



A B A K Ó S

Instituto de Ciências Exatas e Informática



Licença Creative Commons Attribution 4.0 International

Programa para Simulação da Movimentação Humana em Situações de Abandono de Edificações: Implementação Computacional de Aspectos Ergonômicos e Validação dos Resultados*

Software for Simulation of Human Movement in Building Evacuation Situations: Computational Implementation of Ergonomic Aspects and Validation of Results

Henrique Costa Braga¹
Gray Farias Moita²

Resumo

A simulação computacional da movimentação humana em evacuações é uma importante ferramenta para o planejamento da segurança em edificações. Contudo, observa-se na literatura muitas vezes lacunas quanto ao detalhamento da incorporação de aspectos ergonômicos nesses modelos. Este trabalho tem como objetivo implementar, de forma computacional, parâmetros ergonômicos, incluindo aspectos antropométricos, rotação, translação e velocidade, no programa Figa v 2.0, aliado a etapas de verificação e validação. A principal contribuição reside na proposição de um procedimento replicável e transparente de implementação. Os resultados nas condições analisadas indicam elevada consistência entre velocidades definidas e simuladas (erros inferiores a 1%) e tempos de evacuação compatíveis com softwares consolidados, evidenciando a robustez e aplicabilidade da ferramenta no suporte ao projeto arquitetônico e à análise de segurança.

Palavras-chave: Simulação computacional. Evacuação. Ergonomia. Verificação e validação.

*Submetido em 20/12/2023 - Aceito em 27/08/2025

¹Engenheiro de Segurança do Trabalho, Doutor em Modelagem Matemática e Computacional, Prof. Visitante, Departamento de Engenharia de Transportes, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Brasil- henriquebraga@cefetmg.br.

²Engenheiro Civil, PhD em Aeronáutica. Prof. Titular, Departamento de Engenharia Civil e Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Brasil- gray@cefetmg.br.

Abstract

Computational simulation of human movement in evacuations is an important tool for building safety planning. However, the literature reveals a lack of detailed methodologies for incorporating ergonomic aspects into such models. This study aims to computationally implement ergonomic aspects including anthropometric characteristics, rotation, translation, and speed, in the Fuga v. 2.0 program, combined with verification and validation procedures. The main contribution lies in proposing a replicable and transparent implementation procedure. The results under the analyzed conditions indicate high consistency between defined and simulated speeds, with errors below 1%, and evacuation times compatible with established software, demonstrating the robustness and applicability of the tool for supporting architectural design and safety analysis.

Keywords: Computational simulation. Evacuation. Ergonomics. Verification and validation.

1 INTRODUÇÃO

A modelagem computacional da movimentação humana em ambientes construídos possui grande valor para melhor se conhecer e otimizar os sistemas em que estão inclusos. Uma situação corriqueira é a de se determinar um melhor percurso a ser adotado por uma pessoa, considerando um posicionamento inicial qualquer no ambiente e um destino específico desejado, que pode ser tanto um setor como um almoxarifado ou depósito, ou mesmo atingir uma rota de fuga ou uma saída de emergência. Esse melhor percurso pode depender de vários fatores, mas usualmente é considerado como sendo o roteiro que permite o deslocamento com o menor tempo ou menor esforço.

Entretanto, programas que se utilizem desses algoritmos aplicados à movimentação humana devem, além de se preocupar em fornecer as melhores rotas, apesar de nem sempre plenamente obtidas (Soltani et al., 2002; Braga et al., 2017a), incorporar características humanas que os tornem mais realistas. A etapa de implementação computacional desses aspectos ergonômicos, associada às etapas de verificação e validação do programa, é fundamental para que o mesmo possa ser efetivamente aplicável na simulação e estudo de situações concretas do ambiente construído em alto nível.

Apesar do avanço dos programas de simulação, ainda se observa usualmente a ausência de detalhamento metodológico na implementação de aspectos ergonômicos. Essa lacuna compromete a confiabilidade dos resultados e limita a aplicação prática dos modelos em cenários reais.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral apresentar a implementação computacional de parâmetros ergonômicos — incluindo aspectos antropométricos, rotação, translação e velocidade de movimentação — no programa Fuga v. 2.0, bem como a verificação e validação das simulações resultantes. A principal contribuição consiste em oferecer um detalhamento dificilmente visto e replicável da implementação e validação de ergonomia aplicada à simulação de evacuação, preenchendo uma lacuna metodológica relevante e fornecendo maior realismo às aplicações práticas.

Entre os principais resultados obtidos, verificou-se a consistência entre velocidades definidas e simuladas (com erros inferiores a 1%) e a compatibilidade dos tempos de evacuação com softwares reconhecidos da área. Esses achados reforçam a robustez e a aplicabilidade do programa desenvolvido, fortalecendo seu potencial de utilização em análises de segurança.

A organização deste trabalho está estruturada da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a fundamentação teórica, com a descrição dos algoritmos *pathfinder* e a discussão dos trabalhos correlatos. A Seção 3 detalha a metodologia adotada, incluindo o desenvolvimento do programa e os módulos implementados. A Seção 4 expõe a proposta central, na qual são incorporados os aspectos ergonômicos ao modelo computacional. Na Seção 5 são apresentados e discutidos os resultados da verificação e validação. Por fim, a Seção 6 reúne as conclusões e perspectivas futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO

2.1 Background

O tratamento computacional da movimentação humana em ambientes construídos pode ser modelado a partir de algoritmos de busca e exploração de rotas, tradicionalmente classificados como algoritmos *pathfinder*. Entre os mais conhecidos estão o algoritmo de Dijkstra (1959), o algoritmo A* proposto por Hart et al. (1968), bem como variações e aprimoramentos subsequentes (Koenig et al., 2004; Sniedovich, 2006; Cui; Shi, 2011; Miyombo; et al., 2024). Em linhas gerais, esses algoritmos podem ser entendidos como estratégias de inteligência artificial aplicadas à resolução de problemas de otimização espacial.

A incorporação desses algoritmos em ferramentas de apoio ao projeto arquitetônico tem se mostrado especialmente promissora. Por meio delas, o projetista é capaz de avaliar quantitativamente alternativas de concepção espacial, analisando como diferentes soluções impactam a circulação e a evacuação de pessoas. Tais ferramentas oferecem suporte tanto à criatividade do arquiteto quanto à tomada de decisão baseada em parâmetros técnicos (Kowaltowski et al., 2010). Estudos de caso no campo do projeto arquitetônico envolvendo seleção de rotas (Boulmakoul, Mandar, 2011; Silva et al., 2012; Porzycki, Was, 2023) demonstram como esse tipo de algoritmo pode contribuir para a análise e a qualificação do ambiente construído.

2.2 Trabalhos Correlatos

Diversos programas de simulação têm incorporado algoritmos *pathfinder* para modelar deslocamentos humanos em situações de evacuação. Essas ferramentas, em geral, oferecem soluções consolidadas de análise e são amplamente utilizadas em pesquisas e aplicações profissionais. No entanto, a maioria apresenta documentação restrita quanto ao detalhamento metodológico da implementação de aspectos ergonômicos, como variações antropométricas, velocidade de deslocamento ou restrições de rotação dos indivíduos.

Essa ausência de descrição mais minuciosa dificulta a replicação acadêmica, a validação independente dos resultados e o exame crítico da confiabilidade dos modelos. É justamente nesse ponto que se insere a contribuição deste trabalho: o detalhamento da implementação computacional de parâmetros ergonômicos. Tal abordagem, ainda pouco explorada na literatura, busca ampliar a transparência, a replicabilidade e o realismo ergonômico das simulações, fortalecendo o potencial de aplicação prática e acadêmica.

Diferentemente dessas abordagens, o presente trabalho contribui ao detalhar metodologicamente a implementação de aspectos ergonômicos, etapa raramente descrita em profundidade. Essa opção amplia a confiabilidade e a replicabilidade das simulações, reforçando a contribuição diferencial desta pesquisa em relação aos correlatos.

3 METODOLOGIA

Todo o trabalho foi realizado por meio de simulações computacionais. Para isso, foi desenvolvido em linguagem Python o programa **Fuga v. 2.0**, composto por dois módulos principais e independentes: o Fuga Path, responsável pela geração do ambiente e da rota ideal, e o Fuga Move, dedicado à movimentação dinâmica dos agentes.

No componente Fuga Path, o ambiente construído a ser simulado é representado em uma matriz ambiente (MA), sem limitações quanto à geometria da planta ou ao número de pavimentos, embora situações especiais — como o uso de elevadores — não estejam contempladas nessa versão. A partir da MA, é gerado o roteiro de deslocamento ideal, calculado por um algoritmo de alto desempenho desenvolvido especificamente para esse fim, (Braga, Moita, 2026).

Já o componente Fuga Move é responsável pela movimentação efetiva dos agentes. Mesmo partindo de um roteiro pré-computado, o módulo incorpora um processo decisório baseado em lógica *fuzzy*, que permite aos indivíduos simulados se desviarem dinamicamente da rota ideal em resposta ao ambiente (Braga et al., 2017b). É também nesse módulo que são implementados os parâmetros ergonômicos humanos, incluindo variações antropométricas e de velocidade de deslocamento.

Essa estrutura modular permitiu conduzir simulações controladas, de forma a avaliar a consistência do modelo e a confiabilidade dos resultados obtidos, conforme detalhado na seção de Avaliação dos Resultados.

4 PROPOSTA

Nesta seção é apresentada a proposta central deste trabalho, que consiste na aplicação explícita de aspectos ergonômicos ao programa Fuga. O objetivo é mostrar como parâmetros antropométricos, de rotação, de translação e de velocidade de deslocamento foram incorporados ao modelo computacional, de forma a aproximar a simulação da realidade observada no comportamento humano durante processos de evacuação. O detalhamento dessa implementação constitui a principal contribuição metodológica da pesquisa, pois torna transparente uma etapa geralmente omitida em trabalhos correlatos e amplia a confiabilidade e a replicabilidade das simulações realizadas.

4.1 Antropometria

A antropometria (ciência das medidas do tamanho corporal humano) possui um papel fundamental na modelagem. Pessoas são como objetos tridimensionais e uma completa descrição de sua altamente desenvolvida sequência de movimentos absolutamente não é trivial (Viel, 2001). Entretanto, muitos pesquisadores consideram em seus estudos a representação simplificada da projeção vertical do corpo como sendo um objeto geométrico simples, como

um quadrado (Braga et al., 2014; Pereira, 2016; Braga et al., 2017b), uma circunferência (Cui, Bai, 2023), uma elipse (Cucci Neto, 1996), ou mesmo algumas formas básicas conjuntas (Kuligowski, Peacock, 2005).

Neste trabalho não será realizado nenhuma forma de simplificação do formato humano, que será considerado na sua forma mais realística possível, dentro dos limites da sua discretização. Como não existe um ser humano padrão, é grande a variação de tamanhos possíveis.

Para contornar esse ponto, ou pelo menos minimizar esta condição, serão consideradas três tamanhos corporais, denominados de pequeno, médio e grande, conforme apresentado por Still (2000) e que englobam cerca de 95% da população. O método empregado para a obtenção dos perfis humanos discretizados é:

- inicialmente, a imagem da projeção humana, sem nenhuma simplificação, é superposta e centrada a uma malha composta por campos de 5 cm de lado (resolução padrão adotada no programa Fuga);

- quando, dentro de um destes campos de 5 cm de lado, a imagem do perfil humano ocupar visualmente mais da metade de sua área interna, esse campo (pixel) é considerado totalmente preenchido, mas se a imagem do perfil humano ocupar menos da metade da sua área interna, esse campo (pixel) é considerado totalmente vazio; e

- ajustes pessoais também foram realizados para se manter a simetria hemisférica da representação do corpo (lados direitos e esquerdos mantidos iguais).

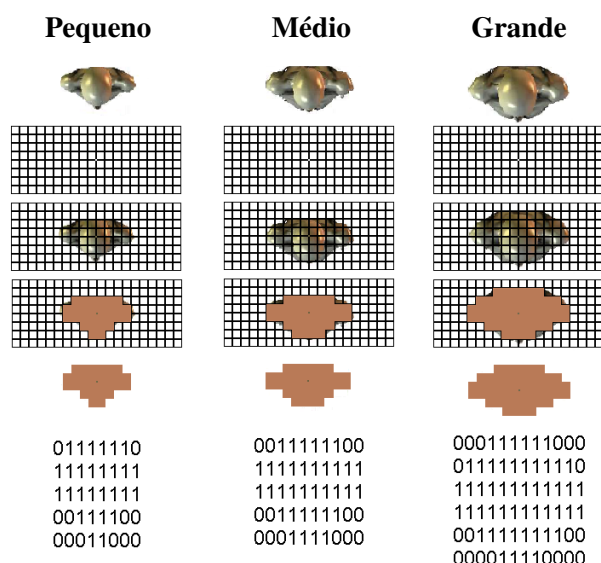
A Tabela 1 resume as principais características obtidas, e a Figura 1 ilustra esse processo para os três perfis considerados:

Tabela 1 – Características das representações humanas da Figura 1

Corpo Humano	Área (cada pixel representa um quadrado de 25 cm² no mundo real)	Maiores dimensões (comprimento entre os ombros x largura)
Pequeno	28 pixels (ou 700 cm ²)	8 pixels x 5 pixels (ou 40 cm x 25 cm)
Médio	36 pixels (ou 900 cm ²)	10 pixels x 5 pixels (ou 50 cm x 25 cm)
Grande	52 pixels (ou 1300 cm ²)	12 pixels x 6 pixels (ou 60 cm x 30 cm)

Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 1 – Processo de obtenção dos perfis humanos discretos



Fonte: elaborado pelos autores, com a imagem contínua dos agentes adaptada de Still (2000).

4.2 Rotação das pessoas

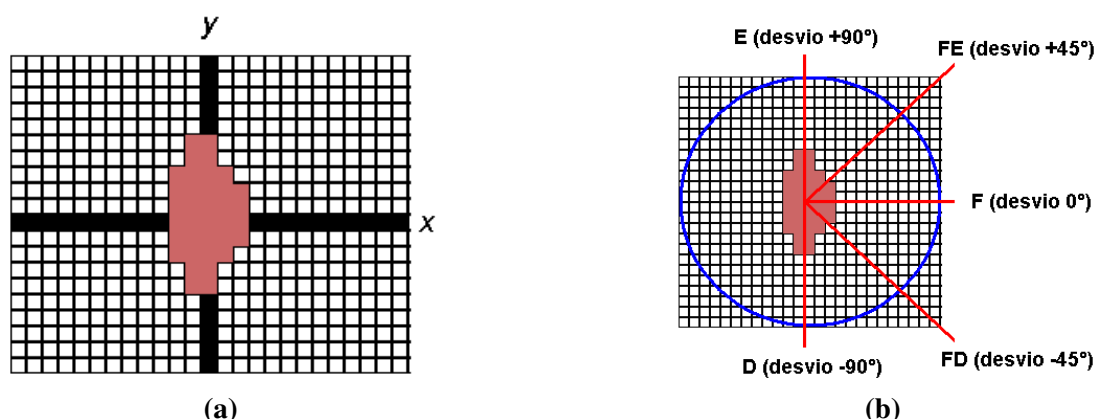
A rotação dos agentes durante a simulação é um quesito obrigatório. Essa angulação foi realizada por mapeamento por meio de uma transformação de rotação (Ammeraal, Zhang, 2008; Toneis, 2015). A rotação do agente (ou de todos os pontos que compõem o agente) em um ângulo φ sobre o sistema de coordenadas xy pode ser realizada pela substituição de cada ponto individual da pessoa que se localiza nas coordenadas x_i e y_i , por um novo ponto que se localiza nas coordenadas x'_i e y'_i . Esses pontos se relacionam entre si pela matriz de rotação da Equação 1.

$$\begin{bmatrix} x'_i & y'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i & y_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

No ambiente discreto, esta transformação não é necessariamente reversível. Assim, para evitar a propagação de erros que resultariam na contínua deformação no formato do corpo dos agentes com a evolução da simulação, a transformação de rotação sempre se dará somente em relação a uma posição base, e não em relação à posição anterior do agente.

Por estar o agente em determinado momento em um direcionamento qualquer no ambiente, serão permitidas quatro possibilidades de movimentação rotacional direta a cada passo: E - esquerda (desvio +90°), FE - frente-esquerda (desvio +45°), FD - frente-direita (desvio -45°) e D - direita (desvio -90°). Obviamente é permitida a movimentação translacional: F - frente (sem desvio). Para se ilustrar essas situações, a Figura 2a apresenta o agente de tamanho médio no seu posicionamento básico sobre um sistema de coordenadas no plano xy , e a Figura 2b apresenta as cinco possibilidades de movimentação direta.

Figura 2 – Em (a) um agente de tamanho médio no seu posicionamento básico, e em (b) um agente com as cinco possibilidades de movimentação direta



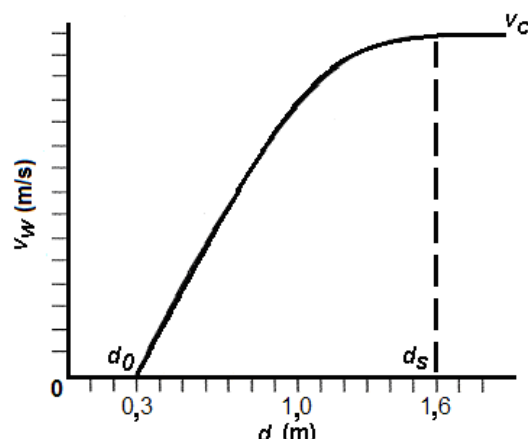
Fonte: Elaborado pelos autores.

4.3 Velocidade normal de deslocamento

A determinação da velocidade de deslocamento varia de forma extensiva em relação à população, e até mesmo um único indivíduo pode apresentar diferentes velocidades dependendo da situação (Okuno et al., 1986; Abley, 2007; Blair, 2010). Um fator que influencia na velocidade de deslocamento praticada é a percepção visual que uma pessoa tem da distância entre si e de outras pessoas, principalmente à frente, ou mesmo de obstáculos. Thompson e Marchant (1995) estudaram a relação entre a velocidade “normal” de movimentação (v_w) em função da distância a mais próxima pessoa à frente (d) para três grupos distintos: homens de 20 anos, mulheres de 50 anos, e para a população média.

Verificou-se uma similaridade no formato da curva de todos os grupos. Assim, na Figura 3 se apresenta a curva geral de v_w em função de d . Nesta Figura 3 as variáveis apontadas são: d_0 (distância mínima entre pessoas), v_c (velocidade de cruzeiro ou velocidade máxima normal) e d_s (distância estacionária ou a menor distância onde v_c é alcançado). Ainda, d_0 é considerado como sendo 30 cm, v_c é considerado como sendo 1,8 m/s para homens com 20 anos, ou 0,8 m/s para mulheres de 55 anos, ou como sendo 1,4 m/s como valor médio para a população, e d_s é considerado como sendo 1,6 m. Portanto, quando d é menor que d_s as pessoas reduzem sua velocidade para um valor inferior a v_c .

Figura 3 – A curva geral da velocidade normal de movimentação (v_w) em função da distância entre pessoas (d)



Fonte: Elaborado pelos autores, baseado nos dados de Thompson e Marchant (1995).

Pelo formato da curva da Figura 3, pode-se, empiricamente, assumir como sendo possível modelar essa curva por uma equação tipo exponencial como a Equação 2.

$$\frac{v_w}{v_c} = \left[\frac{d-d_0}{d_s-d_0} \right]^n \quad (2)$$

Na Equação 2, n é uma taxa de amortecimento, que visivelmente varia com d . Para se testar essa hipótese e obter o valor de n pela propriedade logarítmica, a Equação 2 pode ser posta em uma forma linear, onde n é a inclinação. Através de pontos experimentais obtidos do estudo de Thompson e Marchand (1995) para todos os três grupos, com a Equação 2 trabalhada, se pode então verificar a evolução de n com d , de onde se obtêm a Equação 3 por meio de uma regressão linear ($r^2 = 0,991$). Assim:

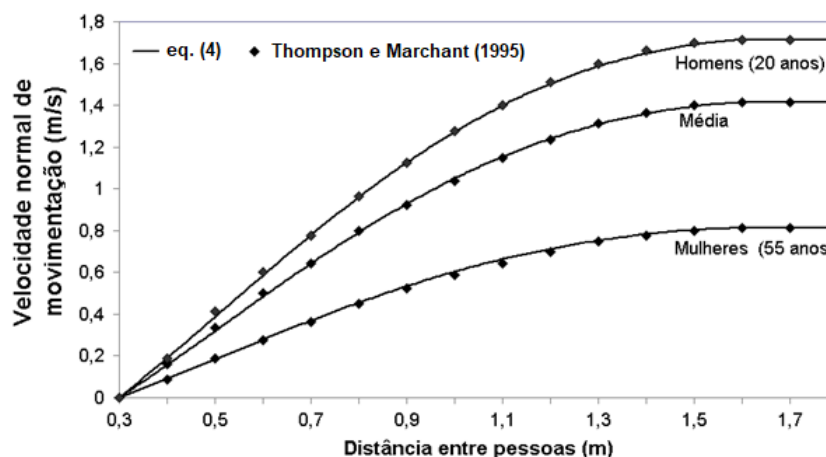
$$n = 1,11 - 0,63 \times d \quad (3)$$

Com as equações 2 e 3, e pela análise da curva da Figura 3, obtém-se a Equação 4 que é válida para todos os grupos relacionando v_w [m/s] em função de d [m], já que todos os demais parâmetros se encontram estabelecidos. A Figura 4 apresenta os resultados encontrados desta modelagem, confrontando os valores de Thompson e Marchant (1995) com os obtidos pela Equação 4.

$$\begin{cases} v_w = 0 & \text{se } d \leq d_0 \\ v_w = v_c \times \left[\frac{d-d_0}{d_s-d_0} \right]^{(1,11-0,63 \times d)} & \text{se } d_0 < d < d_s \\ v_w = v_c & \text{se } d \geq d_s \end{cases} \quad (4)$$

É importante ressaltar que pessoas com deficiência e/ou mobilidade reduzida ou especial (obesos, idosos, gestantes, crianças, doentes), apesar da óbvia grande relevância de seu estudo (Nascimento, Souza, 2019; Silva, 2022), ainda não estão sendo consideradas nessa ver-

Figura 4 – Curvas da velocidade normal de movimentação (v_w) em função da distância interpessoal (d) obtidas pela equação (4) e por Thompson e Marchant (1995)



Fonte: elaborado pelos autores.

são específica do programa Fuga, sendo esse um ponto aberto para melhoria futura.

5 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Esta seção apresenta a avaliação crítica dos experimentos de verificação e validação realizados, destacando a consistência dos parâmetros ergonômicos implementados e a comparação com referências da literatura e programas consolidados.

A verificação e validação do modelo e sua implementação são fatores essenciais para se determinar a confiabilidade dos resultados produzidos por suas simulações. Verificação pode ser definida como sendo o processo de determinar que a implementação do método de cálculo representa com precisão a descrição conceitual do desenvolvedor do método de cálculo e a solução para o método. Já pela ISO – International Organization for Standardization (2008), validação é estabelecida como sendo “o processo de determinar o grau em que um método de cálculo é uma representação precisa do mundo real a partir da perspectiva das utilizações previstas para o método de cálculo” (tradução livre).

Um processo de verificação e validação dos modelos implementados no Fuga por meio de comparações com situações reais, apesar do alto valor intrínseco, é muito difícil de ser realizado. Assim, muitas comparações são feitas com dados obtidos ou de situações de normalidade ou de exercícios de evacuações (Schadschneider et al., 2009, Ibrahim et al., 2019). Diversos sistemas de visão computacional foram desenvolvidos para facilitar estas análises (Jacques Junior et al., 2010; Zhang, Seyfried, 2014). Essas comparações e dados obtidos são de grande relevância, mas o comportamento humano em treinamento pode ser bem diferente do comportamento em uma situação real, além de estarem sujeitas a grande variabilidade nos resultados.

Adicionalmente, é comum autores utilizarem modelos de outros pesquisadores já estabelecidos para comparação (Schadschneider et al., 2009). Entretanto, em alguns casos pode

ocorrer uma razoável divergência entre as modelagens (Rogsch et al., 2009), e o motivo dessas diferenças não é sempre de fácil detecção, já que não raramente os modelos possuem pontos obscuros com diferentes considerações na sua configuração.

Para resolver, ou pelo menos, minimizar essa questão, a NIST - National Institute of Standards and Technology (Ronchi et al., 2013) publicou um protocolo formal de verificação e validação de modelos para evacuação de ambientes, seguindo uma metodologia consistente e abrangente. Esse protocolo NIST foi desenvolvido a partir de um guia elaborado pela IMO – International Maritime Organization (2007). Lubás et al. (2014) analisaram o protocolo NIST, considerando o mesmo como sendo uma iniciativa valorosa, relevante e consistente, tendo adicionalmente apresentado algumas sugestões no sentido de se expandir um pouco mais o escopo dos testes.

Kretz et al. (2025) apresenta um panorama abrangente das principais normas, protocolos e guias desenvolvidos nas últimas décadas para orientar a aplicação de modelos de simulação de pedestres em diferentes contextos.

Neste trabalho, a verificação e a validação do modelo desenvolvido são realizadas por meio de diversas simulações. São feitos alguns ensaios padronizados para se verificar o efetivo comportamento dos algoritmos, pela comparação com resultados de simulações fornecidas na literatura para outros modelos, e por alguns ensaios baseados no protocolo NIST.

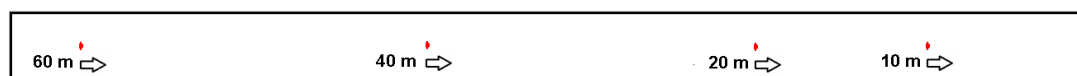
5.1 Velocidade linear (reta e oblíqua)

O cálculo da velocidade efetiva é realizado pela razão entre a distância percorrida em linha reta por um único agente até a saída e o tempo total transcorrido, fornecido pela simulação, para o abandono do ambiente.

Denominou-se de velocidade linear reta quando a movimentação do agente está alinhada na mesma direção de uma linha (ou coluna) na matriz MA que foi gerada para representar o ambiente. Assim, durante o deslocamento somente se altera a coluna na posição do agente na matriz MA mantendo constante a linha, ou vice-versa. Para isso, realizou-se ensaios de movimentação com um agente sozinho em um corredor reto e sem obstruções internas (para se evitar a influência de outros agentes ou obstáculos fixos) de 4 m de largura e 65 m de comprimento, que vai se deslocar até a saída.

O agente estará sempre posicionado inicialmente no centro do corredor em relação à largura do mesmo. Foram realizadas simulações com os agentes estando a uma distância da saída de 10 m, 20 m, 40 m e 60 m da saída. A velocidade de cruzeiro do agente foi previamente especificada antes de cada simulação, sendo mantida fixa ao longo da mesma. Foram realizadas simulações com as velocidades de 0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s. Na Figura 5 está a representação do corredor e na Tabela 2 os resultados encontrados.

Figura 5 – Representação dos agentes (em vermelho) posicionados a diversas distâncias da saída (em laranja) em um corredor reto de 4 m de largura e 65 m de comprimento



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 2 – Comparação entre a velocidade de deslocamento especificada e a calculada após as simulações de abandono do ambiente da Figura 5

Especificada	Velocidade de deslocamento (m/s)			
	Calculada nas simulações			
	Distância da saída (m)			
	10	20	40	60
0,5	0,501	0,500	0,500	0,500
1,0	1,000	1,000	1,000	1,000
1,5	1,498	1,501	1,500	1,500
2,0	2,000	2,000	2,000	2,000

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados da Tabela 2 indicam que o erro na movimentação em linha reta coincidente com uma linha da matriz MA (ou coluna) é muito pequeno, podendo ser desprezado. Outro ponto importante é que o erro não aumenta com a distância.

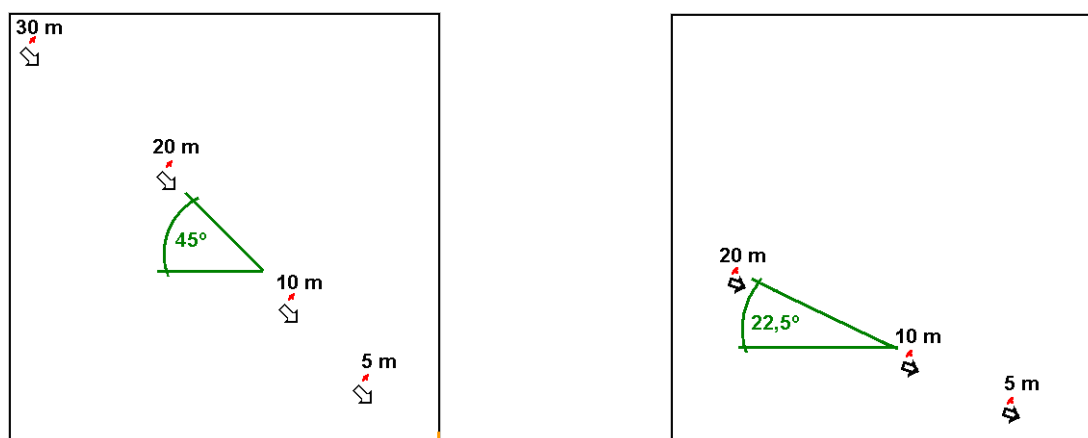
Feito essa primeira parte, torna-se agora necessário a verificação do erro também considerando uma movimentação ainda em linha reta no ambiente, mas cuja rota de deslocamento se comporta em ângulo diferente de 90° em relação à matriz MA (linha e coluna variando), ou a velocidade linear oblíqua.

Para isso, um agente sozinho em um ambiente na forma de um quadrado de 500 m² de área e sem obstruções internas vai se deslocar até a saída. A saída do ambiente está posicionada em um dos cantos. O agente estará sempre posicionado sobre a diagonal do quadrado que passa pela saída (45°), ou sobre a semi-diagonal (22,5°).

São realizadas simulações com os agentes estando a uma distância da saída de 5 m, 10 m, 20 m (para ambas as inclinações) e de 30 m (para a inclinação de 45°). Como feito anteriormente, a velocidade de deslocamento do agente também foi previamente estabelecida, sendo mantida fixa ao longo de cada simulação, com os valores de 0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s. Na Figura 6 está a representação do ambiente e na Tabela 3 os resultados encontrados.

Esses resultados da Tabela 3 indicam que os erros na movimentação em linha reta em angulações de 45° e 22,5° das linhas da matriz MA são pequenos. No pior caso (distância de 5 m) o erro aproximado encontrado foi em torno de +1%, e no melhor caso (distância de 30 m), o erro aproximado encontrado foi de + 0,2%. Apesar de esses erros serem superiores aos encontrados na Tabela 2, podem ser considerados pequenos, principalmente quando se

Figura 6 – Representação dos agentes (em vermelho) posicionados a diversas distâncias da saída (em laranja) sobre a diagonal do ambiente (à esquerda), ou a 22,5° na matriz ambiente (à direita), em salão quadrado com 500 m² de área



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 3 – Comparação entre a velocidade de deslocamento especificada e a calculada após as simulações de abandono do ambiente da Figura 6

Velocidade de deslocamento especificada (m/s)	Velocidade de deslocamento calculada (m/s)							
	Distância da saída (m) e ângulo de movimentação							
	5		10		20		30	
	22,5°	45°	22,5°	45°	22,5°	45°	22,5°	45°
0,5	0,504	0,505	0,503	0,504	0,501	0,502	-	0,501
1,0	1,010	1,011	1,007	1,008	1,005	1,007	-	1,004
1,5	1,512	1,514	1,511	1,511	1,507	1,508	-	1,504
2,0	2,018	2,020	2,009	2,010	2,005	2,007	-	2,003

Fonte: Elaborado pelos autores.

considera os erros de até + 40% que podem ser obtidos na determinação da distância percorrida encontrada por outros algoritmos (Braga et al., 2016).

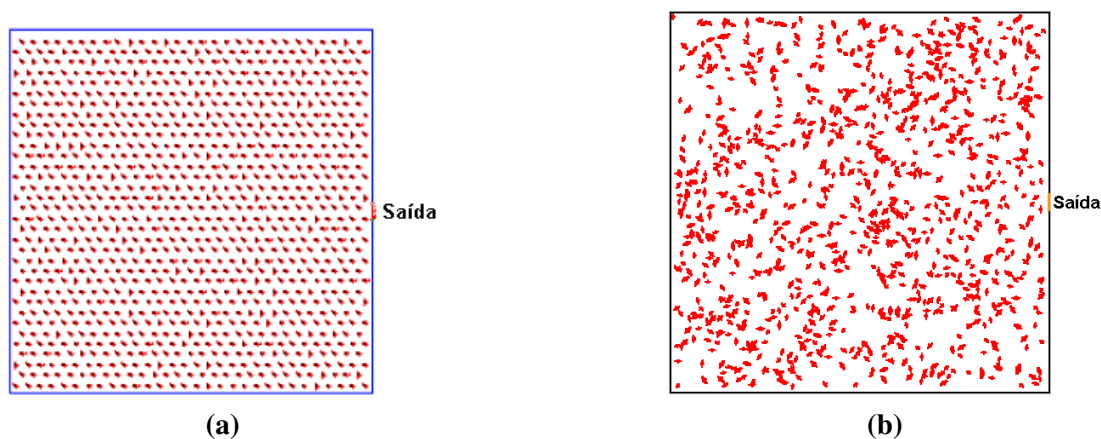
Apesar de não ser significativa a diferença entre os erros nas duas inclinações verificadas, o percurso a 22,5° apresentou um erro sistematicamente um pouco inferior ao apresentado pela inclinação de 45°. Além disso, assim como ocorreu anteriormente, o erro não se elevou com o aumento da distância percorrida.

5.2 Comparações

Repetiu-se o experimento realizado por Ko (2003) com o uso do programa Simulex®. Ko utilizou ambientes quadrados com áreas internas de 500, 1000 e 2000 m² e sempre com uma população de 1003 agentes uniformemente distribuídos no ambiente. Foram criados dentro do programa Fuga esses mesmos ambientes e se repetiu a simulação de Ko, apenas que com a distribuição inicial dos agentes sendo aleatória, mas com um agente sempre no ponto mais

distante da saída. Cada simulação foi realizada cinco vezes para cada ambiente. Na Figura 7 se tem uma imagem gerada do ambiente de 500m², fornecida por Ko (2003), e pelo programa Fuga, e na Tabela 4 uma comparação entre os valores encontrados.

Figura 7 – Em (a) imagem inicial da simulação de Ko (2003), e em (b) imagem inicial de uma simulação no programa Fuga (ambiente quadrado de 500m²)



Fonte: Em (a) adaptado de Ko (2003), e em (b) dos autores.

Tabela 4 – Comparação entre os tempos para total evacuação obtidos pelos programas Simulex® (Ko, 2003) e Fuga (população de 1003 pessoas)

Cenário	Área (m ²)	Densidade (agentes/m ²)	Tempo Evacuação (s)	
			Ko (2003)	Fuga (este trabalho)
1	500	2,0	506	515
2	1000	1,0	537	546
3	2000	0,5	538	545

Fonte: Elaborado pelos autores.

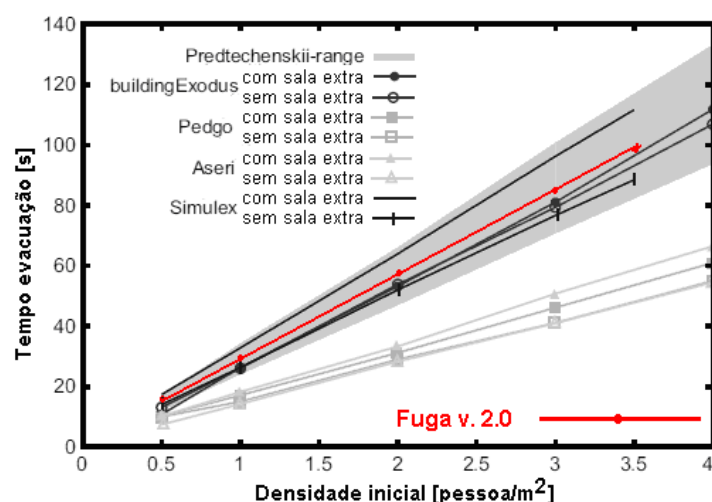
Comparando os resultados dos tempos de evacuação (Tabela 4) entre si, verifica-se para esse teste que os valores obtidos por Ko estão dentro faixa de valores obtida no programa Fuga para o tempo de escape total, considerando o desvio padrão. Adicionalmente, mesmo com a área dos cenários desse teste variando enormemente entre si, não ocorreu uma proporcional elevação no tempo de escape, indicando ser a capacidade de passagem das pessoas pela saída o elemento limitador, e não o posicionamento inicial ou a orientação dos agentes.

Outra comparação realizada foi a repetição do experimento realizado por Rogsch et al. (2009) utilizado para o estudo de diversos modelos. Este se constituiu na evacuação de uma sala retangular de 8 m x 5 m com uma saída única de 1 m de largura (Figura 8). Os valores obtidos pelo programa Fuga para o ambiente e condições dos experimentos realizados por Rogsch et

al. (2009) estão indicados em destaque na Figura 8, sendo os dos demais autores em tons de cinza.

Os valores encontrados para o tempo de evacuação pelo programa Fuga na Figura 8 estão dentro da faixa de valores (que, ressalta-se, definitivamente não é pequena) encontradas na literatura, estando visualmente nesse experimento pouco acima dos valores indicados pelo programa buildingExodus® e dentro da faixa de variação do programa Simulex®. No programa Fuga, devido a sua concepção, não há diferença entre seus resultados pela adição ou não de uma sala extra.

Figura 8 – Comparação entre diferentes modelos para simulação de um ambiente simples, incluindo os resultados obtidos pelo programa Fuga no mesmo ambiente



Fonte: Elaborado pelos autores, adaptado de Rogsch et al. (2009).

5.3 Verificação da velocidade de deslocamento em grupo

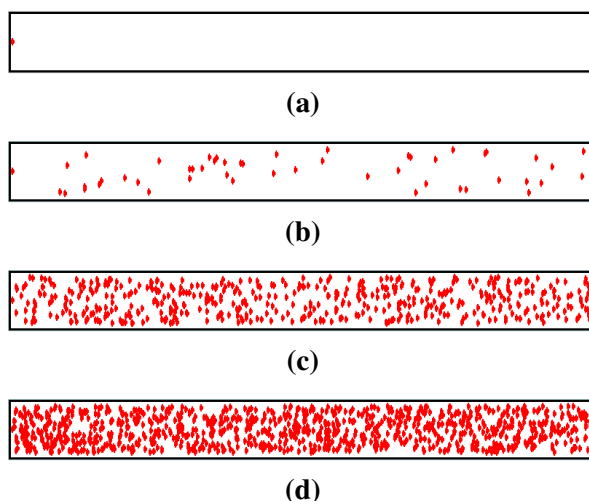
Essa é uma análise também requerida pelo protocolo NIST, onde são sugeridas várias análises distintas nas mais diversas situações de movimentação para se verificar o efeito das pessoas entre si sobre a velocidade de deslocamento, inclusive de grupos.

Para isso, nesse ensaio realizaram-se simulações do abandono de um ambiente formado por um corredor reto de 40 m de comprimento e 4 m de largura, onde a saída se encontra somente em um dos lados do corredor. As simulações são realizadas para populações iniciais de 1, 10, 50, 100, 500, 750 e 1000 agentes. Foram consideradas simulações com todos os agentes tanto se deslocando na velocidade fixa de 1 m/s ou na velocidade variável, em função do agente à frente, mas máxima de 1 m/s.

O posicionamento inicial dos agentes é aleatório a cada simulação, mas todos inicialmente voltados de frente alinhados com a rota rumo a saída. Para se evitar o efeito da possibilidade de todos os agentes ficarem inicialmente mais próximos à saída (particularmente mais relevante nas simulações com menos agentes), sempre em cada simulação pelo menos

um agente estará posicionado no centro do corredor no ponto oposto à saída. Na Figura 9 se apresenta a imagem inicial de algumas das simulações. Os tempos totais de evacuação obtidos estão indicados na Tabela 5.

Figura 9 – Imagens da disposição inicial de uma das simulações do abandono de um corredor de 40 m de comprimento por 4 m de largura, por 1, 50, 500 e 1000 agentes, respectivamente as imagens (a), (b), (c) e (d). Saída em laranja.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 5 – Tempos totais de evacuação obtidos para o abandono do ambiente corredor de 40 m de comprimento e 4 m de largura para diversas populações (Figura 9)

		População (agentes)						
		1	10	50	100	500	750	1000
Densidade inicial (pessoa/m ²)		0,01	0,06	0,31	0,63	3,13	4,69	6,25
Velocidade Máxima fixa	Tempo de evacuação (s)	40	40	40,4	40,7	43,8	53,8	67,5
	Velocidade média (m/s)	1,0	1,0	0,99	0,98	0,91	0,74	0,59
Velocidade variável	Tempo de evacuação (s)	40	40	41,0	44,9	125,4	156,0	209,7
	Velocidade média (m/s)	1,0	1,0	0,98	0,89	0,32	0,26	0,19

Fonte: Elaborado pelos autores.

Conforme apresentado, para baixas populações o tempo de evacuação foi coerente com a velocidade de deslocamento pré-estabelecida. Entretanto, para populações maiores, houve um significativo aumento no tempo total de evacuação (ou redução na velocidade média de deslocamento). A manutenção da velocidade de deslocamento para baixas populações é um ponto positivo, indicando que não houve erros na representação da velocidade pela modelagem, e a redução da velocidade em maiores densidades é coerente com o modelo, dado a influência dos agentes entre si.

Importante ressaltar que esses grupos não são coesos, situação que pode ocorrer, por exemplo, quando uma família se move em conjunto. Assim, na simulação todos os agentes agem de modo independente. O estudo e a simulação de grupos coesos, apesar de importante (Krüchten, Schadschneider, 2017; Adam et al., 2019), ainda não está sendo contemplado no programa Fuga, sendo esse outro ponto aberto a melhorias.

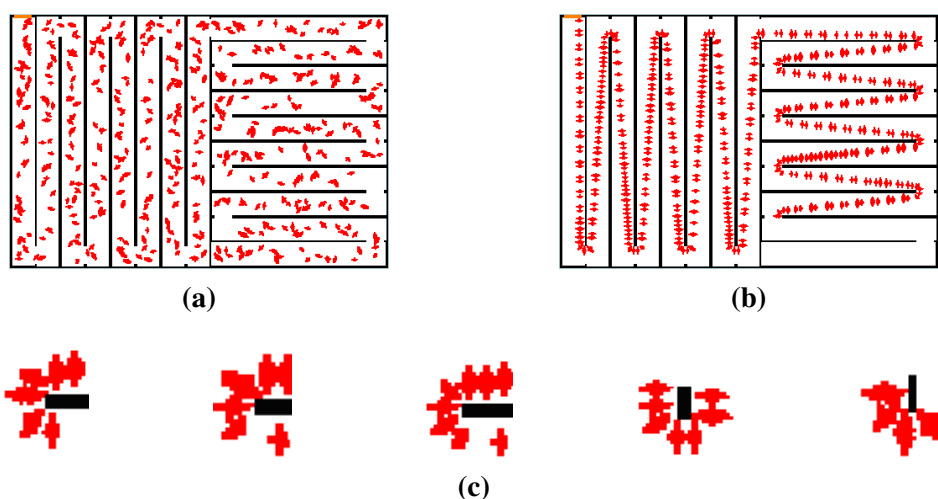
5.4 Verificação do contorno de objetos

Para se realizar a verificação do comportamento dos agentes durante o contorno de objetos fixos (um quina de parede, por exemplo), gerou-se um ambiente formado por múltiplos corredores em ziguezague. O objetivo é verificar qualitativamente eventuais incoerências no perfil de deslocamento e/ou conflitos com as paredes.

Para essa visualização, na Figura 10 se apresentam a imagem inicial de uma simulação de abandono desse ambiente específico criado e também uma imagem retirada durante a simulação, assim como recortes de alguns pontos selecionados para se ilustrar o efetivo comportamento dos agentes.

Nota-se que os agentes disciplinadamente se ordenaram rumo à saída, seguindo a rota de menor distância. Percebe-se também, pelas imagens, a inexistência de conflitos físicos (interpenetração) dos agentes entre si e com as paredes, e que o contorno das quinas é realizado sem maiores problemas ou dificuldades, sendo os agentes capazes de realizar o seu giro no ambiente (rotação) com seu conseqüente redirecionamento.

Figura 10 – Imagens da simulação do abandono de 500 pessoas em ambiente com múltiplos corredores em ziguezague. Em (a) na posição inicial, em (b) em um momento durante o abandono, e em (c) recortes de imagens selecionadas de (b). Saída em laranja.



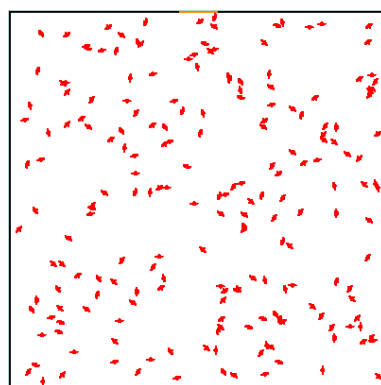
Fonte: Elaborado pelos autores.

5.5 Verificação da seleção e uso da saída

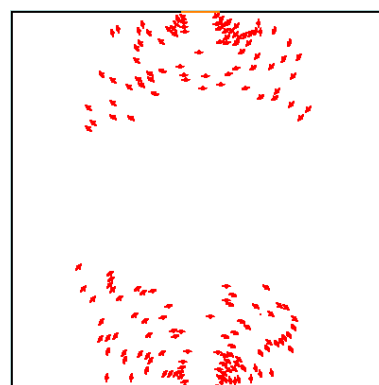
A verificação da seleção e uso da saída é um importante teste recomendado pelo protocolo NIST. No caso do programa Fuga, cada agente sempre vai se direcionar para a saída mais vantajosa entre a(s) saída(s) previamente estabelecida(s) para o mesmo. Para se ilustrar essa particularidade, são realizadas simulações onde os agentes poderão buscar a saída mais vantajosa, ou simulações onde mesmo estando próximos de uma saída, vão desprezá-la e buscar outra saída mais distante, mas que foi previamente estabelecida como sendo o alvo a ser alcançado para aquele agente.

A Figura 11 ilustra essas simulações. Na Figura 11a tem-se o ambiente utilizado, que possui formato quadrado de 20 m de lado com duas saídas em lados opostos e onde 200 agentes estão inicialmente distribuídos aleatoriamente ao longo do ambiente. Já as Figuras 11(b-c-d) foram obtidas durante três distintas simulações do abandono desse ambiente.

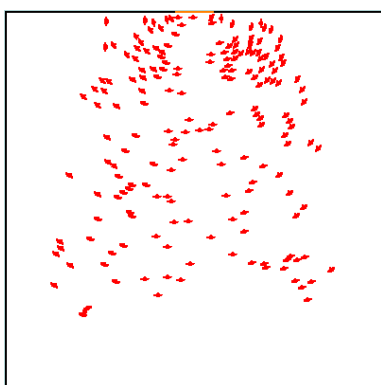
Figura 11 – Imagens da simulação do abandono de 200 pessoas em ambiente quadrado (20 m de lado) com duas saídas em lados opostos (em laranja)



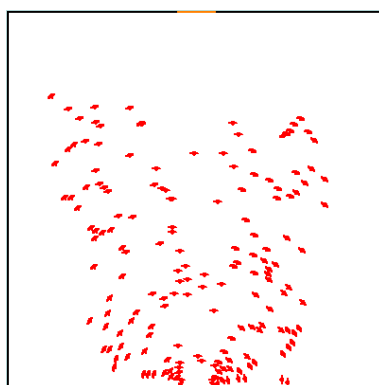
(a) Posição aleatória inicial



(b) Buscando a saída mais próxima



(c) Buscando a saída acima



(d) Buscando a saída abaixo

Fonte: Elaborado pelos autores.

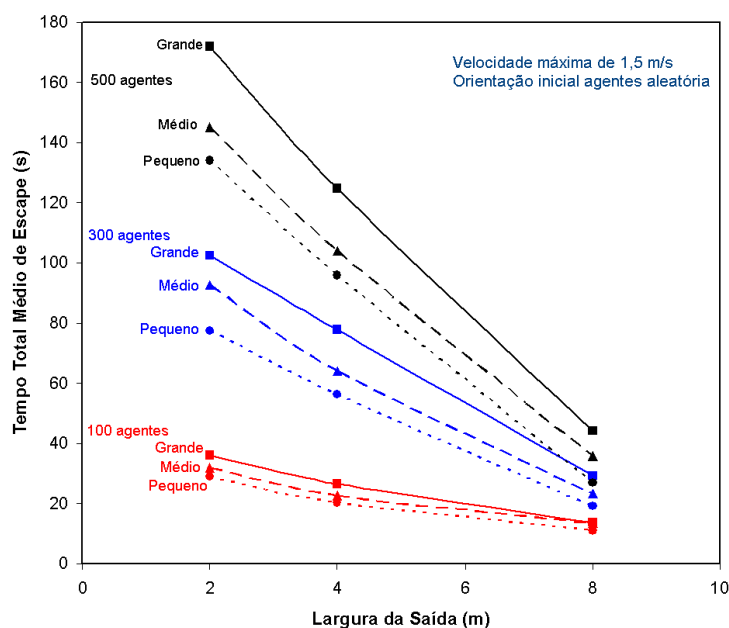
Na simulação ilustrada pela Figura 11b, os agentes se direcionam para a saída mais vantajosa para cada um deles (a localizada mais perto). Na simulação ilustrada pela Figura 11c, os agentes se direcionam somente para uma das saídas (no caso, em uma vista de topo, a saída acima), desprezado a outra mesmo que essa seja vantajosa para muitos deles. Por fim, na Figura 11d, os agentes já se direcionam para a outra saída (no caso, em uma vista de topo, a saída abaixo), similarmente à simulação representada na Figura 11c, desprezando a outra saída, mesmo que ela seja mais vantajosa.

Tais situações foram possíveis porque o programa Fuga ora apresentado gera automaticamente diferentes matrizes com distintas rotas preferenciais (uma para cada saída, e uma para o conjunto de todas as saídas). Em cada simulação, os agentes utilizaram como referência apenas uma destas diferentes matrizes de rotas preferenciais, desprezando as outras, tendo, portanto, objetivos diferenciados a serem alcançados.

5.6 Efeito da distribuição e tamanho dos agentes no perfil de deslocamento

Esse ensaio foi realizado em um ambiente quadrado com 10 m de lado e uma única saída no centro de um dos lados. São consideradas saídas de 2, 4 e 8 m, e populações de 100, 300 e 500 agentes, com velocidade máxima de 1,5 m/s. Em um primeiro conjunto de ensaios, todos os agentes são de tamanho pequeno, posteriormente de tamanho médio, e, por fim, de tamanho grande. Cada simulação foi repetida 10 vezes. A Figura 12 apresenta gráfico com os resultados obtidos.

Figura 12 – Gráfico com o valor do tempo total médio de escape obtido em função da largura da saída, da população e do tipo do agente



Fonte: Elaborado pelos autores.

Verificou-se que o desvio padrão médio no valor do tempo total de escape dos cenários da Figura 12 foi de 4,7%. Verificou-se também que, para determinada configuração, o tempo de escape é aproximadamente proporcional à população do ambiente, e que quanto maior o tamanho do agente maior será o tempo de escape nos cenários observados (a diferença é tanto maior quanto maior for a população e menor a largura da saída).

6 CONCLUSÕES

Este trabalho detalhou a implementação computacional de parâmetros ergonômicos em um programa de simulação da movimentação humana em situações de abandono de edificações denominado Fuga v. 2.0. Foram incorporados aspectos antropométricos, rotação, translação e velocidade de deslocamento, cuja verificação e validação foram realizadas por meio de diferentes ensaios *in silico*.

Os resultados evidenciaram a alta consistência entre velocidades especificadas e simuladas (com erros inferiores a 1%) e a compatibilidade dos tempos de evacuação com programas reconhecidos na área, o que reforça a confiabilidade e aplicabilidade do programa desenvolvido. Assim, a pesquisa preenche uma lacuna metodológica relevante ao oferecer um detalhamento replicável e transparente da incorporação da ergonomia em modelos de simulação.

Embora o modelo ainda apresente limitações, como a ausência de agentes com deficiência, mobilidade reduzida ou em grupos coesos, já se configura como uma ferramenta promissora para apoiar projetistas e pesquisadores na análise de evacuações em ambientes construídos. Futuras versões poderão ampliar a abrangência e realismo do programa, para fortalecer sua aplicação prática e acadêmica.

Além disso, em contraste com a maioria dos trabalhos correlatos, que pouco descrevem a implementação de parâmetros ergonômicos, este estudo avança ao explicitar de forma sistemática as etapas de incorporação desses aspectos, ampliando a confiabilidade, a replicabilidade e o potencial de utilização da ferramenta em diferentes contextos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. Dr. Paulo Eduardo Maciel de Almeida (*in memoriam*) pelas valiosas discussões na fase inicial deste trabalho e pela amizade sempre presente.

REFERÊNCIAS

ABLEY, Steve. **Walkability Tools Research: variables, collection and methodology**. Nova Zelândia: Land Transport New Zealand, 2007, 65 p.

ADAM, Carole; Dugdale, Julie; Garbay, Catherine. Multi-factor Model and Simulation of Social Cohesion and its Effect on Evacuation. In: **52nd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-52)**, 2019, Hawaii. IEEE, 2019.

AMMERAAL, Leen; Zhang, Kang. **Computação Gráfica para Programadores Java**. Rio de Janeiro: LTC, 2008, 217 p.

BLAIR, Alyson Janna. **The Effect of Stair Width on Occupant Speed and Flow of High Rise Buildings**. 2010. Dissertação (Master of Science) — University of Maryland, Maryland, 2010.

BOULMAKOUL, Azedine; Mandar, Meriem. Fuzzy Ant Colony for Virtual Pedestrian Simulation. **The Open Operational Research Journal**, v. 5, p. 19-29, maio 2011.

BRAGA, Henrique Costa; Moita, Gray Farias. Distance Map Associated with Tangent Search as a Pathfinding Strategy: achieving high-quality and safe route maps for crowded movement in built environments. **Trends in Computational and Applied Mathematics**, v. 27, e01845, 2026.

BRAGA, Henrique Costa; Moita, Gray Farias; de Almeida, Paulo Eduardo Maciel. Comparação entre os Algoritmos de Busca pela Vizinhança de Von Neumann ou de Moore para Geração do Mapa de Distâncias em um Ambiente Construído. **Abakós**, Belo Horizonte, v. 4, n. 2, p. 20–40, 2016.

BRAGA, Henrique Costa; Moita, Gray Farias; de Almeida, Paulo Eduardo Maciel. Mapas de Distâncias para a Segurança Contra Incêndio em Edifícios de Interesse Social. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 8, n. 1, p. 32-45, 2017a.

BRAGA, Henrique Costa; Moita, Gray Farias; de Almeida, Paulo Eduardo Maciel. Simulação com Lógica Fuzzy da Movimentação Bidirecional de Pessoas com Formação de Rios de Escoramento e do Empacotamento Humano. **Abakós**, Belo Horizonte, v. 6, n. 1, p. 19–34, 2017b.

BRAGA, Henrique Costa; Moita, Gray Farias; de Almeida, Paulo Eduardo Maciel. Simulação da Movimentação de Pessoas em Situações de Emergência: aspectos ergonômicos e computacionais com autômatos Fuzzy e sua aplicação ao projeto arquitetônico. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 2, p. 61-77, 2014.

CUCCI NETO, João. **Aplicações da Engenharia de Tráfego na Segurança dos Pedestres**. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CUI, Xiaoting; Ji, Jingwei; Bai, Xuehe. Algorithm and Examples of an Agent-based Evacuation Model. **Fire**, v. 6, n. 11, 25 p., 2023.

CUI, Xiao; Shi, Hao. A*-based Pathfinding in Modern Computers Games. **International Journal of Computer Science and Network Security**, v. 11, n. 1, p. 125-130, 2011.

DIJKSTRA, Edsger Wybe. A Note on Two Problems in Connexion. **Numerische Mathematik** 1, p. 269-271, 1959.

HART, Peter E.; Nilsson, Nils J.; Raphael, Bertram. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. **IEEE Transactions of System Science and Cybernetics**, v. 4, n. 2, p. 100-107, 1968.

IBRAHIM, Azhar Mohd; Venkat, Ibrahim; De Wilde, Philippe. The Impact of Potential Crowd Behaviours on Emergency Evacuation: an evolutionary game-theoretic approach. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 22, n. 1, 15 p., 2019.

International Standards Organization. **Fire safety engineering – assessment, verification and validation of calculation methods**. ISO, 2008, 38 p. ISO 16730.

JACQUES JÚNIOR, Júlio César Silveira Jacques; Musse, Soraia Raupp; Jung, Claudio Rposito. Crowd Analysis Using Computer Vision Techniques: a survey. **IEEE Signal Processing Magazine**, v. 27, p. 66-77, 2010.

KO, Sing Yen. **Comparison of Evacuation Times Using Simulex and EvacuationNZ Base on Trial Evacuations**. 2003. Dissertação (Master in Engineering in Fire Engineering) — University of Canterbury, Canterbury, 2003.

KOENIG, Sven; Likhachev, Maxim; Liu, Yaxin; Furcy, David. Incremental Heuristic Search in AI. **AI Magazine**, v. 25, n. 2, p. 99-112, 2004.

KOWALTOWSKI, Doris CCK; Bianchi, Giovana; De Paiva, Valeria Teixeira. Methods that May Stimulate Creativity and Their Use in Architectural Design Education. **International Journal of Technology and Design Education**, v. 20, n. 4, p. 453-476, 2010.

KRETZ, Tobias.; Meyer-König, Tim; Ronchi, Enrico; Ruxton, Emmet; Saberi, Meead. Pedestrian model application guidelines. In: DAAMEN, Winnie; Duives, Dorine (ed.). **Advances in Transport Policy and Planning** Academic Press, 2025. v. 15, p. 349-382.

VON KRÜCHEN, Cornelia; Schadschneider, Andreas. Empirical Study on Social Groups in Pedestrian Evacuation Dynamics. **Physica A: Statistical Mechanics and Applications**. v. 475, n. 1, p. 129-141, 2017.

KULIGOWSKI, Erica D; Peacock, Richard D. **A review of Building Evacuation Models**. NIST, 2005. 156 p. Technical Note 1471.

LUBAŚ, Robert; Mycek, Marcin; Porzycki, Jakub; Waś, Jarosław. Verification and Validation of Evacuation Models – methodology expansion proposition. **Transportation Research Procedia**, v. 2, 2014, p. 715-723.

MIYOMBO, Miyombo Ernest; Liu, Yong-kuo; Mulenga, Chishinga Milton; Siamulonga, Anthony; Kabanda, Martin Chihango; Shaba, Phillimon; Xi, Chunli; Ayodeji, Abiodun. Optimal Path Planning in a Real-World Radioactive Environment: A comparative study of A-star and Dijkstra algorithms. **Nuclear Engineering and Design**, v. 420, A 113039, 2024.

NASCIMENTO, Kissia Stein.; Souza, João Carlos Acessibilidade e Segurança na Evacuação em caso de Incêndio Envolvendo Pessoas com Deficiência. **Revista Flammae**, v. 5, n. 12, p. 121-142, 2019.

OKUNO, Emico; Caldas, Iberê Luiz; Chow, Cecil. **Física para Ciências Biológicas e Biomédicas**. São Paulo: Harbra, 1986. 490 p.

PEREIRA, Leandro Alves. **Modelos de Evacuação Emergencial via Autômatos Celulares com Mudança de Rotas e Campos de Grupos**. 2016. Tese (Doutorado em Estatística) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

PORZYCKI, Jakub; Waś, Jarosław. Modeling Spatial Patterns in a Moving Crowd of People Using Data-driven Approach: a concept of Interplay Floor Field. **Safety Science**, v. 167, n. 3, p. 1-22, 2023.

ROGSCH, Christian; Klingsch, Wolfram; Seyfried, Armin; Weigel, Henning. Prediction Accuracy of Evacuation Times for High-rise Buildings and Simple Geometries by Using Different Software-tools. In: **Traffic and Granular Flow**, 2007. New York: Springer Publishing, 2009, p. 395-400.

RONCHI, Enrico; Nilsson, Daniel. Fire Evacuation in High-rise Buildings: a review of human behaviour and modeling research. **Fire Science Review**, v. 2, n. 7, 21 p., nov. 2013.

SCHADSCHNEIDER, Andreas; Klingsch, Wolfram; Klüpfel, Hubert; Kretz, Tobias; Rogsch, Christian; Seyfried, Armin. Evacuation Dynamics: empirical results, modeling and applications. In: MEYERS, B. (ed.). **Encyclopedia of Complexity and System Science**. Berlin: Springer, v. 5, p. 3142-3176, 2009.

SILVA, Eriberto Carlos Mendes da. **A Perspectiva das Pessoas com Deficiência e Pessoas com Mobilidade Reduzida no Abandono de Auditório sob o Olhar da Segurança Contra Incêndio**. 2022. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

SILVA, Tatiane; Gramani, Liliana; Kaviski, Eloy; Balbo, Fábio; Ferreira, Marina. Análise do Tempo de Evacuação Total de um Cinema por meio da Aplicação de Simulações Computacionais. **Revista Ingeniería Industrial**, v. 11, n. 1, p. 5-16, 2012.

SNIEDOVICH, Moshe. Dijkstra's Algorithm Revisited: the dynamic programming connexion. **Control and Cybernetics**, v. 35, n. 3, p. 599-620, 2006.

SOLTANI, Amir R; Tawfik, Hissam; Goulermas, John Yannis; Fernando, Terrence. Path Planning in Construction Sites: performance evaluation of the Dijkstra, A*, and GA search algorithms. **Advanced Engineering Informatics**, v. 16, n. 4, p. 291-303, 2002.

STILL, G. Keith. **Crowd Dynamics**. 2000. Tese (Doctor of Philosophy in Mathematics) — University of Warwick, Warwick, 2000.

THOMPSON, Peter A; Marchant, Eric W. A Computer Model for the Evacuation of Large Building Populations. **Fire Safety Journal**, v. 24, p. 131-148, mar./apr. 1995.

TONÉIS, Cristiano N. **Matemática Aplicada aos Games: uma abordagem teórica e prática para desenvolvedores**. São Paulo: ArteSam, 2015, 255 p.

VIEL, Éric. **A marcha humana, a corrida e o salto: biomecânica, investigações, normas e disfunções**. Barueri: Manole, 2001. 277 p.

ZHANG, Jun; Seyfried, Armin. Comparison of Intersecting Pedestrian Flows Based on Experiments. **Physica A**, v. 405, p. 316-325, 2014.