

Aplicação de Simulação de Multidão para o Estudo de Layout e Tempo Médio Total de Evacuação

Erasmo Nunes Melo, Márcio das Chagas Moura, Isis Didier Lins, Enrique López Droguett

Centro de Estudos e Ensaio em Risco e Modelagem Ambiental (CEERMA)

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Av. da Arquitetura, S/N Cidade Universitária, CEP: 50.740-550, Recife / PE

erasmonunes@bol.com.br, marcio@ceerma.org, isis.lins@ceerma.org, eld@umd.edu

1. INTRODUÇÃO

Grandes tragédias marcadas pelo pânico foram registradas nos últimos tempos. O ataque em Nova York às torres gêmeas no ano de 2001 e o incêndio na boate Kiss na cidade de Santa Maria (RS) em 2013 são exemplos que ficaram marcados nos cenários nacional e internacional.

Acidentes ou simplesmente ameaças que envolvem multidões provocam comportamentos desordenados tornando-os difíceis de serem controlados, seja pelo pânico gerado pelas pessoas em consequência da ocasião ou pela dificuldade de evacuação dos ocupantes no cenário de risco. A evacuação de um grupo de pedestres, conforme as condições temporais e físicas, é de extrema relevância já que se as pessoas não conseguem escapar da zona de perigo devido a obstáculos, insuficiência de saída ou até mesmo por seleção errada da saída, podem ser feridas ou até mesmo mortas, sejam por consequência do incidente e/ou comportamento da multidão [1].

Existem diversas regulamentações e normas voltadas às condições exigíveis, bem como requisitos mínimos que as edificações devem possuir. Em [2] é possível encontrar informações estruturais que tratam de acessos, número e dimensionamento das saídas de emergências, elevadores de emergência, entre outras. Pode-se encontrar ainda, informações acerca do cálculo da população, distância máxima a percorrer, dimensionamento de cada pessoa, velocidade de locomoção, dentre outros fatores que podem ser utilizados para análise do tempo total de evacuação. Apesar de não serem foco deste estudo, tais informações serão importantes para embasar as constantes utilizadas neste trabalho.

Neste contexto, os estudos de técnicas de evacuação de multidões têm se tornado cada vez mais importantes no que diz respeito à segurança de ambientes em situações de emergência, que possam colocar a vida dos ocupantes em risco, e cuja aglomeração é formada por pessoas com características distintas em um mesmo espaço físico [3]. Portanto, o estudo de layout é importante uma vez que a localização de portas, corredores ou obstáculos pode ser decisiva, assim como a quantidade segura de pessoas (lotação máxima) que se deve ter em um ambiente para que se tenha um tempo de evacuação dentro de um valor esperado [4].

Portanto, simulações computadorizadas da dinâmica de pedestres permitem a observação de características do fluxo real de pessoas e um maior entendimento de seus princípios básicos. O conhecimento do comportamento de pedestres é valioso por prover informações de como formular melhores saídas, geometrias de salas e estádios, por exemplo [5]. Com isto, o uso de simulações tem sido comumente utilizado no que se refere ao estudo do comportamento humano.

Este trabalho propõe o uso de um modelo capaz de simular evacuação de multidões em condições de emergência, que pode ser utilizado em diferentes cenários, podendo ser aplicado para análise de uma edificação já em uso ou em edificações ainda em fase de projeto, visando a construção segura e com estrutura que proporcione o menor tempo de evacuação dos ocupantes, ou qualquer outro fim que vise à segurança das pessoas que irão ocupar um determinado ambiente. Além disto, este trabalho busca

responder a seguinte questão problema: **o posicionamento da porta interfere no tempo total final de saída?**

A pesquisa documentada neste trabalho foi de natureza quantitativa, pois se trabalhou com relações matemáticas e probabilísticas a fim de reproduzir um ambiente real e se tirar conclusões a respeito de melhorias implementadas nesse sistema. Pode-se afirmar que foi utilizada a abordagem do tipo “Modelagem e Simulação” no presente trabalho, visto que foi criado um modelo para representar diferentes tipos de ambiente e que este sofreu diversas iterações para simular diferentes cenários.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 *Comportamento de pedestres*

A eminente preocupação em descrever o comportamento de pedestres em situações de deslocamento coletivo tem se tornado tema de diversos estudos. Sobre os diferentes comportamentos que o indivíduo assume quando em uma multidão e situação de emergência, [3] cita: fenômeno de ir com a multidão (é quando o indivíduo tende a seguir o fluxo das outras pessoas por não saber onde se encontra a saída, por exemplo); fenômeno de reunião (os indivíduos, neste caso, se sentem mais seguros onde se encontra a multidão e tendem a permanecer juntos da mesma, o que pode causar seu recolhimento dentro do local); retrocesso (em que pessoas retornam para recuperar pertences ou ajudar outras pessoas); comportamento de parentesco (as pessoas tendem a se reunir com seus parentes ou retornar para procurá-los); arqueamento (fenômeno que ocorre nas saídas dos locais, em que há a aglomeração de pessoas em torno das saídas); mais rápido é mais lento (quanto mais rápido as pessoas tentam andar, mais lenta pode se tornar a evacuação); efeito não aventureiro (as pessoas tendem a utilizar as saídas mais seguras e conhecidas); pânico (é uma reação psicológica causada em momentos como uma emergência e que pode fazer com que o indivíduo não raciocine, aja por impulso e por vezes fique sem reação).

Ainda sobre comportamento de pedestres, [6] enfatizaram a importância do estudo do comportamento de pedestres em condições de emergência ao estudar metodologias para dimensionamento da largura das saídas a fim de permitir a saída dos pedestres em sua totalidade, dentro de um prazo pré-determinado.

2.2 *Simulação e Modelos Matemáticos*

O uso de modelos matemáticos de simulação tem sido cada vez mais comum no contexto de evacuação de multidões, devido à falta de dados complementares para desenvolver e validar um modelo explicativo [7]. No entanto, a falta de informações de casos verídicos, em situações extremas, realça a importância do cuidado em tirar conclusões para sistemas reais baseados em modelos físicos ou computacionais [8].

A prática da simulação de multidões se torna cada vez mais útil uma vez que tentar simular situações de emergência em ambientes reais é muito caro ou mesmo impossível [3]. Além do fato de que há preocupações éticas e de segurança que impedem a criação de um verdadeiro cenário de pânico [7]. Tais problemas dificultam os estudos do comportamento e dos efeitos causados por pedestres em situações de pânico. Pesquisadores têm que se limitar a um pequeno número de participantes com nenhum controle sobre o nível de pânico, que depois podem não representar o cenário verdadeiro para o comportamento das multidões de pedestres [7]. Podem também fazer uso dos modelos de simulação de evacuação, ferramenta aplicada na previsão do desempenho de evacuações em um ambiente específico, o que a torna uma ferramenta importante para a análise de evacuação do mesmo [1].

Ao simular comportamento de pedestres, é indispensável o uso de considerações acerca de algumas variáveis, uma vez que os padrões de comportamento das pessoas em uma evacuação movida pelo pânico diferem do comportamento em condições normais, por exemplo. Na verdade, pessoas que estão em uma evacuação sem pânico estão propensas a manter certa calma, viabilizando a saída do ambiente em sua

velocidade máxima confortável, além de andar sem erros graves de julgamento, diferente de pessoas condicionadas ao colapso, que estão susceptíveis ao medo e à pressão emocional, [9].

O estudo de modelos matemáticos remonta dos estudos de Von Neumann com o advento de autômatos celulares [1]. Após este marco, diferentes estudos foram realizados a partir de modelos de evacuação de multidão, dentre estes podem-se citar [10] que apresentam, em Simulation Environment for Modeling Pedestrian Dynamics, uma nova abordagem, Model-View-Controller, baseada em ambiente de simulação dinâmica de modelagem de pedestres, por meio da utilização de conceitos no campo da dinâmica de pedestres e teoria da simulação; [11] utilizaram simulação para estudar o comportamento humano numa evacuação de emergência de um compartimento cheio de fumaça; [12] utilizaram simulação para análise da evacuação de uma sala de cinema, visando identificar dentre quatro modelos geométricos da sala, o que minimiza o tempo de evacuação em função do número de pedestres; [13] realizaram simulação de evacuação para o bioterrorismo em ambientes de pequenos espaços.

Segundo [1], um problema de simulação de multidões pode ser abordado de diferentes formas. Entre elas têm-se: autômatos celulares (que são modelos matemáticos discretos, delimitados por uma malha contendo células homogêneas e que são identificadas pelos seus pesos, que são atribuições para proporcionar o deslocamento dos indivíduos); rede de gás (é um modelo especial dos autômatos celulares em que cada pedestre é considerado uma partícula ativa na grade); forças sociais (nesta abordagem, o indivíduo se mantém afastado das fronteiras do ambiente, como paredes e de outros indivíduos, mas pode também ser atraído por outros indivíduos, especialmente indivíduos conhecidos); dinâmica dos fluidos (neste modelo, os indivíduos são levados pela multidão como um todo, tendo seus movimentos individuais ditados pelo fluxo do grupo); baseado em agentes (são modelos computacionais que constroem estruturas sociais, através da simulação de indivíduos como agentes virtuais, e criam organizações emergentes fora da operação de regras que governam as interações entre os agentes); teoria dos jogos (esta abordagem leva em consideração a competição entre indivíduos como, por exemplo, indivíduos competindo para passar pela saída de emergência) e abordagens baseada em experiência com animais (esta é uma nova abordagem para o estudo de evacuação de multidões, uma vez que evacuações por meio de experimentos em verdadeiras condições de pânico são difíceis, especialmente com os seres humanos por causa de possíveis preocupações éticas ou mesmo legais).

O presente trabalho, semelhante aos citados, também faz uso de simulações e estas foram aplicadas via utilização da abordagem de autômato celular. Contudo, difere dos estudos citados por direcionar o foco para o estudo de layout e sua relação com o tempo total de evacuação. Para isto, considerou-se um comportamento homogêneo para os pedestres e tomou-se como principais variáveis o posicionamento da porta e o tempo total de evacuação para cada uma das posições.

2.2.1 Campo de Piso

Para o desenvolvimento dos modelos matemáticos, apresenta-se como ferramenta o campo de piso, que é um modelo de autômato celular e tem suas vantagens específicas em reproduzir fenômenos auto-organizados de multidão, incorporando características individuais, reduzindo a complexidade computacional e traduzindo a interação de longo alcance para a interação local [14]. O uso de campo de piso pode se apresentar de duas formas: estático e dinâmico. Os campos de piso estático não evoluem com o tempo, não mudam com a presença dos pedestres e geralmente são usados para especificar as regiões do espaço que são mais atraentes, como saídas de emergência. Os campos de piso dinâmico se modificam com o tempo e com a presença dos pedestres, isto é, eles têm sua própria dinâmica (difusão e decaimento) [15]. Além disto, [3] mencionou a existência de duas vizinhanças que podem ser utilizadas em uma aplicação de autômatos celulares para um campo de piso estático de duas dimensões: a de Von Neumann e a de Moore. Na vizinhança de Von Neumann, cada célula interage com as quatro células adjacentes na vertical e na horizontal. Já na vizinhança de Moore, cada célula é composta das oito células adjacentes, considerando as células da vertical, horizontal e diagonal, como pode ser visto na Figura 1.

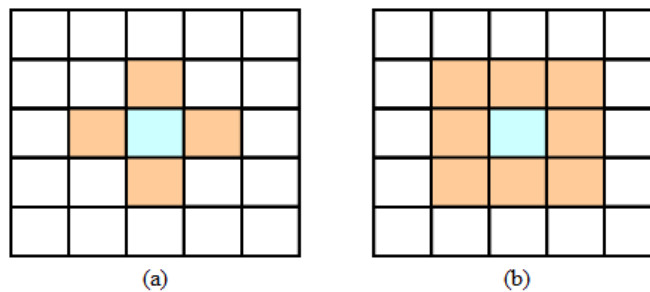


Figura 1 – Vizinhança de Von Neumann (a) e vizinhança de Moore (b)

2.2.2 Tamanho das Células

Ao simular multidões, é preciso fazer considerações acerca dos valores de algumas variáveis que compõem o modelo. Dentre elas está a área e o formato de cada célula que formam o campo de piso. Para essa área é possível encontrar diferentes valores nos diversos estudos que fazem uso desta. A Tabela 1 expõe alguns valores atribuídos para esta variável encontrados na literatura.

Fonte	Dimensões
[16]	0,5 x 0,5 m
[17]	50 x 50 cm
[18]	$\sqrt{0,2 \text{ m}^2}$
[3]	0,4 x 0,4 m
[14]	0,4 x 0,4 m

Para o modelo desenvolvido neste trabalho, adotou-se a medida de 0,4 x 0,4 m para as células do campo de piso, conforme proposto por [3].

2.2.3 Velocidade dos Pedestres

Diferentes velocidades de caminhada podem ser atribuídas aos pedestres quando se estuda o comportamento humano bem como o tempo total de evacuação. A Tabela 2 expõe diferentes valores que podem ser observados na literatura acerca do tempo de caminhada.

Fonte	Velocidade média [m/s]
[3]	1,30
[14]	1,00
[16]	1,00
[6]	1,34

Tais variações na velocidade são dependentes do *layout*, das características do cenário, do interesse dos envolvidos, além das diferentes características fisiológicas incluindo idade, sexo, estado físico, psicológico e o comportamento, tais como percepção e reflexão para o perigo [19]. [20] destacam que na detecção de uma possível colisão, os pedestres preferem a mudança de velocidade à mudança de direção. Destacam ainda que cada pedestre tem uma velocidade máxima de caminhada preferida.

[21] descreveram em seus estudos uma média de 97 ± 24 passos por minuto, com uma população de 45 adultos jovens. Semelhante a este, [22], desenvolveram estudos com uma população de 60 adultos enquanto caminhavam ou normalmente, sem carga, ou usando uma mochila, e encontraram uma cadência de 120 passos por minuto em condições de marcha elevada. Já [23] em seus estudos de comportamento de adulto caminhando, encontraram consistentemente que um ritmo de 100 passos/min é um limite razoável para intensidade moderada. Os estudos citados mostram uma cadência igual ou próximo de 2 passos por segundo.

Para este trabalho, adotou-se um ritmo semelhante aos estudos citados, de modo que, ao invés de utilizar passos por segundo, foram consideradas células por segundo. Desta forma, como cada célula possui dimensão 0,4 x 0,4 m, um ritmo de 2 células por segundo implica uma velocidade de caminhada de 0,8 m/s.

3. DESCRIÇÃO DO MODELO

3.1 *Características do Modelo*

A abordagem escolhida para o desenvolvimento da simulação de multidões foi a de autômatos celulares. Utilizou-se o campo de piso estático com células de mesma dimensão, 0,4 x 0,4 m, e cada célula pode ser ocupada por no máximo um único pedestre [14]. A vizinhança utilizada foi a de Moore e a velocidade de caminhada foi de 0,8 m/s, ou seja, um pedestre leva 0,5s para percorrer uma célula de 0,4 m e, desse modo, um passo de tempo demora 0,5s.

A cada célula foi atribuído um peso. As células que representam a saída recebem um valor baixo (neste caso, foi atribuído peso “um”). À medida que as células se afastam da saída, seus pesos aumentam. A métrica utilizada para a atribuição desses pesos difere da que foi desenvolvida por [24] que teve características como: dado que N representa a célula ocupada em um certo instante, se a próxima célula a ser preenchida for adjacente horizontal ou vertical, a mesma irá receber um valor igual a $N+1$; e se a próxima célula for diagonal à célula anterior, a mesma receberá um valor igual a $N+1.5$, pelo fato de que as células diagonais são mais distantes do que células adjacentes. Para este modelo, adotou-se o valor $N+2$ para as células diagonais. Esta mudança não atrapalhará o critério de escolha pela célula de menor valor uma vez, que em ambos os casos, ao sair do ambiente, andar em diagonal será sempre a melhor escolha, pois, neste sentido, as células com menor valor serão as da diagonal em direção a porta. Este fato não ocorre ao entrar, onde as células com maior peso serão as das diagonais que se distanciam da saída. Além disto, a exibição do *layout* com os pesos das células representados por números inteiros além de melhor representável se torna de fácil entendimento para o leitor.

Se uma mesma célula for adjacente a várias células simultaneamente havendo conflito em atribuição de pesos, a mesma recebe o menor valor entre os pesos em questão. Além disto, para evitar que os obstáculos fixos, a exemplo de paredes, sejam transitáveis, foi atribuído um valor superior aos das células que representaram áreas de circulação; neste estudo os obstáculos receberam valor 500, mesma atribuição usa por [3].

3.2 *Características do Local de Estudo*

O local escolhido para aplicação deste modelo foi um auditório. A escolha do lugar se deu pela necessidade de aplicar o modelo em um cenário real e, em paralelo a isto, buscou-se verificar a adequação do auditório às normas de segurança, por ser uma área que frequentemente concentra uma grande quantidade de pessoas e a depender do evento realizado, visando atender a todo o público interessado, costumam-se abrigar quantidades maiores que o número de assentos e consecutivamente maiores que a quantidade de pessoas indicada para determinada edificação.

Com uma área de 135 m², o auditório estudado dispõe de 93 assentos, dispostos em 7 fileiras de mesas contendo 12 cadeiras cada, formando um retângulo afastado das quatro paredes em volta. Além destas, há ainda mais duas fileiras em separado, uma contendo 6 cadeiras, posicionadas frente ao retângulo principal na parte superior da planta, e outra contendo 3 cadeiras, posicionadas na parte superior da planta e na lateral direita. Há ainda uma mesa redonda sem disposição de cadeiras, posicionada na parte superior da planta e na lateral esquerda.

A Figura 2 mostra a configuração interna do *layout*, onde as fileiras de cadeiras além de estarem afastadas uma das outras, também estão afastadas das paredes em volta, possibilitando a circulação nos arredores das fileiras. Doutra forma, é possível perceber que o retângulo formado pelas fileiras principais está suavemente afastado para a direita da planta. Com isso, o corredor da direita se torna um pouco mais estreito que o da esquerda, característica que pode afetar o tempo total de saída dos ocupantes a depender da posição da porta.

No que tange às dimensões da planta, o auditório possui 11,25 m de largura, 12 m de comprimento e 2,70 m de altura. Para acesso, possui duas portas com dimensões de 1 m cada, com abertura no sentido do fluxo de saída, e posicionadas na parte inferior da planta, conforme exposto na Figura 2.

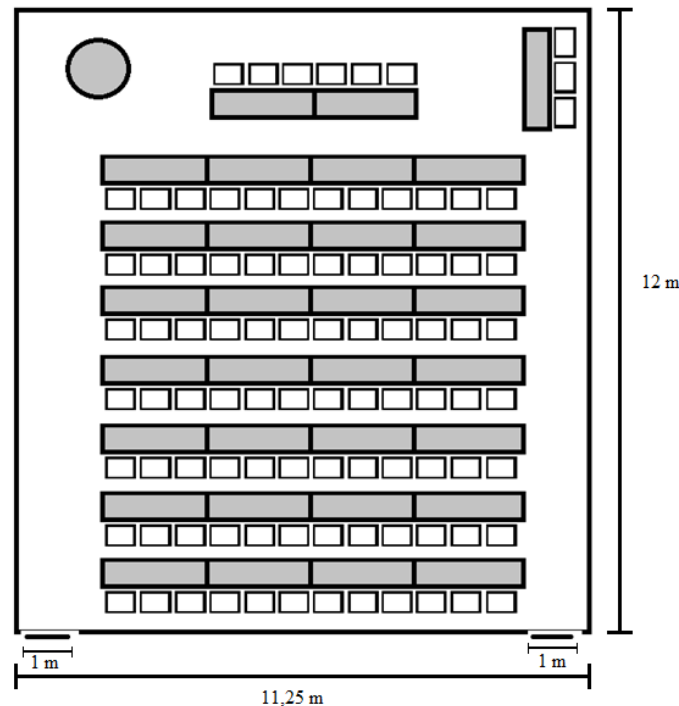


Figura 2 – Layout do Auditório

Avaliando-se as condições atuais do local de estudo, tomando como referência [2], nota-se que o auditório está alocado na classificação quanto à sua ocupação ao grupo F e a divisão F-2, que é a classificação dada para locais de reunião de públicos contemplando templos e auditórios em geral. Logo, para esta classificação, utiliza-se uma pessoa por metro quadrado para o cálculo da população.

Para saber a capacidade populacional total do ambiente, é preciso ainda definir a área de pavimento, ou seja, a área útil interna da dependência que abrigará a população em foco. Para isto, faz-se necessário subtrair da área total do ambiente, a área total dos obstáculos internos. Depois de verificado o valor da área útil, pode-se então definir a população ideal para o cenário em questão segundo [2].

Com uma área de aproximadamente 79 metros quadrados, e considerando 1 pessoa por metro quadrado, o cálculo é simplório, resultando em uma população de 79 pessoas como quantidade máxima para o auditório. No entanto, para análise e desenvolvimento deste trabalho, foi adotada uma população

de 100 pessoas, ou seja, uma quantidade acima do indicado por [2] e acima da capacidade de assentos dispostos no auditório, o que configura um cenário de superpopulação, com aproximados 127% da capacidade indicada. Faz-se necessário salientar que a quantidade de 100 pessoas, como população total, aqui atribuída é apenas um dado para análise, podendo esta, se apresentar como um valor maior, menor ou a quantidade indicada pela norma. Neste caso, buscou-se apenas colocar uma quantidade a mais que o indicado, que é o que parece ser comum para maioria dos casos.

No que se refere à quantidade de portas, [2] exige o uso de apenas uma para os casos de classificação F. Além disso, [2] indica uma largura mínima de 1,10 m para a saída, no entanto, conforme já mencionado, o campo de piso constitui-se de células de 0,4 x 0,4 m, logo, foi adotado três células para composição da porta, resultando numa porta com largura 1,2 m.

Foram gerados novos *layouts* a partir do exposto na Figura 2, a qual representa as condições atuais do auditório. A Figura 3 expressa partes dos novos *layouts* do auditório reajustado às indicações da norma estudada, apresentando-se com apenas uma porta, inicialmente posicionada na esquerda da parte inferior da planta e, em seguida, os demais *layout* gerados a partir da modificação do posicionamento da porta do auditório, de modo que estas modificações se deram de forma padronizada avançando-se, da esquerda para a direita, em cada *layout*, uma posição na célula inicial e final que configuram a largura da porta. A Figura 3 expõe as características da porta para as posições 1, 2, 3, 4 e 26, e por meio destas, pode-se representar a lógica utilizada para as demais posições, onde a porta na posição 26 representa o último *layout*, que é a última posição para alocação da porta no espaço estudado que é a parte inferior da planta.

500	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	3	3	500	
500	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	2	2	500	
500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	1	1	1	500	
PORTA 26																														
.																														
500	6	5	4	3	3	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	500	
500	5	4	3	2	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	500	
500	500	500	500	1	1	1	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
PORTA 4																														
500	5	4	3	3	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	500	
500	4	3	2	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	500	
500	500	500	1	1	1	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
PORTA 3																														
500	4	3	3	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	500	
500	3	2	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	500	
500	500	1	1	1	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
PORTA 2																														
500	3	3	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	500	
500	2	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	500	
500	1	1	1	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
PORTA 1																														

Figura 3 – Características da porta para as posições 1, 2, 3, 4... 26

3.3 Pseudocódigo

A simulação de multidões, realizada neste trabalho, se deu por meio do uso de um software implementado pelo próprio autor com uso da linguagem de programação C++. O software utilizado para o desenvolvimento do algoritmo de simulação foi o *Microsoft Visual C++ 2010 Express*.

Para responder a questão fundamental deste trabalho (o posicionamento da porta interfere no tempo total final de saída?), alguns testes foram necessários, por exemplo: simular em um mesmo cenário diferentes quantidades de indivíduos e modificar a posição da porta obtendo o tempo total final de saída em cada uma das posições. Além disto, algumas considerações foram necessárias, por exemplo: homogeneidade do dimensionamento e da velocidade dos indivíduos e condicionamento do movimento dos simulados ao peso e estado das células vizinhas. Logo, mediante tais peculiaridades, para atingir os

resultados esperados neste trabalho, desenvolver um *software* foi preferível a utilizar um já acabado e direcionado à outros fins.

A Figura 4 expõe o fluxograma com a hierarquia dos algoritmos e o comportamento geral do programa desenvolvido para o caso em estudo, mas que pode atender a casos mais gerais, por exemplo, layouts com diversas portas e obstáculos. O Algoritmo Principal recebe como *input* as coordenadas x e y (largura e comprimento, respectivamente), as coordenadas dos obstáculos e a quantidade e posições das portas. Essas informações são captadas pelo algoritmo de criação de salas que cria uma sala para cada uma das portas descritas. Estas salas possuem as mesmas dimensões e se diferenciarão apenas pela posição da porta. Depois de criadas as salas, estas são repassadas para o algoritmo preenchimento de pesos para que possam receber os pesos das áreas de circulação. Finalizadas as salas, estas são absorvidas pelo algoritmo resultante de sala que fará a intersecção destas salas e devolver como *output* uma única sala de mesma dimensão que as demais, só que contendo os menores pesos destas e também todas as portas existentes no layout. O algoritmo de inserção de cliente toma esta sala resultante e insere, de maneira aleatória, um número NC de clientes. Esta sala, agora povoada, é repassada para o Algoritmo de Simulação que fará a evacuação destes clientes e repassará, como *output*, o tempo total final de saída dos NC clientes.

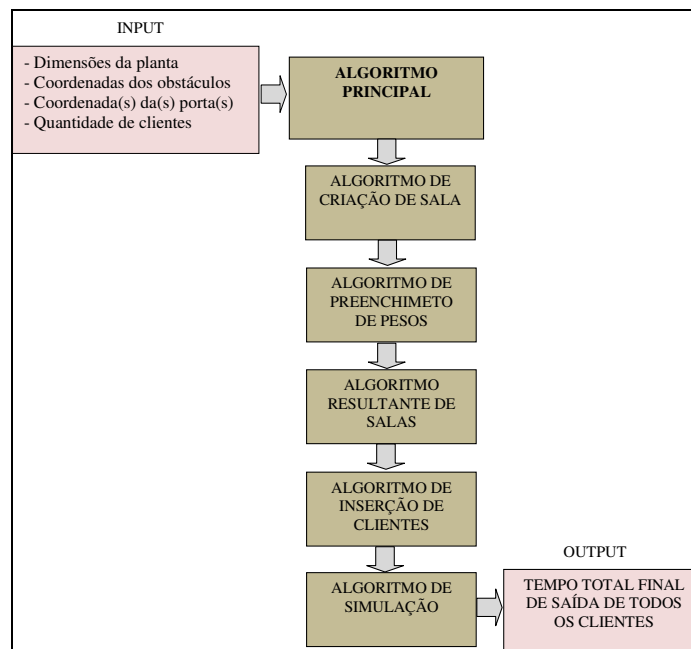


Figura 4 – Fluxograma de Funcionamento do Código

4. SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foram realizadas 1000 simulações via simulação Monte Carlo do procedimento de evacuação do auditório para cada uma das 26 posições da porta e para três lotações diferentes, onde Monte Carlo é um método que tem como base a geração de valores aleatórios para criar o cenário de um problema e é muito utilizado para se determinar propriedades de estimadores ou para se comparar métodos de testes estatísticos [25]. A partir da simulação, foram obtidas estimativas para média do tempo de evacuação com o objetivo de entender o comportamento dessa medida. Duas abordagens foram tomadas para análise da média: a primeira através de intervalos de confiança e a segunda através de uma análise de variância (ANOVA). Ambas as abordagens consideraram uma lotação de 50, 75 e 100 pessoas, ou seja, 63%, 95%

e 127% de 79 pessoas, conforme indicado por [2], configurando assim, com a terceira população simulada, um cenário com superpopulação.

4.1 Intervalos de confiança

A suposição mais natural a ser feita na construção do intervalo de confiança para a média do tempo de evacuação é que a mesma segue distribuição normal. Porém, a Figura 5 ilustra o comportamento dos quantis, medida separatriz correspondente a uma proporção acumulada dos valores da simulação para a porta na posição 1, evidenciando que a distribuição do tempo médio não segue distribuição normal em virtude dos “degraus” encontrados nos quantis, comum em distribuições discretas. Ou seja, a Figura 5 mostra que a relação entre os quantis da distribuição normal teórica e os quantis da distribuição empírica dos dados apesar de ser linear e estar compreendida no intervalo -3 e 3 (intervalo da maior concentração de massa de probabilidade de uma normal) a presença de "degraus" mostra que os dados provenientes da simulação não seguem uma distribuição normal. Esse comportamento se repete para as demais 25 posições em que a porta se encontra.

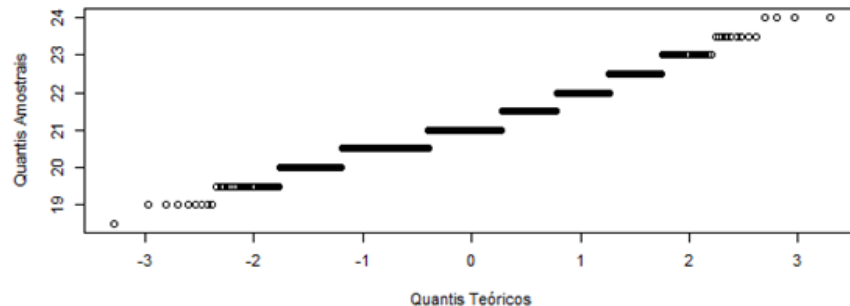


Figura 5 – Gráfico dos quantis da simulação para porta na posição 1

A fim de estimar o tempo médio de evacuação, conforme proposto por [26], utilizou-se o método bootstrap, uma técnica de reamostragem que consiste em sortear com reposição dados pertencentes a uma amostra retirada anteriormente, denominada amostra mestre, de modo a formar uma nova amostra através da distribuição *t-student*. Contudo devido à falta de normalidade, neste caso não é indicado o uso do intervalo de confiança Bootstrap *t-student*. Segundo [27], se o vício e a assimetria estão presentes de forma muito forte recomenda-se a utilização do método de Bootstrap de correção como o método BCPB e o método BCa. Em ambos os métodos BCPB e BCa no cálculo do intervalo de confiança os extremos do intervalo são os percentis da distribuição Bootstrap ajustados para corrigir o vício e a assimetria desta distribuição. No entanto, o método BCa difere do BCPB pelo fato do BCa possuir uma constante de aceleração “a” que ajusta o intervalo de confiança em relação à assimetria. Assim, os intervalos foram calculados via Bootstrap com viés corrigido e acelerado (BCa). Dessa forma, ainda com base no proposto por [26], os intervalos foram calculados através de 1000 amostras via BCa, que não exige normalidade.

A Tabela 3 exibe o tempo médio, o desvio padrão e os limites do intervalo de confiança, em segundos, com nível de confiança de 95%, onde o grifo em negrito representa os tempos médios mais altos e o grifo sublinhado representa o tempo mais baixo. Conforme Tabela 3, pode-se observar quando auditório está com 63% da população, as posições das portas 6 e 22 são as que mais dificultam a evacuação do auditório devido ao tempo médio de evacuação serem os mais altos com os tempos 24,4s e 24s, respectivamente. Já a porta na posição 15 mostrou o melhor resultado para a evacuação por possuir o menor tempo entre as demais posições, 20,3s. Com 95% da população o tempo médio de evacuação é mais baixo na posição 23 com o tempo médio de 22,2s e mais alto nas posições 6 e 22, com valores iguais a 33,1s e 32,5s, respectivamente. É possível constatar também que com 127% da população indicada, o tempo médio de evacuação do auditório é mais alto nas posições 6 e 22 com os tempos 42,3s e 41,6s, respectivamente, e mais baixo nas posições 1 e 26, ambas as posições com tempo médio de 25,4s.

Tabela 3 – Média, desvio padrão e intervalo de confiança dos dados

63% da população					95% da população				127% da população			
Posição	Médias	Desvio Padrão	Límite Inferior	Límite Superior	Médias	Desvio Padrão	Límite Inferior	Límite Superior	Médias	Desvio Padrão	Límite Inferior	Límite Superior
1	21,1	0,9	21,1	21,2	22,7	1,1	22,6	22,7	<u>25,4</u>	0,9	25,4	25,5
6	24,4	1,4	24,3	24,5	33,1	1,5	33,0	33,2	42,3	1,6	42,2	42,4
15	<u>20,3</u>	0,9	20,3	20,4	24,4	1,2	24,4	24,5	29,7	1,3	29,6	29,8
22	24,0	1,4	23,9	24,1	32,5	1,6	32,4	32,6	41,6	1,6	41,5	41,7
23	20,8	0,7	20,7	20,8	<u>22,2</u>	0,9	22,2	22,3	26,2	1,3	26,1	26,3
26	21,1	0,8	21,0	21,1	22,6	1,0	22,5	22,6	<u>25,4</u>	0,9	25,4	25,5

4.2 Análise de variância

Complementando o estudo anterior foi realizada uma análise de variância a fim de verificar se a posição da porta influencia no tempo de evacuação do auditório. Dessa forma, foi investigado através de uma análise de variância o impacto da posição. Como já foi mencionada a ausência de normalidade, uma alternativa não paramétrica utilizada foi o teste de hipótese não paramétrico Kruskal - Wallis [28]. O teste teve como hipótese nula que as posições das portas não influenciam o tempo de evacuação. Porém, como é possível observar na Tabela 4, a hipótese nula foi rejeitada ao nível de significância de 5% para 63%, 95% e 127% da população indicada por [2].

Tabela 4 – Estatística para capacidade

População	Estatística	Graus de Liberdade	p-valor
63%	11030,73	25	< 2.2e-16
95%	21590,15	25	< 2.2e-16
127%	23980,69	25	< 2.2e-16

Logo, a posição da porta interfere no tempo de evacuação do auditório em estudo. A Figura 6 mostra o gráfico tipo boxplot para o tempo médio de evacuação com 127% da população indicada, que é o caso de uma superpopulação, e nela se observa a diferença que há no tempo de evacuação do auditório, sendo as posições 6 e 22 as que apresentam maior tempo de evacuação, e as posições 1 a 3 e 25 a 26 com menor tempo de evacuação.

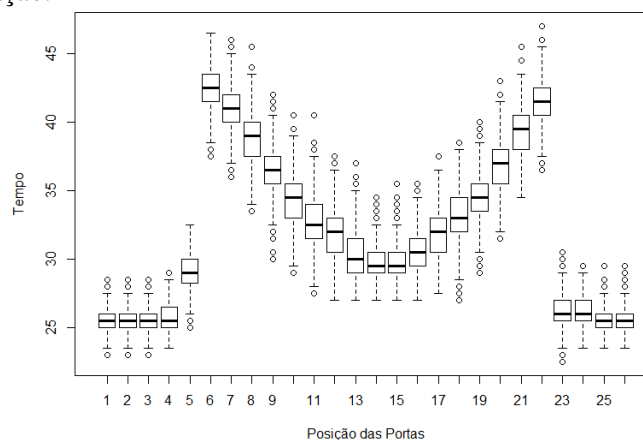


Figura 6: Tempo médio de evacuação com 127% da população indicada

5. CONCLUSÕES (OU COMENTÁRIOS FINAIS)

Conforme o exposto, com a análise de variância realizada através do teste de hipótese não paramétrico Kruskal - Wallis observou-se através na Tabela 4, que a hipótese nula foi rejeitada para os três casos ao nível de significância de 5%. Desta forma, conclui-se que a posição da porta interfere no tempo de evacuação.

Ainda por meio da análise de variância, a Figura 6 expôs o mesmo cenário apresentado por meio do intervalo de confiança, em que se tem as posições 6 e 22 como as que apresentam a maior média para os casos estudados e a porta nas posições 1 e 26 como a menor média para 127% da população indicada por [2]. Desta forma, constata-se uma forte influência da posição da porta no tempo médio de evacuação. Além disto, quanto ao menor tempo de evacuação, observa-se que a melhor posição de porta não foi unânime para as três lotações simuladas, evidenciando que não só a posição da saída, mas a lotação também pode influencia o tempo médio de evacuação do auditório. Nota-se que para 63% da população, os menores tempos médios de evacuação estiveram relacionados às posições da porta no centro da parte inferior do *layout*. Já para 95% da população, o menor tempo esteve para a porta na posição 23 com 22,2s que e uma porta frente ao corredor lateral direito do *layout*. O mesmo acontece para 127% da população, em que os menores tempos estão para as portas frente aos corredores laterais, com as posições 1 e 26 como as de menor tempo médio de evacuação, ambas com 25,4s.

Conforme o exposto, os resultados obtidos por este estudo, evidenciam que o posicionamento da porta influencia o tempo total final de evacuação. Observa-se ainda que a lotação e o arranjo físico da planta podem afetar o tempo de saída dos ocupantes. Tais considerações destacam a importância de estudar o comportamento de pedestres e normas de segurança, para as edificações, que possam evitar ou minimizar os efeitos causados por tumultos em grandes multidões.

6. REFERÊNCIAS

- [1] XIAOPING, Z., TINGKUAN, Z. & MENGTING, L., “Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches”, *Building and Environment*, vol. 44, n.3, p. 437, (2009).
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). “Saídas de Emergência em Edifícios (NBR 9077)”, Rio de Janeiro, (2001).
- [3] CARNEIRO, L. O. *Simulação de Evacuação de Multidão por Autômato Celular Estudo de Caso em um Estádio de Futebol*. Fortaleza, 2012, 73 p. (Mestrado – Universidade Federal do Ceará).
- [4] PEREIRA, L. A., DUCZMAL, L. H. & CRUZ, F. R. B., “Simulação de Evacuação Emergencial Via Autômatos Celulares: Uma Proposta de Modificação do Modelo de Schadschneider”, In: *Anais do XXXII Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional*, Cuiabá, Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, (2009).
- [5] PEREZ, G.J., TAPANG, G., LIM, M. & SALOMA, C., “Streaming, disruptive interference and power-law behavior in the exit dynamics of confined pedestrians”, *Physica A*, [S.l.], v.312, n.3–4, p. 609, (2002).
- [6] SERGIO, D’ELIA, SALVATORE, DE M. & DOMENICO, W. E. M., “A methodology for the sizing and positioning of emergency exits in tunnels”, *Procedia Social and Behavioral Sciences*, vol. 20, pp. 41, (2011).
- [7] SHIWAKOTI, N. & SARVI, M., “Understanding pedestrian crowd panic: a review on model organisms approach”, *Journal of Transport Geography*, vol. 26, pp. 12, (2013).
- [8] SORIA, S.A., JOSENS, R. & PARISI, D.R., “Experimental evidence of the ‘Faster is Slower’ effect in the evacuation of ants”, *Safety Science*, vol. 50, n. 7, pp. 1584, (2012).
- [9] KOO, J., KIM, B. & KIM, Y.S., “Estimating the effects of mental disorientation and physical fatigue in a semi-panic evacuation”, *Expert Systems With Applications*, vol. 41, n. 5, pp. 2379, (2014).
- [10] KULAKOWSKI, K., WAS, J. & TOPA, P., “Simulation environment for modeling pedestrian dynamics”, *Intelligent Information Systems*, pp. 243, (2010).

- [11] WEIFENG, Y. & HAI, T. K., “A model for simulation of crowd behaviour in the evacuation from a smoke-filled compartment”, *Physica A*, vol. 390, n. 23-24, pp. 4210, (2011).
- [12] SILVA, T. C. da, GRAMANI, L., KAVISKI, E., BALBO, F. & FERREIRA, M., “Análise do tempo de evacuação total de um cinema por meio da aplicação de simulações computacionais”, *Revista Ingeniería Industrial*, vol. 11, n. 1, pp. 5, (2012).
- [13] SONG, Y., GONG, J., LI, Y., CUI, T., FANG, L. & CAO, W., “Crowd evacuation simulation for bioterrorism in micro-spatial environments based on virtual geographic environments”, *Safety Science*, vol. 53, pp. 105, (2013).
- [14] FU, Z., YANG, L., CHEN, Y., ZHU, K. & ZHU, S., “The effect of individual tendency on crowd evacuation efficiency under inhomogeneous exit attraction using a static field modified FFCA model”, *Physica A*, vol. 392, n.23, pp. 6090, (2013).
- [15] GWIZDALLA, T. M., “Some properties of the floor field cellular automata evacuation model”, *Physica A*, vol. 419, pp. 718, (2015).
- [16] ZHAO, D., YANG, L. & LI, J., “Occupants’ behavior of going with the crowd based on cellular automata occupant evacuation model”, *Physica A*, vol.387, n. 14, pp. 3708, (2008).
- [17] SAGUN, A., BOUCHLAGHEM, D. & ANUMBA, C. J., “Computer simulations vs. building guidance to enhance evacuation performance of buildings during emergency events”. *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 19, n. 3, pp. 1007, (2011).
- [18] PEREIRA, L. A., “Efeito da Lotação e da Localização de Saídas no Tempo de Evacuação Emergencial de um Auditório: Simulação via Autômatos Celulares”. In: *Anais do XXXIII Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional*, São Paulo, Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, (2010).
- [19] FU, Z., ZHOU, X., ZHU, K., CHEN, Y., ZHUANG, Y., HU, Y., YANG, L., CHEN, C. & LI, J., “A floor field cellular automaton for crowd evacuation considering different walking abilities”, *Physica A*, vol. 420, pp. 294, (2015).
- [20] USHER, J. M. & STRAWDERMAN, L., “Simulating operational behaviors of pedestrian navigation”, *Computers & Industrial Engineering*, vol.59, n. 4, pp. 736, (2010).
- [21] GONZALES, J. U., KUMAR, P., SHPHARD, J. & MEANS, A., “Peak stepping cadence is associated with leg vascular compliance in young adults”, *Journal of Science and Medicine in Sport*, v. 17, n. 6, p. 683, (2014).
- [22] CASTRO, M. P., FIGUEIREDO, M. C., ABREU, S., SOUSA, H., MACHADO, L., SANTOS, R. & VILAS-BOAS, J. P., “The influence of gait cadence on the ground reaction forces and plantar pressures during load carriage of Young adults”, *Applied ergonomics*, n. 49, p. 41, (2015).
- [23] TUDOR-LOCKE, C., CAMHI, S. M., LEONARDI, C., JOHNSON, W. D., KATZMARZYK, P. T., EARNEST, C. P. & CHURCH, T. S., “Patterns of adult stepping cadence in the 2005 – 2006 nhanes”, *Preventive Medicine*, v. 53, n. 3, p. 178, (2011).
- [24] VARAS, A., CORNEJO, M. D., MAINEMER, D., TOLEDO, B., ROGAN, J., MUÑOZ, V. & VALDIVIA, J. A., “Cellular automation model for evacuation process with obstacles”. *Physica A*, vol. 382, n. 2, pp. 631, (2007).
- [25] OLIVEIRA, M. H. F., “A avaliação econômico-financeira de investimentos sob condição de incerteza: uma comparação entre o método de Monte Carlo e o VPL fuzzy”. São Carlos, 2008, 209 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Orientador: Prof^a. Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto.
- [26] DICICCIO, T. J. & EFRON, B., “Bootstrap confidence intervals”. *Statistical Science*, vol. 11, n. 3, pp. 189, (1996).
- [27] EFRON, B. & TIBSHIRANI, R., “Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals, and other measures of statistical accuracy”, *Statistical Science*. vol. 1, n.1, pp. 55, (1986).
- [28] KRUSKAL, W. H. & WALLIS, W. A., “Use of ranks in one-criterion variance analysis”, *Journal of the American Statistical Association*, vol. 47, n. 260, pp. 583, (1952).