

ANÁLISE DO TEMPO DE EVACUAÇÃO TOTAL DE UM CINEMA POR MEIO DA APLICAÇÃO DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS▲

ANALYSIS OF TOTAL TIME EVACUATION OF A MOVIE THEATER THROUGH THE APPLICATION OF COMPUTER SIMULATIONS

Tatiane Silva^{1*}, Liliana Gramani¹, Eloy Kaviski¹, Fábio Balbo¹, Marina Ferreira¹

RESUMO

O estudo da dinâmica de pedestres tem sido utilizada em situações que procuram identificar ou reproduzir características do comportamento humano. Quando envolve multidões, esse estudo torna-se ainda mais complexo, visto que, as questões associadas à interação dos pedestres também deve ser considerada. Para descrever ou prever tais situações o emprego das simulações computacionais permite uma melhor aproximação do modelo, pois possibilita a inclusão de parâmetros como hipóteses iniciais. Nesse sentido, o presente trabalho propõe a análise da evacuação de uma sala de cinema, identificando dentre 4 casos de geometria estabelecidas, a que minimiza o tempo de evacuação em função do número de pedestres. No desenvolvimento estocástico e no processo evolutivo foram utilizadas uma modificação da teoria dos autômatos celulares e empregado o método de Simulação de Monte Carlo, como uma proposta de metodologia de análise. Posteriormente, foi aplicada a regressão polinomial como uma forma de estabelecer um modelo de previsão para demais lotações, a um determinado nível de confiabilidade, que mostrou-se satisfatório na predição do parâmetro tempo médio total.

Palavras chave: Simulação de Monte Carlo, autômato celular, evacuação

ABSTRACT

The study of pedestrian dynamics has been used in situations looking identify or reproduce features of human behavior. When it involves crowds, this study becomes even more complex, since the issues associated with interaction of pedestrians should also be considered. To describe or predict such situations the use of computing simulations allows a better approximation of the model, since it allows inclusion of parameters as initial hypotheses.

In this sense, this paper proposes an analysis of the evacuation of a movie theater, identifying among of 4 cases analysed of sets geometry, which minimizes the evacuation time in function on the number of pedestrians. In stochastic developing and evolution process we used an modification of the theory of cellular automata and employed the method of Monte Carlo simulation, as a proposed of analysis methodology. It was later applied to polynomial regression as a way to establish a forecasting model for other cases, with a certain level of reliability, which was satisfactory in predicting of average total time parameter.

Keywords: Monte Carlo simulation, cellular automata, evacuation.

*IX Congreso del Instituto Chileno de Investigación Operativa, 26-29 de octubre, Pucon. Chile
¹UFPR-Universidade Federal do Paraná. Brazil

Autor correspondente: *tatianecazarin@gmail.com

Recebido: 06.09.2011 Aceito: 27.04.2012

INTRODUÇÃO

A modelagem do fluxo de pedestres por meio de simulações computacionais tem sido amplamente aplicada a problemas que envolvem multidão devido à capacidade de predição e adequação dos resultados. O aumento do fluxo populacional nos grandes centros urbanos tem gerado preocupação quanto à necessidade de segurança e infraestrutura adequadas. Sendo assim, torna-se imprescindível adotar estratégias que visem minimizar transtornos decorrentes da inadequação ou violação dos recursos. Essas são características que conduzem a um estudo ainda maior sobre os fatos que podem afetar o comportamento de uma multidão numa situação de emergência.

Modelos de simulação de dinâmica de pedestres são aplicados em fenômenos coletivos, destacando peculiaridades observadas em situações de evacuação, tais como otimização do espaço e minimização do tempo de evacuação de ambientes. Associado ao aprimoramento de projetos de construção, ao planejamento urbano e ao fortalecimento da dinâmica social as simulações de evacuação de ambientes em condições de emergência encontram-se diretamente relacionadas às evoluções temporais que por sua vez determinam um processo estocástico. Nesse sentido, o objetivo dessa pesquisa é propor o resultado de simulações aplicadas ao processo de evacuação de uma sala de cinema, numa situação sem pânico, por meio da análise do tempo de evacuação total.

A fim de descrever as interações entre os campos de força dinâmica e estática, e a aleatoriedade do comportamento humano, as regras de interação decorrentes da delimitação do espaço e da movimentação serão estabelecidas com o auxílio da teoria dos Autômatos Celulares e do Método de Simulação de Monte Carlo, desenvolvidos em linguagem Pascal. Sendo assim, será possível utilizar dados referentes às simulações de diferentes lotações do espaço, considerando diferentes geometrias, e possibilitando determinar um modelo, dentre os analisados, que minimize o tempo total de evacuação.

Desenvolvimento do tema

O número de pessoas que ocupam um mesmo espaço, principalmente público, pode sofrer grandes variações no decorrer de um dia, por exemplo. Porém, mesmo que tal oscilação ocorra em horários específicos, não é possível calcular com exatidão o número de pessoas que integrarão o ambiente. A fim de evitar transtornos decorrentes da falta de infraestrutura, tais locais devem caracterizar-se pelo desenvolvimento e aprimoramento estruturais, como alternativa de sanar tal dificuldade. (Zampieri, 2006; Steinberg, 2005).

Quando um indivíduo descreve uma trajetória ou realiza um movimento, torna-se um pedestre. A aglomeração ou direcionamento de sentido no movimento dos pedestres define um fluxo. O estudo de características de situações que envolvem o fluxo de pedestres nas mais diversas situações pode garantir a estimação de resultados, conseqüentemente, possibilitando a predição das informações. O estudo de casos que envolvem multidão representa extrema importância no processo de evolução da dinâmica de pedestres.

Os casos de aglomeração, ou “multidão”, são pontuados por envolverem um alto número de indivíduos com características distintas num mesmo espaço físico. Nesses casos, além da interação entre pedestre e meio, tem-se a interação entre pedestres. Diversas são as situações marcadas pelo estudo do comportamento de multidões, tais como a simulação de multidões aplicadas em produções cinematográficas, jogos digitais, planejamento de construções, evacuação de ambientes complexos, arquitetura, dentre outras. (Bicho, 2009; Dapper, 2007).

Nesse sentido, a simulação se destaca como uma poderosa ferramenta no desenvolvimento de sistemas mais eficientes e no apoio à tomada de decisão (Saliby, 1999). O objetivo do desenvolvimento, aprimoramento ou da melhoria de atendimento na prestação de serviços são questões que norteiam objetivos comuns à diversas áreas, visando minimizar erros e maximizar qualidade, já que o fato de estimar dados e prever resultados são fatores relevantes na experimentação e manipulação das informações.

De acordo com Bicho (2009) a modelagem e simulação de multidões, caracterizada por um alto fluxo populacional são temas de estudo em diferentes áreas da ciência, pois garantem um vasto campo aplicativo no que tange o fluxo de pedestres. Nesse sentido, destacam-se os estudos relacionados à simulação de multidões, buscando responder questões associadas desde a escolha de um caminho, até a simulação de situações marcadas pelo pânico. (Zampieri, 2006).

A utilização de simulações computacionais de dinâmica de pedestres facilita no entendimento de características básicas sobre o fluxo de pessoas, e conseqüentemente, torna-se ferramenta essencial para descrever informações relacionadas à formulação de saídas, geometrias de salas e estádios. (Perez *et al.*, 2002).

Considerando o caso específico de uma sala de cinema, trata-se de um ambiente público voltado a uma diversidade de espectadores. Nos casos de cinemas individuais ou situados em centros comerciais, tais como shoppings, a vulnerabilidade para incêndio ou demais peculiaridades é alta. Dentre os fatores que integram as avaliações associadas à falta de segurança dos cinemas, destacam-se o número e a localização de saídas de emergência e o comprimento dos caminhos de evacuação. (Oliveira, 2003).

Dessa forma, o estudo do comportamento dos pedestres numa situação de evacuação de uma sala de cinema, pode fornecer informações que satisfaçam as principais dificuldades enfrentadas, conforme apresentadas. O uso de métodos computacionais pode reproduzir tais situações, permitindo a comparação dos resultados e conseqüentemente predizendo resultados mais satisfatórios e com limite de segurança.

Aplicando simulações computacionais, torna-se possível estabelecer características geométricas que minimizem o tempo de evacuação do ambiente em função de parâmetros estabelecidos como hipóteses iniciais, que podem estar relacionados a dimensão e disposição física dos fatores que integram o ambiente.

Nesse sentido, o presente trabalho propõe ajustar um método de evolução estocástica que permita identificar o tempo total de evacuação de uma sala de cinema, sujeita a comparação de diferentes geometrias, identificando a que minimiza o objeto de estudo. Os principais aspectos teóricos, envolvendo as simulações computacionais, a teoria de autômatos celulares e o Método de Simulação de Monte Carlo, que serão empregados na pesquisa, encontram-se brevemente elencados a seguir.

As simulações computacionais consistem num processo de experimentação pelo qual um modelo busca descrever mudanças na estrutura, no ambiente ou nas condições de contorno de um sistema. (Harell *et al.*, 2002). O modelo idealizado permite a replicação do ambiente real, de forma a explicitar *a priori* modificações na estrutura real. Por essa razão, a veracidade dos resultados está relacionada, em grande escala, com a exposição correta dos dados de entrada do modelo, assim como das especificidades das variáveis. Tal relação de funcionalidade é garantida por meio da metodologia utilizada no desenvolvimento do estudo.

Os autômatos celulares são utilizados em grande escala nas simulações computacionais, visando reproduzir ou descrever fatos numericamente. São utilizados na formação ou determinação de padrões comportamentais, sociais, ambientais e biológicos, por meio da interação dos fatores envolvidos. Trata-se de um modelo matemático discreto no tempo, nas variáveis dinâmicas e no espaço, modelado em uma grade regular de células, chamada malha, cuja evolução é permitida pelo estabelecimento de regras simples de dependência entre elas.

De acordo com Lima (2006) denomina-se autômato celular ao conjunto (L, S, N, f) no qual L representa uma malha d -dimensional com células regulares, S o número de estados que podem ser atribuídos para cada célula, N o tipo de vizinhança que influencia na atualização de cada célula e f a regra que determina o estado de uma célula a partir do seu estado atual e da vizinhança.

A seguir tem-se uma malha quadrada regular, sob a qual está definida a vizinhança *von Neumann* para o caso bidimensional (Figura 1.).

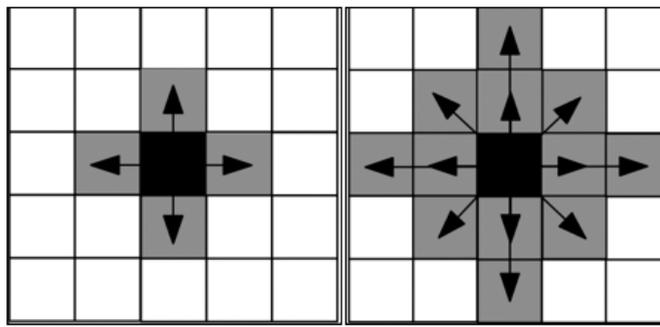


Figura 1. Vizinhança de *von Neumann* para o caso bidimensional, raio 1 e raio 2, respectivamente.

Pode-se observar que a partir da célula central destacada, o movimento de interação entre as células pode ser influenciado pelas células vizinhas, também destacadas. A partir do estado de tais células o estado inicial pode ser modificado, por meio da atualização da regra de interação. Por estado, entende-se a característica de uma célula, definida geralmente por um valor numérico. Com uma possível movimentação, definida inicialmente, há atualização dos estados, e conseqüentemente, das células.

Os estados podem ser fixos para todas as células, ou diferenciados, conduzindo a estados não homogêneos, que interagem temporalmente. Tem-se então um processo estocástico que evolui ao acaso. Dessa forma, uma estratégia para estabelecer a probabilidade de ocorrência de um fenômeno não determinístico é a utilização do Método de Simulação de Monte Carlo.

O Método de Monte Carlo é um método estatístico utilizado em simulações estocásticas, envolvendo a geração de números aleatórios por meio de uma distribuição de probabilidade, (Andrade *et al.*, 2001), cuja intenção é reproduzir algum sistema real, principalmente quando outras análises são matematicamente complexas.

De acordo com Escudero (1973) esse método consiste na substituição de um sistema físico ou matemático por um modelo probabilístico, verificando assim processos por meio de amostras aleatórias, ou números pseudo-aleatórios.

De forma geral, os métodos ou teorias apresentadas encontram-se relacionados ao processo de simulação, visando descrever fenômenos reais, por meio da inclusão de parâmetros que evoluem temporalmente, e conseqüentemente, podem ser utilizadas na predição de resultados.

MATERIAIS E MÉTODOS

Atendendo as normas vigentes para a liberação e construção de obras públicas, assim como a arquitetura específica de uma sala de cinema, (Neufert & Neufert, 2004), foi proposta a análise de evacuação de um ambiente fictício, modelado em pequenas dimensões. A escolha por desenvolver um ambiente fundamenta-se em critérios legais, evitando divulgar resultados de simulações aplicadas a ambientes identificados.

Empiricamente, foi escolhida uma lotação inicial máxima de 130 pedestres, e realizada 4 adaptações, nominados por Caso 1, Caso 2, Caso 3 e Caso 4, que diferem na posição dos corredores e das poltronas, sendo apresentados nas figuras 2, 3, 4 e 5 a seguir.

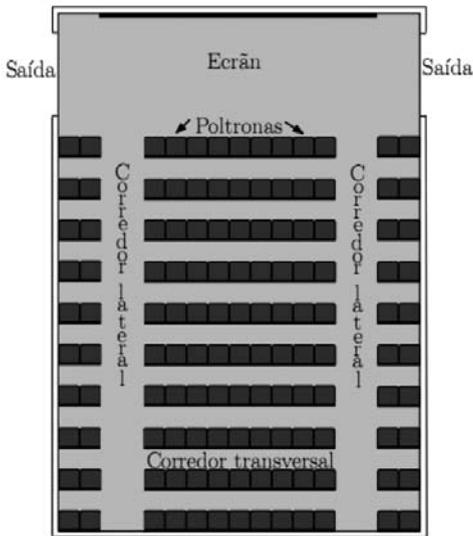


Figura 2. Geometria da sala de cinema caracterizada pelo Caso 1.

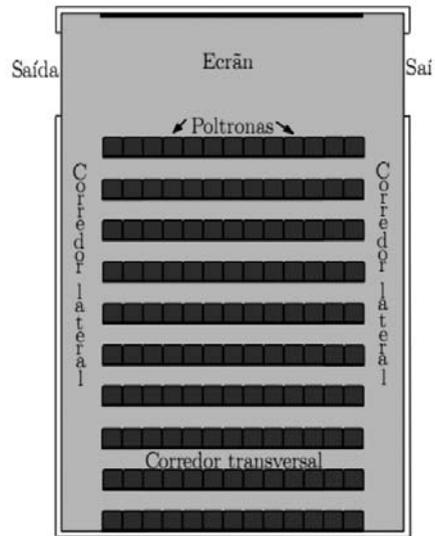


Figura 3. Geometria da sala de cinema caracterizada pelo Caso 2.

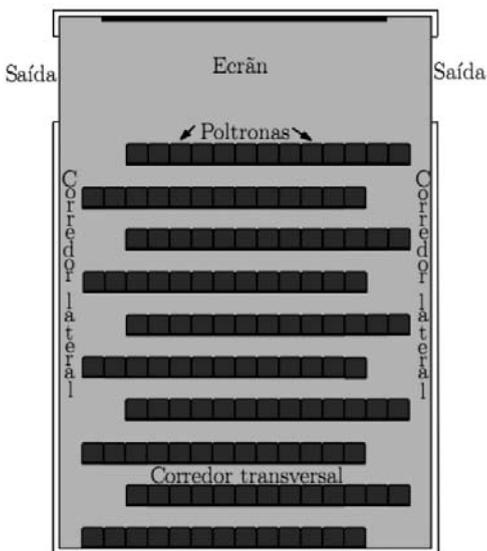


Figura 4. Geometria da sala de cinema caracterizada pelo Caso 3.

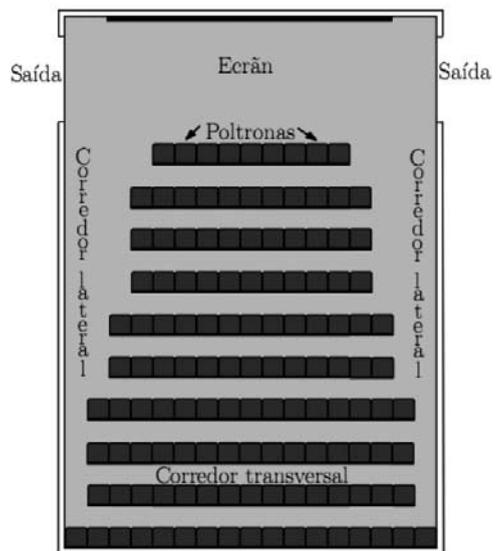


Figura 5. Geometria da sala de cinema caracterizada pelo Caso 4.

Para efeitos de comparação, algumas medidas mantêm-se constantes nos 4 casos, tais como: dimensões da sala (8,5 m x 12,5 m); dimensões do ecrã (8,5 m x 3,0 m); número de saídas (2); largura de cada porta de saída (2 m); largura dos corredores transversais (0,5 m); número máximo de espectadores sentados (130); dimensões da planta baixa das poltronas (0,5m x 0,5m); número de fileiras (10) e número de poltronas por fileira (13).

As características específicas referem-se à diferentes geometrias do ambiente, conseqüentemente, alteram-se as disposições e medidas dos corredores e das poltronas. Tais situações encontram-se destacadas a seguir.

-Caso 1:

- Largura dos corredores laterais: 1 m;

Comprimento dos corredores transversais de cada fileira: 1 m; 4,5 m e 1m, respectivamente;

- Sequência de poltronas: 2, 9 e 2, respectivamente;

- Caso 2:

- Largura dos corredores laterais: 1 m;

Comprimento dos corredores transversais de cada fileira: 6,5 m;

- Sequência de poltronas: 13;

- Caso 3:

- Largura dos corredores laterais: Alternados, com valores de 1,5m e 0,5m, respectivamente;

- Comprimento dos corredores transversais de cada fileira: 6,5m;

- Sequência de poltronas: 13.

- Caso 4:

- Largura dos corredores laterais: Alternados, com valores de 4,5m; 5,5m; 6,5m; 7,5m e 8,5m, respectivamente;

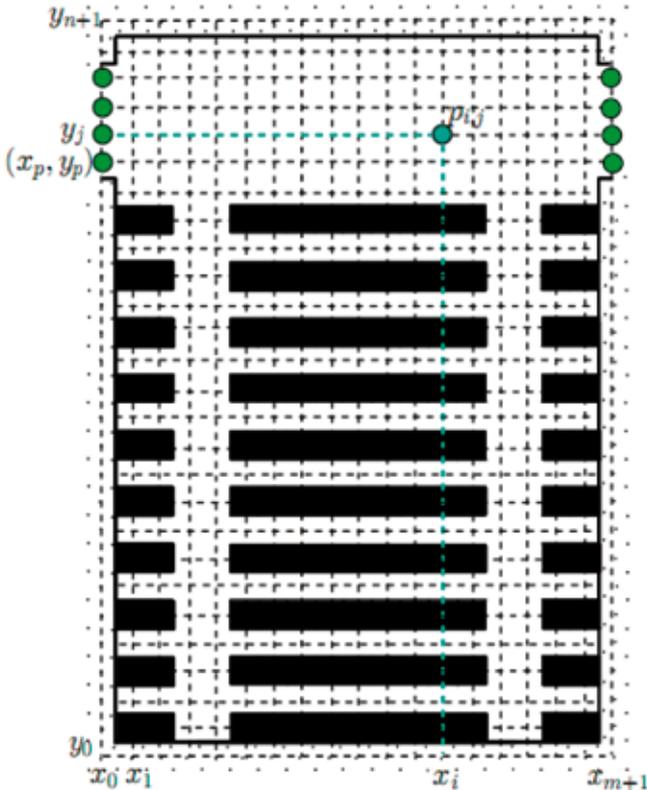
- Comprimento dos corredores transversais de cada fileira: Alternados, com valores de 0,5m; 1,0m; 1,5m e 2,0m, respectivamente;

- Sequência de poltronas: 13.

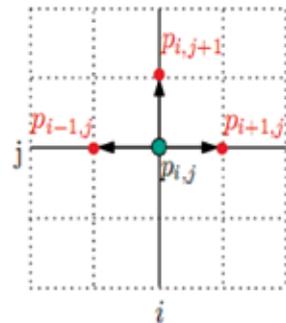
As dimensões das saídas são proporcionais ao número de pessoas que ocupam o ambiente. Sendo assim, as medidas utilizadas, tais como a quantidade e largura mínima dos corredores e das saídas satisfazem a demanda considerada na situação exposta.

Descrição

Sobre cada uma das plantas ilustradas nas figuras 2, 3, 4 e 5, foi aplicada uma malha retangular bidimensional, de ordem $(m + 1 \times n + 1)$, onde $m = 17$ e $n = 25$. Como ilustração, a figura 6(a) representa uma região quadrada formada pela malha, definindo as células que caracterizam o autômato celular.



(a) Disposição geométrica da malha para o Caso 1.



(b) Possibilidades de movimento para o pedestre p_{ij} destacado na malha.

Figura 6. Caracterização da malha e do movimento, ilustrados para a sala de cinema - Caso 1.

As células correspondentes às saídas são dadas por (x_p, y_{p+i}) com $i = 0, 1, 2, 3$, e por (x_{m+1}, y_{p+i}) com $i = 0, 1, 2, 3$. Cada uma das células define um estado, que refere-se ao fato da área estar ocupada ou não. De acordo com Pereira (2010), o estado de cada célula é modificado de acordo com seu estado e dos seus vizinhos na etapa de tempo anterior, através de cada série de regras que tentam imitar as leis biológicas ou físicas que regem o sistema real.

Após o levantamento das informações técnicas, partiu-se para o estabelecimento das regras de interação. Dessa forma, a área correspondente a cada autômato celular ($0,5 m \times 0,5 m$), foi designada para satisfazer as restrições técnicas de uma sala de cinema, assim como a área mínima ocupada por um pedestre, sendo que essa proporção é de $4 \text{ pessoas}/m^2$.

Tratando-se de uma situação de evacuação em condições normais, ou seja, sem pânico, adota-se como hipóteses iniciais o direcionamento para as saídas mais próximas, sendo evitadas regiões de tumulto e obstáculos mediante o campo de visão, não sendo possível o movimento retrógrado.

Para definir o estado inicial dos autômatos celulares foi necessário estabelecer as células que representavam as paredes e as poltronas. As paredes designariam obstáculos fixos ao longo da simulação, enquanto as poltronas, poderiam se tornar obstáculos após a 2a. iteração, já que os pedestres não poderiam retornar ao estado inicial correspondente.

Após a definição da malha, os pedestres são aleatoriamente gerados nas áreas correspondentes às poltronas, donde iniciam a dinâmica do movimento. Adotando a vizinhança de *von Neumann*, com raio 1, o movimento dos pedestres estaria restrito a dois tipos de obstáculos: fixos (poltronas e paredes) e móveis (pedestres). Caso o estado das células que influenciariam o movimento estivesse livre (estado 0), o movimento seria aleatório, com velocidade constante e direcionado a saída geometricamente mais próxima. Entretanto, se as células estivessem ocupadas (estado 1), o pedestre permaneceria na mesma célula determinada pela iteração anterior.

A modificação dos autômatos celulares bidimensionais encontra-se no fato de que o movimento das células em alguns pontos é extremamente limitado, como por exemplo, entre as fileiras. A influência da vizinhança é quase mínima, já que o movimento deve seguir o fluxo para a saída desejada. Nos corredores laterais e na área frontal o movimento é mais flexível, já que não encontra-se restrito apenas ao movimento lateral. Seja p_{ij} a posição correspondente a um pedestre na malha, então, as possibilidades do seu movimento poderão ser descritas conforme a figura 6(b).

Simulação

Com a identificação do estado inicial das células que compõem a malha, é possível iniciar a simulação. O código utilizado foi implementado em linguagem Pascal, e as simulações realizadas em um computador Intel® Pentium® processador T4300 (2.1 GHz, 800 MHz FSB).

Os pedestres são aleatoriamente gerados nas células que representam as poltronas. Seja o tempo $t = 0$ e p_{ij} um pedestre escolhido aleatoriamente. Verifica-se o estado das células vizinhas: se a célula frontal (x_i, y_{j+1}) estiver livre, então o pedestre p_{ij} ocupa essa posição, se não, verifica-se se a célula lateral que conduz a saída mais próxima está disponível, caso afirmativo, ocupa as posições (x_{i+1}, y_j) ou (x_{i-1}, y_j) . Se nenhuma dessas condições for verificada o pedestre continua na posição definida pela iteração anterior, ou seja, (x_i, y_j) . Incrementa-se o tempo, $t = t + 1$, e um novo pedestre é escolhido aleatoriamente, repetindo os passos descritos. Caso a nova posição ocupada represente a saída, considera-se que o pedestre deixará o ambiente na próxima iteração.

As simulações são realizadas até que ocorra a evacuação total, ou seja, incrementa-se o tempo ao passo em que o número de pedestres que atingem as saídas seja condizente ao total inicialmente gerado. Sob os resultados das simulações são aplicados o tempo de reação retardado e a velocidade constante para situações emergenciais sem pânico. Estabelecendo o tempo médio de evacuação para cada um dos casos, definidas especificamente pela lotação do ambiente, foram analisadas 26 quantidades, com demanda máxima de 130 pedestres.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com o objetivo de identificar o tempo médio total de evacuação de uma sala de cinema por meio da aplicação de simulações computacionais, foram realizados testes para diferentes lotações do ambiente. Como saída do programa, obtêm-se os resultados das simulações referentes ao número de iterações necessárias a evacuação total. Sendo assim, sobre esta foi aplicada a velocidade de um pedestre, numa situação emergencial, não caracterizada por pânico, sendo de 1 m/s. (Jian & Lizhong, 2005).

Considerando que a malha definida na simulação tem geometria quadrada, de lado 0,5 m, o deslocamento de um pedestre do ponto médio de uma célula, até o ponto médio de uma célula

adjacente, com probabilidade de movimento conhecida e definida, é dado por 0,5 segundos. Consequentemente, o tempo médio de evacuação do cinema com velocidade conhecida pode ser calculado por:

$$t_e = n \times 0,5, \quad (1)$$

Onde n representa o número médio de iterações para as simulações realizadas, até a evacuação total. Como o objetivo é aproximar o modelo a uma situação real, torna-se necessário considerar o tempo de reação dos pedestres, considerado como um novo parâmetro na análise. O tempo de reação é definido como o intervalo de tempo entre o instante real em que ocorre uma situação de emergência e o instante em que o observador age para desencadear tal ação. Esse é um termo comumente usado em Cinemática e Dinâmica, já que caracterizam experimentos voltados a análise de tempos. De acordo com Zanella (2008) o tempo médio de reação retardado de um pedestre é de 2 segundos.

Acrescentando então o tempo de reação retardado, que supera o tempo de reação em situações normais, é possível estabelecer um modelo de certa forma mais significativo, já que estipula o tempo médio considerando o tempo de reação mais lento. Com isso, pode-se determinar o tempo médio total de evacuação do ambiente proposto, caracterizado pela análise do tempo de reação acrescido ao tempo de evacuação, apresentado na equação (1). Dessa forma, o tempo médio total de evacuação do ambiente, para cada uma das lotações verificadas para os ambientes definidos pode ser apresentada a partir da equação (1):

$$t_t = 2 + n \times 0,5. \quad (2)$$

Tal equação define o tempo, em segundos, necessário para a evacuação de uma sala de cinema, sob as hipóteses fixadas anteriormente, em função do número de iterações necessárias a evacuação total.

Com a manipulação dos dados de saída, ou seja, associando os parâmetros velocidade e tempo de reação para situações emergenciais, pode-se utilizar os resultados a fim de comparação, atingindo os objetivos propostos pela pesquisa.

Foram realizadas 1000 simulações para cada um dos 26 casos de lotação das salas de cinema analisadas. Os dados referentes ao tempo, em segundos, para a evacuação total, encontram-se a seguir, na tabela 1.

Tabela 1. Tempo médio de evacuação total para 26 casos de lotação verificados para 4 casos de salas de cinemas verificados.

Número de pedestres	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
5	13,584	13,439	13,448	13,589
10	14,621	14,438	14,605	14,597
15	15,228	14,991	15,440	15,272
20	15,685	15,426	16,659	15,973
25	16,316	15,869	18,240	16,885
30	17,029	16,552	20,074	18,049
35	18,037	17,565	22,120	19,324
40	19,039	18,869	24,168	20,645
45	20,273	20,320	26,180	22,142
50	21,440	21,846	28,299	23,745
55	22,707	23,343	30,276	25,360
60	24,102	24,831	32,458	26,958
65	25,307	26,331	34,496	28,591
70	26,560	27,697	36,553	30,169
75	27,989	28,894	38,698	31,778
80	29,283	30,192	40,737	33,333
85	30,558	31,343	42,774	34,882
90	32,003	32,560	44,788	36,392
95	33,261	33,703	46,881	37,998
100	34,502	34,867	48,949	39,571
105	35,789	35,977	50,953	41,017
110	37,184	37,251	53,091	42,498
115	38,367	38,264	55,120	43,925
120	39,735	39,451	57,148	45,383
125	41,054	40,711	59,172	46,868
130	42,487	42,004	60,937	48,118

Os dados explicitam que a geometria que minimiza o tempo de evacuação total de uma sala de cinema, na maioria das lotações analisadas foi o caso 1, sendo menor em 14 das 26 situações analisadas. Para o caso de lotação máxima, a diferença do tempo de evacuação em segundos, entre os casos 2 e 3, chega a 45,07%.

Mesmo que as dimensões da sala sejam as mesmas, essa diferença pode representar extrema relevância no sucesso de um processo de evacuação emergencial, consequentemente, conduzindo a resultados mais satisfatórios, e por sua vez, minimizando transtornos caracterizados pela falta de planejamento e infraestrutura específicas.

Utilizando as simulações e realizando um tratamento estatístico aos dados para o **Caso 1**, pode-se verificar se existe uma relação de dependência entre as variáveis t (tempo médio total de evacuação) e p (Número de pedestres). Tal relação de dependência, pode ser explicitada por meio da regressão polinomial.

A análise de regressão polinomial foi realizada de forma a minimizar o erro de ajuste, pelo método dos mínimos quadrados. Dessa forma, foi realizada a regressão polinomial cúbica, realizada por meio do *software* Minitab, graficamente representada na figura 7.

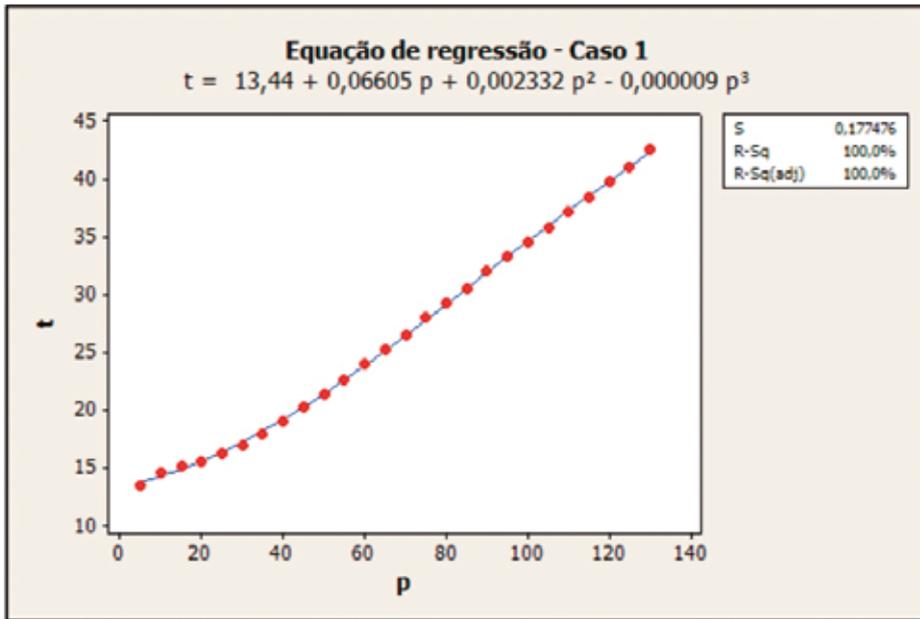


Figura 7. Análise de regressão polinomial cúbica para os dados referentes ao Caso 1.

A equação de regressão é dada por:

$$t = 13,44 + 0,06605p + 0,002332p^2 - 0,000009p^3 \quad (3)$$

onde t representa o tempo médio total de evacuação e p o número de pedestres presentes no ambiente. Pode-se observar que o valor de R-Sq foi de 100,0%, o que representa a adequabilidade na proporção da variabilidade do modelo de ajuste aos dados estabelecidos. Tal modelo pode ser empregado para lotações não analisadas, de forma a estimar, estatisticamente, resultados satisfatórios e confiáveis, sob um determinado nível de confiança. Conduzindo desta forma a evacuações num espaço de tempo seguro e controlado.

CONCLUSÕES

A dinâmica de pedestres é uma análise empregada nas mais diversas situações sobre as quais visa-se identificar e reproduzir suas características. Associada às simulações computacionais, pode-se utilizar os resultados de forma a garantir a predição de situações.

Identificar os fatores que influenciam na trajetória de um pedestre, sejam físicos ou espaciais, relacionar as interações bidimensionais por meio da teoria de autômatos celulares modificado, determinar um modelo, com variáveis estatísticas, que descreva o comportamento do fluxo de pedestres e utilizar a simulação de sistemas dinâmicos na análise do tempo de evacuação de ambientes, por meio do caso analisado, são fatores que representam extrema importância na validação dos modelos.

Aplicadas ao fluxo de pedestres, as simulações computacionais permitem a modelagem do comportamento humano em situações mais próximas do real, controlando assim, possíveis comparações por meio da utilização das simulações e suas respectivas metodologias.

REFERÊNCIAS

Andrade JR, S; Frizzone, A; Sentelhas, P. C. Simulação da precipitação diária para Parnaíba e Teresina, PI, em planilha eletrônica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*. 2001, vol 5, num 2, Campina Grande.

Bicho, A.L. *Da modelagem de plantas à dinâmica de multidões: um modelo de animação comportamental bio-inspirado*. Tese de Doutorado. São Paulo: Universidade Estadual de Campinas. 2009

Dapper, F. *Planejamento de Movimento para Pedestres utilizando Campos Potenciais, Dissertação de Mestrado*. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2007

Escudero, L. F. *La simulación en la empresa*. Barraincúa: Deustro, 1973.

Harell, C. R; Mott, J. R. A; Bateman, R. E; Bowden, R. G; Gogg, T. J. Simulação otimizando os sistemas. Instituto IMAM: São Paulo. 2002

Jian, L; Lizhong, Y; Daoliang, Z. Simulation of bi-direction pedestrian movement in corridor. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2005, vol 354, p.619-628.

Lima, E. B. Modelos microscópicos para simulação do tráfego baseados em autômatos celulares, *Dissertação de Mestrado*. Niterói: Universidade Federal Fluminense. 2005

Neufert, E; Neufert, P. *Arte de projetar em arquitetura: princípios, normas, regulamentos sobre projeto, construção, forma, necessidade e relações espaciais, dimensões de edifícios, ambientes, mobiliário e objetos*. Gustavo Gili, Barcelona. 2004

Oliveira, A. Nível de segurança inaceitável nas salas de cinema. *Diário Digital*. 2003

Perez, G, J; Tapang, G; Lim, M; Saloma, C. Streaming, disruptive interference and power-lan behavior in the exit dynamics of confined pedestrians. *Physica A*. 2002, vol 312, num 3-4, p.609-918.

Saliby, E. *Tecnologia de informação: Uso da Simulação para Obtenção de Melhorias em Operações Logísticas*. Artigos CEL, Centro de Estudos em Logística. 1999

Steinberg, J. G. *Desenvolvimento de modelo para simulação de situações de evacuação de multidões*, *Dissertação de Mestrado*. São Paulo: Universidade Estadual de Campinas. 2005

Zampieri, F. L. L. *Modelo Estimativo de Movimento de Pedestres baseado em sintaxe espacial, medidas de desempenho e redes neurais artificiais*, *Dissertação de Mestrado*. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2006

Zanella, L. M. B. Bebida alcoólica e direção: estatísticas de uma mistura cruel, 2008, vol 72, 16.