líder. Como exemplo de grupo com líder, pode-se considerar um grupo de amigos em que um deles é o mais influente e assume o papel de líder sobre os outros. Para exemplificar um grupo com hierarquia de liderança, pode-se citar uma família em que o pai e a mãe assumem papéis de liderança de níveis distintos, atuando um deles como líder e o outro como sublíder, sendo seguidos pelos filhos. Como exemplo de grupos mistos, pode-se considerar um grupo turístico em que há um guia, indivíduos independentes e subgrupos de colegas, de amigos e de famílias. A maioria dos trabalhos existentes não consegue modelar todos esses tipos de grupos.

Outro importante ponto do comportamento de grupos ignorado por diversos trabalhos anteriores, como (LU *et al.*, 2017; HE *et al.*, 2016a; LIU *et al.*, 2018; CHEN *et al.*, 2019), é a capacidade de representação de níveis de relacionamentos entre os membros de um grupo, o que pode influenciar a proximidade e a intensidade de ligação entre dois membros. A não modelagem desses relacionamentos pode gerar modelos que simulam o comportamento de grupos de forma menos realista. Vários trabalhos também possuem a limitação de representar apenas grupos pequenos de pedestres, de até 4 indivíduos, não possuindo representação adequada para grupos

maiores, por exemplo (MOUSSAÏD *et al.*, 2010; KARAMOUZAS; OVERMARS, 2012; XIE *et al.*, 2016; LU *et al.*, 2017).

Diversos trabalhos anteriores apresentam limitações em aspectos relacionados à coesão dos grupos, como (MOUSSAÏD *et al.*, 2010; KOUNTOURIOTIS *et al.*, 2014; JAKLIN *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2017; QIN *et al.*, 2018). Essa coesão se refere a: necessidade da inclusão de uma estratégia de nível global que possibilite que seus membros sigam as mesmas rotas; prevenção de colisão realizada apenas entre indivíduos, não sendo realizada a nível de grupos; dificuldade que alguns modelos têm de, em cenários mais densos, evitar que algum membro do grupo seja deixado para trás e, caso isso aconteça, o grupo tenha a capacidade de se reagrupar.

Dessa forma, este trabalho apresenta uma nova abordagem para representar essas características de grupos. Mais especificamente, são tratados neste trabalho os grupos sociais, que são grupos cujos membros têm a intenção de permanecerem próximos uns dos outros, como amigos e familiares. O modelo possui capacidade de representar grupos sem líder, com líder, com hierarquia de liderança e grupos mistos. O trabalho também representa grupos de tamanhos variados, incluindo subgrupos, e níveis distintos de relacionamentos entre seus membros.

Além disso, o trabalho também possui uma abordagem de reagrupamento de seus membros e a capacidade de modelar grupos com características de coesão distintas, em que seus membros podem ter mais autonomia para se desviarem de outros indivíduos e grupos, podendo se separar um pouco dos membros do seu grupo para isso, ou podem agir de forma mais coesa, se desviando como um grupo unido. Outra flexibilidade modelada relacionada à coesão dos grupos está na capacidade de se gerar grupos com mais autonomia para seguirem rotas um pouco distintas e se reencontrarem posteriormente ou que atuem como grupos coesos, que seguem as mesmas rotas, com seus membros unidos.

O modelo também propõe a inclusão de um atributo de personalidade que representa o nível de insistência de um indivíduo em seguir em direção à sua meta. Para a obtenção dessas características, é utilizada uma abordagem baseada em um conjunto de estados que um indivíduo pode assumir e no modelo de forças sociais. O estado do indivíduo determina seu comportamento e o modelo de forças sociais atua na sua movimentação local.

As contribuições trazidas por esse trabalho são descritas a seguir:

1. **Flexibilidade de representação de grupos:** é proposto um modelo capaz de representar grupos com estruturas distintas (sem líder, com líder, com hierarquia de liderança e grupos mistos) e com níveis de relacionamentos entre seus membros.

2. **Flexibilidade de coesão dos grupos:** é proposto um modelo capaz de representar grupos com níveis distintos de coesão, em que seus membros podem ter maior autonomia ou maior coesão nos aspectos de prevenção de colisão entre grupos e de escolha de rotas.
3. **Fator de insistência:** é proposto novo fator de personalidade que representa o nível de insistência de um indivíduo em se aproximar de sua meta ou de outro membro do grupo.

A estrutura desta dissertação está descrita a seguir. No Capítulo 2 são discutidos os trabalhos relacionados mais relevantes. O Capítulo 3 contém a descrição do modelo proposto. No Capítulo 4 são apresentados os resultados das simulações utilizando o modelo proposto e é feita uma análise desses resultados. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho e são discutidas as possibilidades de trabalhos futuros.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

O estudo do comportamento, da modelagem e da simulação de grupos de pedestres tem ganhado cada vez mais relevância nos últimos anos (HAGHANI, 2020). Existem na literatura estudos recentes que versam sobre o estado da arte da simulação e da psicologia de grupos de pedestres em multidões (YANG *et al.*, 2020; CEPOLINA; MENICHINI, 2016; CHENG *et al.*, 2014; TEMPLETON *et al.*, 2015). Na Seção 2.1 são abordados alguns trabalhos de modelagem de grupos de pedestres e na Seção 2.2, é realizado um breve comparativo dessas abordagens com o método proposto.

2.1 Abordagens de modelagem de grupos de pedestres

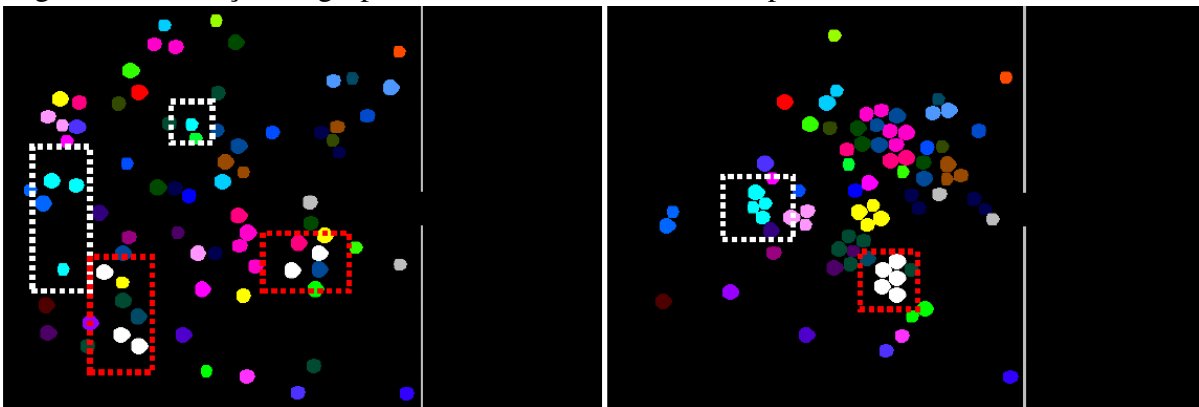
Musse e Thalmann (1997) propuseram um trabalho pioneiro ao modelar uma multidão composta por diversos grupos de indivíduos. O trabalho modela liderança nos grupos e aspectos dinâmicos dos indivíduos e grupos, como a mudança do estado emocional e a capacidade de um indivíduo mudar de grupo. Posteriormente, o trabalho foi expandido (MUSSE; THALMANN, 2001) com a modelagem da multidão em uma estrutura hierárquica e com a possibilidade de gerar agentes com diferentes níveis de autonomia (guiados pelo usuário, programados ou autônomos). Os grupos ganharam capacidade de se subdividirem e se unirem novamente, assim como capacidade de reagrupamento caso um dos membros do grupo fique para trás. Entretanto, a abordagem não representa os níveis de relacionamento entre os membros de um grupo.

O modelo de forças sociais (HELBING; MOLNÁR, 1995; HELBING *et al.*, 2000; CHEN *et al.*, 2018) é um dos mais utilizados para modelagem de pedestres e de grupos de pedestres em multidões. Esse modelo utiliza um conjunto de forças para representar tanto a força física, no caso de colisão entre indivíduos, quanto o desejo de se aproximar ou de se afastar de algo, a força social. Essa abordagem possui alta capacidade de representação do comportamento de pedestres, mas modelos que representam comportamentos mais complexos podem ser difíceis de calibrar (CHEN *et al.*, 2018; MOUSSAÏD *et al.*, 2011).

Braun *et al.* (2003) apresentaram um trabalho baseado em forças sociais para modelar grupos de pedestres em situações de evacuação. Características como dependência e altruísmo foram utilizadas para modelar tanto comportamentos individuais como os relacionamentos entre os membros dos grupos (Figura 6). Em 2005, o trabalho foi expandido (BRAUN *et al.*, 2005)

para lidar com evacuação de ambientes internos mais complexos e eventos de perigo, como fogo, fumaça e explosão, que podem possuir posição, velocidade de propagação e nível de perigo. No trabalho há também a tomada de decisão baseada em máquina de estados finitos¹, em que o agente pode tomar a decisão de tentar atravessar o local onde há o perigo, assumindo o risco, ou então de fugir para longe dele. A utilização de altruísmo e dependência é interessante por possibilitar a modelagem de níveis diferentes de atração entre membros do grupo, por exemplo entre um pai altruísta e um filho dependente. Entretanto, não existe no modelo a flexibilidade de se representar uma estrutura de grupo com líder nem uma abordagem de prevenção de colisão entre grupos.

Figura 6 – Formação de grupos com base em altruísmo e dependência

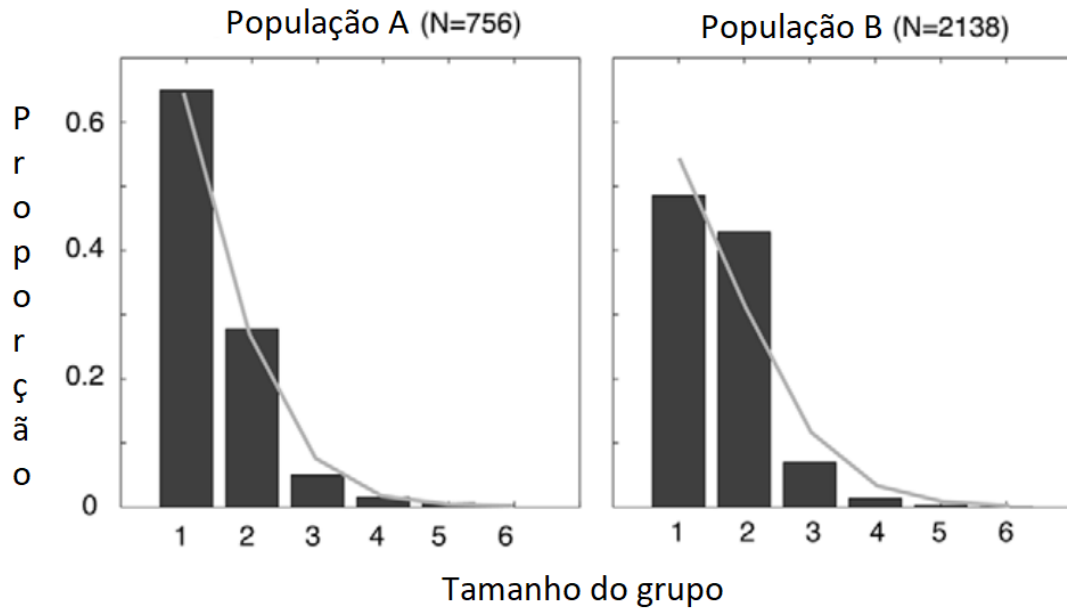


Fonte: Braun *et al.* (2003).

Moussaïd *et al.* (2010) realizaram observações de situações reais, com densidades baixa e moderada, e identificaram que até 70% das pessoas nas multidões analisadas andam em grupos, como amigos, casais e família (Figura 7). Eles também identificaram que esses grupos andam de modo a possibilitar a comunicação entre eles, tendendo a andarem lado-a-lado nas situações de baixa densidade e em formato de *V* ou de *U* nas situações de densidade moderada. Com base nisso, eles estenderam seu trabalho anterior (MOUSSAÏD *et al.*, 2009) para suportar a representação de grupos de indivíduos usando forças sociais. Nele, o conjunto de forças busca manter os membros do grupo próximos e visualizando uns aos outros, possibilitando a comunicação entre eles e convergindo de forma implícita para as formações geométricas observadas. O modelo apresenta como principal contribuição a abordagem de socialização implícita entre seus membros, mas não modela níveis distintos de relacionamentos entre seus membros nem possui capacidade de prevenção de colisão entre grupos.

¹ Informações sobre o conceito de máquina de estados finitos podem ser encontradas em <http://www.inf.ufsc.br/joao.dovicchi/pos-ed/pos/exerc/machines2.pdf>

Figura 7 – Distribuição dos tamanhos dos grupos observados em duas populações



Fonte: adaptado de Moussaïd *et al.* (2010).

Kountouriotis *et al.* (2014) apresentaram um modelo que mistura dinâmica de fluidos, que tem a característica positiva da alta rapidez no processamento, com o modelo de forças sociais, que permite modelar individualidades. No trabalho, os agentes são modelados com os traços: físicos, como massa e velocidade máxima; emocionais, como pânico, medo e estresse; de personalidade, como a tendência de ser um líder. Os agentes podem andar de forma independente ou em grupos, podendo exercer ou não a liderança do grupo com base em sua personalidade. Um ponto positivo do modelo é o balanceamento da rapidez de processamento com a capacidade de modelagem de individualidades, entretanto ele não modela níveis de relacionamentos entre os membros de um grupo nem a possibilidade dos grupos não possuírem um líder.

Jaklin *et al.* (2015) apresentaram um modelo baseado em grupos de pedestres que utiliza um planejamento de movimentação tanto global como local e uma estratégia de reagrupamento em caso de afastamento dos membros de um grupo. No que se refere à movimentação local, é usado um modelo de visão baseado em (MOUSSAÏD *et al.*, 2011) para fins de prevenção de colisão. Para a aproximação dos membros de um grupo e para o posicionamento deles de forma que possam se comunicar entre si, é usada uma abordagem de forças sociais baseada em (MOUSSAÏD *et al.*, 2010). A questão do reagrupamento é tratada fazendo o líder esperar pelos outros membros do grupo em um local de baixa densidade. Kremyzas *et al.* (2016) expandiram o trabalho de (JAKLIN *et al.*, 2015) alterando a estratégia de reagrupamento, de forma a permitir que a busca pelo líder não seja de forma individual, mas em subgrupos. A principal contribuição

do trabalho foi a introdução de uma estratégia de manutenção da coesão dos grupos a nível local e global, entretanto o trabalho não modela níveis de relacionamento entre os membros de um grupo nem a prevenção de colisão entre grupos.

Xie *et al.* (2016) propuseram uma abordagem de pequenos grupos em situações de emergência cujos membros possuem diferentes níveis de afinidades entre si. O trabalho é baseado em forças sociais e possui uma estratégia de reagrupamento em que um agente pode abandonar o grupo em busca de outro que está perdido. Essa decisão é dinâmica e é baseada no nível de afinidade entre os membros do grupo e no nível de risco, que varia com o passar do tempo. O principal diferencial do trabalho está na estratégia de reagrupamento em que um membro pode voltar para buscar outro que ficou para trás em vez de apenas esperar por ele. Algumas limitações do trabalho são que ele trata apenas grupos pequenos e não possui a capacidade de modelar grupos com líder.

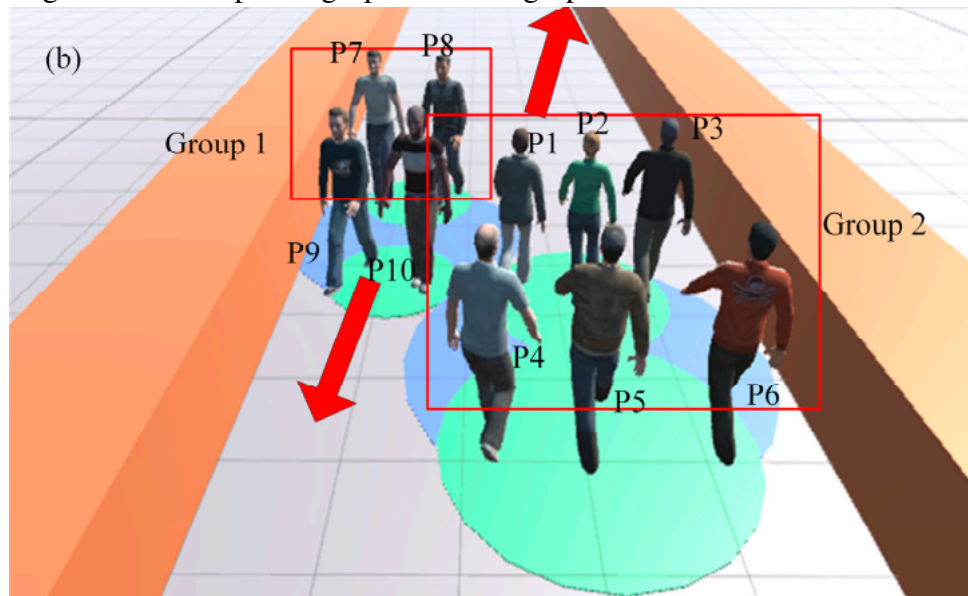
Li *et al.* (2017) propuseram um modelo de simulação de multidão que realiza agrupamento de indivíduos baseado na densidade desses indivíduos no ambiente e nos níveis de relacionamento entre eles. O trabalho utiliza forças sociais, incluindo forças para agrupamento dos pedestres, e uma abordagem de seguir o líder. Qin *et al.* (2018) simularam fluxos bidirecionais de pedestres em situação de evacuação. O modelo inclui representação de grupos e utiliza forças sociais para representar a atração entre os membros de cada grupo, atração esta que varia de acordo com o nível de relacionamento entre eles. Ambas as abordagens possuem limitação relacionada à inexistência de uma estratégia global para os membros de um grupo seguirem a mesma rota e não modelam grupos sem líder.

Liu *et al.* (2018) desenvolveram uma abordagem de evacuação guiada de multidão com o objetivo de reduzir o tempo de evacuação do ambiente através da utilização do conhecimento da estrutura do local armazenado em uma base centralizada. No modelo, os grupos são conjuntos de pessoas próximas que são guiadas por um líder, não possuindo necessariamente relações entre si. O modelo de forças sociais é usado, mas o objetivo dos membros do grupo não é chegar em um local específico, e sim chegar no líder. Este, por sua vez, possui um dispositivo de comunicação com a base centralizada, que gera as rotas, e seu objetivo é guiar o grupo para a saída do local. Uma limitação do modelo é que ele ignora os relacionamentos entre os membros de um grupo, considerando apenas sua localização física no ambiente e a proximidade aos líderes.

Huang *et al.* (2018) estenderam o modelo de (MOUSSAÏD *et al.*, 2010) para incluir a

capacidade de representação de subgrupos e a habilidade dos membros de um grupo se desviarem de outros grupos e indivíduos como um grupo, e não de forma individual, como ocorre no trabalho original (Figura 8). Entretanto, o modelo não apresenta a flexibilidade de modelar grupos com líder nem a capacidade de modelar níveis de relacionamento entre membros de um grupo.

Figura 8 – Exemplo de grupos com subgrupos e se desviando entre si



Fonte: Huang *et al.* (2018).

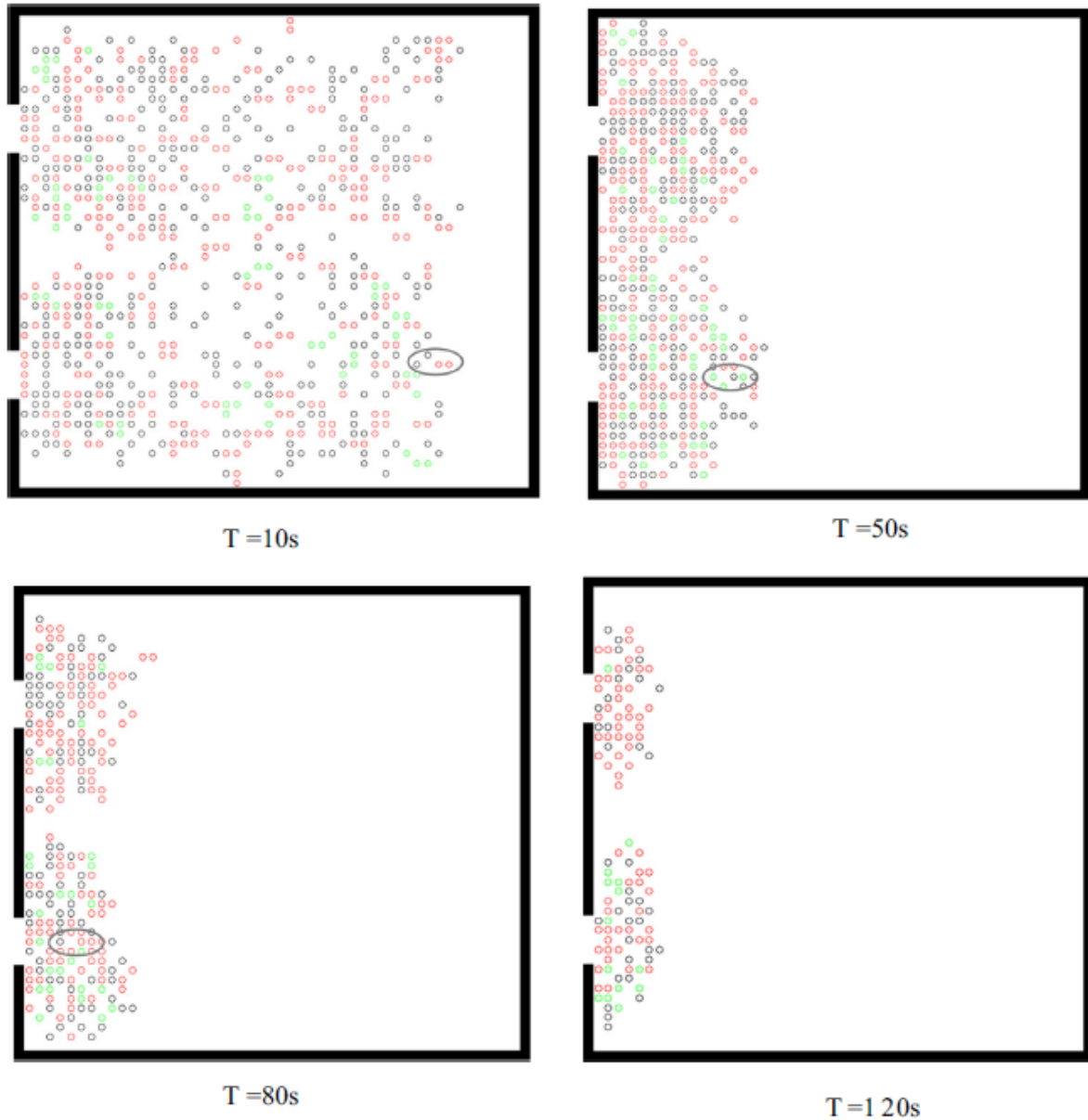
Os modelos baseados em autômato celular (LI *et al.*, 2019; JIAN *et al.*, 2014) funcionam com base em um ambiente discretizado em unidades chamadas células, no qual a movimentação dos agentes se dá com base nas células vizinhas. Esses modelos são muito utilizados por serem simples, eficientes e escaláveis, mas possuem limitações relacionadas a precisão e a como descrever o ambiente e comportamentos humanos (LI *et al.*, 2019).

Lu *et al.* (2017) propuseram um modelo de evacuação para grupos de pedestres estendendo o método de autômato celular e utilizando a regra comportamental de siga-o-líder, em que o grupo tem o líder como referência (Figura 9). Uma das limitações desse trabalho é que ele não modela níveis de relacionamentos entre os membros do grupo, o que pode reduzir o seu nível de realismo.

Chen *et al.* (2019) fizeram um estudo do comportamento de crianças em situação de evacuação não emergencial e propuseram um modelo baseado em autômato celular que considera o nível de congestionamento, a quantidade de obstáculos, a distância para a saída e o comportamento das crianças em grupo no processo de evacuação. Entretanto, o modelo não possui capacidade de representação de grupos com líder nem modela os níveis de relacionamento

entre os membros de um grupo.

Figura 9 – Exemplo de evacuação de multidão com grupos usando um método baseado em autômato celular



Fonte: Lu *et al.* (2017).

Os modelos baseados em velocidade (FIORINI; SHILLER, 1998; BERG *et al.*, 2008; BERG *et al.*, 2011) buscam evitar colisões com outros agentes e obstáculos em um futuro próximo através da extrapolação das trajetórias dos agentes, com base em suas posições e velocidades. Esses modelos possuem natureza paralelizável, tendo assim capacidade de tratar as colisões de forma eficiente. Entretanto, seu nível de realismo geralmente diminui ao aumentar a densidade da multidão e esses modelos tendem a ter dificuldade para tratar situações simétricas (DUTRA, 2015).

Karamouzas e Overmars (2012) propuseram um trabalho de grupos, com base no modelo baseado em velocidade, inspirados na abordagem de (MOUSSAÏD *et al.*, 2010). O trabalho utiliza otimização para a escolha de formações geométricas explícitas de acordo com as situações (Figura 10). Essas formações buscam o posicionamento dos indivíduos de forma que eles possam se comunicar entre si e ao mesmo tempo evitar colisões. As modelagens de formações de grupos explícitas, embora tentem reproduzir certos padrões comportamentais, podem gerar comportamentos um pouco artificiais. O modelo também tem como limitação o fato de lidar apenas com grupos pequenos.

Figura 10 – Exemplo de formações de grupos de três pessoas em situações de densidade baixa (esquerda), média (meio) e alta (direita)

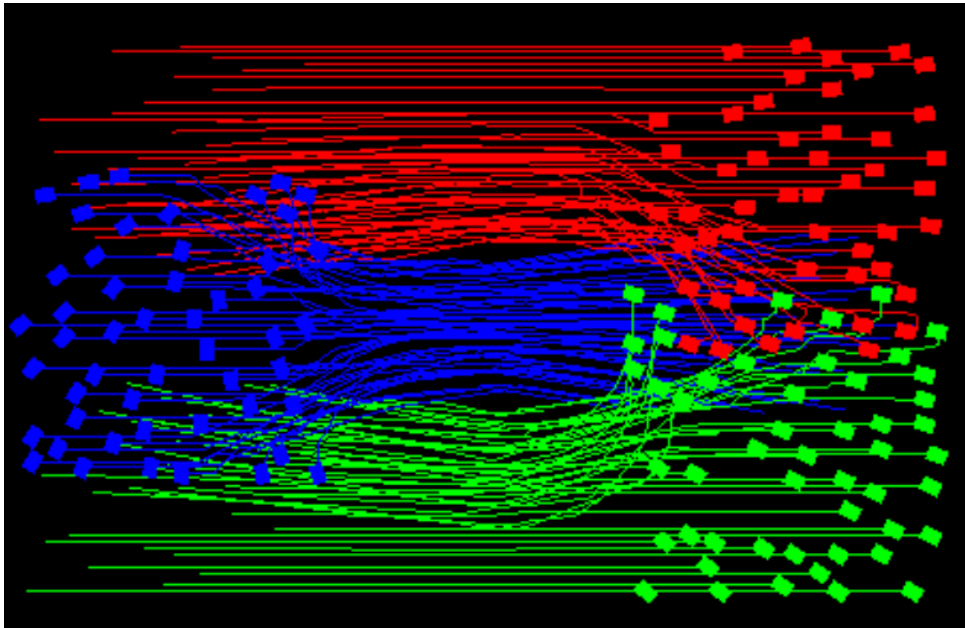


Fonte: Karamouzas e Overmars (2012).

He *et al.* (2016b) propuseram uma abordagem de modelagem de grupos com base no método baseado em velocidade ORCA (*Optimal Reciprocal Collision Avoidance*) (BERG *et al.*, 2011). O modelo possui capacidade de representar grupos que evitam colisões como grupos e não de forma individual (Figura 11). Ele consegue controlar também as distâncias entre os membros de um grupo e o espaço pessoal de cada agente. Uma limitação do trabalho é que ele não consegue simular um grande número de grupos. No mesmo ano, He *et al.* (2016a) apresentaram outro modelo de simulação de grupos, também baseado no algoritmo ORCA, com a capacidade de gerar grupos dinâmicos em relação ao número, ao tamanho e ao formato desses grupos. Entretanto, ambas as abordagens não modelam níveis de relacionamentos entre os membros de um grupo.

Ren *et al.* (2017) apresentaram um modelo de representação de grupos através da extensão da técnica RVO (*Reciprocal Velocity Obstacles*) (BERG *et al.*, 2008), que é uma abordagem baseada em velocidade, e do uso da estratégia de seguir o líder. No trabalho, é apresentada a possibilidade de representar diferentes tipos de grupos. Também é apresentada a capacidade dos grupos se modificarem com o tempo, reproduzindo comportamentos como subdivisões temporárias e indivíduos mudando de grupo. Uma limitação do trabalho é a não

Figura 11 – Exemplo de grupos grandes com capacidade de se desviarem entre si



Fonte: He *et al.* (2016b).

modelagem de uma estratégia a nível global que faça com que os membros do grupo sigam a mesma rota em ambientes complexos.

Knob *et al.* (2018) propuseram uma abordagem de modelagem de grupos de pedestres através de uma alteração do Biocrowds (BICHO *et al.*, 2012), que é um modelo de simulação de multidão baseado no algoritmo de colonização do espaço. O modelo incorpora fatores de personalidade baseados no método OCEAN (acrônimo para *Openness to experience, Conscientiousness, Extraversion, Agreeableness, Neuroticism*) (GOLDBERG, 1990), permitindo a geração de comportamentos distintos dos indivíduos dentro dos grupos. Entretanto, o trabalho não modela níveis de relacionamentos entre os membros dos grupos, sendo esses grupos formados pela proximidade de indivíduos com metas comuns.

2.2 Comparativo das abordagens

Os trabalhos relativos a grupos de pedestres costumam tratar a estrutura dos grupos, no que se refere à liderança, de uma forma não flexível. Eles geralmente utilizam uma abordagem sem líder ou com líder, mas não possuem a capacidade de representar ambas as formas com o mesmo modelo. Além disso, os trabalhos anteriores não tratam a questão da hierarquia de liderança, em que um grupo possui um líder e pode possuir níveis de subliderança. Esse é um aspecto que tende a ser ressaltado em situações em que a concentração de pessoas no ambiente é

alta. Muitos modelos também se limitam a representar grupos pequenos de pedestres, com no máximo 4 membros.

Outro aspecto não tratado pelos trabalhos anteriores é a capacidade de representação em um só modelo das relações entre os membros de um grupo em níveis distintos e da manutenção da coesão dos grupos a nível local e global. Através da modelagem de níveis de relacionamento entre os membros de um grupo, busca-se que dois membros fiquem mais próximos ao aumentar o nível de relacionamento entre eles. Com a modelagem da coesão de grupo, busca-se que seus membros tenham a capacidade de seguir a mesma rota em ambientes complexos, de se reagrupar caso seus membros se separem e de prevenir colisão como um grupo.

A abordagem proposta nesta dissertação trata essas questões, modelando grupos de tamanhos diversos e com possibilidade de representação desses grupos com diferentes níveis de coesão, com membros que possuem mais autonomia ou que são mais unidos na escolha de rotas e na prevenção de colisão. O modelo também representa níveis de relacionamentos distintos entre os membros de um grupo e possibilita a representação de grupos sem líder, com líder e com hierarquia de liderança, dando um caráter flexível ao modelo. Um resumo comparativo do modelo proposto com os anteriormente citados pode ser visualizado na Figura 12.

Figura 12 – Quadro comparativo das abordagens baseadas em grupos de pedestres

| Trabalho | Níveis de Relacionamentos | Flexibilidade (Liderança) | | | Flexibilidade (Tamanho) Grupos maiores (> 4 membros) | Coesão dos grupos | | | Modelo |
|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|------------------------------------|---|-------------------|-----------------------------------|----------------|------------------|
| | | Grupos com líder | Grupos sem líder | Grupos com hierarquia de liderança | | Reagrupamento | Prevenção de colisão entre grupos | Mesma rota (*) | |
| Musse; Thalmann, 2001 | Não | Sim | Não | Não | Sim | Sim | Não | Sim | Regras |
| Braun <i>et al.</i> , 2005 | Sim | Não | Sim | Não | Sim | Sim | Não | Sim | Forças |
| Moussaid <i>et al.</i> , 2010 | Não | Não | Sim | Não | Não | Sim | Não | Não | Forças |
| Kountouriotis <i>et al.</i> , 2014 | Não | Sim | Não | Não | Não | Sim | Não | Não | Forças |
| Jaklin <i>et al.</i> , 2015 | Não | Sim | Sim | Não | Não | Sim | Não | Sim | Forças/Visão |
| Xie <i>et al.</i> , 2016 | Sim | Não | Sim | Não | Não | Sim | Não | Não | Forças |
| Li <i>et al.</i> , 2017 | Sim | Sim | Não | Não | Sim | Sim | Não | Não | Forças |
| Huang <i>et al.</i> , 2018 | Não | Não | Sim | Não | Sim | Sim | Sim | Não | Forças |
| Qin <i>et al.</i> , 2018 | Sim | Sim | Não | Não | Sim | Sim | Sim | Não | Forças |
| Liu <i>et al.</i> , 2018 | Não | Sim | Não | Não | Sim | Sim | Não | Sim | Forças |
| Karamouzas; Overmars, 2012 | Não | Não | Sim | Não | Não | Sim | Sim | Não | Velocidade |
| He <i>et al.</i> , 2016b | Não | Sim | Não | Não | Sim | Sim | Sim | Não | Velocidade |
| He <i>et al.</i> , 2016a | Não | Sim | Não | Não | Sim | Sim | Sim | Não | Velocidade |
| Ren <i>et al.</i> , 2017 | Sim | Sim | Sim | Não | Sim | Sim | Sim | Não | Velocidade |
| Knob <i>et al.</i> , 2018 | Não | Não | Sim | Não | Sim | Não | Não | Não | Biocrowds |
| Lu <i>et al.</i> , 2017 | Não | Sim | Não | Não | Não | Sim | Não | Sim | Autômato Celular |
| Chen <i>et al.</i> , 2019 | Não | Não | Sim | Não | Não | Sim | Sim | Sim | Autômato Celular |
| Modelo Proposto | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim | Forças |

Fonte: elaborado pelo autor.

Nota: (*) nesse comparativo, foi considerado que os trabalhos que tratam apenas navegação local não possuem a funcionalidade *mesma rota* por necessitarem da inclusão de uma estratégia de nível global para garantir que seus membros sigam as mesmas rotas.

3 MÉTODO PROPOSTO

As pessoas em geral podem possuir diferentes tipos de relacionamento entre si e em intensidades distintas. Esses relacionamentos podem inclusive ser assimétricos, possuindo uma intensidade de um indivíduo A para um indivíduo B e uma intensidade diferente de B para A . Essas diferenças de relacionamentos podem gerar grupos com características e comportamentos bastante distintos. Por exemplo, esses relacionamentos podem afetar quem anda mais perto de quem dentro do grupo, o quão próximos os membros do grupo andam uns dos outros e a capacidade de seus membros se manterem unidos em situações adversas. Os relacionamentos também podem influenciar o nível de coesão dos grupos, como a necessidade de seus membros de seguirem juntos ou a liberdade de seguirem por caminhos alternativos, de forma mais independente. Dadas essas características, foram considerados alguns perfis de pedestres, como descrito na Seção 3.0.1, e alguns tipos de grupos, como descrito na Seção 3.1. Na Seção 3.2 são descritos os detalhes do modelo proposto.

3.0.1 Perfis dos agentes

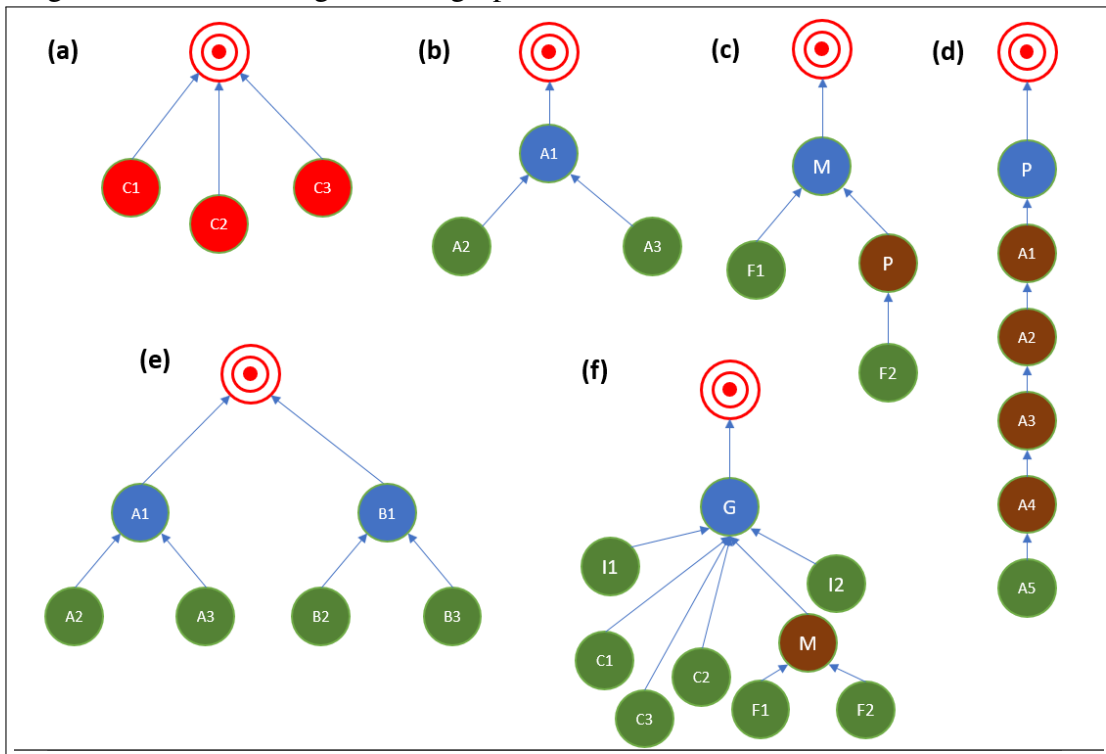
Neste modelo, foram considerados os seguintes perfis de pedestres em um grupo: *líder*, *seguidor*, *sublíder* e *membro autônomo*. Esses perfis são melhor descritos a seguir.

- **Líder:** seu objetivo é ir em direção a um local específico (meta), sendo o responsável por encontrar um caminho para o local de destino do grupo, ou de parte dele. Pode possuir vários seguidores. Na Figura 13, os membros em azul são líderes.
- **Seguidor:** seu objetivo é seguir seu líder l , tendo sua meta baseada na posição de l . Na Figura 13, os membros em verde são seguidores.
- **Sublíder:** é um líder e um seguidor ao mesmo tempo. Seu objetivo é baseado na posição seu líder l . Ele pode possuir vários seguidores. Na Figura 13, os membros em marrom são sublíderes.
- **Membro autônomo:** não possui líder nem seguidores. Seu objetivo é ir em direção a um local específico (meta). Na Figura 13, os membros em vermelho são autônomos.

3.1 Tipos de grupos

Neste modelo, foram considerados os seguintes tipos de grupos: *sem líder*, *com líder*, *com hierarquia de liderança* e *misto*. Nas próximas seções, serão abordadas as características e

Figura 13 – Perfis de agentes em grupos



Fonte: elaborado pelo autor.

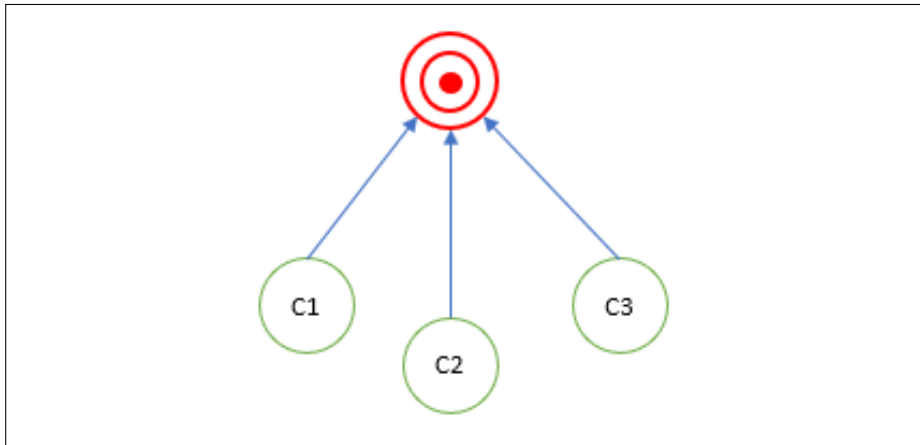
Nota: os agentes na cor vermelha representam membros autônomos dos grupos, os agentes na cor azul são líderes, os agentes em marrom representam sublíderes e os agentes na cor verde são seguidores.

o comportamento de cada um desses tipos de grupos.

3.1.1 Grupo sem líder

No grupo *sem líder*, os membros possuem papéis homogêneos, de forma que nenhum deles assume o papel de liderança. Como não há um líder, cada membro sabe para onde deve ir, mas tem interesse em se manter próximo aos outros membros do grupo, se possível. Nesse caso, espera-se que os membros tenham mais liberdade para seguirem por caminhos alternativos em certas situações, mas se reencontrando posteriormente. Para a modelagem de um *grupo sem líder*, todos os membros do grupo podem ser definidos como *autônomos*. Como exemplo, pode-se considerar um grupo de colegas c_1 , c_2 and c_3 , sem um líder, em que cada um segue em direção à meta comum de forma mais independente, mas que busca também se manter próximo dos outros. A Figura 14 exemplifica esse tipo de grupo.

Figura 14 – Exemplo de grupo *sem líder*, representando um grupo de colegas



Fonte: elaborado pelo autor.

Nota: grupo de três colegas *sem líder* entre si. Cada um deles segue em direção à meta, mas busca se manter próximo dos outros membros do grupo.

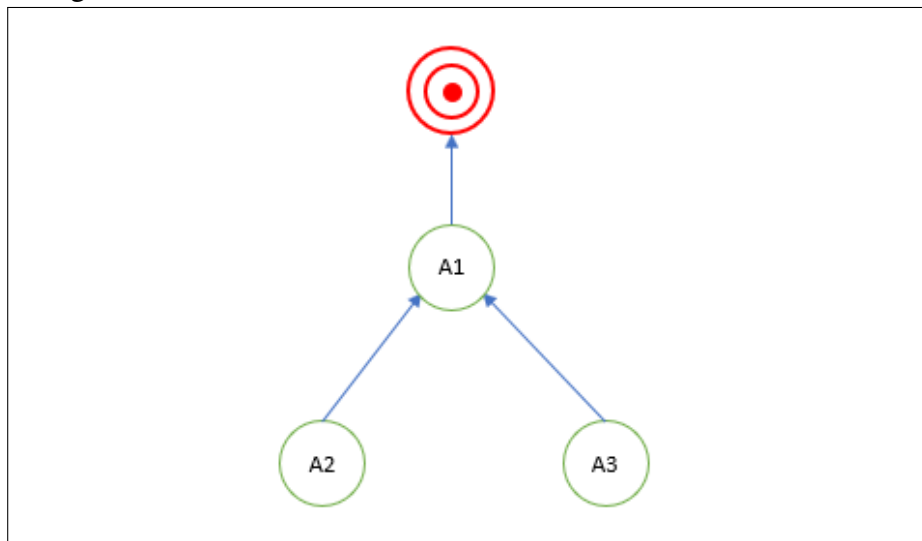
3.1.2 Grupo com líder

No grupo *com líder*, um dos integrantes possui um maior nível de influência sobre os outros e assume o papel do líder do grupo. Esse líder se torna então responsável por escolher a rota para o destino e os outros membros do grupo o seguem. Nesse tipo de grupo, os membros normalmente seguem a mesma rota e se desviam de outros indivíduos, grupos e obstáculos como um grupo coeso. Para representar um *grupo com líder*, um membro pode ser definido como líder e os outros como seguidores. Como exemplo, pode-se considerar um grupo de amigos a_1 , a_2 and a_3 , em que o amigo mais influente assume o papel de líder (a_1). A Figura 15 exemplifica esse tipo de grupo.

3.1.3 Grupo com hierarquia de liderança

Em um grupo *com hierarquia de liderança*, existe um líder e um ou mais sublíderes separados em níveis hierárquicos. Dessa forma, o líder define a rota do grupo e é seguido por outros membros e sublíderes. Esses sublíderes, por sua vez, podem ser seguidos por outros membros ou outros sublíderes, ajudando manter a coesão do grupo. Esse tipo de comportamento que tende a ser observado em alguns tipos de grupos e em situações de alta densidade, em que normalmente há o comportamento de uns seguirem os outros. Nesse tipo de grupo, os membros normalmente seguem a mesma rota e se desviam de outros agentes, grupos e obstáculos como um grupo coeso. Para modelar um *grupo com hierarquia de liderança*, é necessário ter um líder, líderes intermediários como sub-líderes e os membros restantes como seguidores. Como

Figura 15 – Exemplo de grupo *com líder*, representando um grupo de amigos



Fonte: elaborado pelo autor.

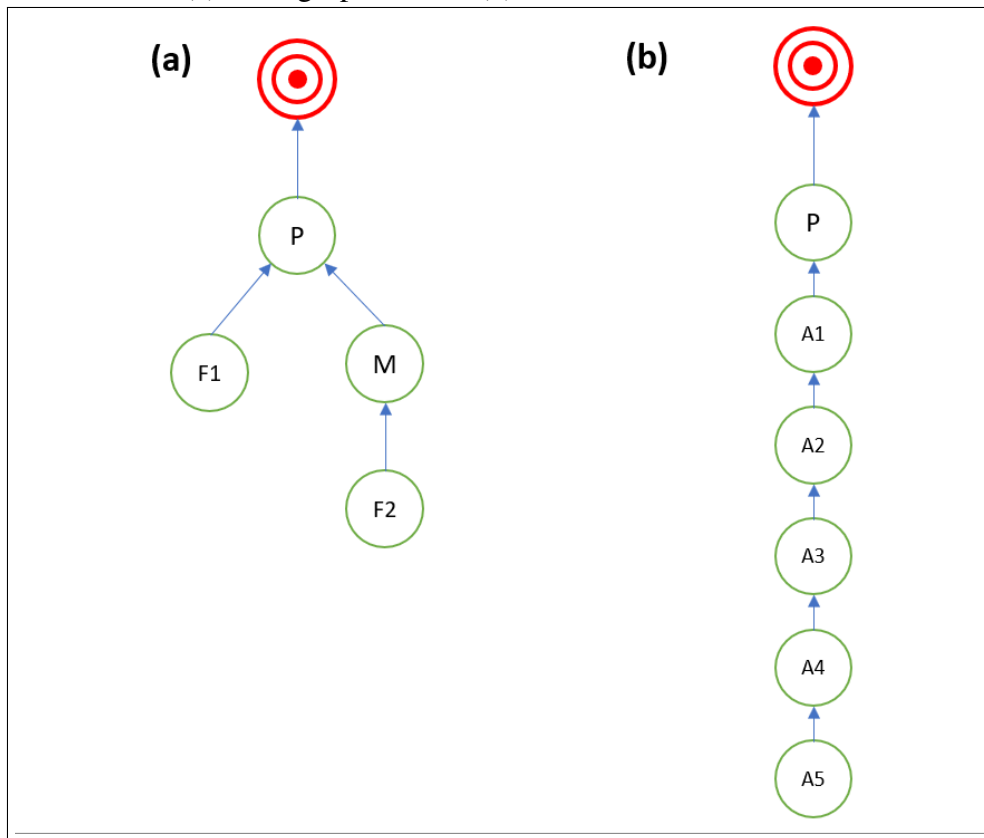
Nota: grupo de três amigos, em que A1 segue em direção à meta e A2 e A3 seguem o amigo A1.

exemplo, conforme ilustrado na Figura 16a, pode-se considerar uma família, em que o pai P e a mãe M assumem os papéis de líder e sublíder, e os filhos $F1$ e $F2$ os seguem. Em outro exemplo, conforme ilustrado na Figura 16b, tem-se um grupo escolar, em que o professor P e os alunos a_1 , a_2 , a_3 , a_4 e a_5 formam uma fila, gerando uma hierarquia em cascata.

3.1.4 Grupo misto

Em um grupo *misto*, podem coexistir subgrupos com características distintas, sendo possível encontrá-los sem líder, com líder ou com hierarquia de liderança. Dessa forma, um grupo *misto* pode possuir um ou mais líderes e um ou mais sublíderes, podendo apresentar comportamentos intermediários aos observados em grupos sem líder e com líder. Como exemplo de grupo com essa estrutura, pode-se considerar um grupo de amigos composto por dois subgrupos (a_1, a_2, a_3) e (b_1, b_2, b_3), em que os membros a_1 e b_1 são líderes de seus subgrupos (Figura 17a). Em outro exemplo (Figura 17b), tem-se um grupo turístico com um guia g como líder, dois subgrupos e membros independentes i_1 e i_2 que seguem o guia g . Um dos subgrupos é um composto por colegas (c_1, c_2 e c_3) e o outro é composto por uma família com a mãe m como líder e dois filhos f_1 e f_2 que a seguem.

Figura 16 – Exemplos de grupos *com hierarquia de liderança*, representando uma família (a) e um grupo escolar (b)



Fonte: elaborado pelo autor.

Nota: em (a) é representado um exemplo de família em que o pai P é o líder do grupo, a mãe M é uma sublíder e os filhos $F1$ e $F2$ seguem o pai e a mãe, respectivamente.

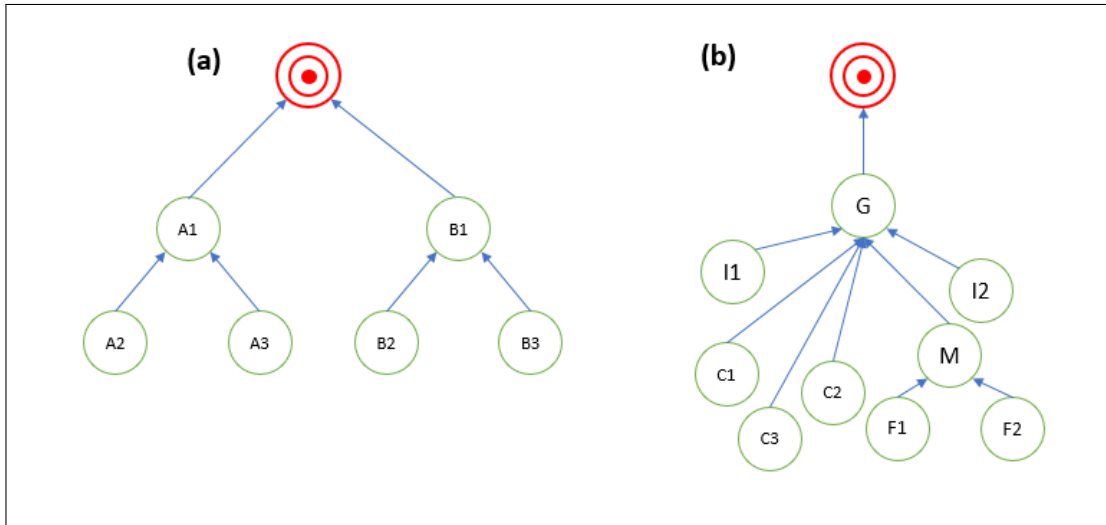
Nota: em (b) é representado um grupo escolar, composto por professor e cinco alunos em fila. O professor P é o líder do grupo e cada aluno é líder do que está imediatamente atrás dele.

3.2 Modelo

Para a representação dos grupos apresentados anteriormente na Seção 3.1, o modelo define um conjunto de perfis para os indivíduos, conforme apresentado na Seção 3.0.1. Para cada um desses perfis, há um conjunto de estados que os agentes podem assumir. Esses estados alteram o comportamento dos agentes, fazendo-os, por exemplo, ter como meta chegar a um local específico do ambiente ou se aproximar de seu líder. O estado do agente também pode fazer ele parar para esperar por outros membros que ficaram para trás a partir de uma certa distância e fazer ele voltar a seguir sua meta quando eles se aproximam.

Para um agente chegar a sua meta, pode ser calculada uma rota da sua posição até a meta considerando a estrutura estática do ambiente. Após isso, é aplicado um conjunto de forças sobre ele para: seguir em busca da meta; se desviar de outros agentes e obstáculos; se aproximar dos outros membros do grupo. Essa aproximação dos outros membros do grupo

Figura 17 – Exemplo de grupos *mistos*, representando um grupo de amigos com dois subgrupos (a) e um grupo turístico (b)



Fonte: elaborado pelo autor.

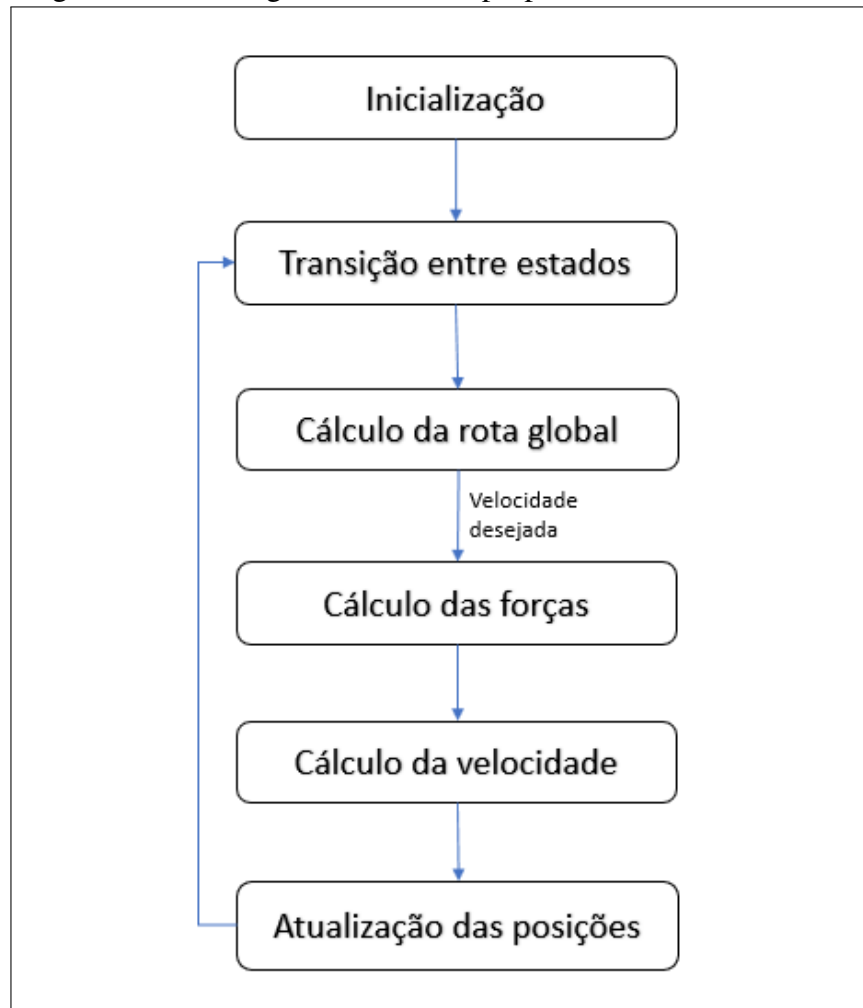
Nota: em (a) é representado um grupo de amigos com dois subgrupos contendo dois líderes A1 e B1.

Nota: em (b) é representado um grupo turístico formado: pelo guia G, que é o líder do grupo; por dois indivíduos I1 e I2; por um grupo de 3 colegas C1, C2 e C3, que não possuem liderança entre si, mas que seguem o guia; por uma família liderada pela mãe M e seguida por dois filhos F1 e F2.

é baseada nos seus níveis de relacionamento com eles. Em seguida, é realizado o cálculo da velocidade do agente, podendo ser aplicado um ajuste da sua velocidade para controlar sua aproximação em relação ao seu líder, caso ele tenha um. Esse ajuste visa melhorar o nível de realismo comportamental do grupo. Ao final de cada passo de tempo, ocorre a atualização das posições dos agentes através da soma do vetor posição corrente com o novo vetor velocidade.

Na Figura 18 há uma visão geral dos componentes do modelo. Na fase de *inicialização*, são definidos os parâmetros gerais do modelo e é realizada a configuração dos agentes e dos grupos. A forma de representação dos agentes é tratada na Seção 3.2.1. Na Seção 3.2.2 são discutidos os estados dos agentes e suas transições. A abordagem de *cálculo da rota* está descrita na Seção 3.2.3. A etapa de *cálculo das forças* está descrita na Seção 3.2.4. A fase de *cálculo da velocidade* e do seu respectivo ajuste está descrita na Seção 3.2.5.

Figura 18 – Visão geral do modelo proposto



Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.1 Representação dos agentes

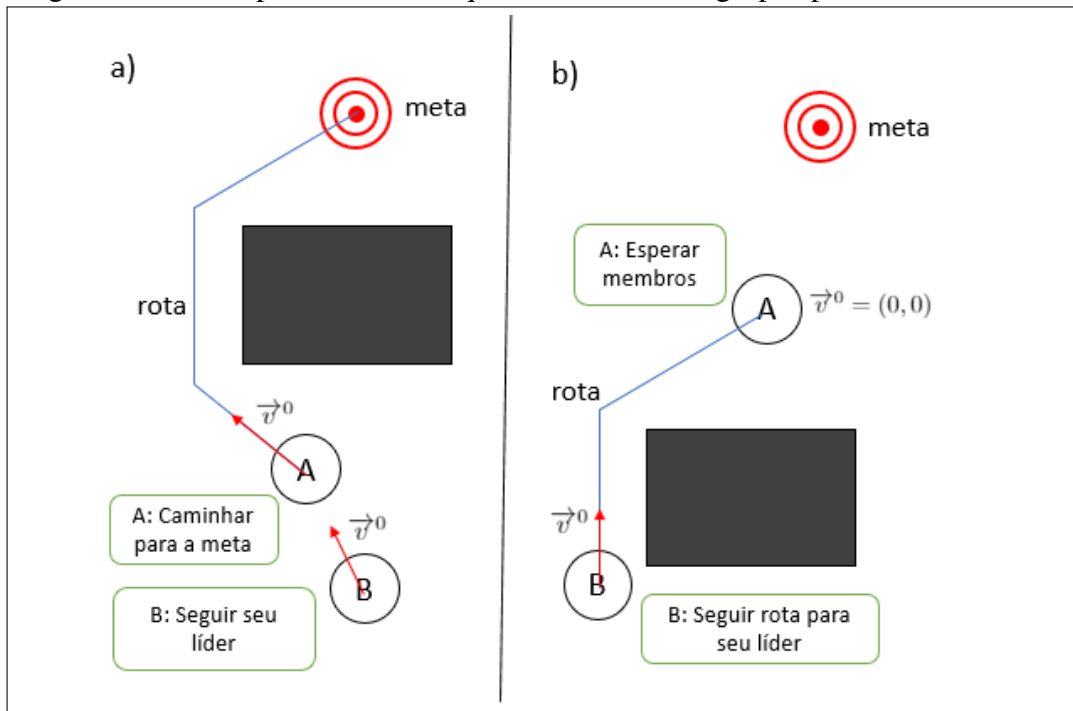
Neste trabalho, um agente i é representado por um círculo de raio r_i e centro \vec{x}_i . Sua velocidade corrente é \vec{v}_i e sua velocidade desejada é $\vec{v}_i^0 = s_i^0 \vec{e}_i^0$, em que s_i^0 é sua velocidade escalar desejada e \vec{e}_i^0 é o vetor unitário que representa sua direção desejada. O vetor unitário que aponta do centro do indivíduo i para o centro do agente j é dado por $\vec{e}_{ij} = (\vec{x}_j - \vec{x}_i) / \|\vec{x}_j - \vec{x}_i\|$ e a distância entre eles é $d_{ij} = \|\vec{x}_j - \vec{x}_i\| - (r_i + r_j)$. Entre os agentes i e j do mesmo grupo, existe um parâmetro R_{ij} , de entrada do modelo, que representa o nível de relacionamento de i em relação a j e que possui valor na faixa de $[0, 1]$.

3.2.2 Estados e transições

Os estados que um agente pode assumir variam de acordo com seu perfil. Esses estados definem se um agente deve parar para esperar por membros do grupo que ficaram para trás ou se ele deve seguir em direção à sua meta, seja ela um local específico do ambiente ou uma região próxima de seu líder, caso ele tenha um. O conjunto de estados definidos para os agentes, assim como exemplificado na Figura 19, são:

- **Caminhar para a meta:** o indivíduo i caminha em direção a um local específico do ambiente, que é sua meta. Para isso, ele calcula uma rota da sua posição para sua meta conforme descrito na Seção 3.2.3 e em seguida é aplicado o modelo de forças descrito na Seção 3.2.4.
- **Esperar membros:** o indivíduo i para e aguarda a aproximação de outros membros do grupo que estavam mais distantes da meta do que ele (retardatários). Nesse momento, sua velocidade desejada é $\vec{v}_i^0 = \vec{0}$.
- **Seguir seu líder:** o agente i (um sublíder ou um seguidor) caminha em direção ao seu líder l , de forma que sua meta é uma região no formato de um círculo centrado na posição corrente \vec{x}_l do seu líder l . O raio dessa região pode ser ajustado de acordo com a situação, mas para o presente trabalho, foi utilizado raio igual a $r_l + 2r_i + D_l$, que corresponde a uma área que cabe o líder, o seguidor, mais uma distância entre eles. Os parâmetros r_l e r_i são os raios do líder l e do indivíduo i , respectivamente, e D_l é um parâmetro de entrada do modelo que representa o valor do espaçamento ideal entre dois agentes. Nesse estado, não é calculada uma rota do agente i até sua meta, mas é utilizado diretamente o modelo de forças descrito na Seção 3.2.4, sendo que a posição do líder l é atualizada a cada passo de tempo.
- **Seguir rota para seu líder:** o agente i (um sublíder ou um seguidor) tem sua meta definida da mesma forma que no estado *seguir seu líder*, ou seja, uma região no formato de um círculo centrado na posição corrente \vec{x}_l do seu líder l . O agente i calcula então uma rota da sua posição para sua meta conforme descrito na Seção 3.2.3 e em seguida é aplicado o modelo de forças descrito na Seção 3.2.4. É importante destacar que este estado calcula uma rota global para o líder, evitando que ele fique "preso" sem conseguir alcançar seu líder, diferindo do estado *seguir seu líder*, que considera apenas a movimentação local. Caso esteja nesse estado e atinja sua meta, o agente i calcula novamente uma rota para a nova meta centrada na posição corrente \vec{x}_l do seu líder l .

Figura 19 – Exemplo dos estados que os membros do grupos podem assumir



Fonte: elaborado pelo autor.

Nota: em (a), o agente A, líder de B e no estado *caminhar para a meta*, segue uma rota para a sua meta, enquanto B, no estado *seguir seu líder*, tem seu objetivo baseado na posição de A. Em (b), o agente A, líder de B, no estado *esperar membros*, aguarda a aproximação de B. O indivíduo B, no estado *seguir rota para seu líder*, segue uma rota em direção a seu líder A.

Com o objetivo de manter o grupo unido, os indivíduos mais adiante podem parar para esperar por outros membros do grupo que ficaram para trás. Para o indivíduo i esperar por outro membro j , devem ser verdadeiras todas as seguintes condições: j é retardatário, ou seja, j está mais distante da meta do que i ; o agente i tem algum relacionamento com j , ou seja $R_{ij} > 0$, em que R_{ij} é um parâmetro de entrada do modelo; j está distante de i , acima de um limiar D_1 . Dessa forma, i só espera pelos membros retardatários que estão distantes dele e com quem ele tem algum relacionamento. Quando j se aproxima o suficiente de i , a partir de um limiar D_2 este deixa de esperar por j .

Quando não há mais nenhum membro j por quem i esteja esperando, i volta a caminhar para sua meta. De forma empírica, valores considerados satisfatórios para uso são: $D_2 = 2r_i(N - 2) + (N - 1)D_l$ e $D_1 = D_2 + M$. O valor atribuído a D_2 representa a distância entre o primeiro e o último membros do grupo quando enfileirados e separados um do outro pela distância D_l , que é o valor do espaçamento ideal entre dois agentes. O valor atribuído a D_1 representa o valor de D_2 mais a distância M , que é a margem de diferença entre parar para esperar e voltar a caminhar. N é o tamanho do grupo. D_l e M são parâmetros de entrada do

modelo.

Essas e outras mudanças de comportamento entre os agentes são controladas por transições entre os estados. Na Figura 20 são esquematizadas essas transições, que também são descritas com maiores detalhes a seguir:

– **Líder/Membro autônomo:**

- Estado inicial: *caminhar para a meta*.
- Do estado *caminhar para a meta*, o agente i muda para o estado *esperar membros* caso exista algum membro retardatário j tal que $d_{ij} > D_1$ e $R_{ij} > 0$.
- Do estado *esperar membros*, ele volta para o estado *caminhar para a meta* caso $d_{ij} < D_2$ para todos os membros retardatários j com $R_{ij} > 0$.

– **Sublíder:**

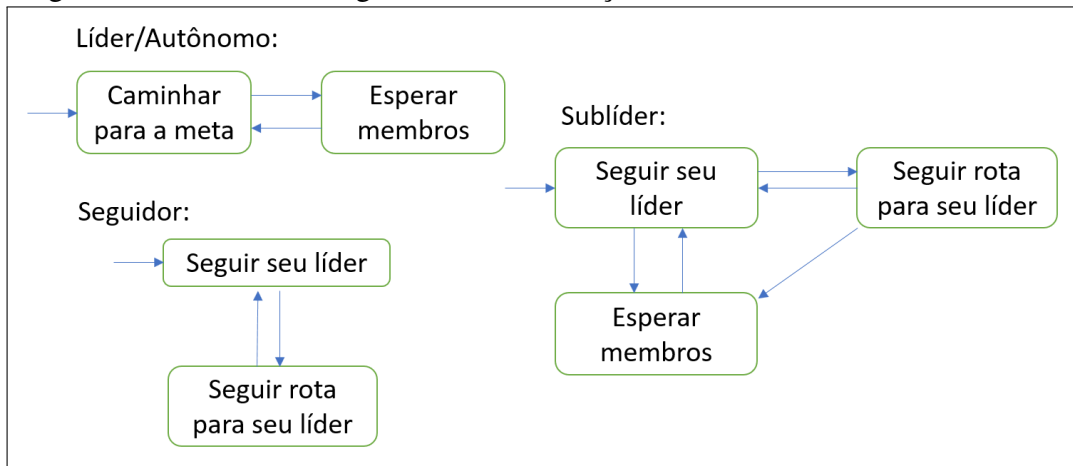
- Estado inicial: *seguir seu líder*.
- Do estado *seguir seu líder*, caso exista algum membro retardatário j tal que $d_{ij} > D_1$ e $R_{ij} > 0$, ele vai para o estado *esperar membros*. Senão, se seu líder não estiver visível, ele passa para *seguir rota para seu líder*. Considera-se que um membro j está visível para i caso não haja um obstáculo que intercepte a reta $\overrightarrow{x_i x_j}$ que liga seus centros.
- Do estado *esperar membros*, ele volta para o estado *seguir seu líder* caso $d_{ij} < D_2$ para todos os membros retardatários j com $R_{ij} > 0$.
- Do estado *seguir rota para seu líder*, caso exista algum membro retardatário j tal que $d_{ij} > D_1$ e $R_{ij} > 0$, ele vai para o estado *esperar membros*. Senão, caso seu líder esteja visível, ele passa para o estado *seguir seu líder*.

– **Seguidor:**

- Estado inicial: *seguir seu líder*.
- Do estado *seguir seu líder*, se seu líder não estiver visível, ele vai para o estado *seguir rota para seu líder*.
- Do estado *seguir rota para seu líder*, caso seu líder esteja visível, ele vai para o estado *seguir seu líder*.

Com essa configuração de estados e transições, pode-se modelar o comportamento de indivíduos esperando por retardatários do grupo. Pode-se representar também um indivíduo seguindo seu líder sem a necessidade de calcular uma rota global entre eles a cada passo de tempo. Essa rota entre eles é calculada quando o líder não está visível. Com isso, evita-se que

Figura 20 – Estados dos agentes e suas transições



Fonte: elaborado pelo autor.

um indivíduo tente atravessar paredes ou fique preso em mínimos locais, e ainda assim mantém a eficiência ao calcular essa rota apenas em situações necessárias.

3.2.3 Cálculo da rota

O estágio de *cálculo da rota* consiste na busca de um caminho do agente até sua meta e tem como saída a velocidade desejada do agente. Para o cálculo de rotas e a abordagem de como segui-la, pode ser utilizado qualquer algoritmo existente, por exemplo (OLIVA; PELECHANO, 2015; GERAERTS, 2010). A saída do algoritmo de seguir a rota é sua velocidade desejada \vec{v}_i^0 , a qual é utilizada como entrada para o modelo de forças descrito na Seção 3.2.4. Para fins de otimização, a rota só é calculada quando o agente entra nos estados *Caminhar para a meta* e *Seguir rota para seu líder*, ou quando ele atinge sua meta atual, ou quando o agente é empurrado para uma região fora da sua rota corrente. Nos outros casos o algoritmo apenas calcula a velocidade desejada com base na rota previamente calculada.

3.2.4 Modelo de Forças

O conjunto de forças aplicado sobre um indivíduo i do modelo é baseado na abordagem de Moussaïd et al. (MOUSSAÏD *et al.*, 2009; MOUSSAÏD *et al.*, 2010), com algumas alterações. Esse conjunto de forças é definido por:

$$\vec{F}_i = \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \vec{F}_i^0 + \sum_w \vec{F}_{iw} + \sum_j \vec{F}_{ij} + \vec{F}_i^{group}, \quad (3.1)$$

em que \vec{F}_i^0 é a força que representa a intenção do pedestre seguir na direção de seu objetivo com sua velocidade desejada, \vec{F}_{iw} é a força de repulsão exercida por um obstáculo w , como

uma parede ou uma coluna, \vec{F}_{ij} é a força de repulsão empreendida por um agente j e \vec{F}_i^{group} é o conjunto de forças responsável por manter o pedestre i próximo de seu grupo.

A força \vec{F}_i^0 é baseada na utilizada em (MOUSSAÏD *et al.*, 2009; MOUSSAÏD *et al.*, 2010) e é dada por:

$$\vec{F}_i^0 = S_i^D \frac{\vec{v}_i^0 - \vec{v}_i}{\tau}, \quad (3.2)$$

sendo que τ é uma constante que indica o tempo de relaxamento que o agente i leva para adaptar sua velocidade atual para sua velocidade desejada. S_i^D é um novo fator proposto neste trabalho para determinar o nível de insistência do indivíduo i de seguir em direção à sua meta, aumentando seu valor a cada passo de tempo que ele não consegue avançar o mínimo desejado em direção à sua meta e diminuindo seu valor caso ele esteja conseguindo se aproximar da meta. Esse fator pode, por exemplo, modelar uma situação em que um indivíduo tenta passar por um fluxo de pedestres, e espera com paciência inicialmente, mas ao perceber que o fluxo não diminui vai perdendo a paciência até chegar um ponto em que ele entra de uma vez no meio do fluxo, podendo chegar a empurrar os outros pedestres, como exemplificado na Figura 21. O fator S_i^D possui um valor que pode variar de 1 a $S^{D_{max}}$ e seu valor só aumenta caso o agente i queira se deslocar pelo ambiente. Dessa forma, temos:

$$S_i^D(t) = \begin{cases} \text{Min}(S^{D_{max}}, S_i^D(t-1) + I) & \text{se } D_i^G(t-1) - D_i^G(t) < D_D \text{ e } s_i^0 \neq 0 \\ \text{Max}(1, S_i^D(t-1) - I) & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (3.3)$$

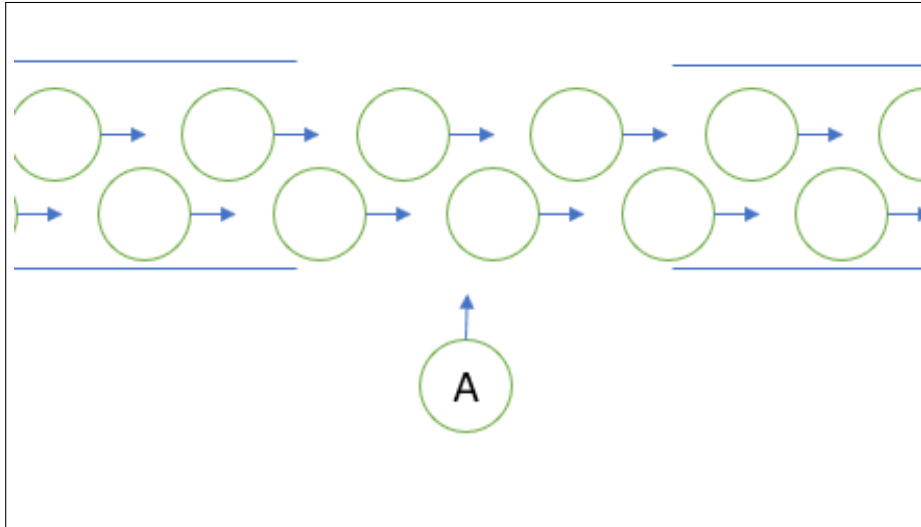
de maneira que $S^{D_{max}}$ é o valor máximo de insistência e I é a variação da insistência que pode ocorrer a cada passo de tempo t . $D_i^G(t)$ é a distância do agente i para sua meta no passo de tempo t e D_D é a redução desejada de distância para a meta, de forma que a insistência do agente pode aumentar caso ele não se aproxime de sua meta em pelo menos D_D metros e pode diminuir caso contrário. $S^{D_{max}}$, I e D_D são parâmetros de entrada do modelo. O valor inicial de S_i^D é 1.

\vec{F}_{iw} é a força de repulsão exercida sobre o agente i devido a um obstáculo w . Ela é a mesma força usada em (MOUSSAÏD *et al.*, 2009; MOUSSAÏD *et al.*, 2010) e é dada por uma função exponencial da distância entre o agente e o obstáculo:

$$\vec{F}_{iw} = a e^{-d_{iw}/b} \vec{e}_{wi}, \quad (3.4)$$

em que a e b são parâmetros do modelo, $d_{iw} = \|\vec{x}_{wi} - \vec{x}_i\| - r_i$ é a distância entre o agente i e o obstáculo w , no qual \vec{x}_{wi} é o ponto do objeto w mais próximo do indivíduo i , $\vec{e}_{wi} = (\vec{x}_{wi} - \vec{x}_i) / \|\vec{x}_{wi} - \vec{x}_i\|$ é o vetor unitário que aponta de \vec{x}_{wi} para \vec{x}_i , e o número de Euler é

Figura 21 – Exemplo de indivíduo tentando passar por um fluxo denso de pedestres



Fonte: elaborado pelo autor.

Nota: à medida que o tempo vai passando, o pedestre A fica mais ansioso, aumentando as chances de ele forçar passagem pelo fluxo através do uso do fator de insistência S_A^D .

representado por e . Maiores detalhes sobre essa força podem ser encontrados em (MOUSSAÏD *et al.*, 2009).

A força de repulsão \vec{F}_{ij} de um indivíduo j sobre outro i é dada pela equação:

$$\vec{F}_{ij} = \vec{f}_{ij} + \vec{f}_{ij}^{body} + \vec{f}_{ij}^{friction}, \quad (3.5)$$

tal que \vec{f}_{ij}^{body} e $\vec{f}_{ij}^{friction}$ são as forças *body force* e *sliding friction force* definidas em (HELBING *et al.*, 2000), que entram em ação quando ocorre colisão entre os dois agentes. Essas forças serão melhor descritas mais à frente nesta seção. A força \vec{f}_{ij} é usada para prevenção de colisão entre os agentes i e j e é baseada em (MOUSSAÏD *et al.*, 2009), mas conforme o modelo de grupos de (MOUSSAÏD *et al.*, 2010), essa força atua apenas quando i e j pertencem a grupos distintos. Dessa maneira, tem-se que:

$$\vec{f}_{ij} = -pA e^{\frac{-d_{ij}}{B}} [e^{-(n'B\theta')^2} \vec{t}_{ij} + k e^{-(nB\theta')^2} \vec{n}_{ij}]. \quad (3.6)$$

Dentre esses elementos, A , n e n' são parâmetros de entrada. A direção de interação \vec{t}_{ij} entre os agentes i e j é dada por $\vec{t}_{ij} = \vec{D}_{ij}/\|\vec{D}_{ij}\|$, em que $\vec{D}_{ij} = \lambda(\vec{v}_i - \vec{v}_j) + \vec{e}_{ij}$ e λ é um parâmetro do modelo. \vec{n}_{ij} é o vetor unitário ortogonal a \vec{t}_{ij} orientado à esquerda, dado por $\vec{n}_{ij} = (-t_{ij}^y, t_{ij}^x)$. O ângulo entre \vec{t}_{ij} e \vec{e}_{ij} é θ , e com a aplicação de um viés a esse ângulo tem-se $\theta' = \theta + B\varepsilon$, em que ε é um parâmetro do modelo que representa uma tendência de desvio para a esquerda ou a direita. O sinal do ângulo θ' é representado por k e $B = \gamma\|\vec{D}_{ij}\|$,

sendo que γ é um parâmetro do modelo. Uma descrição mais detalhada sobre essa força de repulsão entre dois agentes pode ser encontrada em (MOUSSAÏD *et al.*, 2009).

Para o presente trabalho, o parâmetro p foi adicionado à força \vec{f}_{ij} do modelo de (MOUSSAÏD *et al.*, 2009) para incluir um peso que diminui a força caso o agente j esteja atrás de i . Dessa forma, tem-se que $p = p_1$ caso o ângulo absoluto formado entre \vec{e}_{ij} e \vec{v}_i seja maior que $\pi/2$ e $p = 1$ caso contrário. p_1 é uma constante de valor entre 0 e 1. Caso se tenha $p_1 = 1$, a força se comporta de forma equivalente à do modelo original. Outro ajuste realizado é que é definido $\vec{f}_{ij} = (0, 0)$ caso se tenha $s_i^0 = 0$, ou seja, a força atua apenas caso o agente i tenha a intenção de se movimentar pelo ambiente.

As forças \vec{f}_{ij}^{body} e $\vec{f}_{ij}^{friction}$, definidas em (HELBING *et al.*, 2000), foram incluídas neste trabalho para a modelagem de eventuais colisões entre os indivíduos i e j , evitando que eles se atravessem, como ocorre nos modelos de (MOUSSAÏD *et al.*, 2009; MOUSSAÏD *et al.*, 2010). Com isso, visa-se aumentar o nível de realismo do modelo proposto. Portanto, essas forças atuam apenas quando os agentes i e j colidem, sendo dadas por:

$$\vec{f}_{ij}^{body} = k_1 g(-d_{ij}) \vec{e}_{ij} \quad (3.7)$$

e

$$\vec{f}_{ij}^{friction} = k_2 g(-d_{ij}) \Delta v_{ji}^t \vec{t}g_{ij}, \quad (3.8)$$

em que k_1 e k_2 são constantes, $\vec{t}g_{ij} = (-e^y, e^x)$ é o vetor unitário ortogonal a \vec{e}_{ij} orientado à esquerda e $\Delta v_{ji}^t = (\vec{v}_j - \vec{v}_i) \vec{t}g_{ij}$ é a projeção da velocidade relativa sobre $\vec{t}g_{ij}$. Como essas forças atuam apenas em caso de colisão, existe a função $g(x) = 0$, se $d_{ij} > 0$ e $g(x) = x$, caso contrário. Mais detalhes sobre as forças \vec{f}_{ij}^{body} e $\vec{f}_{ij}^{friction}$ podem ser encontradas em (HELBING *et al.*, 2000).

O modelo de forças de grupo \vec{F}_i^{group} é um conjunto de forças responsável por manter os agentes do grupo próximos uns dos outros, sendo definido por:

$$\vec{F}_i^{group} = \vec{F}_i^{att} + \vec{F}_i^{rep} + \vec{F}_i^{det}. \quad (3.9)$$

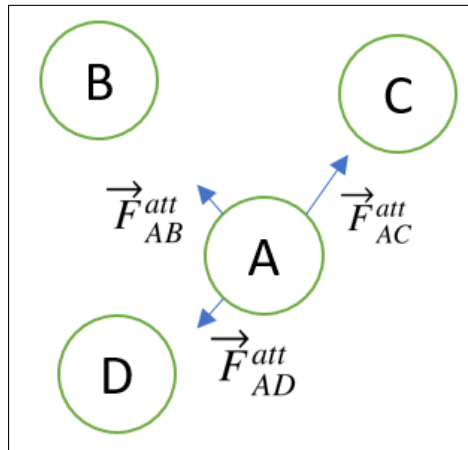
A força \vec{F}_i^{att} , proposta neste trabalho, representa a atração do indivíduo i pelos outros membros do grupo e é dada por:

$$\vec{F}_i^{att} = \sum_j R_{ij} C_A \vec{e}_{ij}, \quad (3.10)$$

em que C_A e R_{ij} são parâmetros que definem, respectivamente, a magnitude da força \vec{F}_i^{att} e a intensidade da relação entre o agente i e o agente j , que é um valor que varia entre 0 e 1. Essa força só atua sobre o agente caso ele queira se mover, ou seja, quando $s_i^0 \neq 0$, e quando a distância entre os agentes i e j é maior que um valor D_A .

Essa força de atração \vec{F}_i^{att} no modelo original de Moussaïd *et al.* (2010) representa apenas uma força de atração do indivíduo i para o centro do grupo. No presente modelo é possível representar as relações entre os membros do grupo, com base no parâmetro R_{ij} , permitindo que as pessoas com relacionamento mais estreito andem de forma mais próxima e seja mais difícil afastá-las durante o deslocamento, como exemplificado na Figura 22. É possível, por exemplo, modelar um forte relacionamento de uma mãe com seu filho, evitando que eles se distanciem durante o trajeto. Para isso, pode-se modelar a mãe como líder do filho e definir um valor alto para o parâmetro de relacionamento R_{ij} entre os dois.

Figura 22 – Exemplo de forças de atração de intensidades diferentes entre os membros de um grupo



Fonte: elaborado pelo autor.

Nota: o indivíduo A é atraído de forma mais intensa por C do que por B e D devido a um nível mais elevado de relacionamento com ele.

A força \vec{F}_i^{rep} foi adicionada para evitar a colisão do indivíduo i com outros membros do seu grupo e sua definição foi retirada de (MOUSSAÏD *et al.*, 2010), sendo definida por:

$$\vec{F}_i^{rep} = \sum_k \vec{F}_{ik}^{rep} = \sum_k h(d_{ik}) C_R \vec{e}_{ki}, \quad (3.11)$$

em que o indivíduo k é membro do mesmo grupo de i . C_R é um parâmetro do modelo que representa a intensidade da repulsão, \vec{e}_{ki} é o vetor unitário que aponta do pedestre k para o pedestre i e existe uma função $h(x)$ para aplicar a força apenas quando os dois estão próximos o suficiente, a uma distância de até D_R , de forma que $h(x) = 1$ caso $d_{ik} < D_R$ e $h(x) = 0$ caso

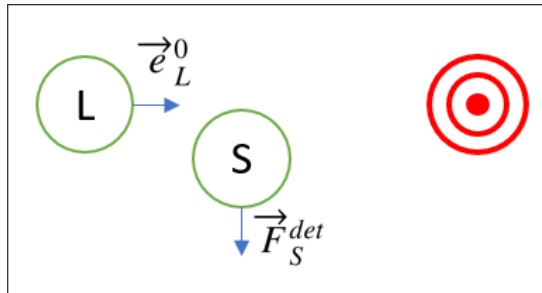
contrário. A força de repulsão \vec{F}_{ik}^{rep} é igual a zero caso k seja líder de i , sendo essa aproximação entre eles controlada pelo método descrito na Seção 3.2.5.

A força de desvio \vec{F}_i^{det} (Figura 23) é uma nova força incluída para evitar que o indivíduo i atrapalhe seu líder l de prosseguir para sua meta. Ela atua sobre o agente i de forma tangencial em relação à direção desejada de seu líder. Essa força é definida por:

$$\vec{F}_i^{det} = \begin{cases} SC_D \cos(\Theta) \vec{p}, & \text{se } d_{il} < D_D \text{ e } |\Theta| < \frac{\Pi}{2} \\ \vec{0}, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (3.12)$$

de forma que essa força existe apenas se a distância d_{il} entre eles for menor que um limiar D_D e o valor absoluto do ângulo Θ formado entre a direção \vec{e}_{li} do líder l para o pedestre i e a direção desejada do líder \vec{e}_l^0 for menor que $\Pi/2$. O ângulo Θ é positivo caso \vec{e}_{li} esteja à direita de \vec{e}_l^0 e é negativo caso contrário. S é o sinal de Θ e \vec{p} é o vetor unitário ortogonal a \vec{e}_l^0 orientado à esquerda. C_D é um parâmetro do modelo que define a intensidade da força.

Figura 23 – Exemplo da força de desvio sendo aplicada



Fonte: elaborado pelo autor.

Nota: a força de desvio é aplicada ao indivíduo S de forma que ele dê passagem ao seu líder L .

3.2.5 Cálculo da velocidade

Dada a aceleração $\frac{d\vec{v}_i}{dt} = \vec{F}_i$ obtida na Seção 3.2.4, a nova aceleração do agente i é dada por $\vec{\alpha} = \min(|\vec{F}_i|, \alpha^{max})(\vec{F}_i/|\vec{F}_i|)$, tal que α^{max} é sua aceleração escalar máxima. Dessa forma, a nova velocidade do agente i é dada por: $\vec{v}_i^{new} = \vec{v}_i + \vec{\alpha}T_s$, sendo que T_s é o tempo de um passo da simulação.

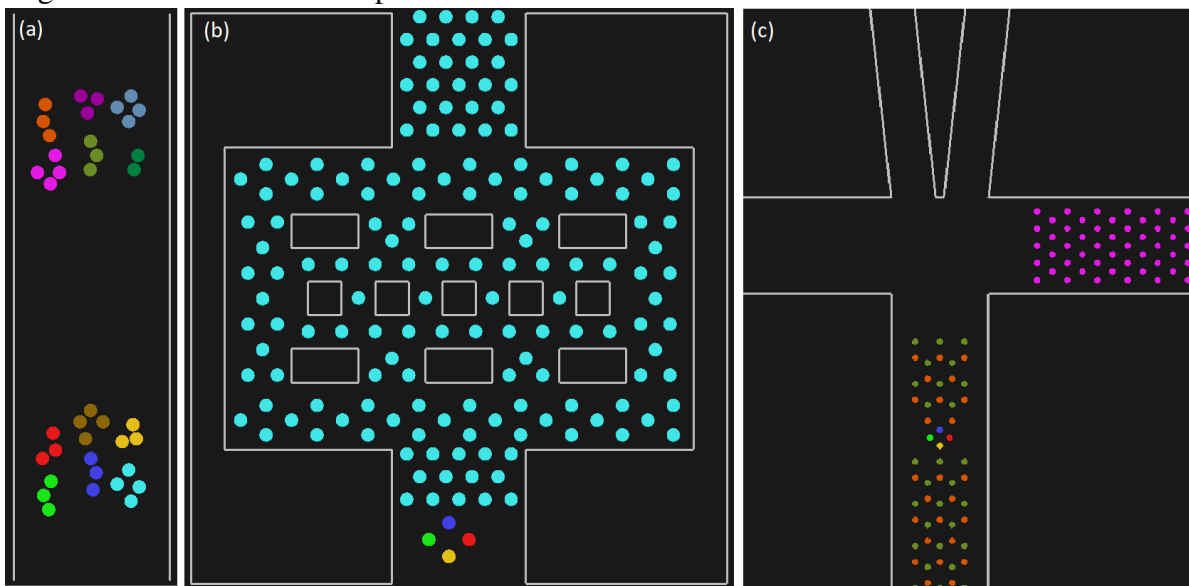
Com o objetivo de evitar que os seguidores colidam com seus líderes, foi incluído neste trabalho um fator de ajuste dessa velocidade. Ele é aplicado quando o agente i não colidiu com outro agente ou com um obstáculo e está se aproximando de seu líder l . Para isso, é calculada a distância mínima d_{il}^{min} necessária para que o indivíduo i reduza de sua velocidade s_i para a velocidade de seu líder s_l usando sua desaceleração máxima $-\alpha^{max}$. Assim, tem-se

$d_{il}^{min} = (s_l^2 - s_i^2)/(-2\alpha^{max})$. Caso d_{il}^{min} seja maior que a distância esperada entre eles no próximo passo de tempo d_{il}^{new} , considerando o agente i com a nova velocidade s_i^{new} e seu líder com a velocidade corrente s_l , então é aplicada a desaceleração máxima sobre a velocidade \vec{v}_i^{new} do pedestre i .

4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Com o objetivo de demonstrar as funcionalidades do modelo proposto, foi realizada uma série de experimentos. Foram também realizados testes comparativos com o modelo de Moussaïd *et al.* (2010) para demonstrar as melhorias do modelo proposto. Os experimentos foram realizados nos seguintes cenários, como ilustrado na Figura 24: a) *corredor de fluxo bidirecional*; b) *sala com obstáculos*; c) *cruzamento com bifurcação*. Em cada um desses cenários, foram realizados vários experimentos com o objetivo de validar as características do modelo relativas a: flexibilidade de modelagem de grupos, com tamanhos, estruturas e níveis de relacionamentos distintos; representação da insistência dos indivíduos; capacidade de reagrupamento dos membros dos grupos; capacidade de gerar grupos com comportamentos distintos, prevenindo colisões e seguindo rotas de forma mais coesa ou de forma mais autônoma.

Figura 24 – Cenários dos experimentos realizados



Fonte: o autor.

Nota: (a), (b) e (c) representam respectivamente os cenários de *corredor de fluxo bidirecional*, *sala com obstáculos* e *cruzamento com bifurcação*.

No cenário de *corredor de fluxo bidirecional* (Figura 24 (a)), há grupos que seguem em direções opostas em um corredor. Nesse cenário, são analisadas qualitativamente as funcionalidades do modelo relacionadas à prevenção de colisão. São também observados diferentes tipos de grupos e se eles possuem mais capacidade de se desviar como grupos coesos ou se seus indivíduos possuem mais autonomia para prevenir colisões, agindo de forma mais independente.

No cenário *sala com obstáculos* (Figura 24 (b)), há um ambiente mais complexo, e um grupo deseja atravessar esse ambiente com obstáculos estáticos, junto a um fluxo considerável

de outros pedestres independentes entre si. Nesse cenário, é observada a melhoria obtida com a inclusão do fator de insistência ao modelo de forças de Moussaïd *et al.* (2009), que é o modelo de forças base utilizado em Moussaïd *et al.* (2010). Esse fator aumenta o nível de insistência que o indivíduo tem de seguir em direção à sua meta caso esteja tendo dificuldade de fazê-lo. Esse é um fator importante em simulações de pedestres, especialmente nas que envolvem grupos, ainda que não seja considerado na maioria nos modelos existentes atualmente. Nesse mesmo cenário, também é demonstrada a possibilidade que o modelo tem de gerar grupos cujos membros seguem as mesmas rotas ou que são mais autônomos e que têm mais liberdade para seguirem por caminhos alternativos e se reagruparem posteriormente.

No cenário de *cruzamento com bifurcação* (Figura 24 (c)), há dois fluxos de pedestres caminhando em direções perpendiculares entre si. Esses fluxos se encontram em um cruzamento, sendo que em uma das direções existe uma bifurcação. Nesse cenário são analisadas quantitativamente algumas métricas do modelo em testes com grupos de estruturas distintas e é observada a capacidade desses grupos atravessarem um fluxo de alta densidade, que é algo bem relevante e impactante em simulações de multidões e muitas vezes negligenciado nos modelos existentes. Nesse cenário, ainda é demonstrada a capacidade de reagrupamento do modelo, em que um grupo mais à frente para e espera pelos membros que ficaram para trás, e a manutenção da maior proximidade dos indivíduos com maior nível de relacionamento.

O modelo proposto foi implementado em linguagem C++, utilizando o Visual Studio 2015, no sistema operacional Windows 10. Para dar suporte à implementação, foi usado o Menge (CURTIS *et al.*, 2016), que é um *framework* de simulação de multidão multiplataforma, extensível e modular. Ele possui uma infraestrutura que permite a implementação de uma solução para um subproblema específico através da utilização de *plugins* e facilita a comparação entre modelos distintos. Entretanto, apesar dessas vantagens, a utilização do Menge trouxe alguns pontos negativos, como o aumento do nível da complexidade do desenvolvimento da solução, pois como o *framework* se propõe a ter um uso para diversas abordagens de simulação de multidão, ele traz consigo uma estrutura complexa. Algumas customizações necessárias se mostraram simples e práticas, enquanto outras se mostraram bastante complexas ou custosas. Abaixo, seguem algumas limitações derivadas do uso do Menge:

- Não foi possível alterar o formato dos visual dos agentes com base em seu perfil. Em relação a esse item, o framework representa os agentes usando o mesmo padrão visual, que são círculos. Com base nisso, neste trabalho foram utilizados círculos de cores diferentes

para representar agentes com funções distintas.

- Neste trabalho, não foi implementada uma solução de planejamento de rotas a nível global, pois não era o foco do mesmo, apesar de o *framework* permitir essa customização. Então, foi utilizada a técnica que vem implementada por padrão no Menge que se baseia no caminho mais curto. O inconveniente dessa técnica é que ela não considera aspectos dinâmicos da simulação, como caminhos com alta densidade de pessoas e caminhos com baixa densidade. Com isso, pode-se perceber um comportamento menos realista nos experimentos, em especial no experimento de *sala com obstáculos*, ao ver os agentes buscarem sempre o mesmo caminho mais curto, mesmo tendo caminhos livres um pouco mais longos.

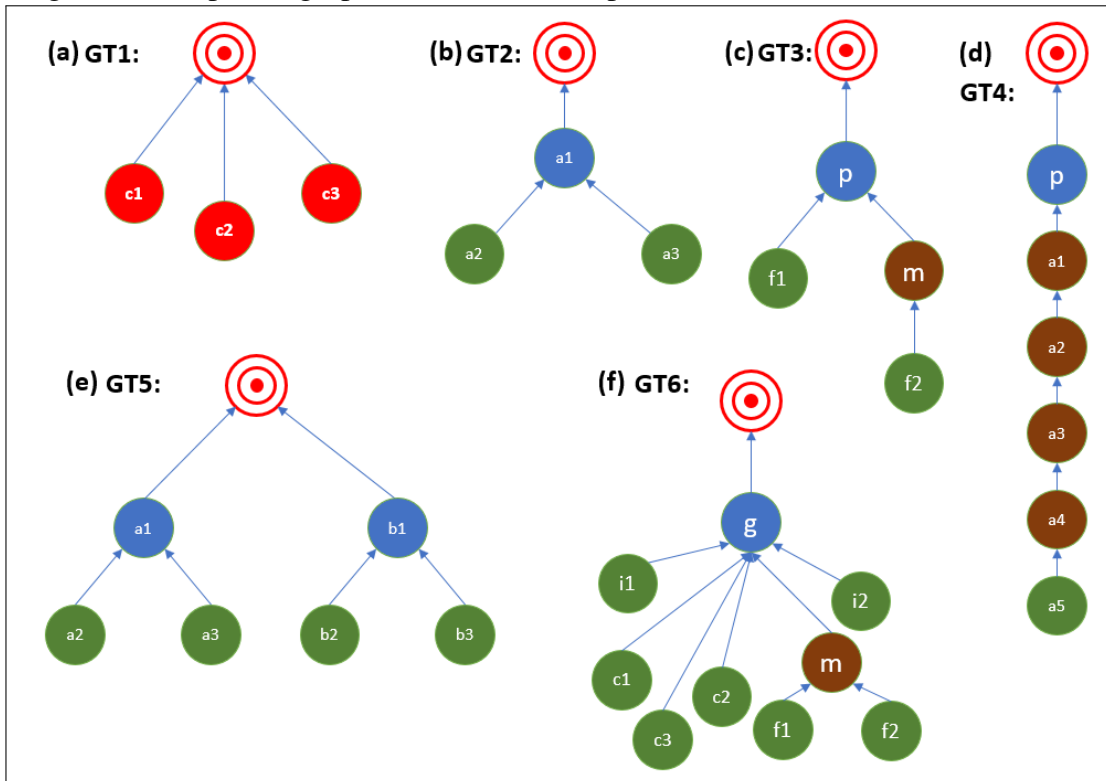
Na implementação realizada, não foi feita paralelização e nem otimizações para torná-la mais eficiente, entretanto o modelo proposto pode ser paralelizável para execução com maior rapidez. Para a realização dos testes, foram utilizados os seguintes parâmetros:

- raio dos agentes $r = 0,24m$;
- tempo de cada passo da simulação de $0,05s$;
- velocidade desejada $s^0 = 1,34m/s$, velocidade máxima de $5m/s$ e aceleração máxima $\alpha^{max} = 5m/s^2$;
- $\tau = 0,5s$, $S_{max}^D = 4$, $I = 0,05$ e $D_D = 0,005m$ para a força \vec{F}_i^0 ;
- $a = 10$ e $b = 0,1$ para \vec{F}_{iw} ;
- $A = 3,5$, $p_1 = 0,3$, $n = 2$, $n' = 3$, $\varepsilon = 0,005$ e $\gamma = 0,35$ para \vec{f}_{ij} ;
- $k_1 = 80$ e $k_2 = 160$ para \vec{f}_{ij}^{body} e $\vec{f}_{ij}^{friction}$, respectivamente;
- $C_A = 6$ e $D_A = 0,2m$ para \vec{F}_i^{att} ;
- $C_R = 4$ e $D_R = 0,1m$ para \vec{F}_i^{rep} ;
- $C_D = 4$ e $D_D = 0,5m$ para \vec{F}_i^{det} ;
- a margem de diferença entre parar para esperar e voltar a caminhar $M = 1m$;
- espaçamento ideal entre dois agentes $D_I = 0,15m$.

Os parâmetros r e s^0 foram escolhidos com base em Jaklin *et al.* (2015), os parâmetros τ , a , e b foram atribuídos com base em Moussaïd *et al.* (2010), e n , n' , ε e γ foram definidos a partir de Moussaïd *et al.* (2009). Os demais parâmetros foram escolhidos com base em observações sobre as simulações realizadas. Para fins de comparação, foi implementado o modelo de Moussaïd *et al.* (MOUSSAÏD *et al.*, 2010) e usados os parâmetros do trabalho deles. Como esse modelo é apenas local, não possuindo estratégia de movimentação global, foi incluída

uma abordagem básica de navegação global para os testes desse modelo, em que cada indivíduo calcula sua rota independentemente dos demais membros do grupo, mas com o mesmo objetivo final. Todos os parâmetros aqui definidos podem ser alterados ou adaptados, dependendo de alguma característica desejada da simulação. Nos experimentos, foram realizados testes com diversos tipos de grupos, conforme ilustrado na Figura 25.

Figura 25 – Tipos de grupos utilizados nos experimentos



Fonte: elaborado pelo autor.

Nota: (a) *GT1* representa um grupo *sem líder*, podendo ser formado, por exemplo, por colegas ou amigos (c1, c2 e c3). (b) *GT2* representa um grupo *com líder*, em que um deles é o líder (a1) e os outros são seguidores (a2 e a3), podendo ser formado, por exemplo, por amigos. (c) *GT3* representa um grupo *com hierarquia de liderança* em que o líder *p* possui mais de um seguidor (f1 e m), sendo que um deles é um sublíder (m), que é seguido por outro membro (f2), podendo representar, por exemplo, uma família composta por um pai, uma mãe e dois filhos. (d) *GT4* é também um grupo *com hierarquia de liderança*, em que há um líder *p*, alguns sublíderes (a1, a2, a3 e a4) e um seguidor (a5), em formato de fila, podendo representar, por exemplo, um grupo escolar com um professor e alunos. (e) *GT5* é um *grupo misto*, formado por dois subgrupos, em que cada subgrupo tem um líder (a1 e b1) e um conjunto de seguidores (a2, a3, b2 e b3), podendo representar, por exemplo, dois subgrupos de amigos. (f) *GT6* é um *grupo misto*, formado por um líder e alguns subgrupos, podendo formar, por exemplo, um grupo turístico, em que há um guia *g* como líder, dois agentes *i1* e *i2* que são independentes em relação ao resto do grupo, mas que seguem o guia *g*, um subgrupo de colegas *c1*, *c2* e *c3* sem líder entre si, mas que seguem *g*, e um grupo com líder em que a mãe *m* segue o guia *g* e os filhos *f1* e *f2* a seguem.

Nota: os agentes na cor vermelha representam membros autônomos dos grupos, os agentes na cor azul são líderes, os agentes em marrom representam sublíderes e os agentes na cor verde são seguidores.

Nota: As setas indicam para onde os agentes querem ir, seja em direção a outro agente ou em direção a um local no ambiente, sendo este representado por um alvo vermelho.

4.1 Corredor de fluxo bidirecional

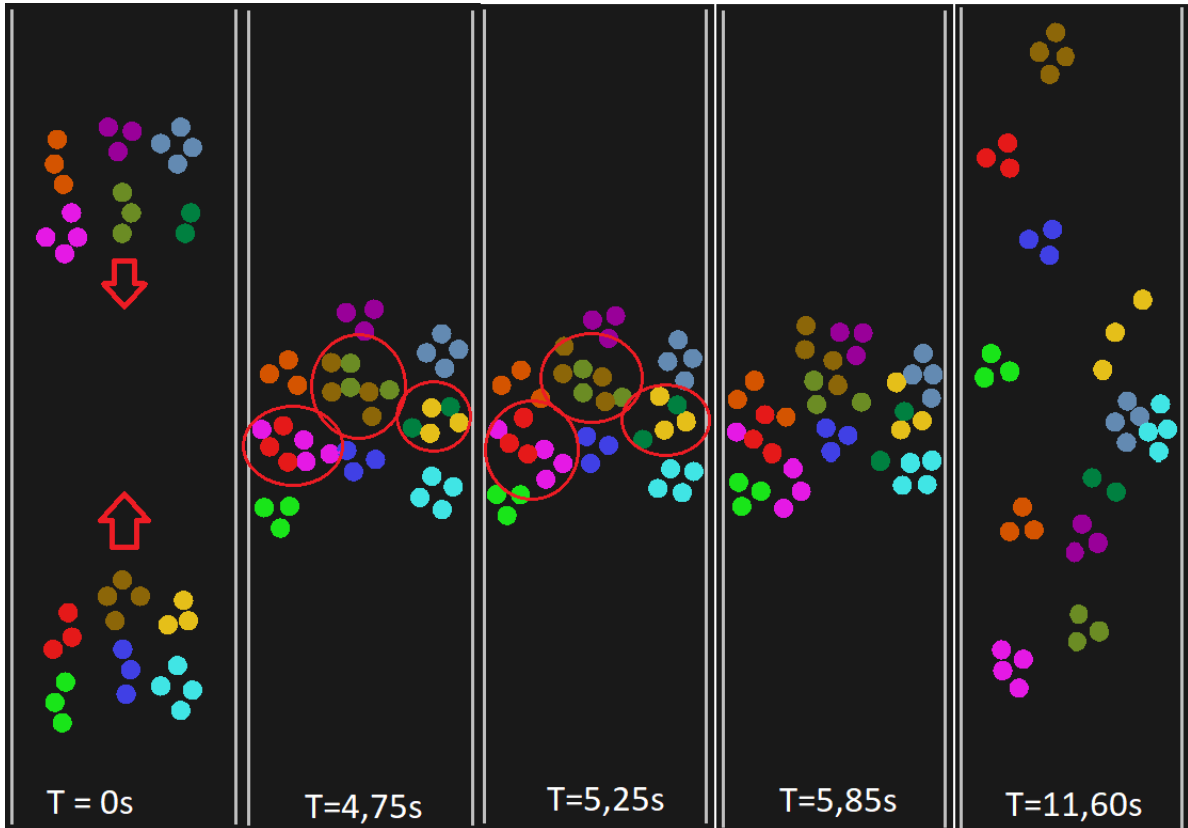
Um aspecto interessante do comportamento de grupos de pedestres, que não é tratado por diversos trabalhos de simulação de grupos, é a capacidade de prevenção de colisão entre grupos, e não apenas entre indivíduos. Este trabalho proposto apresenta a flexibilidade de se modelar tanto grupos com capacidade de se desviar de outros pedestres, grupos e obstáculos de forma mais coesa quanto grupos cujos membros são menos ligados e possuem mais autonomia para evitar colisões e se reagruparem posteriormente.

Com o objetivo de validar essa capacidade no modelo proposto, foram realizadas simulações em um corredor de 5.5m x 20m com 12 diferentes grupos de agentes, em que 6 grupos sobem e 6 grupos descem, com base nos tipos de grupos definidos na Figura 25. Foram realizados os seguintes experimentos:

- A1) todos são grupos *sem líder*, do tipo *GT1*, que utilizam o modelo proposto;
- A2) todos são grupos baseados no modelo de Moussaïd *et al.* (2010);
- A3) todos são grupos *com líder*, do tipo *GT2*, que utilizam o modelo proposto;
- A4) todos são grupos *com hierarquia de liderança*, sendo 4 do tipo *GT3* e 8 do tipo *GT4*, que utilizam o modelo proposto.

No experimento A1 (Figura 26), todos os grupos são *sem líder*, do tipo *GT1*, e são baseados no modelo proposto. O nível de relacionamento entre dois indivíduos i e j do mesmo grupo é de $R_{ij} = 0, 2$. Nesse cenário, é possível identificar que os membros dos grupos possuem certa autonomia para prevenir colisões, pois em alguns momentos parte dos membros se afastam dos outros membros de seu grupo para não colidirem com indivíduos de outros grupos. Após a situação de prevenção de colisão, os membros dos grupos se reaproximam. A partir dessas observações, é possível perceber que, para esse tipo de grupo, pode ocorrer certo entrelaçamento entre os grupos, fazendo com que ocorra uma maior separação entre os membros dos grupos nesses momentos. Nesse aspecto, esse tipo de grupo se assemelha ao modelo de Moussaïd *et al.* (2010), pois os indivíduos possuem mais autonomia para evitarem colisões. O experimento com o modelo de Moussaïd *et al.* (2010) está descrito em maiores detalhes mais adiante. A Figura 26 mostra alguns pontos-chave do experimento, com destaques nos momentos em que ocorre certo entrelaçamento entre os grupos.

Figura 26 – Experimento A1: simulação de grupos *sem líder*, do tipo *GT1*, utilizando o modelo proposto, no cenário de *corredor de fluxo bidirecional*



Fonte: o autor.

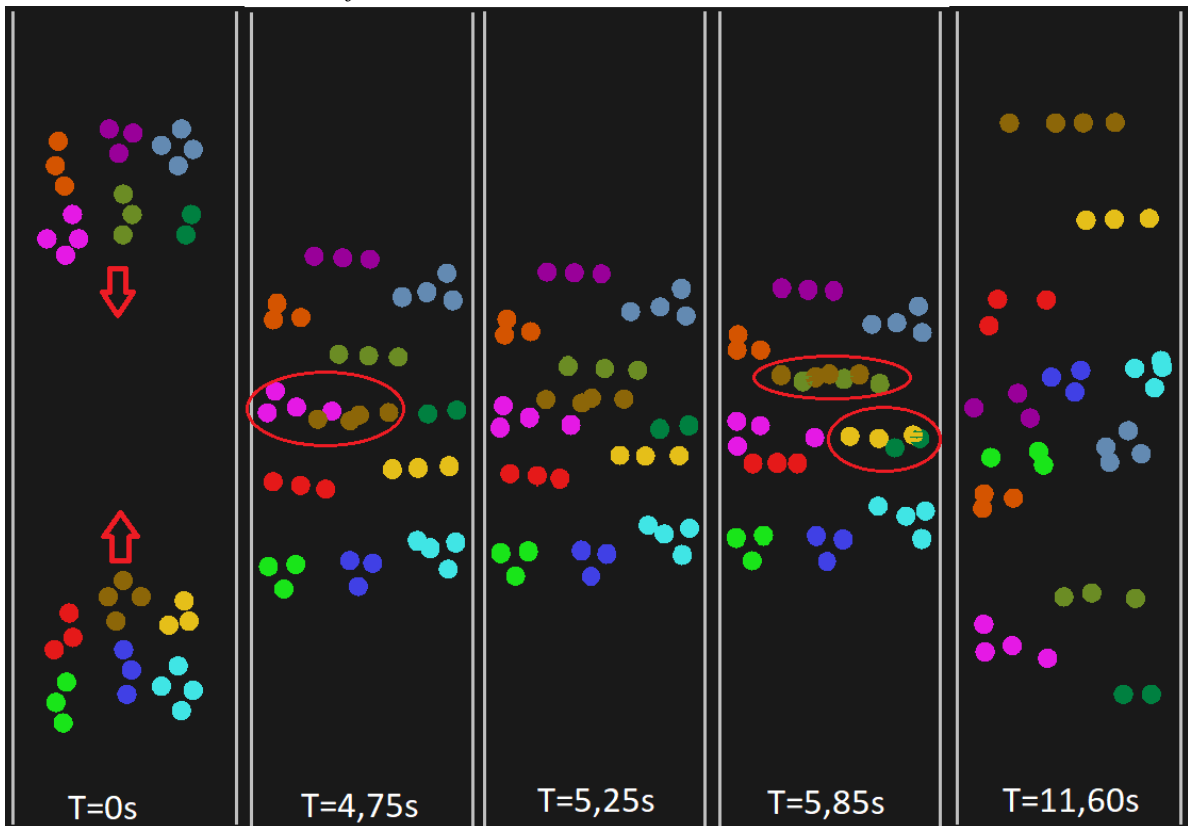
Nota: cada cor representa um grupo distinto.

Nota: a linha do tempo segue da esquerda para a direita.

Nota: nas imagens, há destaque para os pontos em que há certo entrelaçamento entre os grupos, demonstrando que, nos grupos sem líder, os membros possuem mais autonomia para se separarem e depois se reagruparem.

No experimento A2 (Figura 27), todos os grupos utilizam o modelo de Moussaïd *et al.* (2010). Nesse caso, é possível identificar que os membros dos grupos possuem certa autonomia para prevenir colisões, assim como no modelo proposto com grupos *sem líder*. Outro ponto que é possível perceber ao utilizar esse modelo é que, pelo fato de não existir uma representação da colisão propriamente dita no modelo de Moussaïd *et al.* (2010), os indivíduos acabam se atravessando em alguns momentos, como fantasmas, o que é algo não desejável.

Figura 27 – Experimento A2: simulação de grupos usando o modelo de Moussaïd *et al.* (2010) no cenário de *corredor de fluxo bidirecional*



Fonte: o autor.

Nota: cada cor representa um grupo distinto.

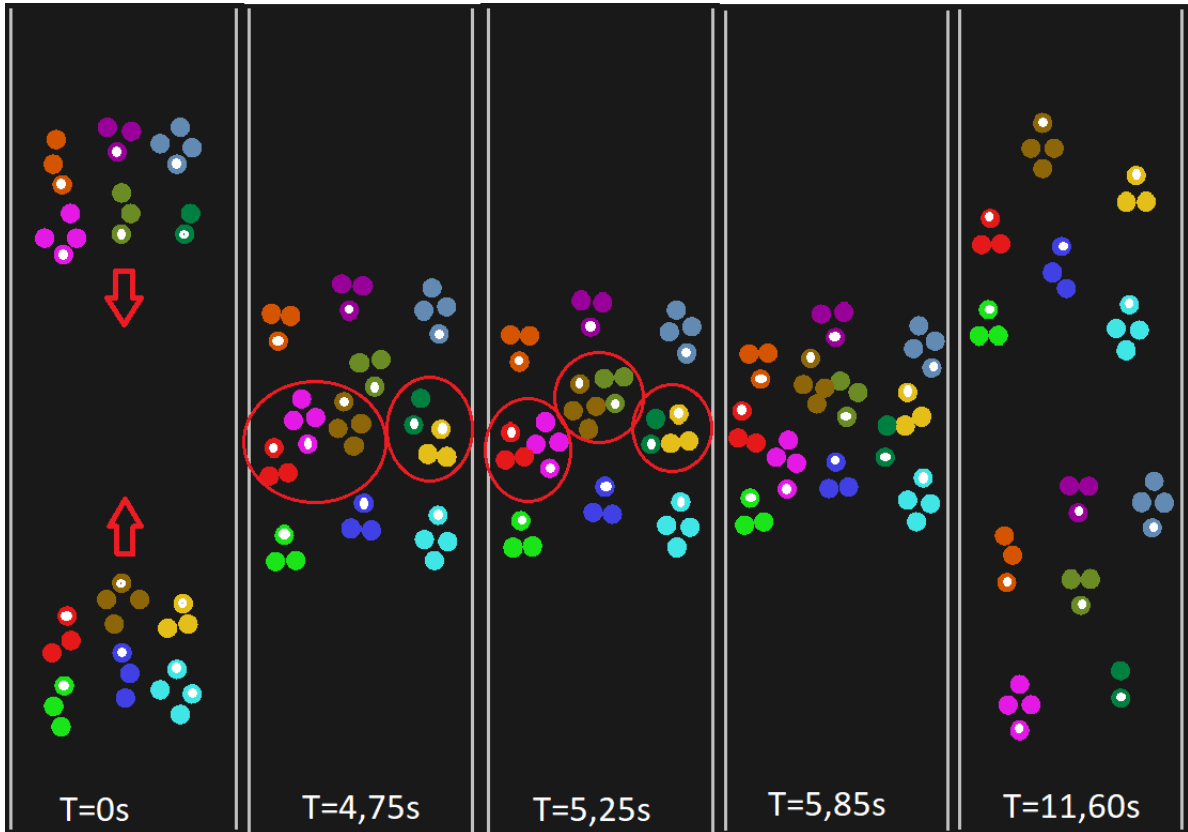
Nota: a linha do tempo segue da esquerda para a direita.

Nota: nas imagens, há destaque para os pontos em que há certo entrelaçamento entre os grupos, demonstrando que, nos grupos do modelo de Moussaïd *et al.* (2010), os membros possuem mais autonomia para se separarem e depois se reagruparem.

Nota: também é possível ver nas imagens que os indivíduos, em alguns momentos, atravessam uns aos outros, pois o modelo não representa colisões.

No experimento A3 (Figura 28), todos os grupos são *com líder*, do tipo *GT2*. No experimento A4, (Figura 29), todos os grupos são *com hierarquia de liderança*, sendo 4 grupos do tipo *GT3* e 8 do tipo *GT4*. Os grupos dos experimentos A3 e A4 utilizam o modelo proposto e o nível de relacionamento entre dois indivíduos i e j do mesmo grupo é de $R_{ij} = 0,2$ para ambos os experimentos. Nos dois experimentos, é possível perceber que os grupos se desviam entre si, agindo de forma mais coesa, pois possuem as figuras do líder/sublíder como referência. Nas observações não foram identificados casos de entrelaçamentos entre os grupos.

Figura 28 – Experimento A3: simulação de grupos *com líder*, do tipo *GT2*, utilizando o modelo proposto no cenário de *corredor de fluxo bidirecional*



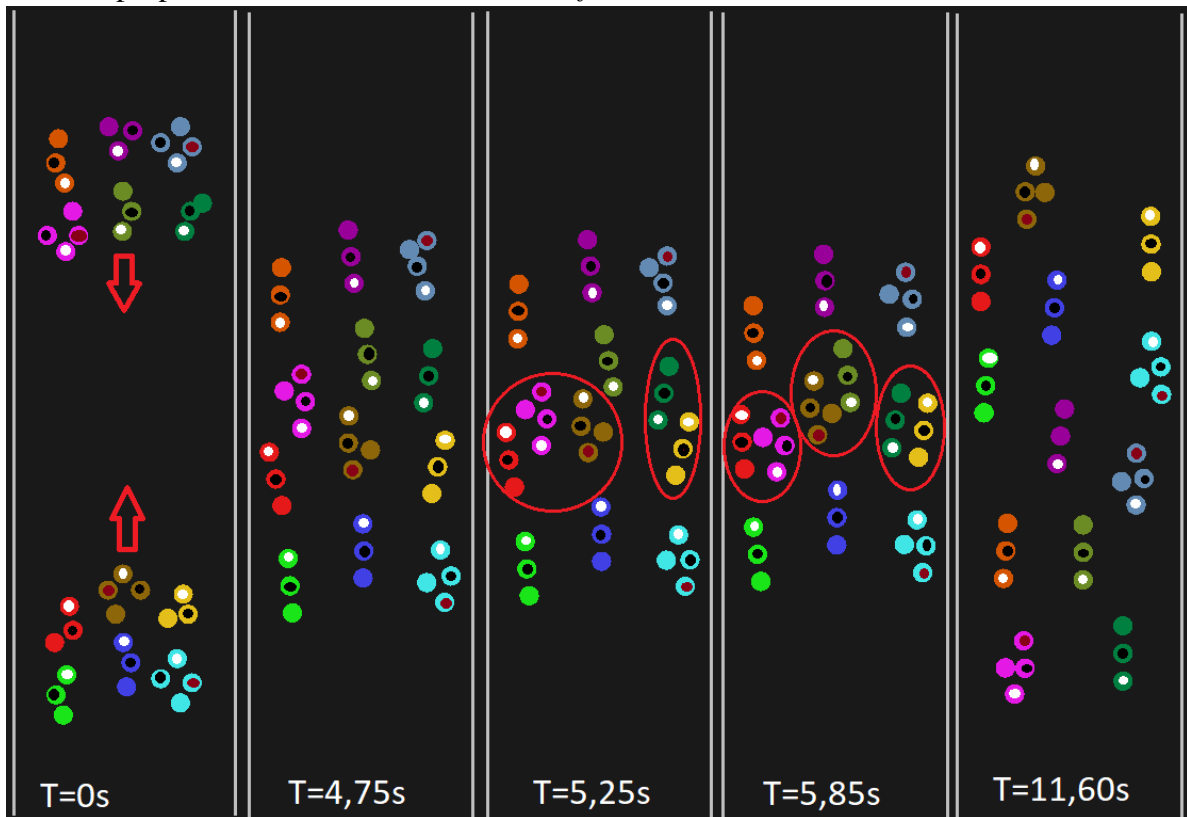
Fonte: o autor.

Nota: cada cor representa um grupo distinto, sendo que o líder do grupo possui uma marcação branca.

Nota: a linha do tempo segue da esquerda para a direita.

Nota: nas imagens, há destaque para os pontos em que os grupos se desviam entre si, demonstrando que, nos grupos *com líder*, os membros atuam de forma coesa, evitando se separarem.

Figura 29 – Experimento A4: simulação de grupos *com hierarquia de liderança*, utilizando o modelo proposto, no cenário de *corredor de fluxo bidirecional*



Fonte: o autor.

Nota: todos os grupos são *com hierarquia de liderança*. Os grupos com 3 membros são do tipo *GT4* e os com 4 membros são do tipo *GT3*.

Nota: cada cor representa um grupo distinto, sendo que o líder de cada grupo possui uma marcação em branco, o sublíder possui uma marcação em preto e o membro que segue o sublíder possui marcação em marrom. Os membros que apenas seguem o líder não possuem marcação.

Nota: a linha do tempo segue da esquerda para a direita.

Nota: nas imagens, há destaque para os pontos em que os grupos se desviam entre si, demonstrando que, nos grupos com hierarquia de liderança, os membros atuam de forma coesa, evitando se separarem.

Na Tabela 1, podemos ver o comparativo, entre os experimentos, do tempo que os membros de todos os grupos levaram para sair do corredor e da distância média percorrida pelos grupos. A partir desses dados, é possível perceber que os grupos sem líder e com líder (experimentos A1 e A3) levaram menos tempo no trajeto e que os grupos com o modelo de Moussaïd *et al.* (2010) e os grupos com hierarquia de liderança (experimentos A2 e A4) levaram mais tempo no percurso. A variação de distância percorrida entre os experimentos foi pequena.

Tabela 1 – Quadro comparativo dos experimentos A1, A2, A3 e A4

| Experimento | Tempo | Percurso |
|---|-------|----------|
| A1 (modelo proposto - grupos sem líder) | 20,5s | 19,0m |
| A2 (modelo de Moussaïd <i>et al.</i> (2010)) | 23,5s | 18,5m |
| A3 (modelo proposto - grupos com líder) | 20,5s | 18,1m |
| A4 (modelo proposto - grupos com hierarquia de liderança) | 24,0s | 18,4m |

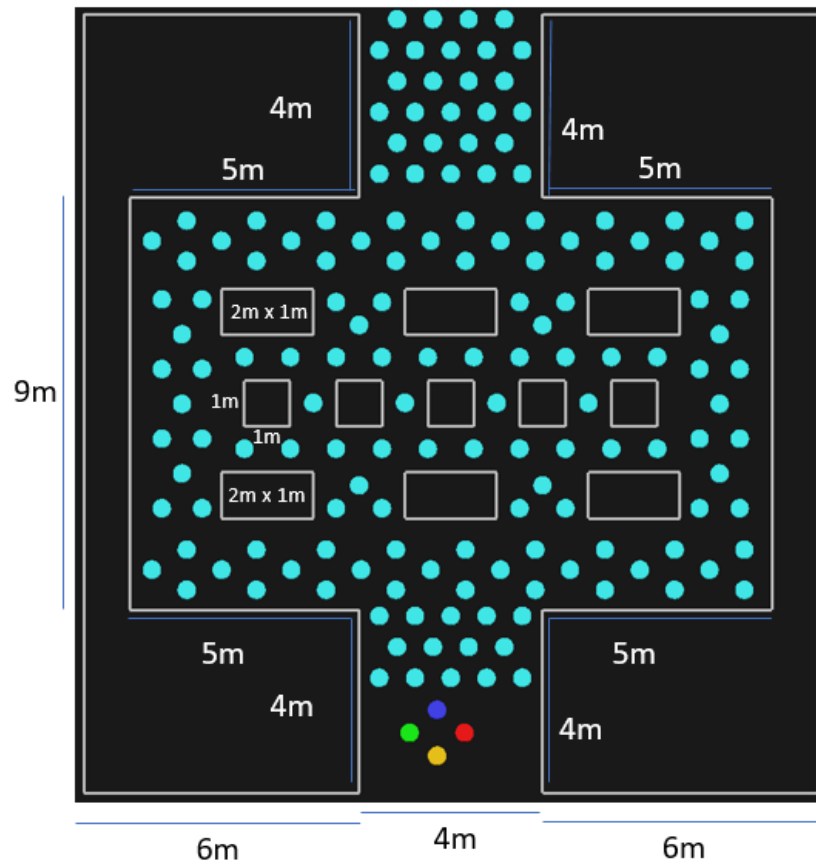
Fonte: o autor.

Com a realização desses experimentos, pode-se perceber que o modelo possibilita a flexibilidade de criar grupos mais coesos (*com líder* ou *com hierarquia de liderança*), que se desviam dos outros grupos como grupos com membros unidos, e de criar grupos com membros mais autônomos (grupo *sem líder*), em que os membros têm mais liberdade para se separarem dos outros membros e depois se reagruparem.

4.2 Sala com obstáculos

No cenário de *sala com obstáculos* (Figura 30), há um ambiente com diversos obstáculos, que poderia representar, por exemplo, um museu com várias obras de arte espalhadas pelo local. Nesse cenário, foram realizadas simulações com 166 pedestres independentes, que geram um fluxo contínuo de baixo para cima, pois ao chegarem na parte superior do ambiente, eles reaparecem na parte de baixo com o objetivo de subir novamente. Para cada um dos experimentos, é incluído um grupo que busca chegar na parte superior do ambiente. Para esse cenário, foram executados dois conjuntos de experimentos: um para demonstrar as melhorias trazidas pela inclusão do fator de insistência (Seção 4.2.1) e outro para demonstrar a flexibilidade do modelo de gerar grupos que seguem as mesmas rotas ou que possuem mais autonomia para seguirem por rotas alternativas e se reagruparem posteriormente (Seção 4.2.2).

Figura 30 – Sala com obstáculos e suas dimensões

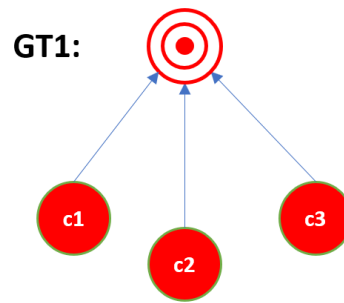


Fonte: o autor.

4.2.1 Sala com obstáculos - Fator de insistência

Com o objetivo de demonstrar a melhoria trazida pelo fator de insistência S_i^D aplicado a cada indivíduo i , pertencente ou não a um grupo, foram realizados três experimentos: B1, B2 e B3. Esse fator, proposto neste trabalho, se destina a aumentar a vontade do agente i seguir em direção à sua meta à medida que ele não consegue avançar em direção à mesma. Em cada um desses experimentos, foi incluído um grupo de três pedestres, sendo que: em B1 é utilizado o modelo de (MOUSSAÏD *et al.*, 2010); em B2 é utilizado o modelo proposto sem a utilização do fator de insistência; em B3 é utilizado o modelo proposto com a utilização do fator de insistência, com os parâmetros $S_{max}^D = 4$, $I = 0,05$ e $D_D = 0,005m$. Nos experimentos B2 e B3 foi utilizado um grupo *sem líder*, do tipo *GT1* (Figura 31), com nível de relacionamento $R_{ij} = 0,3$ entre cada par de indivíduos i e j do grupo.

Figura 31 – Grupo *sem líder*, do tipo GT1, utilizado nos experimentos B2 e B3



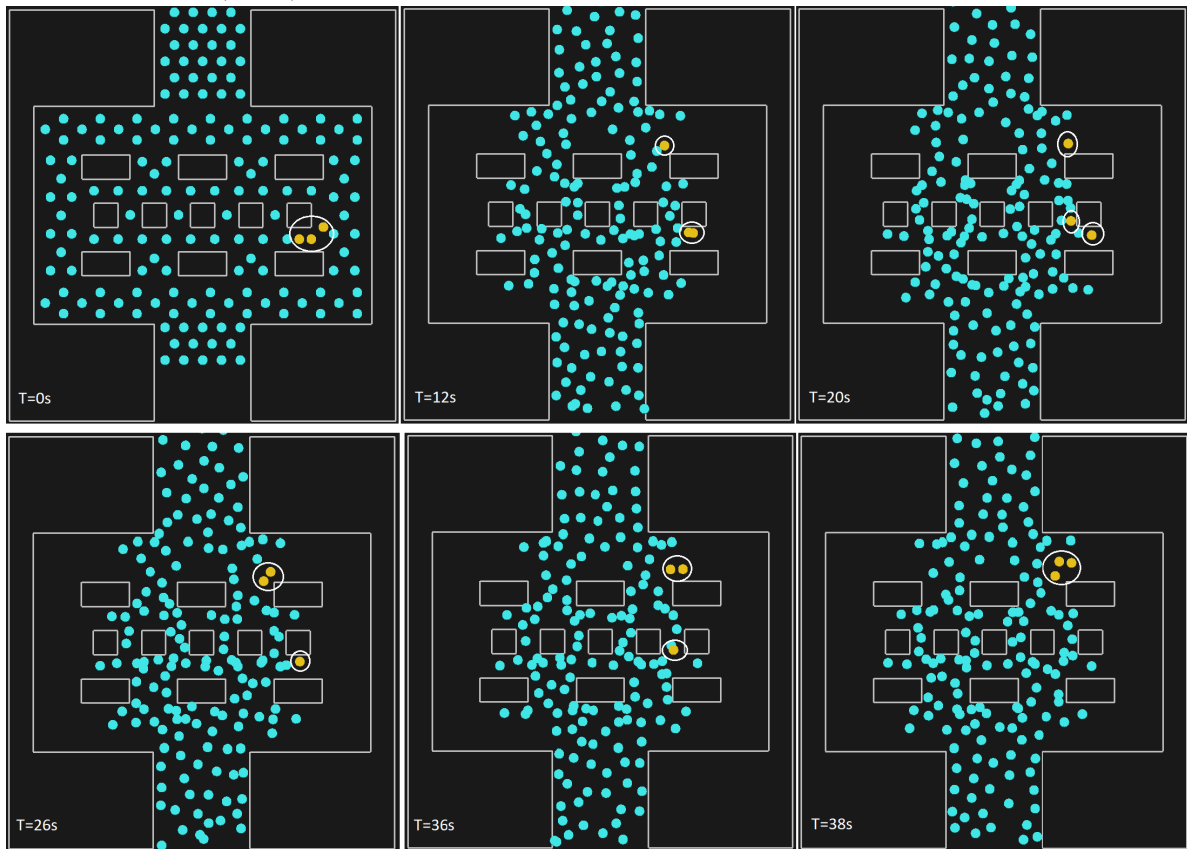
Fonte: o autor.

Nota: os agentes na cor vermelha representam membros autônomos dos grupos.

Nota: as setas indicam para onde os agentes querem ir, seja em direção a outro agente ou em direção a um local no ambiente, sendo este representado por um alvo vermelho.

No experimento B1 (Figura 32), que utiliza o grupo com o modelo de Moussaïd *et al.* (2010), é possível perceber a dificuldade dos membros do grupo de seguirem em direção ao seu destino. Em um primeiro momento, um dos membros do grupo segue em frente e os outros dois ficam para trás. Após bastante dificuldade, com 20s de simulação, o segundo membro consegue seguir adiante, entretanto, um membro ainda fica para trás. Os dois membros mais à frente ficam esperando pelo membro retardatário, que só consegue prosseguir seu caminho com 36s de simulação. Essa dificuldade dos agentes seguirem em frente pode acontecer tanto com membros de um grupo, como aconteceu nesse experimento, quanto com indivíduos totalmente independentes. Pode ocorrer, inclusive, de um indivíduo ficar preso indefinidamente, sem conseguir avançar para seu destino. Esse comportamento ocorre devido a um desbalanceamento de forças, em que o somatório das forças de repulsão sobre o agente que está preso é maior do que o somatório das forças que o atraem para seu objetivo.

Figura 32 – Experimento B1: simulação de um grupo de indivíduos usando o modelo de Moussaïd *et al.* (2010), no cenário de sala com obstáculos



Fonte: o autor.

Nota: os indivíduos na cor azul claro são independentes entre si e os na cor amarela representam um grupo de 3 indivíduos.

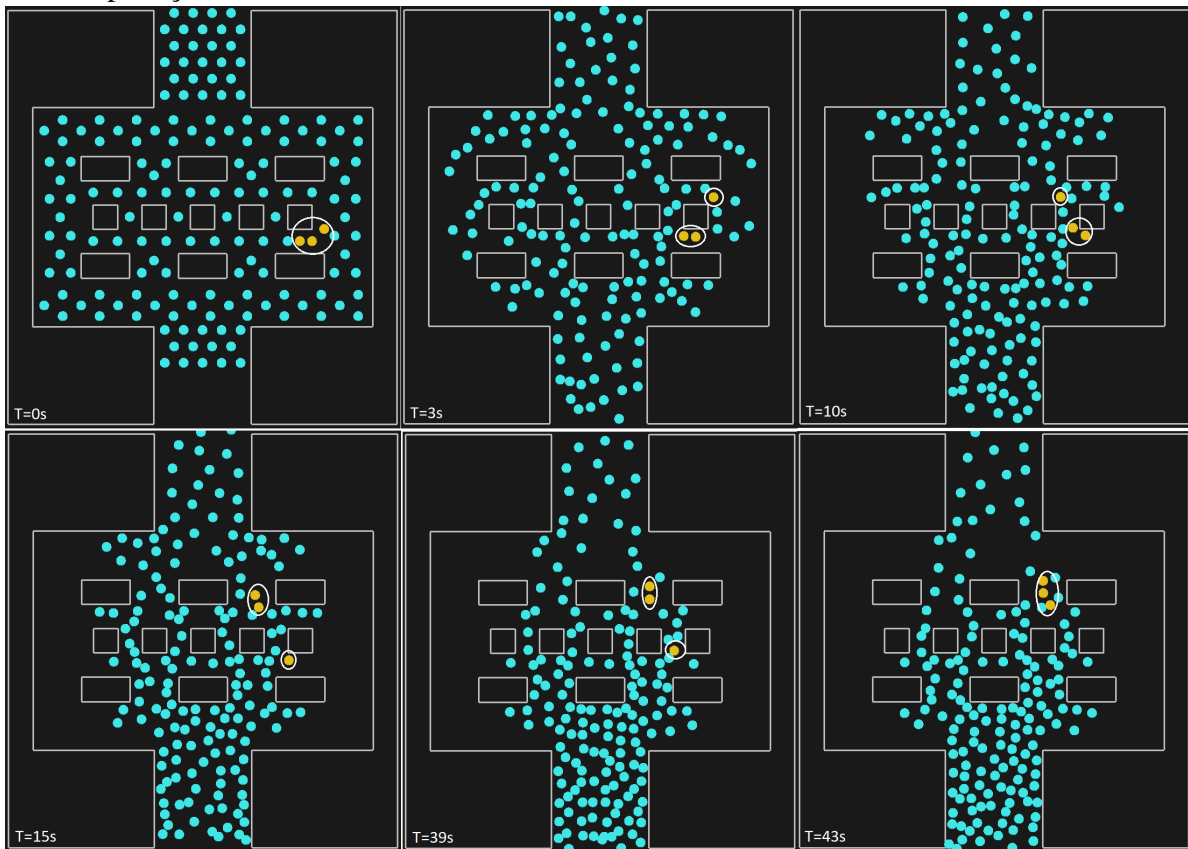
Nota: há um fluxo constante de indivíduos passando pelo ambiente da parte de baixo para a parte de cima.

Nota: a linha do tempo segue da esquerda para a direita e de cima para baixo.

Nota: nas imagens, pode-se perceber que os membros do grupo tem dificuldade de seguirem para sua meta, que é a parte de cima do ambiente.

O experimento B2 (Figura 33) utiliza um grupo sem líder, do tipo *GT1*, com o modelo proposto sem a aplicação do fator de insistência. Nesse experimento, é possível perceber a dificuldade dos membros do grupo de seguirem em direção ao seu destino, assim como no experimento B1. Nesse experimento, dois membros do grupo seguem adiante e um membro fica para trás. Os membros mais à frente param e aguardam a chegada do membro retardatário, que só consegue avançar em direção a seus colegas com 39s de simulação. Nesse experimento ocorre o mesmo problema de balanceamento de forças do experimento B1, o que pode dificultar ou mesmo impedir um indivíduo de seguir em frente.

Figura 33 – Experimento B2: simulação de um grupo de indivíduos usando o modelo proposto, sem a aplicação do fator de insistência, no cenário de *sala com obstáculos*



Fonte: o autor.

Nota: os indivíduos na cor azul claro são independentes entre si e os na cor amarela representam um grupo *sem líder* de 3 indivíduos.

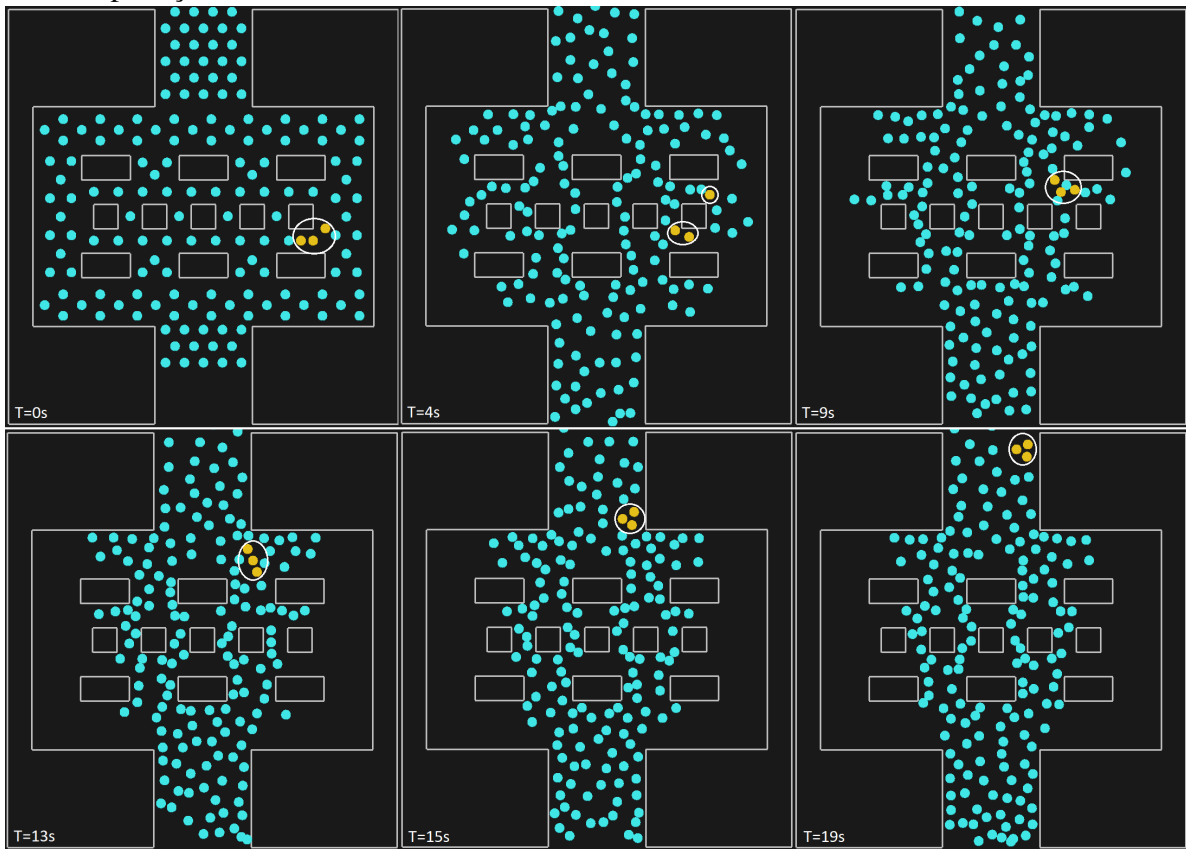
Nota: há um fluxo constante de indivíduos, usando o modelo proposto, passando pelo ambiente da parte de baixo para a parte de cima.

Nota: a linha do tempo segue da esquerda para a direita e de cima para baixo.

Nota: nas imagens, pode-se perceber que um dos membros do grupo tem dificuldade de seguir para sua meta, que é a parte de cima do ambiente.

O experimento B3 (Figura 34) utiliza um grupo *sem líder*, do tipo *GT1*, com o modelo proposto, mas inclui a aplicação do fator de insistência. Dessa maneira, pode-se perceber no experimento que os membros do grupo conseguem avançar de forma mais fácil em direção ao seu objetivo e conseguem se manter mais próximos uns dos outros, tratando o problema de balanceamento de forças observado nos dois experimentos anteriores.

Figura 34 – Experimento B3: simulação de um grupo de indivíduos usando o modelo proposto, com a aplicação do fator de insistência, no cenário de *sala com obstáculos*



Fonte: o autor.

Nota: os indivíduos na cor azul claro são independentes entre si e os na cor amarela representam um grupo *sem líder* de 3 indivíduos.

Nota: há um fluxo constante de indivíduos passando pelo ambiente da parte de baixo para a parte de cima.

Nota: a linha do tempo segue da esquerda para a direita e de cima para baixo.

Nota: nas imagens, pode-se perceber que os membros do grupo têm mais facilidade de seguirem para sua meta, que é a parte de cima do ambiente, do que nos experimentos B1 e B2. É possível perceber também que os membros do grupo permanecem mais unidos do que nesses experimentos.

Na Tabela 2, podemos ver o comparativo, entre os três experimentos, do tempo total que os membros do grupo levaram para sair do ambiente e da distância média percorrida pelo grupo. A partir desses dados, é possível perceber que, ao utilizar o fator de insistência (experimento B3), o grupo conseguiu se deslocar com maior fluidez no ambiente, saindo do mesmo em um tempo consideravelmente menor e percorrendo uma distância também menor.

Tabela 2 – Quadro comparativo dos experimentos B1, B2 e B3

| Experimento | Tempo | Percurso |
|---|-------|----------|
| B1 (modelo de Moussaïd <i>et al.</i> (2010)) | 47s | 15,9m |
| B2 (modelo proposto sem fator de insistência) | 50s | 12,3m |
| B3 (modelo proposto com fator de insistência) | 20s | 11,8m |

Fonte: o autor.

Com esses experimentos, pode-se perceber a melhoria trazida pela inclusão do fator de insistência, que:

- evita que indivíduos não consigam seguir em direção às suas metas;
- permite que os membros de um grupo andem mais próximos uns dos outros;
- representa um comportamento natural das pessoas, que tendem a seguir com mais vontade e com mais vigor em direção às suas metas ou aos seus companheiros à medida que o tempo passa e elas não conseguem avançar para o local desejado.

4.2.2 *Sala com obstáculos - Flexibilidade de rotas*

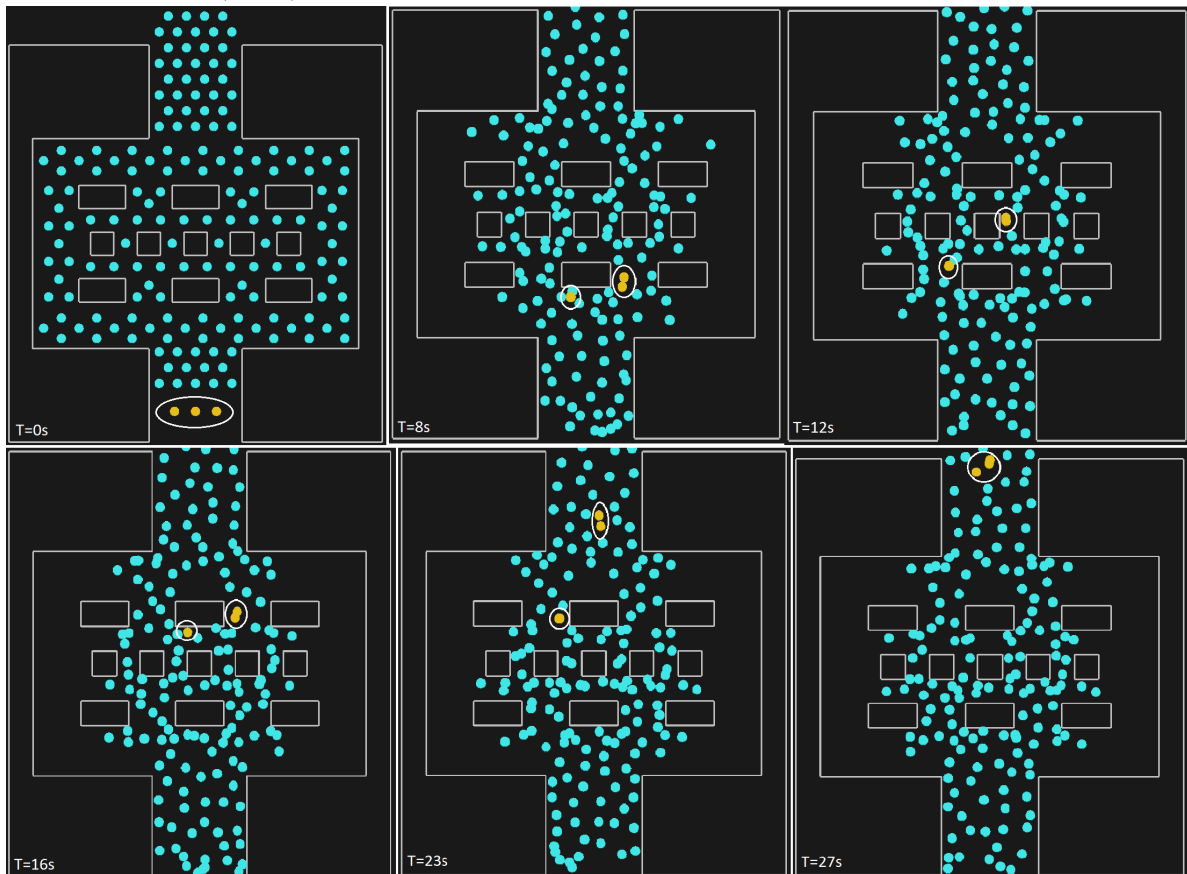
Com o objetivo de demonstrar a flexibilidade do modelo de gerar grupos mais coesos, que seguem as mesmas rotas, ou de gerar grupos mais autônomos, cujos membros têm mais flexibilidade para seguirem por caminhos alternativos e se reencontrarem posteriormente, foi realizado mais um conjunto de experimentos no ambiente *sala com obstáculos*.

Em cada experimento, é adicionado um grupo cujo objetivo é alcançar a parte de cima do ambiente. Dessa maneira, foram realizados os seguintes experimentos:

- C1) grupo de 3 indivíduos utilizando o modelo de Moussaïd *et al.* (2010);
- C2) grupo *sem líder* de 3 indivíduos, do tipo *GT1*, utilizando o modelo proposto;
- C3) grupo *com líder* de 3 indivíduos, do tipo *GT2*, utilizando o modelo proposto;
- C4) grupo de 4 indivíduos *com hierarquia de liderança*, do tipo *GT3*, utilizando o modelo proposto;
- C5) grupo *misto* de 6 indivíduos, do tipo *GT5*, utilizando o modelo proposto;
- C6) grupo *misto* de 9 indivíduos, do tipo *GT6*, utilizando o modelo proposto;

No experimento C1 (Figura 35), é analisado o comportamento de um grupo de 3 indivíduos que utiliza o modelo de Moussaïd *et al.* (2010). No experimento, é possível perceber que o grupo possui um caráter bastante autônomo, sendo que seus membros seguem rotas distintas e andam separados na maior parte do tempo.

Figura 35 – Experimento C1: simulação de um grupo de indivíduos usando o modelo de Moussaïd *et al.* (2010), no cenário de *sala com obstáculos*



Fonte: o autor.

Nota: os indivíduos na cor azul claro são independentes entre si e os na cor amarela representam um grupo de 3 indivíduos.

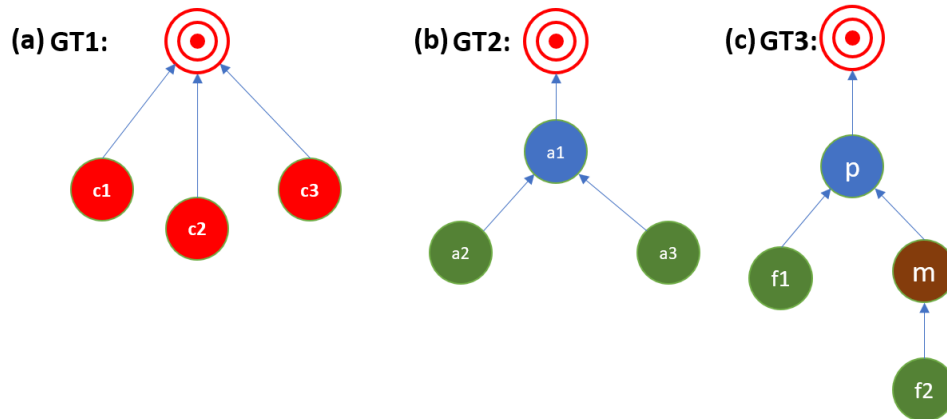
Nota: há um fluxo constante de indivíduos passando pelo ambiente da parte de baixo para a parte de cima.

Nota: a linha do tempo segue da esquerda para a direita e de cima para baixo.

Nota: nas imagens, pode-se perceber que os membros do grupo seguem por rotas distintas e se mantêm separados na maior parte do tempo.

No experimento C2 (Figura 37), é analisado o comportamento de um grupo *sem líder* de 3 indivíduos, do tipo *GT1* (Figura 36 (a)), representado um grupo de colegas, que utiliza o modelo proposto. O nível de relacionamento entre dois indivíduos i e j do mesmo grupo é $R_{ij} = 0,2$. No experimento, é possível perceber que o grupo anda junto na maior parte do tempo, mas também possui certo nível de autonomia, pois durante parte do tempo seus membros se separaram para se desviar de um obstáculo e se reagruparam logo em seguida.

Figura 36 – Tipos de grupos utilizado nos experimentos C2, C3 e C4, respectivamente

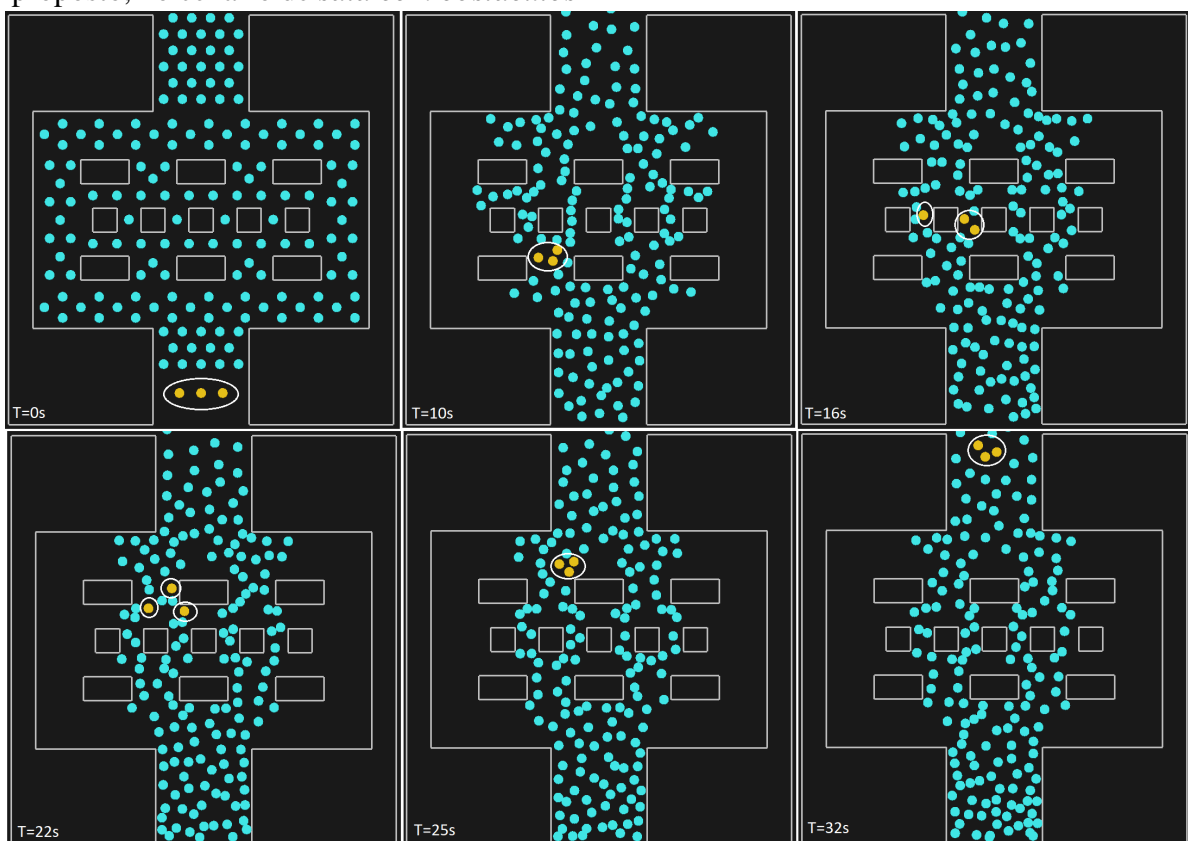


Fonte: o autor.

Nota: os agentes na cor vermelha representam membros autônomos dos grupos, os agentes na cor azul são líderes, os agentes em marrom representam sublíderes e os agentes na cor verde são seguidores.

Nota: As setas indicam para onde os agentes querem ir, seja em direção a outro agente ou em direção a um local no ambiente, sendo este representado por um alvo vermelho.

Figura 37 – Experimento C2: simulação de um grupo *sem líder*, do tipo GT 1, usando o modelo proposto, no cenário de *sala com obstáculos*



Fonte: o autor.

Nota: os indivíduos na cor azul claro são independentes entre si e os na cor amarela representam um grupo *sem líder* de 3 indivíduos.

Nota: há um fluxo constante de indivíduos passando pelo ambiente da parte de baixo para a parte de cima.

Nota: a linha do tempo segue da esquerda para a direita e de cima para baixo.

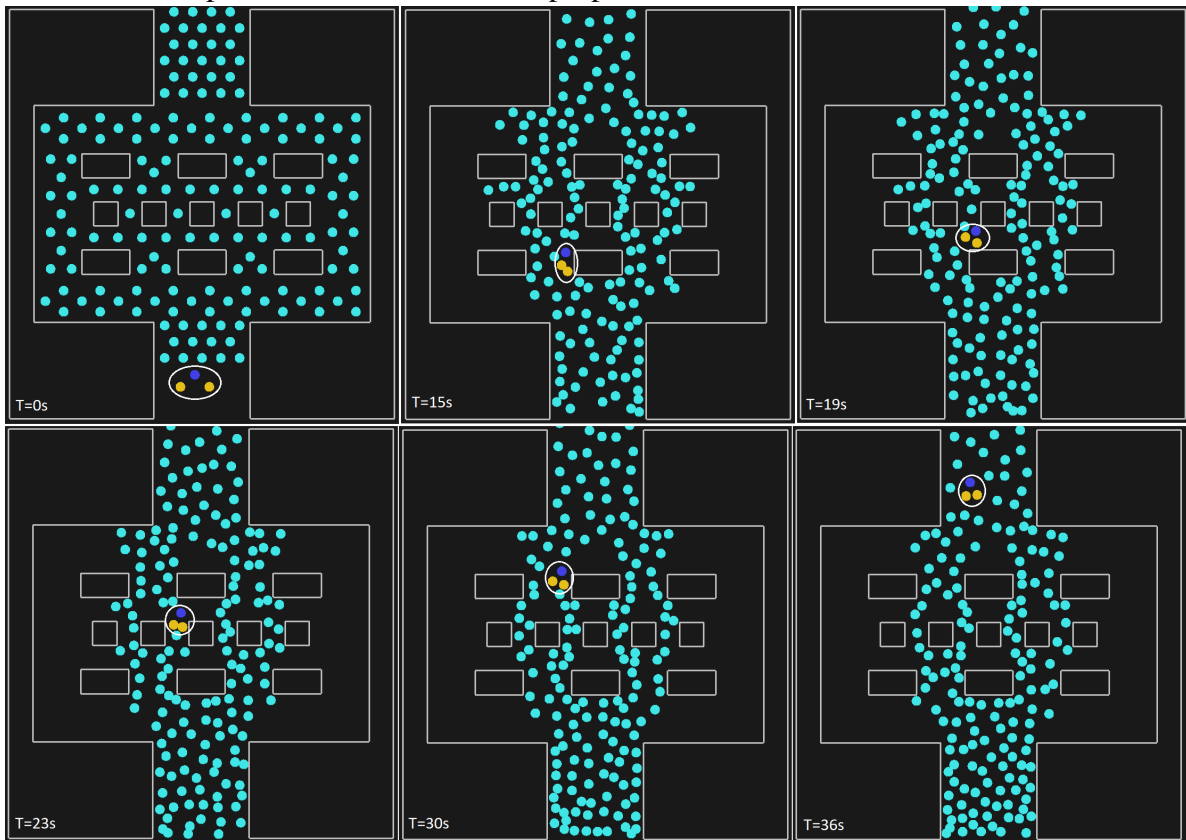
Nota: nas imagens, pode-se perceber que os membros do grupo, embora procurem se manter próximos uns dos outros, possuem certa autonomia, se separando temporariamente para se desviar de um obstáculo e se reagrupando em seguida.

No experimento C3 (Figura 38), é analisado o comportamento de um *grupo com líder* de 3 indivíduos, do tipo *GT2* (Figura 36 (b)), que utiliza o modelo proposto. A estrutura pode representar, por exemplo um grupo de amigos em que um dos amigos é o mais influente e age como líder, enquanto os outros dois o seguem. O nível de relacionamento entre dois indivíduos i e j do mesmo grupo é de $R_{ij} = 0,2$.

No experimento C4 (Figura 39), é analisado o comportamento de um *grupo com hierarquia de liderança* de 4 indivíduos, do tipo *GT3* (Figura 36 (c)), que utiliza o modelo proposto. A estrutura representa uma família composta pelos pais p e m e por dois filhos f_1 e f_2 . No grupo, p atua como líder e m como sublíder, sendo que f_1 segue p e f_2 segue m . O relacionamento de um filho para seu líder é $R_{f_1p} = R_{f_2m} = 1$ e o relacionamento entre dois membros i e j restantes é de $R_{ij} = 0,3$.

Nos experimentos C3 e C4 (Figuras 38 e 39 respectivamente), é possível perceber que os membros de cada um dos grupos andam próximos uns dos outros de forma coesa e seguem a mesma rota durante o trajeto.

Figura 38 – Experimento C3: simulação de um grupo de amigos representado como um grupo *com líder*, do tipo *GT2*, usando o modelo proposto, no cenário de *sala com obstáculos*



Fonte: o autor.

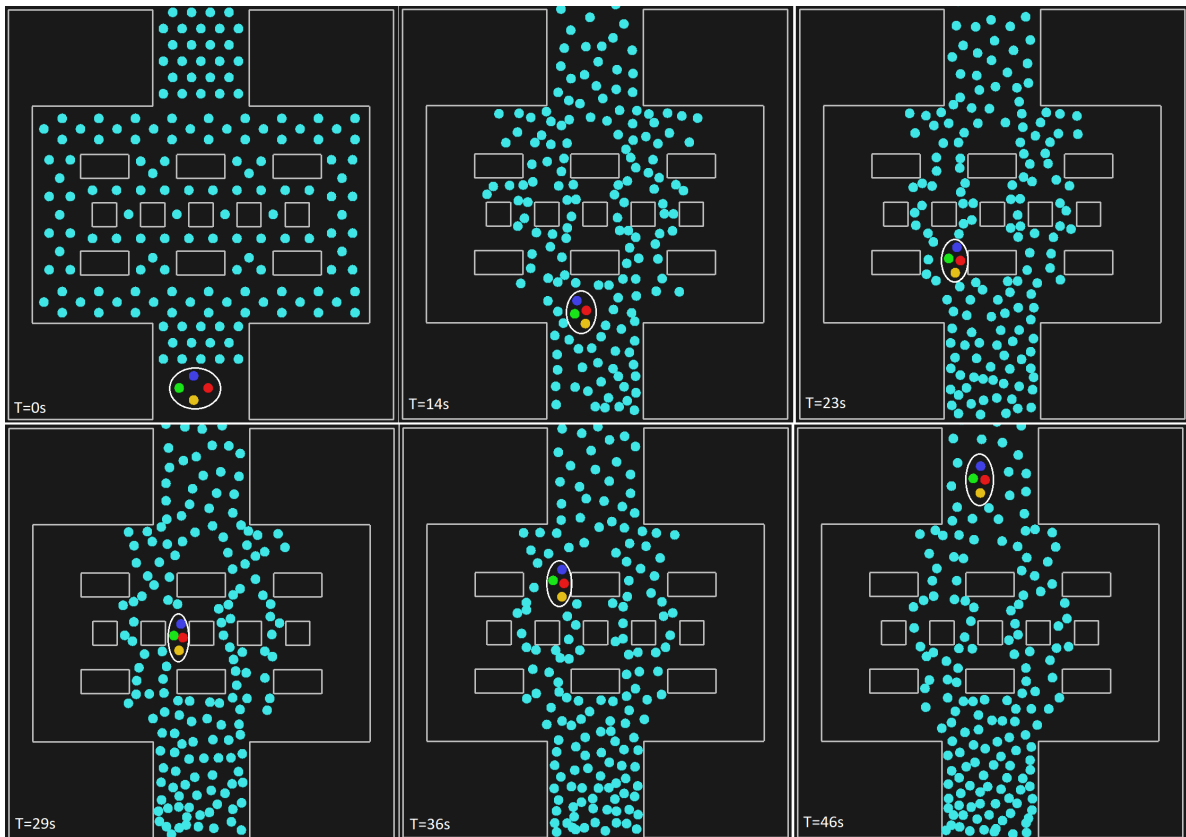
Nota: o indivíduo na cor azul escuro é o líder do grupo, sendo seguido por dois amigos (em amarelo). Os indivíduos na cor azul claro são independentes entre si.

Nota: há um fluxo constante de indivíduos passando pelo ambiente da parte de baixo para a parte de cima.

Nota: a linha do tempo segue da esquerda para a direita e de cima para baixo.

Nota: nas imagens, pode-se perceber que os membros do grupo seguem a mesma rota e caminham próximos uns dos outros, de forma coesa, durante todo o trajeto.

Figura 39 – Experimento C4: simulação de uma família, representada como um *grupo com hierarquia de liderança*, do tipo *GT3*, usando o modelo proposto, no cenário de *sala com obstáculos*



Fonte: o autor.

Nota: os pais p (em azul escuro) e m (em vermelho) são o líder e o sublíder, respectivamente. Os filhos f_1 (em verde claro) e f_2 (em amarelo) seguem p e m , respectivamente. Os indivíduos na cor azul claro são independentes entre si.

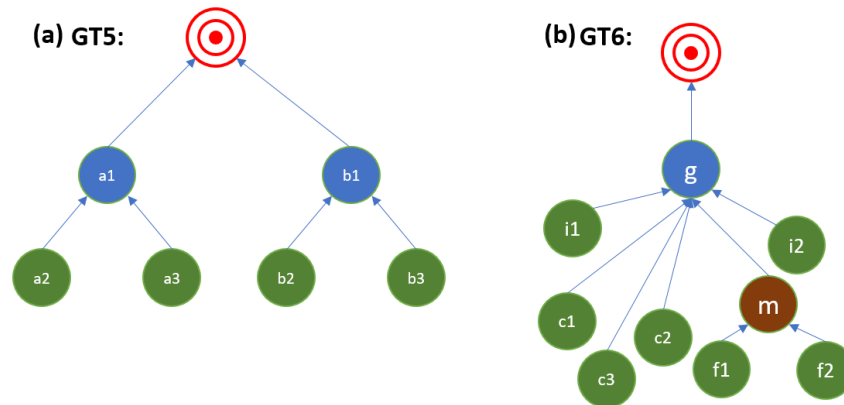
Nota: há um fluxo constante de indivíduos passando pelo ambiente da parte de baixo para a parte de cima.

Nota: a linha do tempo segue da esquerda para a direita e de cima para baixo.

Nota: nas imagens, pode-se perceber que os membros do grupo seguem a mesma rota e caminham próximos uns dos outros, de forma coesa, durante todo o trajeto.

Nos experimentos C5 e C6 foram realizados testes com grupos *mistos*. Em C5, é analisado um grupo *misto*, do tipo *GT5* (Figura 40 (a)), contendo dois subgrupos de amigos. Para cada subgrupo, há um líder e dois seguidores. O relacionamento entre dois membros i e j do mesmo subgrupo é $R_{ij} = 0,2$ e entre dois membros i e k de subgrupos distintos é $R_{ik} = 0,1$. O experimento demonstra que os membros de cada subgrupo andam próximos e seguem as mesmas rotas, entretanto, como há dois líderes para o grupo, cada subgrupo se movimenta de maneira mais autônoma em relação ao outro subgrupo, seguindo por rotas distintas na maior parte do caminho, mas se reagrupando ao superarem os obstáculos. A Figura 41 ilustra o comportamento do grupo na simulação.

Figura 40 – Tipos de grupos utilizado nos experimentos C5 e C6, respectivamente

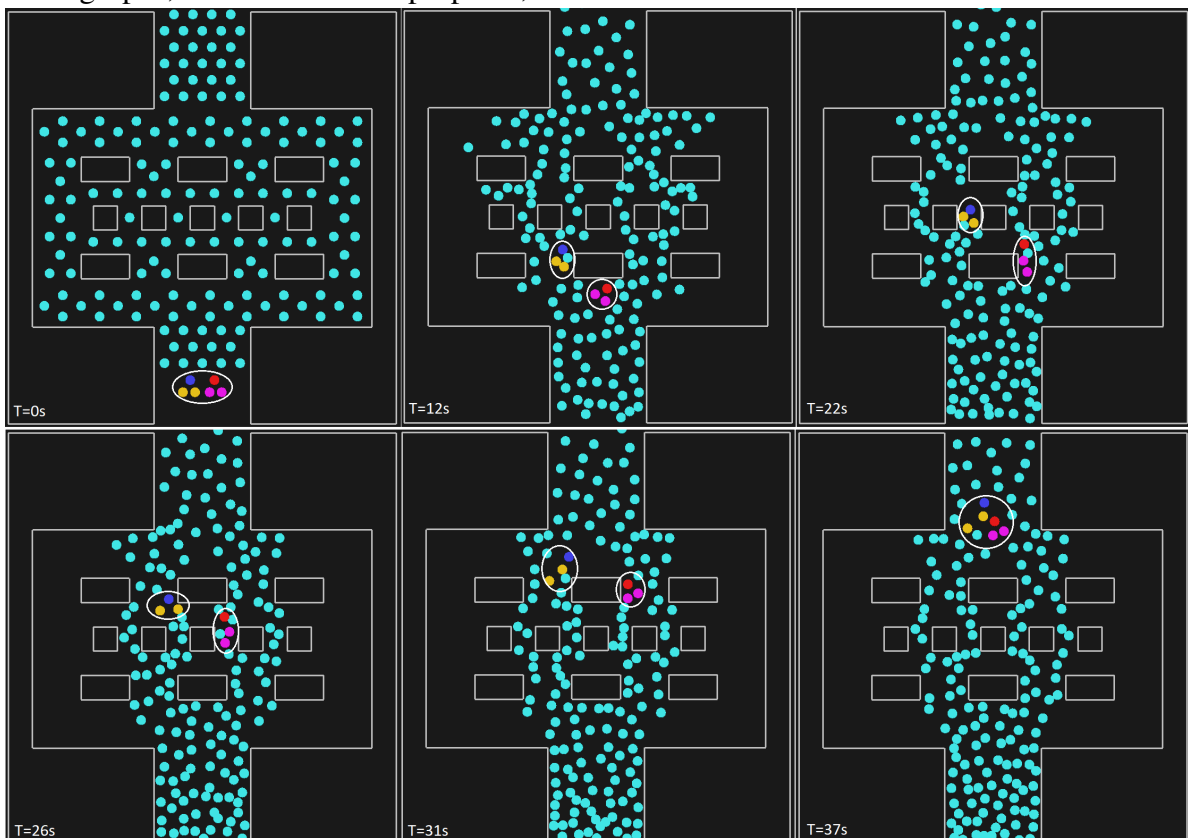


Fonte: o autor.

Nota: os agentes na cor azul são líderes, os agentes em marrom representam sublíderes e os agentes na cor verde são seguidores.

Nota: As setas indicam para onde os agentes querem ir, seja em direção a outro agente ou em direção a um local no ambiente, sendo este representado por um alvo vermelho.

Figura 41 – Experimento C5: simulação de um grupo *misto* de amigos, do tipo *GT5*, contendo 2 subgrupos, usando o modelo proposto, no cenário de *sala com obstáculos*



Fonte: o autor.

Nota: o indivíduo na cor azul escuro é líder dos outros dois em amarelo e o pedestre em vermelho é líder dos outros dois na cor rosa. Os indivíduos na cor azul claro são independentes entre si.

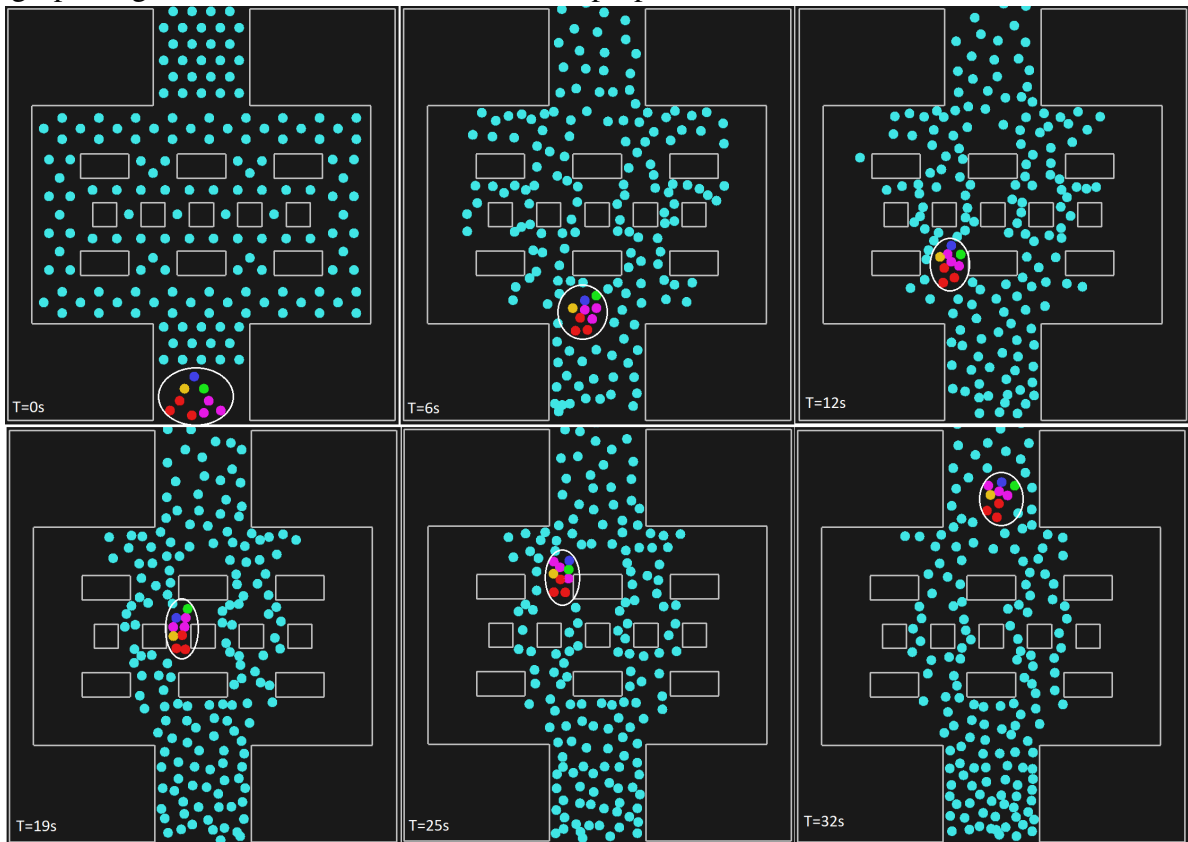
Nota: há um fluxo constante de indivíduos passando pelo ambiente da parte de baixo para a parte de cima.

Nota: a linha do tempo segue da esquerda para a direita e de cima para baixo.

Nota: nas imagens, pode-se perceber que os membros de um subgrupo seguem as mesmas rotas e andam de forma coesa, entretanto, os subgrupos seguem por rotas distintas, demonstrando maior coesão dentro de um subgrupo e maior autonomia entre subgrupos.

No experimento C6, é analisado um grupo *misto*, do tipo *GT6* (Figura 40 (b)), contendo um guia e um conjunto de turistas, totalizando 9 pedestres. Nesse caso, o guia turístico g é o líder do grupo, sendo seguido por dois membros i_1 e i_2 independentes do resto do grupo (mas que seguem g), uma família (m , f_1 e f_2) e um grupo de colegas (c_1 , c_2 e c_3). O líder g do grupo tem relacionamento $R_{g,k} = 0,1$ com os outros membros do grupo. Os membros independentes i_1 e i_2 possuem apenas relacionamento com o guia $R_{i_1g} = R_{i_2g} = 0,1$. A família possui três membros, sendo composta por uma mãe m e dois filhos f_1 e f_2 , onde a mãe m é uma sublíder do grupo, seguindo g e sendo líder dos filhos f_1 e f_2 . A mãe possui relação com o guia de $R_{mg} = 0,1$, mas os filhos não possuem relação com ele ($R_{f_1g} = R_{f_2g} = 0$). Os filhos possuem relacionamento de $R_{f_1m} = R_{f_2m} = 1$ com a mãe e o restante dos relacionamentos entre os membros da família é de $R_{ij} = 0,3$. Não há relacionamento deles com os membros i_1 e i_2 nem com o subgrupo de colegas. No subgrupo de colegas, não há liderança entre eles, sendo que cada um segue diretamente o guia g , com relacionamento $R_{ig} = 0,1$. O relacionamento entre eles é de $R_{ij} = 0,1$. Não há relacionamento deles com os membros i_1 e i_2 nem com os membros da família. O experimento demonstra que os membros de cada subgrupo andam próximos e seguem as mesmas rotas durante todo o percurso devido a terem apenas um líder para o grupo, gerando um grupo coeso. A Figura 42 ilustra o comportamento do grupo na simulação.

Figura 42 – Experimento C6: simulação de um grupo *misto*, do tipo *GT6*, representado um grupo de guia com turistas, usando o modelo proposto, no cenário de *sala com obstáculos*



Fonte: o autor.

Nota: o indivíduo na cor azul escuro é líder do grupo, sendo seguido por dois indivíduos independentes (amarelo e verde), por uma família (em vermelho) e por um grupo de colegas (em rosa). Os indivíduos na cor azul claro são independentes entre si.

Nota: há um fluxo constante de indivíduos passando pelo ambiente da parte de baixo para a parte de cima.

Nota: a linha do tempo segue da esquerda para a direita e de cima para baixo.

Nota: nas imagens, pode-se perceber que os membros do grupo seguem as mesmas rotas e andam de forma coesa durante todo o trajeto.

Na Tabela 3, podemos ver o comparativo, entre os experimentos, do tempo total que os membros do grupo levaram para sair do ambiente e da distância média percorrida pelo grupo. A partir desses dados, pode-se perceber que o grupo que chega no objetivo com menor tempo é o do modelo de Moussaïd *et al.* (2010) (C1), o que é justificado pelo fato de os agentes se atravessarem em caso de colisão. A família, representada pelo grupo com hierarquia de liderança (experimento C4), obtém o maior tempo de deslocamento, pois seus membros seguem mais devagar, esperando uns pelos outros. Em relação ao percurso total, não houve grande variação entre os experimentos.

Tabela 3 – Quadro comparativo dos experimentos C1, C2, C3, C4, C5 e C6

| Experimento | Tempo | Percurso |
|--|-------|----------|
| C1 (3 agentes com o modelo de Moussaïd <i>et al.</i> (2010)) | 28,0s | 18,7m |
| C2 (3 agentes sem líder) | 33,5s | 18,1m |
| C3 (3 agentes com líder) | 39,5s | 17,7m |
| C4 (4 agentes com hierarquia de liderança) | 50,0s | 17,9m |
| C5 (6 agentes em grupo misto) | 42,5s | 18,0m |
| C6 (9 agentes em grupo misto) | 38,0s | 19,6m |

Fonte: o autor.

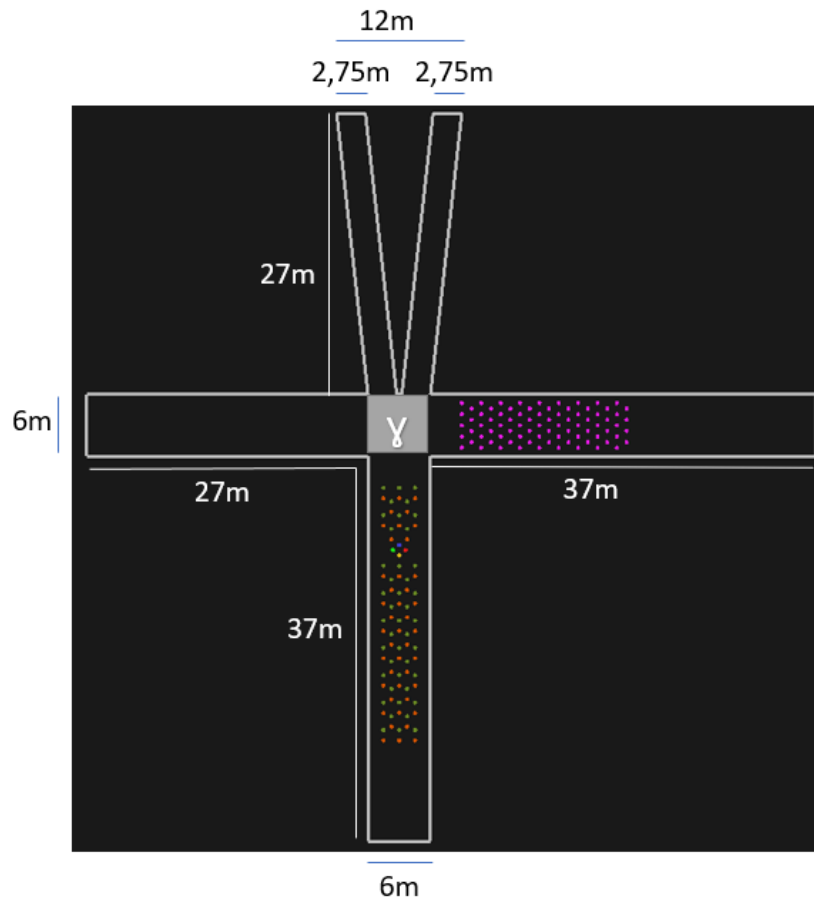
Os experimentos realizados demonstram a flexibilidade do modelo, que gera grupos mais coesos ao se utilizar estruturas com um líder para o grupo (*grupo com líder*, *grupo com hierarquia de liderança* e *grupo misto* com um líder) ou grupos com membros mais autônomos ao se utilizar grupos *sem líder* ou *mistos* com mais de um líder.

4.3 Cruzamento com bifurcação

No cenário de cruzamento com bifurcação (Figura 43), há um ambiente com um cruzamento em que a parte de cima do cruzamento é uma bifurcação. Esse cenário poderia representar, por exemplo, um cruzamento de uma estação de metrô. Nos experimentos, há um fluxo contínuo de pedestres saindo da direita para a esquerda e um fluxo contínuo de pedestres caminhando de baixo para cima, em que uns pretendem ir para o lado esquerdo da bifurcação e os outros para o lado direito dessa bifurcação. Os grupos testados saem da parte de baixo e objetivam alcançar o lado direito da bifurcação.

Para esse cenário, foram executados dois conjuntos de experimentos. Na Seção 4.3.1, foram realizados experimentos em situação de alta densidade, para fazer uma análise quantitativa do comportamento dos grupos e validar a capacidade desses grupos atravessarem um fluxo de alta densidade. Na Seção 4.3.2, foi realizado um experimento com densidade mais elevada ainda, representando uma situação bastante adversa, de modo a forçar uma separação dos membros do grupo e demonstrar a capacidade de reagrupamento do modelo e o impacto da modelagem de relacionamentos nos grupos.

Figura 43 – Cenário de cruzamento com bifurcação e suas dimensões



Fonte: o autor.

Nota: a região γ destacada em cinza é a considerada para o levantamento de métricas.

4.3.1 Cruzamento com bifurcação - densidade alta

Com o objetivo de se fazer uma análise quantitativa do comportamento dos grupos testados e de se verificar a capacidade desses grupos de atravessarem um fluxo de pedestres de alta densidade, foram realizados os seguintes experimentos usando o modelo proposto, incluindo um grupo por experimento:

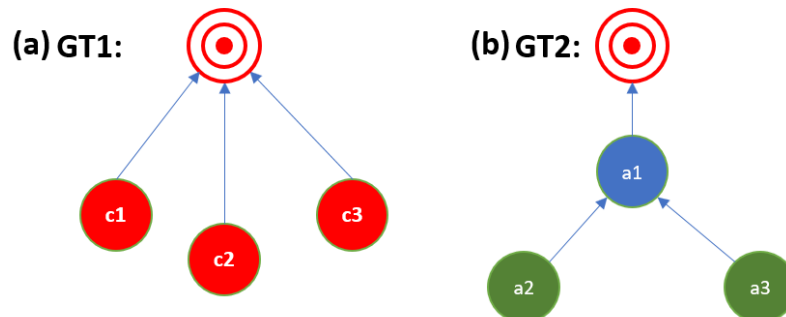
- D1) grupo de colegas *sem líder*, do tipo *GT1*;
- D2) grupo de amigos *sem líder*, do tipo *GT1*, com nível de relacionamento entre seus membros superior ao do grupo de colegas do experimento D1;
- D3) grupo de amigos *com líder*, do tipo *GT2*;
- D4) grupo escolar *com hierarquia de liderança*, do tipo *GT4*;
- D5) grupo turístico (*misto*), do tipo *GT6*.

Para a realização dos experimentos, foram retiradas as métricas a partir do momento em que o grupo começa a entrar na interseção do cruzamento, até o momento em que ele sai

totalmente dela. Essa interseção γ consiste na área quadrada de 6m x 6m em que acontece o encontro do fluxo horizontal com o fluxo vertical de pedestres. Para o cálculo da densidade, é considerada a quantidade de agentes presentes nessa interseção γ , dividido pela área da mesma, de tal forma que a densidade, em um dado momento t , é definida por $Dens(t) = Q_{ped}(t)/S_{\gamma}$, em que Q_{ped} é a quantidade de pedestres presentes em γ no instante t e S_{γ} é a área de γ . Na Figura 43, são exibidas as dimensões do cenário utilizado e é destacado em cinza a área de interseção γ .

No experimento D1, foi testado um grupo de 3 colegas *sem líder*, do tipo GT1 (Figura 44 (a)), em que os relacionamentos entre dois membros i e j é $R_{ij} = 0,1$. No experimento D2, foi incluído um grupo de amigos *sem líder*, do tipo GT1 (Figura 44 (a)), similar ao experimento D1, mas com nível de relacionamento mais elevado entre dois membros i e j , $R_{ij} = 0,2$. No experimento D3, foi incluído um grupo de 3 amigos, do tipo GT2 (Figura 44 (b)), com o mesmo nível de relacionamento entre membros do experimento D2, $R_{ij} = 0,2$, mas agora *com líder*, sendo um líder e dois seguidores.

Figura 44 – Tipos de grupos utilizado nos experimentos D1 (a), D2 (a) e D3 (b)



Fonte: o autor.

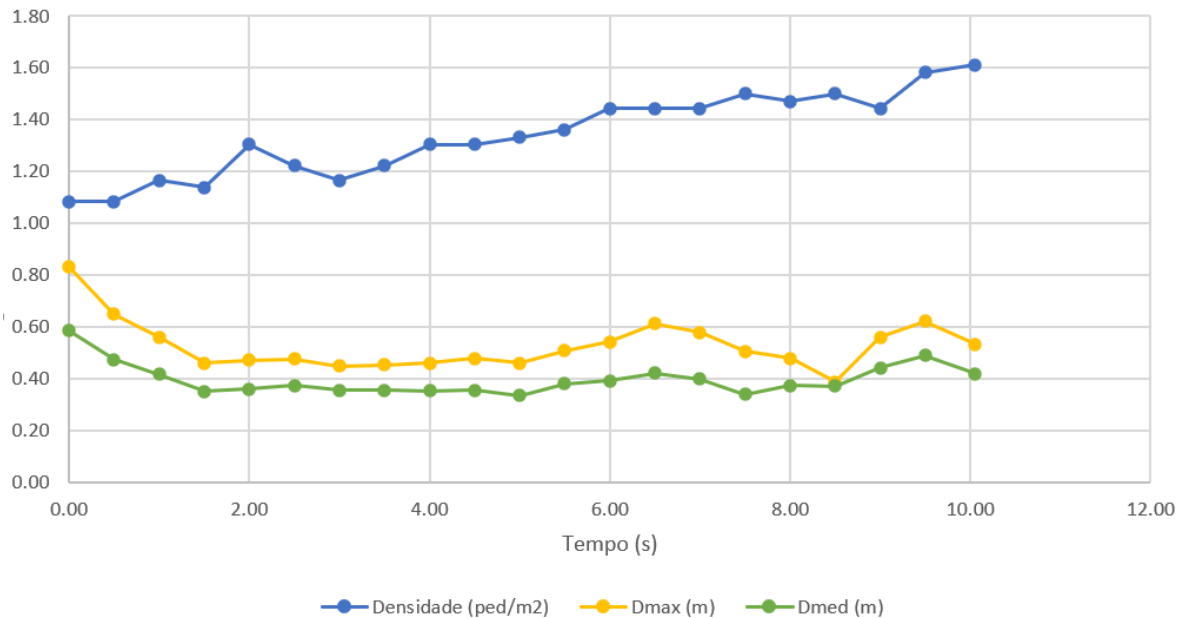
Nota: os agentes na cor vermelha representam membros autônomos dos grupos, o agente na cor azul é um líder e os agentes na cor verde são seguidores.

Nota: As setas indicam para onde os agentes querem ir, seja em direção a outro agente ou em direção a um local no ambiente, sendo este representado por um alvo vermelho.

No experimento D1, a Figura 45 representa o gráfico do comportamento do grupo de colegas *sem líder*, do tipo GT1, com relacionamentos entre si $R_{ij} = 0,1$, durante o período de tempo em que o grupo entra no cruzamento até o momento em que ele sai pelo lado direito da bifurcação. A variável D_{max} representa a distância máxima de um membro para o centro do grupo em um dado momento, enquanto que a variável D_{med} representa a distância média dos membros para o centro do grupo em um dado momento. No gráfico, pode-se identificar o aumento crescente da densidade, variando de $1,10 \text{ pedestres}/m^2$ na entrada do grupo, quando $T=0s$, até $1,60 \text{ pedestres}/m^2$ na saída do grupo do cruzamento, quando $T=10s$. Pode-se identificar também

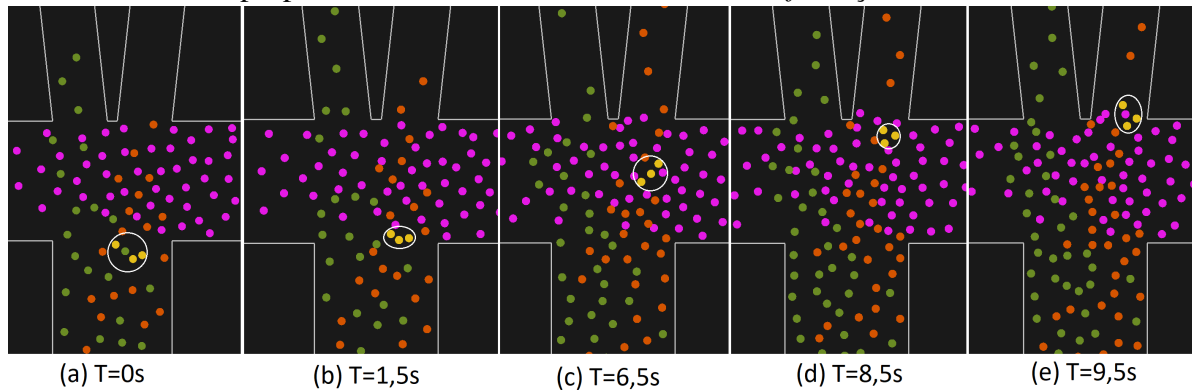
que, em $T=0s$, o grupo possui valores um pouco mais altos de D_{max} e D_{med} , representando uma maior dispersão do grupo na entrada do cruzamento devido a um dos membros ter se separado do resto para evitar colisão. O grupo então se compacta mais em $T=1,5s$, se mantendo mais compacto, até que em $T=6,5s$ o grupo se dispersa um pouco mais para evitar colisão, ficando em posição de fila. Em $T=8s$ o grupo se compacta para evitar colisão, ficando seus membros em posições simétricas em relação ao centro do grupo, obtendo valores iguais de D_{max} e D_{med} . Por fim, na saída do cruzamento, em $T=9,5s$, o grupo se dispersa mais novamente, sendo que um de seus membros se separa dos outros para evitar colisão. As imagens referentes a esses pontos-chaves da simulação estão presentes na Figura 46.

Figura 45 – Experimento D1: gráfico da simulação de um grupo de colegas *sem líder*, do tipo *GT1*, com $R_{ij} = 0,1$, usando o modelo proposto, no cenário de *cruzamento com bifurcação*



Fonte: o autor.

Figura 46 – Experimento D1: simulação de um grupo de colegas *sem líder*, do tipo *GT1*, usando o modelo proposto, no cenário de *cruzamento com bifurcação*



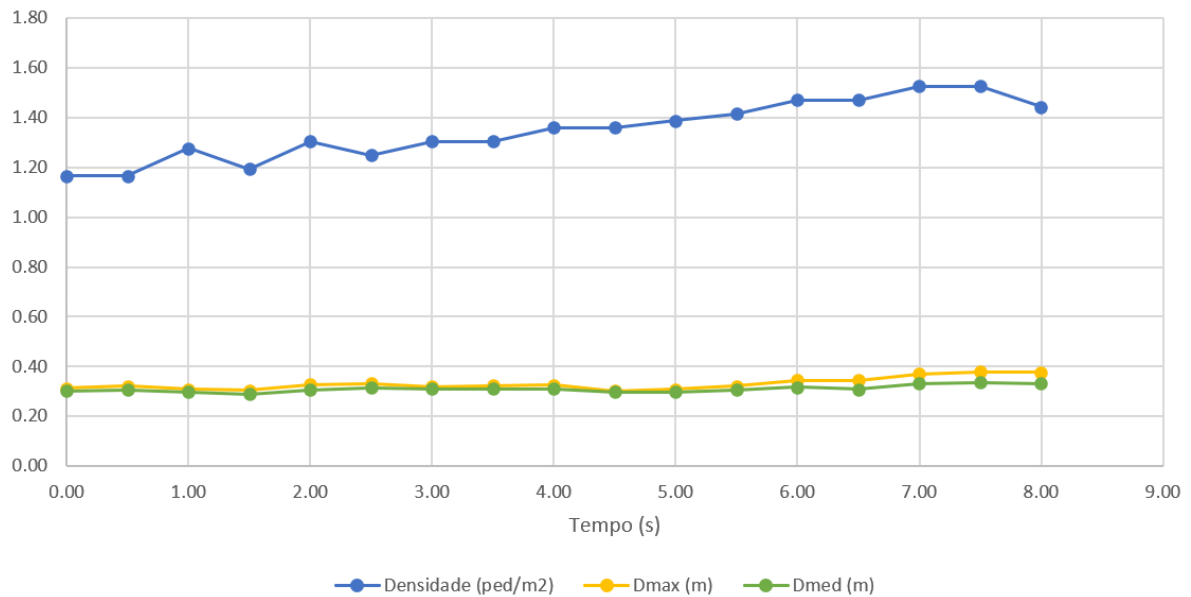
Fonte: o autor.

Nota: os indivíduos em amarelo representam o grupo de colegas. Os indivíduos em rosa caminham da direita para a esquerda, os em verde vão de baixo para o lado esquerdo da bifurcação e os em laranja caminham para o lado direito da bifurcação.

Nota: a linha do tempo segue da esquerda para a direita.

No experimento D2, a Figura 47 representa o gráfico do comportamento do grupo de amigos *sem líder*, do tipo *GT1*, com relacionamentos entre si $R_{ij} = 0,2$ (mais intensos do que os do grupo de colegas do experimento D1), durante o período de tempo em que o grupo entra no cruzamento até o momento em que ele sai pelo lado direito da bifurcação. No gráfico, pode-se identificar o aumento crescente da densidade, variando de $1,17 \text{ pedestres}/\text{m}^2$ na entrada do grupo, quando $T=0\text{s}$, até $1,53 \text{ pedestres}/\text{m}^2$ quando o grupo está próximo da saída do cruzamento, com $T=7,5\text{s}$. Pelos valores de D_{max} e D_{med} , pode-se perceber que, durante o percurso, os membros do grupo se mantêm próximos e não se separam, mantendo uma coesão alta e com pouca variação.

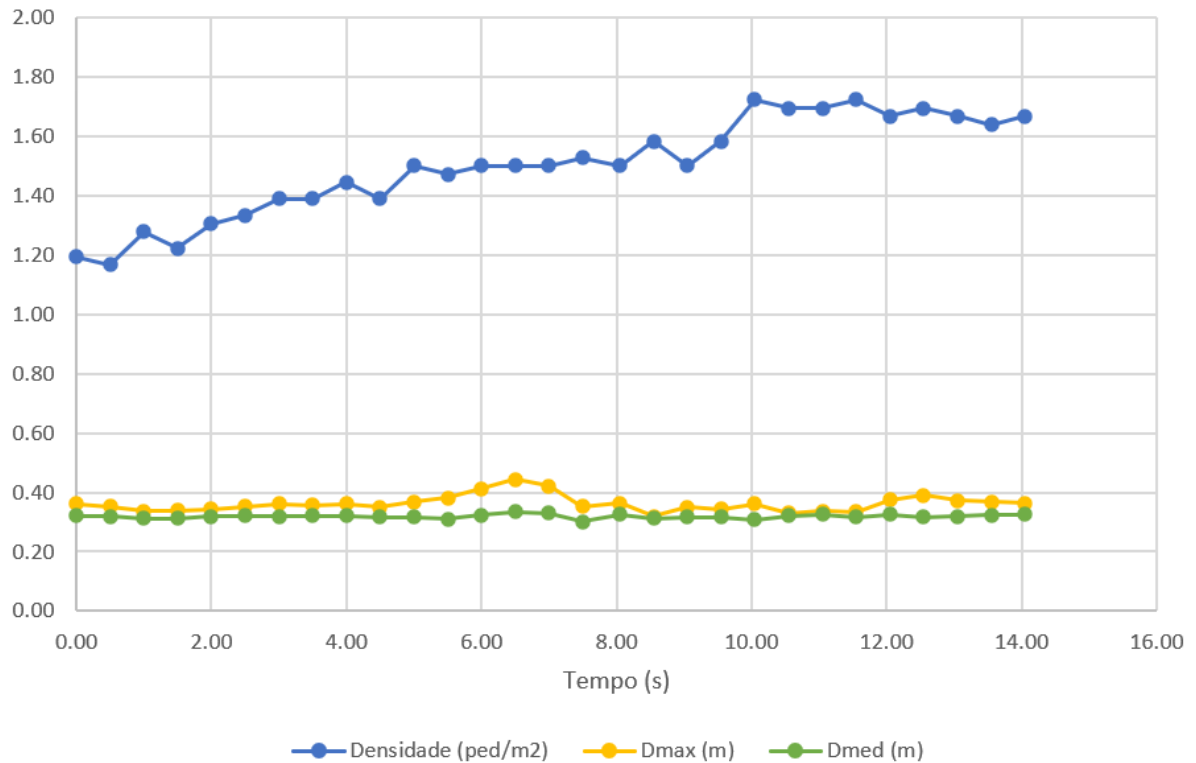
Figura 47 – Experimento D2: gráfico da simulação de um grupo de amigos *sem líder*, do tipo *GT1*, com $R_{ij} = 0,2$, usando o modelo proposto, no cenário de *cruzamento com bifurcação*



Fonte: o autor.

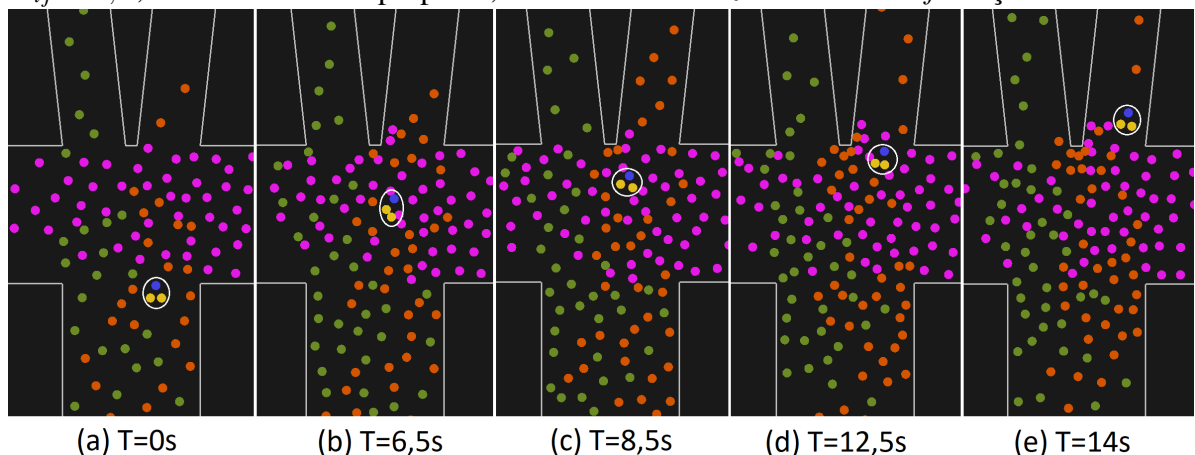
No experimento D3, a Figura 48 representa o gráfico do comportamento do grupo de amigos *com líder*, do tipo *GT2*, com relacionamentos entre si $R_{ij} = 0,2$, durante o período de tempo em que o grupo entra no cruzamento até o momento em que ele sai pelo lado direito da bifurcação. No gráfico, pode-se identificar o aumento crescente da densidade, variando de $1,17 \text{ pedestres}/\text{m}^2$ na entrada do grupo, quando $T=0,5\text{s}$, até $1,72 \text{ pedestres}/\text{m}^2$ quando o grupo está próximo à saída do cruzamento, com $T=11,5\text{s}$. Pelos valores de D_{max} e D_{med} , pode-se perceber que, durante o percurso, o grupo se mantém coeso, com pouca variação dessa coesão. Quando $T=6,5\text{s}$, ocorre um leve aumento na dispersão do grupo para evitar colisão, mas logo em seguida seus membros se reaproximam. As imagens do experimento estão presentes na Figura 49.

Figura 48 – Experimento D3: gráfico da simulação de um grupo de amigos *com líder*, do tipo *GT2*, com $R_{ij} = 0,2$, usando o modelo proposto, no cenário de *cruzamento com bifurcação*



Fonte: o autor.

Figura 49 – Experimento D3: simulação de um grupo de amigos *com líder*, do tipo *GT2*, com $R_{ij} = 0,2$, usando o modelo proposto, no cenário de *cruzamento com bifurcação*



Fonte: o autor.

Nota: o indivíduo em azul representa o líder do grupo, enquanto que os amigos em amarelo representam os seguidores. Os indivíduos em rosa caminham da direita para a esquerda, os em verde vão de baixo para o lado esquerdo da bifurcação e os em laranja caminham para o lado direito da bifurcação.

Nota: a linha do tempo segue da esquerda para a direita.

Um comparativo entre os experimentos D1, D2 e D3 está presente na Tabela 4. Com ela, pode-se perceber que a densidade média do cruzamento ficou próxima nos experimentos,

variando entre 1,34 e 1,50 *pedestres/m²*. Nesses experimentos, a velocidade média dos grupos foi inferior à velocidade média dos indivíduos independentes, o que era algo esperado. Em relação ao nível de coesão aplicado aos grupos, o grupo de colegas *sem líder* (tipo *GT1*) do experimento D1, com menor nível de relacionamento entre os membros, mostrou ser um grupo menos coeso do que os grupos dos experimentos D2 e D3, obtendo maiores valores médios para *Dmax* e *Dmed*. Esse grupo também demonstrou ter maior variação dessa dispersão, com valores maiores para o desvio padrão (DP) de *Dmax* e *Dmed*, representando os momentos em que um indivíduo se afasta do grupo para evitar colisão e depois de reaproxima do resto do grupo.

Tabela 4 – Quadro resumo dos experimentos D1, D2 e D3

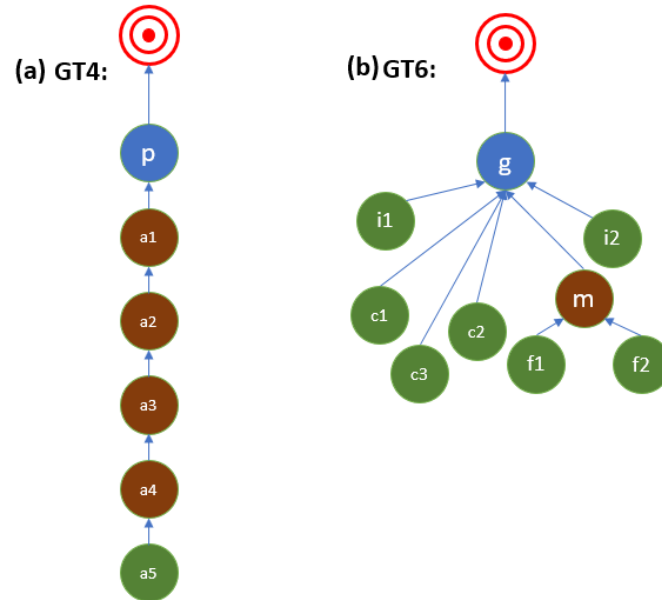
| D1 - Grupo de colegas sem líder (tipo <i>GT1</i> e $R_{ij} = 0,1$) | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|
| | Dens (ped/m²) | Vel. indiv (m/s) | Vel grupo (m/s) | Dmax (m) | Dmed (m) |
| Média | 1,34 | 0,91 | 0,77 | 0,53 | 0,40 |
| DP | 0,16 | 0,06 | 0,21 | 0,10 | 0,06 |
| D2 - Grupo de amigos sem líder (tipo <i>GT1</i> e $R_{ij} = 0,2$) | | | | | |
| | Dens (ped/m²) | Vel. indiv (m/s) | Vel grupo (m/s) | Dmax (m) | Dmed (m) |
| Média | 1,35 | 0,95 | 0,86 | 0,33 | 0,31 |
| DP | 0,12 | 0,04 | 0,20 | 0,02 | 0,01 |
| D3 - Grupo de amigos com líder (tipo <i>GT2</i> e $R_{ij} = 0,2$) | | | | | |
| | Dens (ped/m²) | Vel. indiv (m/s) | Vel grupo (m/s) | Dmax (m) | Dmed (m) |
| Média | 1,50 | 0,84 | 0,56 | 0,36 | 0,32 |
| DP | 0,17 | 0,07 | 0,24 | 0,03 | 0,01 |

Fonte: o autor.

No experimento D4, foi realizado um teste com um grupo *com hierarquia de liderança*, do tipo *GT4*, representando um grupo escolar com um professor e cinco alunos (Figura 50 (a)). O grupo anda em fila e possui o professor como líder de um aluno e cada aluno é líder do que está atrás dele, com exceção do último, que não é líder de ninguém. As relações do grupo foram representadas da seguinte forma: cada indivíduo *i* possui relação $R_{il} = 1$ com seu líder *l*, caso possua um, possui relação $R_{is} = 0,3$ com seu seguidor *s*, caso possua um, e possui relação $R_{ij} = 0,1$ com os demais membros do grupo. No gráfico da Figura 51, pode-se identificar o aumento crescente da densidade, variando de 1,25 *pedestres/m²* na entrada do grupo, quando $T=0s$, até 2,03 *pedestres/m²* quando o grupo está próximo à saída do cruzamento, com $T=16s$. No experimento, o grupo conseguiu atravessar o cruzamento sem se dispersar, mantendo os valores de *Dmax* e *Dmed* estáveis durante a travessia do cruzamento (Figura 51) e com baixo

desvio padrão (Tabela 5). A velocidade média do grupo também foi um pouco inferior à média dos indivíduos sem grupo, como esperado.

Figura 50 – Tipos de grupos utilizado nos experimentos D4 (a) e D5 (b)

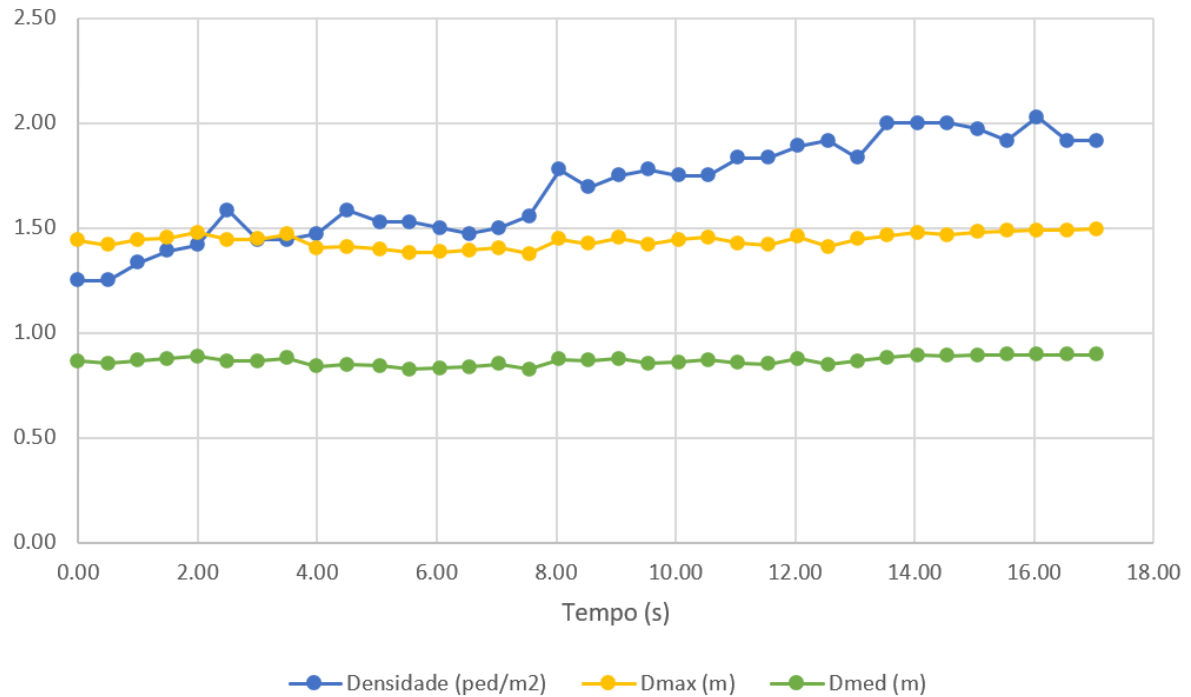


Fonte: o autor.

Nota: os agentes na cor vermelha representam membros autônomos dos grupos, os agentes na cor azul são líderes, os agentes em marrom representam sublíderes e os agentes na cor verde são seguidores.

Nota: As setas indicam para onde os agentes querem ir, seja em direção a outro agente ou em direção a um local no ambiente, sendo este representado por um alvo vermelho.

Figura 51 – Experimento D4: gráfico da simulação de um grupo com hierarquia de liderança, representando um grupo escolar de professor com alunos em fila, usando o modelo proposto, no cenário de *cruzamento com bifurcação*



Fonte: o autor.

Tabela 5 – Quadro resumo do experimento D4

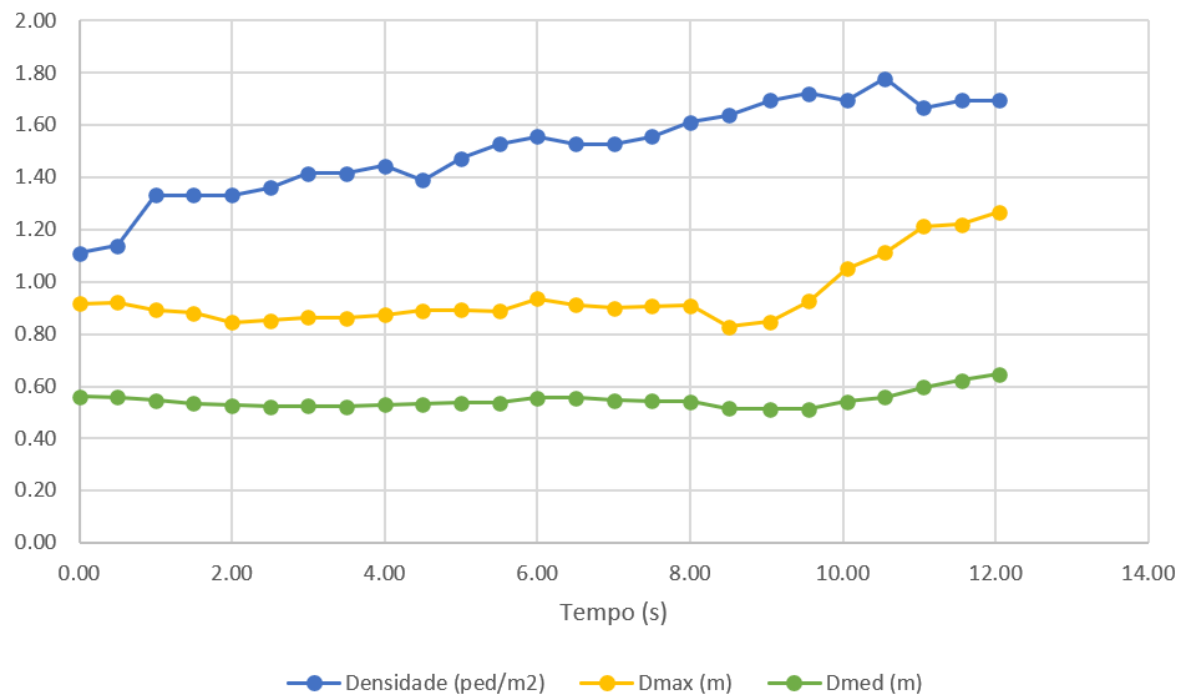
| D4 - Grupo escolar com hierarquia de liderança (tipo GT4 e $R_{ij} = 0,2$) | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|
| | Dens (ped/m²) | Vel. indiv (m/s) | Vel grupo (m/s) | Dmax (m) | Dmed (m) |
| Média | 1,68 | 0,75 | 0,56 | 1,44 | 0,86 |
| DP | 0,23 | 0,09 | 0,28 | 0,03 | 0,02 |

Fonte: o autor.

No experimento D5, foi realizado um teste com um *grupo misto*, do tipo GT6, contendo um grupo turístico com um guia e um conjunto de turistas, totalizando 9 pedestres (Figura 50 (b)). Nesse caso, o guia turístico g é o líder do grupo, sendo seguido por dois membros independentes, uma família e um grupo de colegas. O líder g tem relacionamento $R_{g,k} = 0,1$ com os outros membros k do grupo. Os membros independentes i_1 e i_2 seguem o guia g e possuem relacionamento apenas ele, sendo $R_{i_1g} = R_{i_2g} = 0,1$. A família possui três membros, sendo composta por uma mãe m e dois filhos f_1 e f_2 , sendo que a mãe m é uma sublíder do grupo, seguindo g e sendo líder dos filhos f_1 e f_2 . Apenas a mãe possui relação com o guia, de forma que $R_{mg} = 0,1$ e $R_{f_1g} = R_{f_2g} = 0$. Os filhos possuem relacionamento de $R_{f_1m} = R_{f_2m} = 1,0$ com a mãe e o relacionamento entre os membros i e j restantes da família é

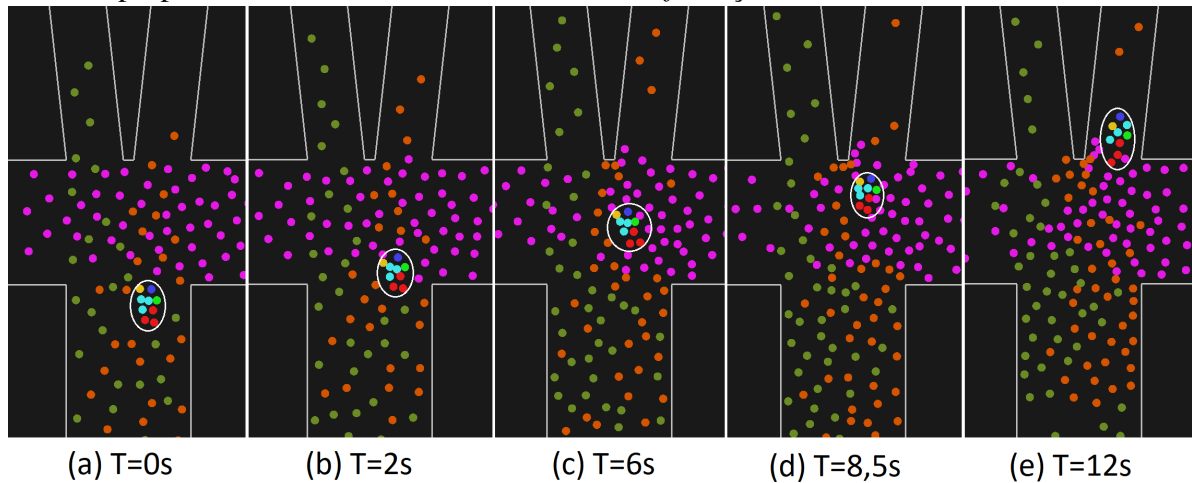
de $R_{ij} = 0,3$. Não há relacionamento deles com os membros independentes nem com o subgrupo de colegas. No subgrupo de colegas, não há liderança entre eles, sendo que cada um segue diretamente o guia g , com relacionamento $R_{ig} = 0,1$. O relacionamento entre eles é de $R_{ij} = 0,1$. Não há relacionamento deles com os membros independentes nem com os membros da família. No gráfico da Figura 52, pode-se identificar o aumento da densidade à medida que o tempo passa, variando de $1,11 \text{ pedestres}/\text{m}^2$ na entrada do grupo, quando $T=0\text{s}$, até $1,78 \text{ pedestres}/\text{m}^2$ quando o grupo está próximo à saída do cruzamento, com $T=10,5\text{s}$. No experimento, com base em D_{max} , pode-se perceber que o grupo mantém uma coesão estável durante o trajeto, com exceção do final, após $T=9\text{s}$, em que o grupo se dispersa um pouco para sair. No experimento, a velocidade média do grupo é um pouco inferior à dos indivíduos independentes, conforme esperado (Tabela 6). Na Figura 53, pode-se visualizar a evolução do grupo no trajeto.

Figura 52 – Experimento D5: gráfico da simulação de um grupo *misto*, do tipo *GT6*, representando um grupo turístico, usando o modelo proposto, no cenário de *cruzamento com bifurcação*



Fonte: o autor.

Figura 53 – Experimento D5: simulação de um grupo turístico *misto*, do tipo *GT6*, usando o modelo proposto, no cenário de *cruzamento com bifurcação*



Fonte: o autor.

Nota: o indivíduo em azul escuro é o guia, líder do grupo, enquanto que os membros em amarelo e verde claro seguem o guia independentemente dos outros. Os indivíduos em azul claro são um subgrupo de colegas e os em vermelho representam uma família formada por mãe e dois filhos. Os indivíduos em rosa caminham da direita para a esquerda, os em verde vão de baixo para o lado esquerdo da bifurcação e os em laranja caminham para o lado direito da bifurcação.

Nota: a linha do tempo segue da esquerda para a direita.

Tabela 6 – Quadro resumo do experimento D5

| D5 - Grupo turístico (misto) | | | | | |
|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|
| | Dens (ped/m²) | Vel. indiv (m/s) | Vel grupo (m/s) | Dmax (m) | Dmed (m) |
| Média | 1,51 | 0,86 | 0,73 | 0,94 | 0,55 |
| DP | 0,18 | 0,09 | 0,18 | 0,12 | 0,03 |

Fonte: o autor.

Na Tabela 7, podemos ver o comparativo, entre os experimentos, do tempo total que os membros do grupo levaram para sair do ambiente e da distância média percorrida pelo grupo. A partir desses dados, pode-se perceber que o grupo escolar, representado por um professor e cinco alunos (experimento D4) é o grupo que leva mais tempo e percorre a maior distância para atravessar o cruzamento. Isso se deve ao fato de seus membros seguirem em formato de fila e por cada um dos líderes/sublíderes ficarem responsáveis pelos seus seguidores diretos. Os grupos sem líder (experimentos D1 e D2) atravessam em menor tempo, por terem menor compromisso de esperarem uns pelos outros.

Tabela 7 – Quadro comparativo dos experimentos D1, D2, D3, D4 e D5

| Experimento | Tempo | Percurso |
|--|-------|----------|
| D1 (3 colegas sem líder) | 10s | 8,0m |
| D2 (3 amigos sem líder) | 8s | 7,2m |
| D3 (3 amigos com líder) | 14s | 8,0m |
| D4 (6 agentes com hierarquia de liderança) | 17s | 9,7m |
| D5 (9 agentes em grupo misto) | 12s | 9,0m |

Fonte: o autor.

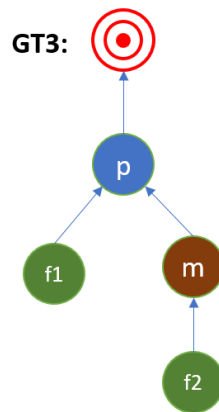
Nos experimentos D1 a D5, é possível verificar que a velocidade dos grupos é um pouco inferior à velocidade dos indivíduos, o que é um comportamento esperado. Também é possível verificar que todos os grupos conseguiram atravessar o cruzamento, com fluxo de densidade alta, com valor médio de densidade superior a $1,34 \text{ pedestres}/m^2$. Dos grupos analisados, o grupo de colegas (experimento D1), *sem líder* e com valores de relacionamentos baixos, e o grupo de turistas (experimento D5), com tamanho maior, com mais complexidade e com características mistas dos grupos, demonstraram comportamentos um pouco mais dispersos. Os grupos de amigos com relacionamentos mais elevados, tanto os *sem líder* quanto os *com líder*, e o grupo escolar, *com hierarquia de liderança*, apresentaram comportamentos mais coesos, demonstrando a capacidade do modelo de representar grupos mais autônomos, que se dispersam mais, ou mais coesos.

4.3.2 Cruzamento com bifurcação - densidade muito alta

Com o objetivo de se demonstrar a capacidade de reagrupamento do modelo e o impacto da modelagem de relacionamentos nos grupos, foi elevada ainda mais a densidade do cruzamento, de modo a forçar uma separação dos membros do grupo testado. No experimento E1, foi incluída uma família modelada *com hierarquia de liderança*, do tipo GT3 (Figura 54), em que um filho tem uma ligação muito forte com o pai e o outro filho tem uma ligação muito forte com a mãe. O pai p é o líder do grupo, sendo seguido pela mãe m e pelo filho f_1 . A mãe m é uma sublíder, sendo seguida pelo filho f_2 . O relacionamento de um filho para seu líder é $R_{f_1p} = R_{f_2m} = 1$ e o relacionamento entre dois membros i e j restantes é de $R_{ij} = 0,3$. Ao serem colocados para atravessar esse cruzamento em condições adversas, com densidade média de $2,55 \text{ pedestres}/m^2$, o grupo teve bastante dificuldade de atravessá-lo, e acabou se separando em dois, situação na qual um subgrupo passou pelo cruzamento e o outro ficou preso temporariamente (Figura 55 (a)). Apesar da situação adversa, o filho mais ligado ao pai

conseguiu sair junto com ele do cruzamento, enquanto que o filho mais ligado à mãe ficou junto dela tentando atravessar o cruzamento. Esse fato destaca a capacidade do modelo de representar diferentes intensidades de relacionamento dentro do próprio grupo. Outra característica ocorrida nesse cenário foi que, ao sair do cruzamento, o grupo formado por pai e filho parou e esperou pelo outro subgrupo formado por mãe e filho. Todos se reagruparam e seguiram juntos seu percurso quando o subgrupo mãe-filho conseguiu sair do cruzamento (Figura 55 (b)). Isso destaca a capacidade de reagrupamento do modelo proposto. No experimento, o grupo percorre uma distância de 13,7m e leva um tempo de 125s para atravessar o cruzamento, o que é um tempo bastante elevado, ocorrido devido à densidade bastante elevada na região do cruzamento e às altas relações entre os membros do grupo (familiares).

Figura 54 – Tipo de grupo utilizado no experimento E1

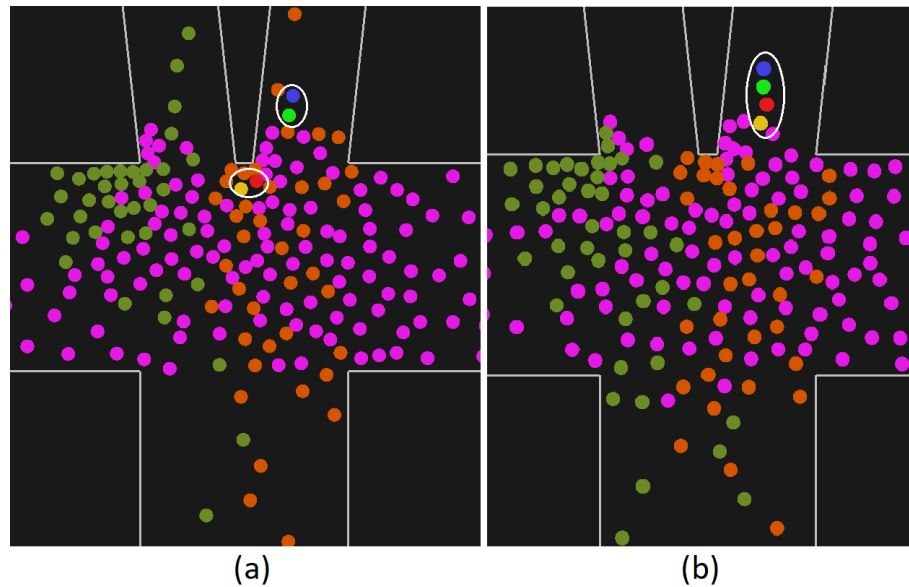


Fonte: o autor.

Nota: os agentes na cor vermelha representam membros autônomos dos grupos, os agentes na cor azul são líderes, os agentes em marrom representam sublíderes e os agentes na cor verde são seguidores.

Nota: As setas indicam para onde os agentes querem ir, seja em direção a outro agente ou em direção a um local no ambiente, sendo este representado por um alvo vermelho.

Figura 55 – Experimento E1: simulação de uma família *com hierarquia de liderança*, do tipo *GT3*, usando o modelo proposto, no cenário de *cruzamento com bifurcação* com densidade bastante elevada



Fonte: o autor.

Nota: o indivíduo na cor azul escuro é o pai, líder do grupo, sendo seguido pela mãe (em vermelho) e por um filho (em verde claro). A mãe é uma sublíder, seguida pelo outro filho (em amarelo). Os indivíduos em rosa caminham da direita para a esquerda, os em verde vão de baixo para o lado esquerdo da bifurcação e os em laranja caminham para o lado direito da bifurcação.

Nota: a linha do tempo segue da esquerda para a direita.

Nota: nas imagens, pode-se perceber o impacto da estrutura do grupo e dos níveis de relacionamento, que apesar da situação adversa mantiveram o filho mais ligado à mãe junto a ela e o filho mais ligado ao pai junto a ele. É exibida também a capacidade de reagrupamento do modelo, em que pai e filho esperam a chegada da mãe e do outro filho para continuarem seu trajeto.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, foi proposto um modelo flexível de representação de grupos de pedestres com relacionamentos em simulação de multidão. O modelo demonstrou ter capacidade de representar grupos com diferentes estruturas, podendo ser *com líder*, *sem líder*, *com hierarquia de liderança* ou *misto*, e grupos com tamanhos variados, incluindo grupos com subgrupos. Os experimentos realizados demonstraram a capacidade do modelo de representar grupos coesos, cujos membros seguem as mesmas rotas e desviam de outros grupos como um grupo unido e não apenas individualmente. Foi demonstrado também que o modelo pode representar grupos com membros mais autônomos, que possuem mais liberdade para seguirem rotas alternativas e se desviarem de forma mais individualizada, se reencontrando posteriormente. Foi possível também visualizar a capacidade que o modelo possui de reagrupamento, em que, caso alguém fique para trás, os outros membros do grupo esperam para todos se reencontrarem novamente. O modelo proposto demonstrou capacidade de representar níveis de relacionamento entre os membros de um grupo, em que dois membros andam mais próximos e é mais difícil separá-los de acordo com a intensidade do relacionamento entre eles. Foi demonstrada também a melhoria conseguida com a inclusão do fator de insistência, em que um indivíduo fica mais impaciente e segue em direção a seu destino com mais vigor caso não esteja conseguindo se aproximar de seu objetivo.

Como trabalho futuro, é interessante analisar a possibilidade de se modelar a escolha dos líderes/sublíderes de um grupo de forma dinâmica, de acordo com a situação, gerando grupos com estruturas também dinâmicas. Essa escolha dinâmica dos líderes pode ser baseada em aspectos como o nível de relacionamento entre os membros do grupo e a distância entre eles. A incorporação da modelagem de formações geométricas para grupos e subgrupos, como por exemplo a formação de uma tropa militar, e a inclusão de novos atributos de personalidade para os indivíduos também pode trazer mais capacidade de representação ao modelo. A parametrização com base no contexto e a extensão do trabalho para lidar com cenários 3D também são itens a serem estudados, assim como a análise do comportamento da abordagem proposta com a utilização de um modelo livre de colisões, como o Biocrowds (BICHO *et al.*, 2012), no lugar do modelo de forças.

REFERÊNCIAS

- BERG, J. van den; GUY, S. J.; LIN, M.; MANOCHA, D. Reciprocal n-body collision avoidance. In: PRADALIER, C.; SIEGWART, R.; HIRZINGER, G. (Ed.). **Robotics Research**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 3–19. ISBN 978-3-642-19457-3.
- BERG, J. van den; LIN, M.; MANOCHA, D. Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation. In: **2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S. l.: s. n.], 2008. p. 1928–1935.
- BICHO, A. de L.; RODRIGUES, R. A.; MUSSE, S. R.; JUNG, C. R.; PARAVISI, M.; MAGALHÃES, L. P. Simulating crowds based on a space colonization algorithm. **Computers & Graphics**, v. 36, n. 2, p. 70 – 79, 2012. ISSN 0097-8493. Virtual Reality in Brazil 2011. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0097849311001713>.
- BRAUN, A.; BODMANN, B. E. J.; MUSSE, S. R. Simulating virtual crowds in emergency situations. In: **Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology**. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2005. (VRST '05), p. 244–252. ISBN 1595930981. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/1101616.1101666>.
- BRAUN, A.; MUSSE, S. R.; OLIVEIRA, L. P. L. de; BODMANN, B. E. J. Modeling individual behaviors in crowd simulation. In: **Proceedings 11th IEEE International Workshop on Program Comprehension**. [S. l.: s. n.], 2003. p. 143–148.
- CEPOLINA, E. M.; MENICHINI, F. Pedestrian social groups modeling & simulation: a state of the art. In: **18th International Conference on Harbor, Maritime and Multimodal Logistics Modelling and Simulation (HMS 2016) : held at the 13th International Multidisciplinary Modeling and Simulation Multiconference (I3M 2016)**. [S. l.]: CAL-TECH, 2016. p. 76–85. ISBN 978-889799969-0.
- CHEN, L.; TANG, T.-Q.; SONG, Z.; HUANG, H.-J.; GUO, R.-Y. Child behavior during evacuation under non-emergency situations: Experimental and simulation results. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 90, p. 31 – 44, 2019. ISSN 1569-190X. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X18301539>.
- CHEN, X.; TREIBER, M.; KANAGARAJ, V.; LI, H. Social force models for pedestrian traffic – state of the art. **Transport Reviews**, Routledge, v. 38, n. 5, p. 625–653, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1396265>.
- CHENG, L.; YARLAGADDA, R.; FOOKES, C. B.; YARLAGADDA, P. K. A review of pedestrian group dynamics and methodologies in modelling pedestrian group behaviours. **World Journal of Mechanical Engineering**, Premier Publishers, v. 1, n. 1, p. 002–013, 2014. Disponível em: <https://eprints.qut.edu.au/78716/>.
- CURTIS, S.; BEST, A.; MANOCHA, D. Menge: A modular framework for simulating crowd movement. **Collective Dynamics**, v. 1, n. 0, p. 1–40, 2016. ISSN 2366-8539. Disponível em: <https://collective-dynamics.eu/index.php/cod/article/view/A1>.
- DICKINSON, P.; GERLING, K. M.; HICKS, K.; MURRAY, J. C.; SHEARER, J.; GREENWOOD, J. Virtual reality crowd simulation: effects of agent density on user experience and behaviour. **Virtual Reality**, v. 23, p. 19–32, 2018.

DONG, H.; ZHOU, M.; WANG, Q.; YANG, X.; WANG, F. State-of-the-art pedestrian and evacuation dynamics. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 21, n. 5, p. 1849–1866, May 2020. ISSN 1558-0016.

DUIVES, D.; DAAMEN, W.; HOOGENDOORN, S. State-of-the-art crowd motion simulation models. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 37, p. 193–209, 12 2013.

DUTRA, T. B. **Gradient-Based steering for vision-based crowd simulation algorithms**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

FARKAS, I.; HELBING, D.; VICSEK, T. Mexican waves in an excitable medium. **Nature**, v. 419, p. 131–2, 10 2002.

FIORINI, P.; SHILLER, Z. Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles. **The International Journal of Robotics Research**, v. 17, n. 7, p. 760–772, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/027836499801700706>.

GERAERTS, R. Planning short paths with clearance using explicit corridors. In: **2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S. l.: s. n.], 2010. p. 1997–2004.

GOLDBERG, L. R. An alternative "description of personality": the big-five factor structure. **Journal of personality and social psychology**, v. 59 6, p. 1216–29, 1990.

HAGHANI, M. Empirical methods in pedestrian, crowd and evacuation dynamics: Part i. experimental methods and emerging topics. **Safety Science**, v. 129, p. 104743, 2020. ISSN 0925-7535. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753520301405>.

HE, L.; PAN, J.; NARANG, S.; MANOCHA, D. Dynamic group behaviors for interactive crowd simulation. In: **Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation**. Goslar Germany, Germany: Eurographics Association, 2016. (SCA '16), p. 139–147. ISBN 978-3-905674-61-3. Disponível em: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2982818.2982838>.

HE, L.; PAN, J.; WANG, W.; MANOCHA, D. Proxemic group behaviors using reciprocal multi-agent navigation. In: **2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)**. [S. l.: s. n.], 2016. p. 292–297.

HELBING, D.; BUZNA, L.; JOHANSSON, A.; WERNER, T. Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions. **Transportation Science**, v. 39, n. 1, p. 1–24, 2005. Disponível em: <https://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/trsc.1040.0108>.

HELBING, D.; FARKAS, I.; VICSEK, T. Simulating dynamical features of escape panic. **Nature**, v. 407, p. 487–490, 09 2000.

HELBING, D.; MOLNÁR, P. Social force model for pedestrian dynamics. **Phys. Rev. E**, American Physical Society, v. 51, p. 4282–4286, May 1995. Disponível em: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.51.4282>.

HUANG, L.; GONG, J.; LI, W.; XU, T.; SHEN, S.; LIANG, J.; FENG, Q.; ZHANG, D.; SUN, J. Social force model-based group behavior simulation in virtual geographic environments. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 7, p. 79, 02 2018.

JAGER, W.; POPPING, R.; SANDE, H. van de. Clustering and fighting in two-party crowds: Simulating the approach-avoidance conflict. **J. Artificial Societies and Social Simulation**, v. 4, 06 2001.

JAKLIN, N.; KREMYZAS, A.; GERAERTS, R. Adding sociality to virtual pedestrian groups. In: **Proceedings of the 21st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology**. New York, NY, USA: ACM, 2015. (VRST '15), p. 163–172. ISBN 978-1-4503-3990-2. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/2821592.2821597>.

JIAN, X.-X.; WONG, S.; ZHANG, P.; CHOI, K.; LI, H.; ZHANG, X. Perceived cost potential field cellular automata model with an aggregated force field for pedestrian dynamics. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 42, p. 200 – 210, 2014. ISSN 0968-090X. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X14000321>.

KARAMOUZAS, I.; OVERMARS, M. Simulating and evaluating the local behavior of small pedestrian groups. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 18, n. 3, p. 394–406, 2012.

KARAMOUZAS, I.; SOHRE, N.; NARAIN, R.; GUY, S. J. Implicit crowds: Optimization integrator for robust crowd simulation. **ACM Trans. Graph.**, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 36, n. 4, jul. 2017. ISSN 0730-0301. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3072959.3073705>.

KNOB, P.; BALOTIN, M.; MUSSE, S. R. Simulating crowds with ocean personality traits. In: **Proceedings of the 18th International Conference on Intelligent Virtual Agents**. New York, NY, USA: ACM, 2018. (IVA '18), p. 233–238. ISBN 978-1-4503-6013-5. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/3267851.3267871>.

KOUNTOURIOTIS, V.; THOMOPOULOS, S. C.; PAPELIS, Y. An agent-based crowd behaviour model for real time crowd behaviour simulation. **Pattern Recogn. Lett.**, Elsevier Science Inc., New York, NY, USA, v. 44, n. C, p. 30–38, jul. 2014. ISSN 0167-8655. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.patrec.2013.10.024>.

KREMYZAS, A.; JAKLIN, N.; GERAERTS, R. Towards social behavior in virtual-agent navigation. **Science China Information Sciences**, v. 59, 11 2016.

LI, Y.; CHEN, M.; DOU, Z.; ZHENG, X.; CHENG, Y.; MEBARKI, A. A review of cellular automata models for crowd evacuation. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 526, p. 120752, 2019. ISSN 0378-4371. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437119303528>.

LI, Y.; LIU, H.; LIU, G. peng; LI, L.; MOORE, P.; HU, B. A grouping method based on grid density and relationship for crowd evacuation simulation. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 473, p. 319 – 336, 2017. ISSN 0378-4371. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437117300080>.

LIU, H.; LIU, B.; ZHANG, H.; LI, L.; QIN, X.; ZHANG, G. Crowd evacuation simulation approach based on navigation knowledge and two-layer control mechanism. **Information Sciences**, v. 436-437, p. 247 – 267, 2018. ISSN 0020-0255. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025516316127>.

LU, L.; CHAN, C.-Y.; WANG, J.; WANG, W. A study of pedestrian group behaviors in crowd evacuation based on an extended floor field cellular automaton model. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 81, p. 317 – 329, 2017. ISSN 0968-090X. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X16301565>.

MARTINEZ-GIL, F.; LOZANO, M.; GARCÍA-FERNÁNDEZ, I.; FERNÁNDEZ, F. Modeling, evaluation, and scale on artificial pedestrians: A literature review. **ACM Comput. Surv.**, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 50, n. 5, set. 2017. ISSN 0360-0300. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3117808>.

Microsoft Studios. **Age of Empires: Definitive Edition**. 2018.

MOLNAR, P.; STARKE, J. Control of distributed autonomous robotic systems using principles of pattern formation in nature and pedestrian behavior. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)**, v. 31, n. 3, p. 433–435, 2001.

MOUSSAÏD, M.; HELBING, D.; GARNIER, S.; JOHANSSON, A.; COMBE, M.; THERAULAZ, G. Experimental study of the behavioural mechanisms underlying self-organization in human crowds. **Proceedings. Biological sciences / The Royal Society**, v. 276, p. 2755–62, 06 2009.

MOUSSAÏD, M.; HELBING, D.; THERAULAZ, G. How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, National Academy of Sciences, v. 108, n. 17, p. 6884–6888, 2011. ISSN 0027-8424. Disponível em: <https://www.pnas.org/content/108/17/6884>.

MOUSSAÏD, M.; PEROZO, N.; GARNIER, S.; HELBING, D.; THERAULAZ, G. The walking behaviour of pedestrian social groups and its impact on crowd dynamics. **PLoS one**, v. 5, p. e10047, 04 2010.

MUSSE, S. R.; THALMANN, D. A model of human crowd behavior : Group inter-relationship and collision detection analysis. In: THALMANN, D.; PANNE, M. van de (Ed.). **Computer Animation and Simulation '97**. Vienna: Springer Vienna, 1997. p. 39–51. ISBN 978-3-7091-6874-5.

MUSSE, S. R.; THALMANN, D. Hierarchical model for real time simulation of virtual human crowds. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 7, n. 2, p. 152–164, April 2001.

OLIVA, R.; PELECHANO, N. Clearance for diversity of agents' sizes in navigation meshes. **Computers & Graphics**, v. 47, p. 48 – 58, 2015. ISSN 0097-8493. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0097849314001423>.

QIN, X.; LIU, H.; ZHANG, H.; LIU, B. A collective motion model based on two-layer relationship mechanism for bi-direction pedestrian flow simulation. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 84, p. 268 – 285, 2018. ISSN 1569-190X. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X1830039X>.

REN, Z.; CHARALAMBOUS, P.; BRUNEAU, J.; PENG, Q.; PETTRÉ, J. Group modeling: A unified velocity-based approach. **Computer Graphics Forum**, v. 36, n. 8, p. 45–56, 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/cgf.12993>.

RUDENKO, A.; PALMIERI, L.; HERMAN, M.; KITANI, K. M.; GAVRILA, D. M.; ARRAS, K. O. Human motion trajectory prediction: a survey. **The International Journal of Robotics Research**, v. 39, n. 8, p. 895–935, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0278364920917446>.

TEMPLETON, A.; DRURY, J.; PHILIPPIDES, A. From mindless masses to small groups: Conceptualizing collective behavior in crowd modeling. **Review of General Psychology**, v. 19, n. 3, p. 215–229, 2015. PMID: 26388685. Disponível em: <https://doi.org/10.1037/gpr0000032>.

THALMANN, D.; MUSSE, S. R. **Crowd Simulation**. 2nd. ed. [S. l.]: Springer Publishing Company, Incorporated, 2013. ISBN 144714449X.

TURNER, A.; PENN, A. Encoding natural movement as an agent-based system: An investigation into human pedestrian behaviour in the built environment. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 29, n. 4, p. 473–490, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1068/b12850>.

ULICNY, B.; THALMANN, D. Towards interactive real-time crowd behavior simulation. **Computer Graphics Forum**, v. 21, n. 4, p. 767–775, 2002. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1467-8659.00634>.

VARGHESE, E. B.; THAMPI, S. M. Towards the cognitive and psychological perspectives of crowd behaviour: a vision-based analysis. **Connection Science**, Taylor & Francis, v. 0, n. 0, p. 1–26, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09540091.2020.1772723>.

Warner Bros. Pictures. **O Hobbit: A Batalha dos Cinco Exércitos**. 2014.

XIE, R.; YANG, Z.; NIU, Y.; ZHANG, Y. Simulation of small social group behaviors in emergency evacuation. In: **Proceedings of the 29th International Conference on Computer Animation and Social Agents**. New York, NY, USA: ACM, 2016. (CASA '16), p. 71–77. ISBN 978-1-4503-4745-7. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/2915926.2919325>.

YANG, S.; LI, T.; GONG, X.; PENG, B.; HU, J. A review on crowd simulation and modeling. **Graphical Models**, v. 111, p. 101081, 2020. ISSN 1524-0703. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1524070320300242>.

ZHU, R.; LIN, J.; BECERIK-GERBER, B.; LI, N. Human-building-emergency interactions and their impact on emergency response performance: A review of the state of the art. **Safety Science**, v. 127, p. 104691, 2020. ISSN 0925-7535. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753520300886>.