

INFORMAÇÕES GERAIS DO TRABALHO

Título do Trabalho: Modelagem e Simulação Computacional de Evacuação em Instituições de Ensino Baseado em Características Comportamentais dos Indivíduos

Autor (es): Guilherme Cardoso Silva, Diego Mello da Silva, Bruno César de Melo Moreira, Mateus Campos Cunha

Palavras-chave: Autômato Celular, Evacuação de Multidão, *Floor Field*, *Crowd Evacuation*, *Cellular Automata*.

Campus: Formiga - MG

Área do Conhecimento (CNPq): 1.03.02.02-6 Modelos Analíticos e de Simulação

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar resultados preliminares sobre simulação de evacuação de multidões utilizando autômatos celulares em uma representação de ambiente de ensino (Bloco C do IFMG Campus Formiga) considerando efeitos da distância da saída do Bloco C (*floor field* estático) que orienta os pedestres do ambiente qual é o sentido da evacuação emergencial, *tracing* virtual deixado por pedestres (*floor field* dinâmico) que incorpora o efeito da densidade de pedestres na simulação, potencial repulsivo de paredes e obstáculos que permite inserir o comportamento observado de que pedestres evitam caminhar nas proximidades de obstáculos, e efeito inercial que permite modelar a tendência de que pedestres sigam movimentando no mesmo sentido do movimento que tenham realizado mais recentemente. Trata-se de um resultado parcial obtido a partir da análise do modelo de decisão implementado como parte do projeto de modelagem e simulação de evacuação de multidões utilizando características comportamentais. Este modelo opera a partir de um autômato celular de espaço discreto que descreve o ambiente usado no cenário de simulação, onde cada pedestre da multidão decide qual célula deve ocupar de sua vizinhança na próxima iteração considerando uma probabilidade de transição p_{ij} cujo cálculo segue um modelo probabilístico adaptado do trabalho de Nishinari et al (2004), que incorpora os efeitos apresentados acima. No presente momento o modelo ainda não considera características comportamentais individuais. Alguns experimentos preliminares foram realizados para entender o efeito dos parâmetros de sensibilidade K_S , K_D , K_W e K_I que ponderam os efeitos da distância, *tracing* virtual, obstáculos e inércia, considerando uma multidão de 400 pedestres distribuídos ao longo dos cômodos do piso térreo do Bloco C. Como indicador de desempenho mediu-se a quantidade de iterações que o autômato celular necessita para evacuar completamente a multidão do Bloco C. Para cada parâmetro considerado experimentou-se o modelo replicando-o por 10 repetições independentes, cujos resultados são reportados com algumas medidas básicas, e brevemente discutidos.

INTRODUÇÃO

Uma abordagem utilizada para modelar o comportamento de multidões em evacuações emergenciais é o autômato celular com *floor fields*. Trata-se de um modelo de espaço discreto com células de tamanho uniforme, que podem estar vazias ou ocupadas por um único pedestre ao mesmo tempo. Neste modelo cada pedestre move-se para uma das células vizinhas não ocupadas em cada passo de tempo discreto $t \rightarrow t + 1$ de acordo com certas probabilidades de transição p_{ij} calculadas, em geral, com dados oriundos de *floor fields* estático e dinâmico. O *floor field* estático relaciona a distância do pedestre à saída do ambiente, e é definido com valor inversamente proporcional à esta distância (Varas et al, 2007). Segundo Nishinari et al (2004), o *floor field* dinâmico modela um *tracing* virtual deixado por pedestres com dinâmica própria de difusão e decaimento. O modelo permite reproduzir fenômenos fundamentais observados em evacuação de multidões, como formação de faixas em corredores, agrupamento de pedestres e gargalos. Para maiores detalhes sobre uso de autômatos celulares com *floor fields* e sua extensão para incluir outros efeitos, consultar as obras de Schadschneider (2002), Nishinari et al (2004), Varas et al (2007), Huang (2008), Carneiro (2012), Castro e Lima (2013), Cao et al (2014), Gwizdała (2015), Wang e Wang (2016). Neste trabalho utilizou-se o autômato celular com *floor field* para analisar o comportamento de multidão na evacuação de ambiente de ensino do Campus Formiga. Maiores detalhes são apresentados a seguir.

O modelo de simulação de evacuação de multidões por autômatos celulares usado considera efeitos de (i) um campo estático de distâncias de cada pedestre até a saída do ambiente, que o conduz na evacuação completa do ambiente simulado; (ii) um campo de *tracing* dinâmico que, inspirado em quimiotaxia, permite que pedestres sigam preferencialmente os rastros de outros pedestres que já evacuaram o ambiente; (iii) um potencial repulsivo, que faz com que o pedestre evite trafegar nas proximidades de paredes e obstáculos; e (iv) um efeito inercial que faz com que o pedestre siga preferencialmente na mesma direção de seu movimento mais recente. O modelo utilizado é probabilístico, dado por Nishinari et al (2004). Seja (i, j) uma célula adjacente à célula ocupada por um pedestre, segundo a vizinhança de Moore (i.e., com suas 8 células adjacentes). Cada pedestre da multidão sorteia qual célula (i, j) tentará ocupar na próxima iteração da simulação com probabilidade p_{ij} , calculada pela Equação 1:

$$p_{ij} = N \cdot \exp(-K_S S_{ij}) \cdot \exp(K_D D_{ij}) \cdot p_I(i, j) \cdot p_W \cdot (n_{ij} - 1) \quad (\text{Equação 1})$$

onde p_{ij} representa a probabilidade de mover-se para a célula (i, j) ; N corresponde ao fator de normalização, que garante que $\sum p_{ij} = 1$ para todo (i, j) de sua vizinhança; K_S representa o parâmetro de sensibilidade para o campo estático de distância; S_{ij} corresponde ao valor de *floor field* estático da célula (i, j) com valor inversamente proporcional à saída do ambiente; K_D corresponde ao parâmetro de sensibilidade para o campo dinâmico; D_{ij} corresponde ao valor de *floor field* dinâmico do *tracing* virtual deixado na célula (i, j) por outros pedestres; $p_I(i, j)$ corresponde ao efeito inercial experimentado pelo pedestre, que assume $p_I(i, j) = \exp(K_I)$ se a direção do movimento para (i, j) tiver o mesmo sentido que seu movimento mais recente, ou assume $p_I(i, j) = 1$ caso contrário; K_I corresponde ao parâmetro de sensibilidade para o efeito inercial; p_W corresponde ao potencial repulsivo com valor inversamente proporcional à distância do pedestre à paredes/obstáculos, dado por $p_W = \exp(K_W \cdot \min(d, D_{max}))$ com d representando a menor distância, em células, de (i, j) para todas as paredes ou obstáculos do ambiente, e D_{max} representando a distância máxima de efeito do potencial repulsivo; K_W corresponde ao parâmetro de sensibilidade para o potencial repulsivo de paredes; e n_{ij} corresponde ao número de ocupação da célula, que assume $n_{ij} = 0$ se a célula (i, j) estiver vazia, ou $n_{ij} = 1$ se a célula (i, j) estiver ocupada por outro pedestre ou por paredes/obstáculos do mapa.

Embora o efeito do fogo, fumaça e características comportamentais individuais ainda não tenham sido incorporados ao modelo, o efeito dos quatro fatores considerados foi experimentado para verificar o impacto de seus parâmetros de sensibilidade, mais especificamente, para $K_S \in \{1, 2, 3\}$, $K_D \in \{1, 2, 3\}$, $K_W \in \{0.5, 1, 2\}$ e $K_I \in \{0.5, 1, 2\}$. Experimentos preliminares foram realizados em um ambiente simulado representativo do piso térreo do Bloco C do IFMG Campus Formiga, ilustrado na Figura 1.

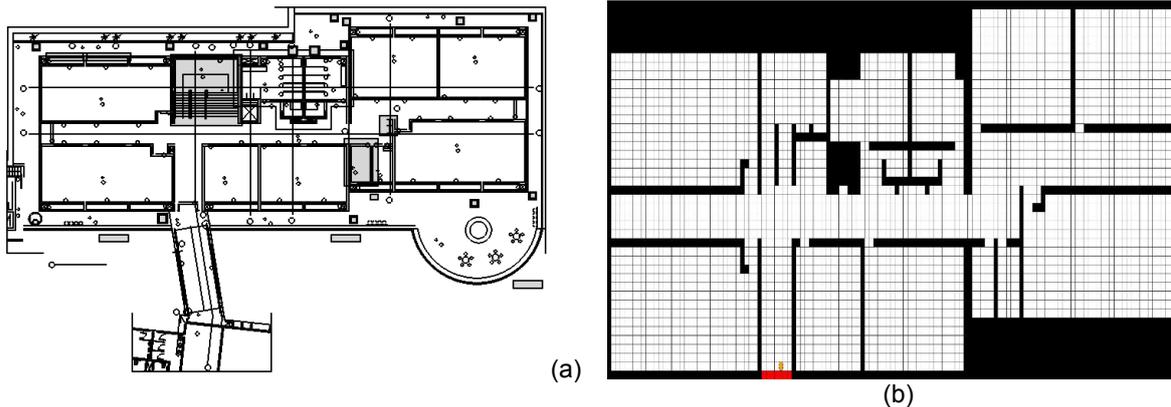


Figura 1 - Ambiente utilizado como cenário da simulação. Em (a), planta baixa do piso térreo do Bloco C. Em (b), modelo espacial discreto de autômato celular representando os principais cômodos do Bloco C.

Para a experimentação implementou-se o algoritmo descrito na Figura 2 em linguagem Python versão 3.6.1, com IDE Eclipse Java EE IDE for Web Developers versão Oxygen Release (4.7.0), *plugin* PyDev, e *Bitbucket* para controle de versão, em Notebook Asus x555LF BRA XX189T, com 8 GB de memória RAM, HD de 1TB 5400 R SATA e CPU x64 Core i5 - 5200U 5ª Geração 2.2 GHz.

Algorithm 1 SIMULACAO-MULTIDAO-AUTOMATO-CELULAR()

```

1: Carrega todos os mapas em forma de grid
2: for all grid do
3:   Calcula o floor field estático do grid
4: end for
5: Gera indivíduos aleatoriamente, distribuídos entre os grids
6: while ( $\exists$  indivíduos não evacuados) do
7:   Ordena os indivíduos de cada grid por distância da saída segundo o floor field estático
8:   for all (indivíduos que ainda não evacuaram grid) do
9:     for all (célula na vizinhança de Moore deste indivíduo) do
10:      Calcula  $p_{ij} = N \cdot \exp(-K_S S_{ij}) \cdot \exp(K_D D_{ij}) \cdot p_I(i, j) \cdot p_W \cdot (n_{ij} - 1)$ 
11:     end for
12:     Move indivíduo para célula da vizinhança não ocupada com probabilidade  $p_{ij}$ 
13:     Incrementa o floor field dinâmico da célula antes ocupada em 1 unidade
14:     if (célula escolhida corresponde à uma porta ou teleporte) then
15:       Transfere o indivíduo para outro grid ou saída
16:     end if
17:   end for
18:   for all (célula de cada grid) do
19:     Atualiza floor field dinâmico  $D_{ij}$  em termos de difusão e decaimento
20:   end for
21: end while

```

Figura 2 - Pseudocódigo do algoritmo que simula a evacuação de multidões usando autômatos celulares

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos experimentos preliminares propostos são reportados nesta seção. Em todos os casos, simulou-se a evacuação de uma multidão composta por 400 pedestres, cuja localização inicial foi

definida de maneira uniformemente distribuída no ambiente. O indicador de desempenho considerado foi a quantidade de iterações que o autômato celular necessita para evacuar completamente a multidão. Cada um dos parâmetros de sensibilidade apresentados foi experimentado em 10 repetições independentes. Os resultados obtidos encontram-se reportados na Tabela 1. Nela, quatro diferentes experimentos estão registrados, com parâmetros adotados descritos na coluna “**Parâmetros**”. As colunas “**Min**”, “**Média**”, “**Max**” e “**Desvio Padrão**” correspondem, respectivamente, ao menor valor, valor médio, maior valor e desvio padrão amostral calculados sobre as amostras de resultados da simulação, i.e., com a quantidade de iterações necessárias para evacuar todos os pedestres da multidão de cada replicação independente do modelo. Na Tabela 1, quando algum parâmetro for omitido na coluna “**Parâmetros**”, assume-se que o fator correspondente foi eliminado do modelo para medir apenas o impacto dos fatores destacados pelos parâmetros correspondentes. Assim, o Experimento I refere-se ao efeito isolado do campo estático, o Experimento II refere-se ao efeito conjunto do campo estático e do campo dinâmico, o Experimento III refere-se ao efeito conjunto do campo estático com potencial de paredes, e o Experimento IV refere-se ao efeito conjunto do campo estático com o efeito inercial.

Tabela 1 - Efeito dos parâmetros K_S , K_D , K_W e K_I sobre o desempenho da evacuação do Bloco C

Experimento	Parâmetros	Min	Média	Max	Desvio Padrão
I - Efeito Isolado do Campo Estático	$K_S = 1$	446	471,50	512	20,95
	$K_S = 2$	351	370,20	385	11,29
	$K_S = 3$	317	338,40	350	7,79
II - Efeito Conjunto do Campo Estático e Dinâmico	$K_S = 2, K_D = 1$	390	430,30	457	20,05
	$K_S = 2, K_D = 2$	519	547,70	580	17,80
	$K_S = 2, K_D = 3$	635	667,30	723	25,88
III - Efeito Conjunto do Campo Estático e Pot. de Paredes	$K_S = 2, K_W = \frac{1}{2}$	333	345,60	356	9,21
	$K_S = 2, K_W = 1$	355	367,20	379	8,14
	$K_S = 2, K_W = 2$	584	610,30	645	16,32
IV - Efeito Conjunto do Campo Estático e Efeito Inercial	$K_S = 2, K_I = \frac{1}{2}$	353	362,50	370	6,08
	$K_S = 2, K_I = 1$	315	328,40	340	7,48
	$K_S = 2, K_I = 2$	316	328,20	340	7,50

Analisando a Tabela 1 temos que os seus resultados sugerem que a variação de valores dos parâmetros de sensibilidade K_S , K_D , K_W e K_I referentes à importância do campo estático, dinâmico, potencial de parede e inercial influenciam o desempenho da evacuação completa da multidão. O Experimento I considerou apenas o efeito isolado do campo estático. Pela Tabela 1 observa-se que aumentando-se o valor do parâmetro K_S , mais se dá importância às células da vizinhança do pedestre que estão mais próximas da saída, segundo o campo S_{ij} , e menor é o tempo de evacuação da multidão. Isso explica-se porque os pedestres terão optado, na maioria das escolhas de movimento, por seguir o fluxo de menor caminho para a saída, evitando dispersar-se do fluxo principal.

No Experimento II analisou-se o efeito conjunto do campo estático de distância com o *tracing* virtual dinâmico gerado pelos fluxos mais seguidos por pedestres. Pelos resultados da Tabela 1 observa-se que quanto menor é a importância dada para este fator, mais rápido a multidão é evacuada do ambiente. Uma possível explicação para o fato está na calibração de parâmetros relacionados à dinâmica de difusão e decaimento do *tracing*, fora do escopo deste artigo. O forte efeito do *tracing* faz com que pedestres mais atrasados sejam atraídos por fluxos executados por pedestres mais adiantados no processo de evacuação, que não necessariamente sortearam boas escolhas de movimentação. Se a probabilidade de transição para uma célula ocupada previamente por muitos pedestres é maior do que as demais células da mesma vizinhança, logo é mais provável que ela seja escolhida, mesmo que existam células vizinhas com melhores chances de evacuar este pedestre. Neste caso, cabe utilizar os resultados observados para reconfigurar os parâmetros relacionados à difusão e decaimento do *floor field* dinâmico. Detalhes sobre estes parâmetros podem ser vistos em Nishinari et al (2004).

O Experimento III avaliou o efeito conjunto do campo estático de distâncias com o potencial repulsivo de paredes e objetos. Pelos resultados da Tabela 1 observa-se que quanto menor é a importância dada à este potencial, menor é o tempo necessário para evacuação completa da multidão. Isso pode ser explicado pelo afunilamento que ocorre nos corredores do ambiente simulado quando se aumenta o potencial repulsivo, pois quanto maior for a importância dada à este potencial, menor será o viés de escolha para as células da vizinhança do pedestre que se localizam próximas de paredes e obstáculos, já que o efeito experimentado possui valor com magnitude inversamente proporcional à distância do pedestre à estes objetos. Em um corredor importante, por exemplo, células muito próximas à paredes e obstáculos serão evitadas na maioria dos sorteios, restando como opções mais prováveis de movimento do pedestre as células mais distantes destes objetos, concentradas no meio dos corredores, causando alta densidade de ocupação e formação de filas nestas faixas, que causam gargalos e atrasos na evacuação da multidão como um todo.

Por fim, o Experimento IV avaliou o efeito conjunto do campo estático de distância e da inércia do movimento do pedestre. Os resultados da Tabela 1 para este experimento sugerem que quanto maior for a importância dada à tendência de manter o sentido de movimentação mais recente de um pedestre, menor será o tempo necessário para evacuação completa da multidão. O próprio campo estático insere um viés positivo no sorteio das células da vizinhança próximas de saídas, logo já existe uma predisposição na escolha de células bem localizadas. Quando considera-se o efeito inercial em conjunto com o efeito do

campo estático, boas escolhas são reforçadas, pois o valor de viés do efeito inercial é adicionado ao valor de viés do campo estático, causando uma “interferência construtiva” que aumenta a probabilidade de transição de células da vizinhança do pedestre que estejam (i) bem localizadas e que (ii) correspondam ao mesmo sentido de movimento recente do pedestre. Este “reforço” explica o resultado médio de menor magnitude reportado sobre o tempo de evacuação da multidão quando se considera ambos os efeitos (Experimento IV) contra apenas o efeito do campo estático (Experimento I).

Para ilustrar como a dinâmica de evacuação ocorre segundo o modelo, a Figura 3 exemplifica-a em um cenário com 400 indivíduos, representados por pontos coloridos (que representam diferentes categorias de pedestres), inicialmente dispersos no piso térreo do Bloco C do Campus Formiga. Os *snapshots* de (a) a (g) foram sacados do simulador nas iterações 0, 25, 50, 100, 150, 200, 250 e 300.

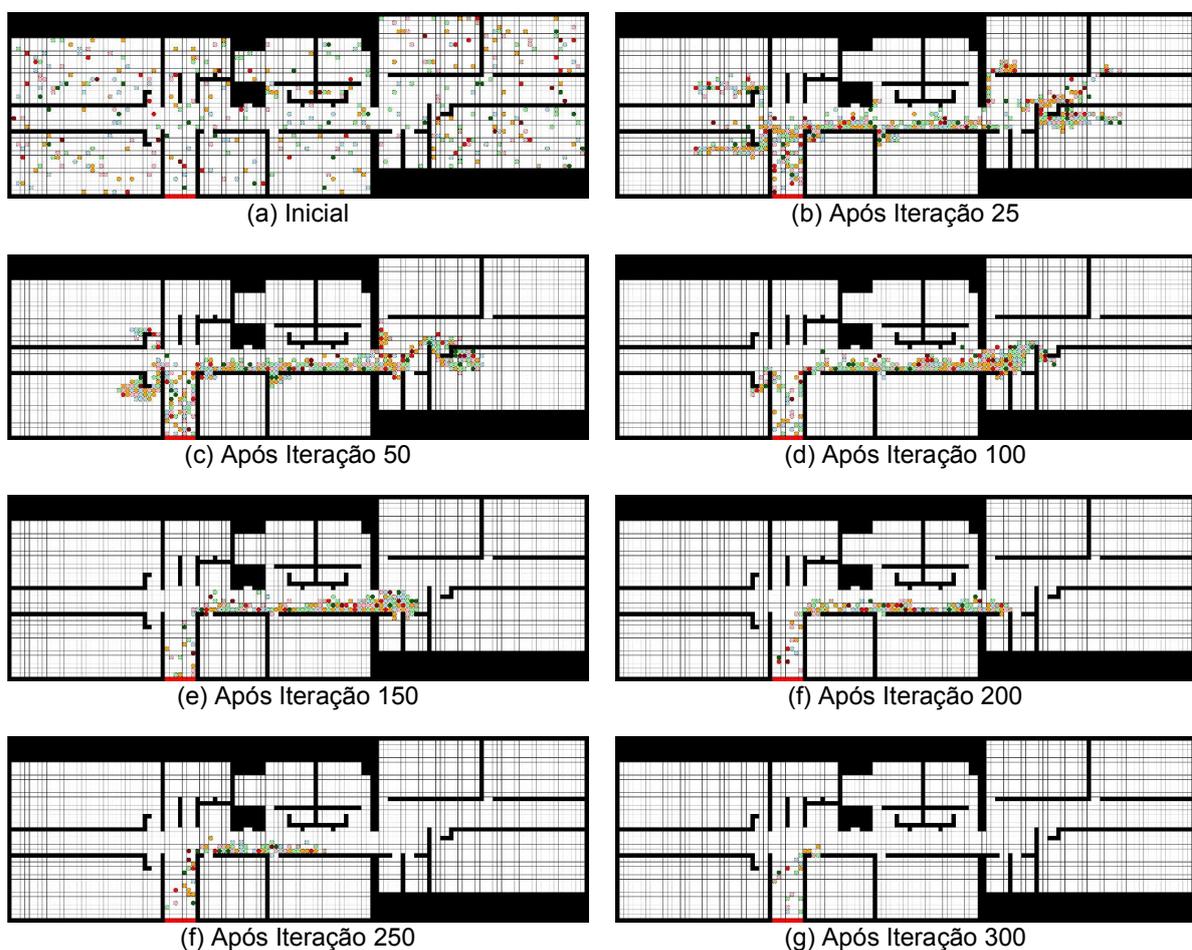


Figura 3 - Evolução de uma Evacuação de Multidão com 400 Pedestres ao Longo do Tempo

CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou resultados preliminares que resultaram da implementação e experimentação de modelo de simulação de evacuação de multidões utilizando autômatos celulares. Os fatores considerados foram distância da saída de emergência, *tracing* virtual deixado por outros pedestres,

efeito repulsivo de potencial de paredes e efeito inercial. Experimentos preliminares foram realizados a partir de um cenário representativo do piso térreo do Bloco C do IFMG Campus Formiga, onde 400 pedestres foram evacuados, medindo-se a quantidade de iterações necessárias para evacuação completa da multidão. Os resultados apresentados mostram que a escolha dos parâmetros de sensibilidade dos referidos efeitos pode impactar de maneira significativa no tempo total de evacuação. Trabalhos futuros incluem calibrar e validar os parâmetros destes fatores, e considerar novos fatores no modelo, mais especificamente para medir o efeito do espalhamento de fogo e fumaça, e impacto na decisão considerando características comportamentais individuais tais como idade, gênero, e outras, ainda a definir.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAO, S.-C. *et al.* Simulation of Pedestrian Evacuation in a Room under Fire Emergency. **Procedia Engineering**, v. 71, p. 403–409, 2014.

CARNEIRO, L.O.C. **Simulação de Evacuação de Multidão por Autômato Celular: Estudo de Caso em um Estádio de Futebol.** 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Departamento de Computação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

CASTRO, A.P., LIMA, D. A. Autômatos Celulares Aplicados à Modelagem de Dinâmica Populacional em Situação de risco. In: WORKSHOP OF APPLIED COMPUTING FOR THE MANAGEMENT OF THE ENVIRONMENT AND NATURAL RESOURCES (WCAMA), 4, 2013, Maceió. **Anais do XXXIII Congresso da Sociedade Brasileira de Computação (CSBC). Porto Alegre, RS, Brasil: Sociedade Brasileira de Computação (SBC), 2013, v.33, p.1091 - 1102.**

GWIZDAŁŁA, T. M. Some properties of the floor field cellular automata evacuation model. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 419, p. 718–728, 2015.

HUANG, H.-J.; GUO, R.-Y. Static floor field and exit choice for pedestrian evacuation in rooms with internal obstacles and multiple exits. **Physical Review E**, v. 78, n. 2, 2008.

NISHINARI, K. *et al.* Extended floor field CA model for evacuation dynamics. **EICE Transactions on Information and Systems**, v. E87-D, n.3, p. 726-732, 2004.

SCHADSCHNEIDER, A. Cellular Automaton Approach to Pedestrians Dynamics - Theory. In: SCHRECKENBERG, M. e SHARMA, S. D. (Ed.) **Pedestrian and evacuation dynamics** Springer, 2002.

VARAS, A. *et al.* Cellular automaton model for evacuation process with obstacles. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 382, n. 2, p. 631–642, 2007.

WANG, C.; WANG, J. A Modified Floor Field Model Combined with Risk Field for Pedestrian Simulation. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2016, p. 1–10, 2016.