

# TRANSPORTE NÃO-MOTORIZADO: DINÂMICA DE MULTIDÕES E A RELEVÂNCIA DO COMPORTAMENTO INDIVIDUAL DE PEDESTRES

**Manuela Marques Lalane Nappi**

Universidade Federal de Santa Catarina

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – PósARQ

**João Carlos Souza**

Universidade Federal de Santa Catarina

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – PósARQ

## RESUMO

O aumento da frequência e das proporções de eventos de massa têm dado impulso a importantes pesquisas sobre a simulação de fluxos de pedestres na tentativa de garantir a segurança desse tipo de transporte não motorizado e compreender precisamente o comportamento de multidões. Cenários de pânico, pisoteamentos, esmagamentos e mortes mostram-se cada vez mais comuns e abordagens de modelagem consideradas bem-sucedidas parecem não se apresentar de maneira consistente em relação a observações empíricas, exigindo novas perspectivas de análise sobre a movimentação de multidões. Esta revisão de literatura aborda o conceito de multidão sob o ponto de vista da engenharia de transportes e apresenta diferentes modelos de simulação, com ênfase nas perspectivas de análise que consideram questões comportamentais nos processos de evacuação. Ao mesmo tempo, busca reforçar a relação entre esse campo da engenharia e a arquitetura, responsável pelos espaços em que se desenvolvem os instigantes fenômenos de movimentação de multidões.

## ABSTRACT

Increase in the frequency and proportions of mass events has given impetus to relevant research on the simulation of pedestrian flows in an attempt to guarantee the safety of this type of non-motorized transport and to precisely understand the behavior of crowds. Panic, trampling, crushing, and death scenarios are increasingly common, and successful modeling approaches appear to be inconsistent with empirical observations, requiring new perspectives on crowd-movement analysis. This literature review addresses the concept of crowds from the transportation engineering point-of-view and presents distinct models of simulation, with emphasis on perspectives of analysis that consider behavioral issues in evacuation processes. At the same time, this work seeks to reinforce the relationship between this research field of engineering and architecture, responsible for the spaces in which the stimulating phenomena of crowd movement take place.

## 1. INTRODUÇÃO

O aumento da frequência e das proporções de eventos de massa fez com que os desastres de multidões e a simulação de fluxos de pedestres se tornassem importantes e emergentes áreas de pesquisa (Moussaïd *et al.*, 2011). Grandes confraternizações de pedestres são muito frequentes em encontros religiosos de grandes festivais hindus, na Índia ou em Meca, por exemplo (Shukla, 2009). Nestas confraternizações, corriqueiramente presencia-se debandadas de multidões que podem ser atribuídas a inúmeras razões. Daí, segundo os autores, o crescente impulso nas últimas décadas para modelar o comportamento de pedestres.

Helbing *et al.* (2005) afirmam que projetar instalações para pedestres representa uma arte que exige fluxos eficientes, especialmente para locais de reunião de grande público, como é o caso de aeroportos, estádios e teatros, por exemplo, que devem atender a questões de segurança. Segundo os autores, nos últimos 100 anos, problemas com multidões causaram 4000 fatalidades e 10 vezes mais ferimentos graves. Assim sendo, afirmam que apesar do aumento dos padrões de segurança, o quadro geral não melhorou e embora o número médio de vítimas pareça diminuir, seu número total aumenta paralelamente ao aumento da frequência de eventos de massa.

Para Shahhoseini e Sarvi (2017), a tentativa de garantir a segurança de pedestres, compreender precisamente o comportamento de multidões e das regras que governam o seu movimento adquire uma importância crítica. No entanto, segundo Moussaïd *et al.* (2011), mesmo abordagens de modelagem consideradas bem-sucedidas ainda não se apresentam de maneira consistente em relação a observações empíricas e, muitas vezes, são consideradas de difícil calibração. Possivelmente, a razão mais crítica para se estudar a dinâmica coletiva de pedestres em situações de emergência seja a falta de dados complementares para desenvolver e validar um modelo explicativo, o que elucidaria a existência de poucos modelos focados em situações de pânico (Shiwakoti e Sarvi, 2013).

Diferentes comportamentos complexos de multidões de pedestres podem ser críticos sob condições de emergência e alta densidade, sendo que a escassez de dados humanos sobre pânico traz dificuldades e desafios à modelagem da dinâmica de multidões em situações complexas, especialmente em emergências (Dias *et al.*, 2013). Nesse sentido, Frank e Dorso (2011) discorrem sobre a importância de pesquisas relacionadas ao comportamento humano em evacuações em pânico e citam diversos autores que chamaram atenção para o fato de que um obstáculo inserido próximo a uma saída é capaz de melhorar o tempo de evacuação de um ambiente, como Helbing *et al.* (2000 e 2005), Hughes (2003) e Johansson e Helbing (2007). No entanto, Frank e Dorso (2011) acreditam que o obstáculo, por si só, não garante melhores chances de sobrevivência, pois a maneira com que os pedestres escolhem evitá-lo é muito importante para o seu próprio desempenho.

A proposta deste trabalho é, portanto, colocar em pauta as principais publicações sobre a dinâmica de evacuação de pedestres que relacionam a eficácia de fluxos de saída com características do comportamento humano, discutindo-se os conceitos de multidão (do ponto de vista da engenharia de transportes), o comportamento de pedestres em multidões, assim como modelos de simulação de pedestres que têm destaque no campo da pesquisa. Considera-se que a contribuição mais significativa desta proposição seja trazer à discussão um viés pouco explorado na literatura internacional, que trata da importância de se considerar o comportamento humano como fator de interferência na velocidade de fluxos em evacuações e não apenas características arquitetônicas das áreas e rotas de escape.

## **2. DEFINIÇÃO DE MULTIDÃO E O CONCEITO DE PÂNICO**

Para Helbing e Johansson (2011) a multidão se dá a partir da aglomeração de muitas pessoas em uma mesma área e ao mesmo tempo. Segundo os autores, deve-se presumir que a densidade de uma multidão é suficientemente alta para causar interações contínuas ou reações em outros indivíduos. No campo da sociologia, em que estudos sobre multidões são corriqueiros, a definição de multidão é evidentemente ampla: “mais de duas pessoas no mesmo local durante o mesmo período de tempo” e, quantitativamente, não representa um ponto de referência para a engenharia (Duives *et al.*, 2013, p. 194). Os autores adotam a definição de multidão como sendo um grande grupo de indivíduos (maior ou igual a 100), num mesmo espaço e ao mesmo tempo, cujo movimento se dá por um período prolongado de tempo (maior ou igual a 60 segundos), de maneira dependente das interações que predominam no local (sendo a densidade maior que 1 pessoa / m<sup>2</sup>). Ainda que se considere essa definição, segundo os autores, o tipo de multidão pode ser muito diferente.

No tipo de multidão assumida por Duives *et al.* (2013) os pedestres estão próximos uns dos outros (distância menor que 1 m) e tomam decisões múltiplas de movimento em fração de

segundos. Além disso, não se encontram sob pressão externa para se movimentarem, mas possuem um objetivo em mente quando estão se movendo. Os autores também assumem uma atmosfera amigável, sem tensão adicional ou interações entre indivíduos ou grupos deles. Não há faixa etária ou gênero predominante, o que significa diferentes velocidades de fluxo, sendo que a multidão é considerada heterogênea, tal qual ocorre em eventos públicos e festivais. Nela há pedestres solitários e outros que fazem parte de um grupo, sendo que todos carregam uma pequena mochila e nenhum deles possui familiaridade com o layout do local onde se encontram, ou seja, os pedestres podem exibir tanto comportamento de busca quanto de escolha de rota ideal. Diante do que foi exposto, Duives *et al.* (2013) consideram ter adotado uma definição para o termo multidão, no campo da engenharia, mais direta para a modelagem de pedestres em movimento.

Para Shukla (2009), um comportamento desastroso que pode ocorrer em uma multidão é a debandada de pedestres, geralmente desencadeada em situações onde se estabelece o risco de morte, como em situações de incêndio em corredores lotados, ou quando há pressa para se chegar a eventos de grande escala (como milhões de pessoas em eventos relacionados à fé religiosa). Nesse sentido, Helbing *et al.* (2005) afirmam não ser incomum que as mortes e ferimentos das vítimas tenham como causa o comportamento da multidão e não perigos reais. Para Escobar e De La Rosa (2003) o pânico é uma catástrofe natural produzida pelo homem, ou seja, é uma catástrofe natural pelo fato de não ser deliberada. Os autores afirmam que a histeria coletiva pode ser desencadeada por desastres como incêndios e terremotos, por exemplo. Mas também pode ocorrer em outros cenários, como em shows, encontros religiosos ou eventos esportivos com consequências tão graves quanto os primeiros. A frequência desse tipo de desastre aumenta proporcionalmente ao crescimento das densidades populacionais, combinada com a facilitação dos meios de transporte, que levam maiores quantidades de pessoas a eventos de massa (Helbing e Johansson, 2011). Estudos levantados pelos autores mostram que são raras as pesquisas empíricas e sistemáticas sobre o pânico, além de haver escassez de teorias quantitativas que possibilitem prever a dinâmica de multidões em densidades extremas.

Segundo Helbing *et al.* (2002) o pânico pode ocorrer sem quaisquer razões compreensíveis e pode ser desencadeado, até mesmo, por pequenos contrafluxos de pedestres que causam atrasos em uma multidão que está em movimentação de saída. Nesses casos, os pedestres que não percebem o motivo da desaceleração temporária ficam impacientes e insistentes. De maneira global, longos tempos de espera tendem a aumentar a velocidade desejada, resultando em vazão ineficiente que aumenta ainda mais os tempos de espera, em um ciclo vicioso que termina de maneira trágica ao desencadear pressões tão altas que geram pessoas esmagadas, caídas e pisoteadas. Daí a importância de prever-se saídas suficientemente amplas e evitar-se contracorrentes quando grandes multidões desejam sair, também citado por Helbing *et al.* (2000).

Escobar e De La Rosa (2003) acreditam que a natureza trágica do fenômeno do pânico explique ações egoístas e que uma possível solução resida no projeto arquitetônico para maximizar o fluxo de saída em situações de evacuação. Para Helbing *et al.* (2005), quando pessoas perdem o equilíbrio e caem, por exemplo, diante da falta de controle da multidão, a massa as atropela (Figura 1). Isso exige, segundo os autores, soluções específicas de projeto arquitetônico que possam reduzir os perigos potenciais durante eventos de massa. À esquerda da Figura 1 demonstra-se o efeito causado pela pressão em uma multidão, que aumenta até um

nível potencialmente letal, podendo dobrar barreiras de aço. E à direita vê-se pessoas em pânico que se atropelam e são empilhadas umas sobre as outras.



**Figura 1:** Problemas típicos durante debandadas de multidões. Fonte: Helbing *et al.* (2005).

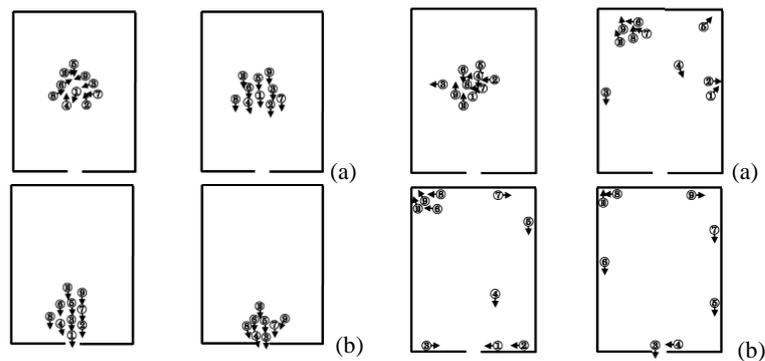
A transição que ocorre entre o comportamento racional e o comportamento de pânico, aparentemente irracional, é ditada, segundo Helbing *et al.* (2002), pelo parâmetro “nervosismo”. Por outro lado, os autores afirmam que existem medidas que possibilitam o aumento da eficácia dos fluxos de pedestres, tanto em situações normais quanto de pânico. Citam como exemplo o posicionamento adequado de pilares, ainda que eles reduzam as áreas de saída. A pesquisa sobre comportamento de pedestres e multidões, no entanto, é altamente multidisciplinar. Ela envolve atividades de cientistas, psicólogos, sociólogos, biólogos, físicos, cientistas da computação, etc. (Helbing e Johansson, 2011). O que explica a existência de opiniões controversas sobre o assunto como, por exemplo, em relação ao conceito de pânico, tratado acima, à explicação de padrões de movimento coletivos e aos modelos de simulação para o campo da pesquisa e análise, assunto que serão abordados na sequência.

### 3. O COMPORTAMENTO DE PEDESTRES

Uma ampla variedade de comportamentos auto-organizados pode ser observada em multidões de pessoas em situações cotidianas (Helbing *et al.*, 2000). O movimento mais comum de auto-organização, descrito por diversos pesquisadores, é o fenômeno de *formação de vias*. Durante esse processo, vias de larguras variáveis se formam de maneira dinâmica em um corredor. Já as pesquisas realizadas por Helbing *et al.* (2007) sobre a ponte *Jamarat*, encontraram o fenômeno das *ondas stop-and-go*, onde os fluxos são temporariamente interrompidos longitudinalmente quando ocorrem altas densidade de multidões unidirecionais. Em um fluxo ainda mais denso, surgiu a chamada *turbulência de multidão*. Nesse regime, o pedestre não apresenta mais controle sobre seus próprios movimentos e são observadas interações locais entre os pedestres baseadas na força. Três outros efeitos foram descritos em nível operacional e em torno de gargalos, são eles: o *efeito de pastoreio*, citado por Helbing *et al.* (2005), o *efeito de zíper*, colocado por Hoogendoorn e Daamen (2005) e o *efeito mais rápido é mais lento*, discutido em Helbing e Johansson (2011).

Duives *et al.* (2013) resumem os últimos três efeitos citados acima: o *efeito de pastoreio* trata dos casos em que a falta de clareza em determinada situação faz com que as pessoas apresentem o comportamento de seguirem umas às outras ao invés de seguirem o caminho ideal. Esse tipo de comportamento é visto com frequência em situações de estresse em evacuações. O *efeito de zíper* é aquele onde os indivíduos permitem que outros permaneçam dentro de seu espaço territorial, desde que se encontrem diagonalmente a sua frente, ou seja, o espaço à frente de seus pés deve permanecer vazio. Isso permite vias mais estreitas em um gargalo quando comparadas à largura esperada da zona territorial de um pedestre. Já o *efeito mais rápido é mais lento* se refere a uma situação em que a densidade em uma fila à montante de um gargalo aumente devido ao fato de as pessoas continuarem avançando mesmo com o gargalo entupido.

Situações em que as pessoas não demonstram certeza sobre suas decisões apresentam certa tendência de comportamento imitativo, especialmente pronunciado em situações de ansiedade (Helbing e Johansson, 2011). Simulações realizadas por Helbing *et al.* (2000) sugerem que estratégias ótimas em situações de evacuação envolvem uma combinação de comportamento individualista e do instinto coletivo de pastoreio (comportamento imitativo). As maiores chances de sobrevivência, portanto, estariam atreladas a uma mistura de comportamento individualista e de pastoreio, em que o individualismo permitiria a detecção de algumas saídas por determinadas pessoas e o pastoreio garantiria que as soluções bem-sucedidas fossem imitadas por pequenos grupos (Helbing *et al.*, 2000). Segundo Helbing e Johansson (2011), uma situação típica do que foi exposto se dá no momento de escape de um ambiente com fumaça, quando a dinâmica de evacuação ocorre de forma muito diferente de uma saída em situação normal (Figura 2).



**Figura 2:** Comparação entre saída normal (a) e evacuação de um ambiente sem visibilidade (b). Fonte: Helbing e Johansson (2011).

Vê-se, no exemplo demonstrado pela Figura 2 que, sob condições normais de visibilidade, a saída é facilmente encontrada e há a tendência de que a evacuação se dê pelo caminho mais curto (à esq.). Por outro lado, quando a visibilidade da saída é impedida, a evacuação ocorre de maneira menos eficiente e mais lenta (à dir.). Helbing e Johansson (2011) notaram que a maior parte das pessoas procura andar relativamente em linha reta na direção em que suspeita haver uma saída. E, no geral, elas acabam indo de encontro a uma parede, onde decidem por uma das duas direções possíveis até encontrarem a saída. Segundo os autores, ao encontrarem umas às outras, as pessoas tendem a tomar decisões conjuntas por uma ou outra direção, passando a mover-se coletivamente.

Para Duives *et al.* (2013), quanto maior a densidade maior se torna o problema de coordenação, pois um grande número de pessoas passa a disputar algumas pequenas lacunas. Além disso, a interação corporal e o atrito provocam retardos no movimento global de uma multidão. Quanto aos processos estratégicos capazes de influenciar o comportamento de movimento, destaca-se que a maioria das pesquisas utiliza apenas propriedades físicas como, por exemplo, distância em relação a objetos, larguras efetivas de porta, etc. Mas, conforme afirmam Duives *et al.* (2013), o movimento de pedestres também sofre influência de decisões tomadas a nível estratégico. Decisões, estas, que podem resultar de processos fisiológicos, psicológicos, sociológicos e físicos. Na sequência serão apresentadas diferentes perspectivas de análise e modelagem de fluxos de evacuação de multidões, dando-se ênfase àquelas que trazem à discussão a relevância do comportamento individual de pedestres, pouco abordado na literatura.

#### 4. DIFERENTES PERSPECTIVAS DE ANÁLISE DA EVACUAÇÃO DE MULTIDÕES

Helbing e Johansson (2011) afirmam que a modelagem do movimento de pedestres desperta grande interesse teórico e prático. Segundo Duives *et al.* (2013) os atuais modelos de simulação de pedestres são utilizados para prever onde, quando e por que surgem movimentos perigosos em multidões de alta densidade. Nesse sentido, conforme apontam Moussaïd *et al.* (2011), muitos modelos de comportamento de pedestres foram propostos a fim de explicar as leis subjacentes à dinâmica de multidões. Dentre eles, as abordagens que se baseiam na física são bastante comuns, a exemplo dos modelos de dinâmica fluida e de força social, ambos inspirados na mecânica newtoniana. No entanto, conforme afirmam os autores, mesmo abordagens de modelagem consideradas bem-sucedidas ainda não se apresentam de maneira consistente em relação a observações empíricas e, muitas vezes, são consideradas de difícil calibração.

O trabalho desenvolvido por Duives *et al.* (2013) revisou um amplo espectro disponível de modelos de simulação para o campo da pesquisa e análise, fornecendo uma visão geral de cada um deles: Autômatos Celulares, Modelos de Força Social, Modelos de Escolha de Atividades, Modelos Baseados em Velocidade, Modelos Comportamentais, Modelos de Rede, Modelos Contínuos e Modelos Híbridos. Para os autores, o atual campo de simulação de pedestres aponta para algumas grandes áreas de aplicação. Uma delas se refere à pesquisa sobre o movimento de multidão, sendo que os modelos descritos nos trabalhos de Helbing e Molnár (1997) e Hoogendoorn e Bovy (2004) conseguiram simular a maioria deles. Duives *et al.* (2013) recomendam, portanto, os Modelos de Força Social e os Modelos Baseados em Atividades, respectivamente, para a pesquisa de movimento de multidão de pedestres.

Segundo Moussaïd *et al.* (2011), o Modelo de Força Social descreve o movimento de pedestres a partir de uma soma de forças atrativas e repulsivas, impulsivas e flutuantes, que refletem diversas influências externas bem como motivações internas. Shukla (2009) afirma que a modelagem baseada em forças sociais de multidões de pedestres representa uma abordagem microscópica avançada que permite simular a dinâmica da movimentação de pedestres. Esse tipo de modelagem, segundo o autor, tem sido utilizado de forma efetiva para simulações de pedestres em situações normais e de pânico. Segundo Helbing *et al.* (2005), o Modelo de Força Social tem como filosofia de modelagem subjacente o comportamento ou reação automática dos pedestres. Os autores afirmam que, geralmente, os pedestres não tomam decisões complicadas, pois enfrentam situações padrão e aplicam estratégias comportamentais otimizadas, que foram aprendidas ao longo do tempo. Desta maneira, um pedestre terá reações automáticas ao deparar-se com obstáculos ou outros pedestres, por exemplo.

O Modelo Baseado em Atividades incorpora um processo estratégico de decisão e representa uma generalização do Modelo de Força Social. Foi proposto por Hoogendoorn e Bovy (2004) e denominado *Nomad*. Nesse modelo os pesquisadores buscaram definir a base do comportamento simulado fundamentando-se em regras comportamentais. A abordagem escolhida também inclui, segundo Duives *et al.* (2013), a escolha de rota em tempo e espaço contínuos. Conforme destacado por Campanella *et al.* (2009), no *Nomad*, as ações dos pedestres são dependentes das atividades que eles desejam realizar, sendo que o seu planejamento estratégico e movimentos podem ser atualizados durante a simulação. Assim como no modelo de Força Social, o que determina o comportamento dos indivíduos é a sobreposição de efeitos de atração e de repulsão.

O modelo de multidões de pedestres aplicado por Helbing *et al.* (2000) geraram uma série de resultados contra intuitivos, como é o caso dos fenômenos *congelamento por aquecimento* ou *mais rápido é mais lento* e, ainda, da subutilização de saídas alternativas, todos em função de situações de pânico. Os referidos autores, além de Helbing *et al.* (2005), previram ainda que as taxas de fuga aumentavam com a obstrução ou barreira parcial à montante de uma saída. Fato que também foi objeto de estudo de pesquisadores que trabalham com questões granulares, como é o caso de Zuriguel *et al.* (2011), ou questões arquitetônicas, como Escobar e De La Rosa (2003), Shiwakoti e Sarvi (2013), Yanagisawa *et al.* (2010) e Jiang *et al.* (2014), por exemplo.

Helbing *et al.* (2005) sugeriram em suas conclusões que um obstáculo pode apresentar-se como uma barreira que absorve a pressão da multidão e a reduz a um nível subcrítico. Zuriguel *et al.* (2011) concluíram que o mecanismo físico capaz de melhorar o fluxo granular é representado pela diminuição da pressão na região de formação de arcos. Escobar e De La Rosa (2003) realizaram comparações entre diferentes obstáculos em relação a sua capacidade de melhorar a eficiência do fluxo de saída. Os autores concluíram que os pilares foram o tipo de obstáculo mais eficiente e mais simples para tal efeito. Shiwakoti e Sarvi (2013) realizaram diversos experimentos com formigas a fim de melhorar as condições de fuga em pânico a partir do projeto arquitetônico. Os autores afirmam existir indícios importantes de que pequenas características estruturais do ambiente físico possam ter influências desproporcionais na dinâmica de evacuação em situações de pânico. O que concede enorme potencial ao layout de uma área de escape. Yanagisawa *et al.* (2010) verificaram a eficiência da evacuação com obstáculos no espaço celular hexagonal com experimentos humanos. E Jiang *et al.* (2014) também afirmam que o projeto arquitetônico pode facilitar ou dificultar processos de fuga em situações de pânico. Esses estudos destacam que é possível aumentar o fluxo de saída inserindo-se adequadamente um obstáculo em frente a ela, mas é consenso entre os autores que obstáculos inadequados retardam o fluxo ao invés de aumentá-lo.

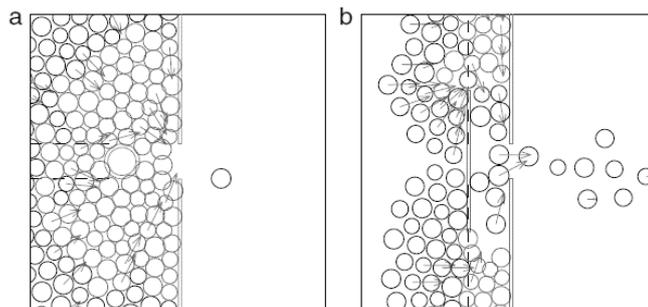
Preocupados com o fator humano, Frank e Dorso (2011) afirmam que as melhorias apontadas por estudos anteriores são mais ou menos eficazes de acordo com o comportamento dos pedestres nos processos de evacuação. Os autores acreditam que um comportamento realista permitiria que, na simulação, o pedestre pudesse mudar sua direção desejada para longe dos obstáculos até que a saída se tornasse visível. Desta maneira, um indivíduo inteligente tentaria sair de uma denominada *área de sombra*, que não tem visibilidade para a porta, e depois iria em direção à saída. Os autores explicam que se um pedestre estiver disposto a mover-se a uma velocidade desejada e em uma direção determinada, mas não conseguir atingir essa velocidade nem mesmo a direção desejada, que dependem de fatores ambientais, como obstáculos e visibilidade, ele precisará acelerar ou desacelerar para alcançar seu objetivo na velocidade desejada. Essa aceleração ou desaceleração representa a força de desejo, que é motivada por sua própria disposição.

Frank e Dorso (2011) salientam que embora o comportamento não estratégico pareça irreal, ele tem sido utilizado em toda a literatura. Além disso, os autores acreditam que ele provavelmente aconteça em situações de pânico, conforme relatado após a tragédia no Estádio *River Plate* (Buenos Aires, Argentina) em 23 de junho de 1968. Nessa situação, Frank e Dorso (2011) relatam que as pessoas tentaram sair pelo Portão 12, mesmo ele estando bloqueado por razões desconhecidas. Situação semelhante teria acontecido em 24 de julho de 2010, no *Love Parade Festival* de Duisburg, na Alemanha, na entrada de um túnel. Diante do que foi colocado, os

autores sugerem que comportamentos estratégicos e não estratégicos são adequados para modelagem de evacuações em pânico.

Frank e Dorso (2011) tiveram como objetivo comparar o comportamento não estratégico, comumente utilizado na literatura correlata, com o comportamento estratégico, aparentemente mais realista, e implementaram o modelo de força social para 200 pedestres que tentavam evacuar um recinto quadrado com 20 m de lado e uma única saída, com 1,2 m de largura. Para tanto, foram adotados diferentes índices de nervosismo, a começar pelo estado de relaxamento, onde a velocidade desejada era de 0,5 m/s, até uma corrida em pânico, com velocidade de 6 m/s. A Figura 3 apresenta as duas situações de obstrução que foram avaliadas. Uma delas mostra um pilar de diâmetro  $L$  e a outra corresponde a um painel plano, delgado, de  $4L \times 0,1 L$ . Ambos os obstáculos foram colocados simetricamente em relação ao ponto médio da porta a fim de facilitar a análise das diferentes estratégias de pedestres.

Frank e Dorso (2011) consideram como comportamento não estratégico aquele que busca diretamente a saída, o que é comumente assumido em simulações. Esse comportamento faz com que o desejo de chegar ao ponto mais próximo à saída impeça o pedestre de enxergar o obstáculo, que funciona como se fosse transparente. Já o comportamento denominado estratégico faz com que o pedestre primeiro apresente o objetivo de sair da zona de sombra, ou seja, da zona que não proporciona visibilidade para a saída. Na Figura 3, as linhas tracejadas delimitam a zona de sombra assumida em cada situação e a distância entre o obstáculo e a porta é de  $1,1 L$ , sendo  $L = 1,2$  m (a largura da porta) em ambas as situações (a) e (b). Os círculos representam pedestres (que apresentam comportamento estratégico) e as setas representam a direção desejada de alguns pedestres. A direção desejada muda assim que os pedestres saem da zona de sombra, sendo que a velocidade desejada está fixada em  $4$  m / s.



**Figura 3:** Imagens do processo de evacuação com pilar (a) e painel (b) como obstáculos.

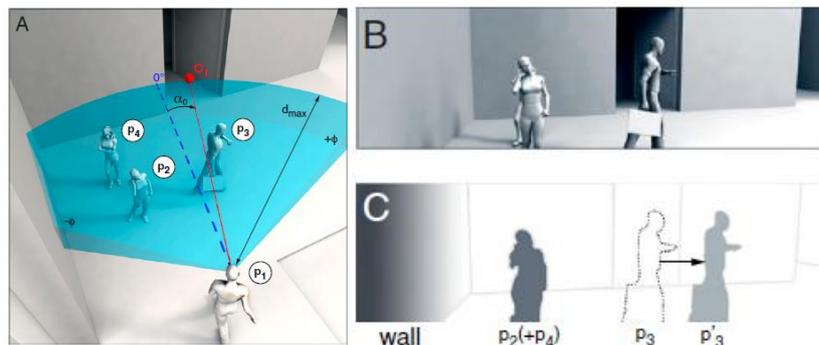
Fonte: Frank e Dorso (2011).

Frank e Dorso (2011) afirmam que seu principal interesse foi avaliar o impacto do comportamento humano em uma situação de fuga, tendo se concentrado em dois tipos de indivíduos, de acordo com suas capacidades de evitar obstáculos. Os autores observaram que o obstáculo representado por um pilar apresentou menor tempo de evacuação que o obstáculo representado por um painel, mas não foram observadas diferenças significativas entre os dois tipos de pedestres nessa comparação. Quanto ao painel, ele parece melhorar a evacuação nos seguintes casos: (a) quando o obstáculo está muito próximo à saída, melhorando a evacuação tanto de pedestre estratégicos quanto daqueles não estratégicos, se comparado à situação livre de obstáculos; (b) quando o obstáculo encontra-se longe da saída ( $2L$ ) o tempo de evacuação para os dois grupos de pedestres se assemelha à ausência de obstáculos; (c) quando o obstáculo está a uma distância intermediária ( $1,1 L$ ) o tempo de evacuação melhora para os dois tipos de

pedestres em relação à ausência de obstáculo, sendo que os pedestres não estratégicos levam vantagem nessa situação.

Moussaïd *et al.* (2011) destacam que embora os modelos inspirados na física consigam reproduzir bem algumas observações, alguns problemas já foram detectados. Um deles é a dificuldade de capturar a gama completa de comportamentos de multidões em um único modelo, que exige expressões matemáticas sofisticadas e relativamente difíceis de serem calibradas. A abordagem cognitiva baseada na heurística comportamental, por outro lado, supera este e outros problemas. Segundo os autores, as heurísticas são procedimentos cognitivos rápidos e simples, frequentemente utilizadas quando decisões precisam ser tomadas em situações de pressão, por exemplo. Além disso, apresentam a vantagem de serem capazes de prever trajetórias individuais e padrões coletivos de movimento com bom grau de concordância quantitativa em relação a variados dados empíricos e experimentais.

Segundo afirmam Moussaïd *et al.* (2011), estudos precedentes demonstraram que pessoas caminhando podem estimar o tempo de colisão com um obstáculo a partir de mecanismos neurais especializados. Mecanismos estes que se encontram nos níveis da retina e do cérebro (Schrater *et al.*, 2000 e Hopkins *et al.*, 2004). Assim sendo, Moussaïd *et al.* (2011) representaram as informações visuais dos pedestres calculando a distância até a primeira colisão em todas as direções possíveis. Na Figura 4 (A), vê-se a ilustração do pedestre P1, diante de outros três pedestres, tentando chegar ao ponto de destino O1, marcado em vermelho. A linha tracejada azul corresponde à linha de visão. Em (B), pode-se observar a situação conforme a visão do pedestre P1. E, em (C), a abstração da cena por um campo visual preto e branco, onde as áreas mais escuras representam uma distância de colisão mais curta.



**Figura 4:** Informações visuais de pedestres em relação a obstáculos. Fonte: Moussaïd *et al.* (2011).

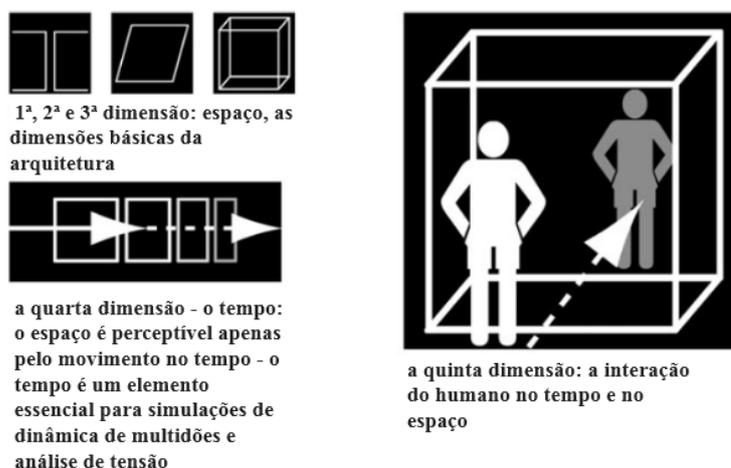
A primeira heurística de Moussaïd *et al.* (2011) diz que um pedestre escolhe a direção que possibilita o caminho mais direto ao seu ponto de destino, mas leva em consideração a presença de obstáculos. A segunda heurística determina a velocidade de caminhada desejada dos pedestres e afirma que um pedestre mantém distância do primeiro obstáculo na direção de caminhada escolhida, garantindo um tempo de colisão de, no mínimo  $\tau$ , definido como tempo de relaxamento de 0,5 s.

Moussaïd *et al.* (2011) destacam que em densidades altas, as interações físicas tendem a dominar o comportamento de caminhada baseado na heurística. E, ao passo que as forças de interação na multidão se acumulam, movimentos intencionais passam a ser substituídos por movimentos não intencionais. Desta maneira, movimentos antes bem coordenados entre os

pedestres começam a se romper, de maneira particular em torno dos gargalos. Esse fato, citado como colapso pelos autores, tem como resultado padrões de movimento extremamente flutuantes e não controláveis, denominados de *turbulência de multidão*, fenômeno que revela áreas de compressão corporal consideradas graves, próximas a gargalos. A distribuição desequilibrada de pressão relacionada a esse fenômeno tem como consequência liberações repentinas de tensões e deslocamentos de massa, semelhantes a terremotos de pedestres em todas as direções possíveis.

O modelo desenvolvido por Moussaïd *et al.* (2011), portanto, considera a reação de um pedestre no ambiente visualmente percebido por ele. O que se dá de forma integrada e não reduzida a uma superposição de interação de pares. Ao invés de serem repelidos por seus vizinhos, o que foi assumido em modelos anteriores, neste tipo de abordagem, os indivíduos buscam um caminho livre dentro da multidão. Para os autores, o efeito combinado de indivíduos vizinhos fica implícito na representação visual de um pedestre, o que permite ao modelo lidar de forma correta com situações em que os pedestres estejam escondidos ou fora do campo de visão. Situações em que ocorrem altas densidades e risco de vida, portanto, podem ser avaliadas pela combinação de movimentos fundamentados em heurística, que resultam da percepção visual do ambiente e apresentam deslocamentos acidentais em razão de forças físicas originadas em colisões inevitáveis com outros corpos. Assim, o surgimento da multidão turbulenta em situações de pânico também pode ser reproduzido.

Illera *et al.* (2010), por sua vez, apontam que questões quantitativas são facilmente mensuráveis no projeto de edifícios, diferentemente das qualidades espaciais, que são difíceis de nomear e complexas para serem entendidas. Para os autores, a chave para entender alguns aspectos específicos do projeto são os fatores de qualidade da pesquisa cognitiva e os estudos comportamentais. Os autores descrevem o espaço arquitetônico em cinco dimensões, conforme a Figura 5. As três primeiras dimensões (1D, 2D e 3D) são responsáveis por construir a forma arquitetônica no espaço. A quarta dimensão é o tempo, que permite a percepção de movimentos e a quinta dimensão é aquela que descreve a interação entre as pessoas no tempo e no espaço. Segundo os autores, soluções arquitetônicas que procuram mitigar os efeitos relacionados ao pânico devem considerar as cinco referidas dimensões.



**Figura 5:** As cinco dimensões da arquitetura. Fonte: adaptado Illera *et al.* (2010).

Embora autores como Shukla (2009) afirmem que o desenho arquitetônico dos ambientes exerça grande influência nos processos de evacuação, segundo Illera *et al.* (2010), o crescente

número de incêndios e de outros tipos de catástrofes relatados em grandes eventos colocam em pauta a seguinte questão: por que as medidas preventivas relacionadas ao projeto não foram tomadas? Para Duives *et al.* (2013), avaliar a segurança de eventos que reúnem multidões de pedestres tem se revelado uma tarefa difícil. Além de diferentes layouts de ambientes, os movimentos de pedestres também se diferem em distintos eventos. Questões que confirmam, portanto, a necessidade de inclusão de novas maneiras de otimizar edifícios e locais de evento.

## 5. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES FINAIS

Diversos modelos para a simulação de fenômenos de movimento de multidões já foram analisados e discutidos em importantes publicações internacionais, tendo sido apontada a necessidade de investigação da dimensão comportamental de pedestres, especialmente no que se refere ao movimento de multidões densas. Além disso, conforme discutido em Illera *et al.* (2010), vê-se a necessidade de transpor os resultados de simulações para a linguagem de arquitetos e planejadores, pois, embora o planejamento de evacuação não seja um campo de pesquisa bem estabelecido na arquitetura, o pânico e o estresse têm origem em espaços, que são o campo de ação natural dos arquitetos.

Governado em grande parte pelo projeto arquitetônico, o fluxo de pedestres pode ser suavizado pela inserção adequada de entidades arquitetônicas, assunto bastante discutido por diversos autores mencionados neste trabalho. Por outro lado, ao discorrerem sobre a importância de pesquisas relacionadas ao comportamento humano em evacuações em pânico, autores como Frank e Dorso (2011) afirmam que um obstáculo, por si só, não garante melhores chances de sobrevivência, pois a maneira com que os pedestres escolhem evitá-lo é muito importante para o seu próprio desempenho. Nesse sentido, compreender a heurística de pedestres e o surgimento de comportamentos complexos de multidões configura um importante degrau em direção à descrição e previsão, com maior confiabilidade, dos fluxos de pedestres em situações reais (Moussaïd *et al.*, 2011).

Salienta-se aqui, que a maior parte da literatura internacional sobre a modelagem do movimento de multidões e a simulação de evacuações discute a interferência de elementos arquitetônicos e do próprio projeto de áreas de escape e rotas de evacuação no fluxo de saída de pedestres. Poucos trabalhos chegam a considerar questões comportamentais e capacidades individuais na melhoria dos processos de evacuação. Daí a importância de trazer à discussão outras perspectivas de análises, indicando que a influência do comportamento individual na modelagem de multidões não deve ser negligenciada. Ao mesmo tempo, busca-se dar espaço a discussões sobre o planejamento desse tipo de transporte não motorizado e sobre a relação entre esse campo da engenharia e a arquitetura, responsável pelo planejamento de espaços onde ocorrem os instigantes fenômenos de movimentação de multidões.

### Agradecimentos

Os autores desejam agradecer ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina [PósARQ], ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico [CNPq] e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior [CAPES].

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Campanella, M., S. Hoogendoorn e W. Daamen. (2009) Effects of Heterogeneity on Self-Organized Pedestrian Flows. *Transportation Research Record*, v.2124, n.1. p. 148–156.
- Dias, C., M. Sarvi, N. Shiwakoti, O. Ejtemai, e M. Burd. (2013) Investigating Collective Escape Behaviours in Complex Situations. *Safety Science*, v.60, p. 87-94.
- Duives, D., W. Daamen e S. Hoogendoorn. (2013) State-of-the-Art Crowd Motion Simulation Models. *Transportation Research Part C*, v.37, p. 193–209.

- Escobar R. e A. De La Rosa (2003) Architectural Design for the Survival Optimization of Panicking Fleeing Victims. *In: Banzhaf W., J. Ziegler, T. Christaller, P. Dittrich e T. Kim. (eds.) Advances in Artificial Life. Proceedings of the 7th European Conference, ECAL 2003. Lecture Notes in Computer Science, v.2801, p. 97–106. Springer, Berlin, Heidelberg.*
- Frank, G. e C. Dorso. (2011) Room Evacuation in the Presence of an Obstacle. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications (Amsterdam)*, v. 390, n.11, p. 213–2145.
- Helbing, D. e A. Johansson. (2011) Pedestrian, Crowd and Evacuation Dynamics. *In: Meyers, R. (eds.) Extreme Environmental Events. Springer, New York, NY.*
- Helbing D. e P. Molnár. (1997) Self-Organization Phenomena in Pedestrian Crowds. *In: Schweitzer, F. (eds.) Self-Organization of Complex Structures: From Individual to Collective Dynamics*, p. 569–577. Gordon and Breach, London.
- Helbing, D., I. Farkas e T. Vicsek. (2000) Simulating Dynamical Features of Escape Panic. *Nature*, v. 407, p. 487–490.
- Helbing, D., P. Molnár, I. Farkas e K. Bolay. (2001) Self-Organizing Pedestrian Movement. *Environment and Planning B*, v. 28, n. 3, p. 361–383.
- Helbing, D., I. Farkas, P. Molnár, T. Vicsek, M. Schreckenberg, e S. Sharm. (2002) Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations. *In: Pedestrian and Evacuation Dynamics*, p. 21–58. Springer, Berlin, Germany.
- Helbing, D., L. Buzna, A. Johansson e T. Werner. (2005) Self-Organized Pedestrian Crowd Dynamics: Experiments, Simulations, and Design Solutions. *Transportation Science*, v. 39, n.1, p. 1–24.
- Helbing, D., A. Johansson e H. Al-Abideen. (2007) Dynamics of crowd disasters: an empirical study. *Physical Review E*. v. 75, n.4.
- Hoogendoorn, S. e P. Bovy. (2004) Pedestrian Route-Choice and Activity Scheduling Theory and Models. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 38, p. 169–190.
- Hoogendoorn, S. e W. Daamen. (2005) Pedestrian Behavior at Bottlenecks. *Transpn. Sci.* v. 39, n. 2, p. 147–159.
- Hopkins, B., A. Churchill, S. Vogt e L. Rönnqvist. (2004) Braking Reaching Movements: Atest of the Constant Tau-Dot Strategy under Different Viewing Conditions. *J Mot Behav*, v. 36, n. 1, p. 3–12.
- Hughes, L. (2003) The Flow of Human Crowds. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 35, p. 169–182.
- Illera, C., M. Fink, H. Hinneberg, K. Kath, N. Waldau, A. Rosic e G. Wurzer. (2010) No panic. Escape and Panic in Buildings—Architectural Basic Research in the Context of Security and Safety Research. *In: Klingsch, W., C. Rogsch, A. Schadschneider, M. Schreckenberg, (eds.) Pedestrian and Evacuation, Dynamics*, p. 733–742. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Jiang, L., J. Li, C. Shen, S. Yang e Z. Han. (2014) Obstacle Optimization for Panic Flow - Reducing the Tangential Momentum Increases the Escape Speed. *PLoS ONE*, v. 9, n. 12, p. 1–15.
- Johansson, A. e D. Helbing. (2007) Pedestrian Flow Optimization with a Genetic Algorithm Based on Boolean Grids. *In: Waldau, N., P. Gattermann, H. Knoflacher, M. Schreckenberg (eds.) Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005*, p. 267–272. Springer, Heidelberg.
- Moussaïd, M., D. Helbing, e G. Theraulaz. (2011) How Simple Rules Determine Pedestrian Behavior and Crowd Disasters. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 108, n. 17, p. 6884–6888.
- Schrater, P., D. Knill, e E. Simoncelli. (2000) Mechanisms of Visual Motion Detection. *NatNeurosci*, v. 3, p. 64–68.
- Shahhoseini, Z. e M. Sarvi (2017) Collective Movements of Pedestrians: How we can Learn from Simple Experiments with Non-Human (Ant) Crowds. *PLoS ONE*, v. 12, n. 8, p. 1–20.
- Shiwakoti, N. e M. Sarvi. (2013) Enhancing the Panic Escape of Crowd Through Architectural Design. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 37, p. 260–267.
- Shukla, P. (2009) Genetically Optimized Architectural Designs for Control of Pedestrian Crowds. *In: Korb, K., M. Randall, T. Hendtlass (eds.) Artificial Life: Borrowing from Biology. ACAL (2009). Lecture Notes in Computer Science, v. 5865. Springer, Berlin, Heidelberg.*
- Yanagisawa, D., R. Nishi, Tomoeda, A., K. Ohtsuka, A. Kimura, Y. Suma, e K. Nishinari. (2010) Study on Efficiency of Evacuation with an Obstacle on Hexagonal Cell Space. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, v. 3, n. 6, p. 395–401.
- Zuriguel, I., A. Janda, A. Garcimartín, C. Lozano, R. Arévalo, e D. Maza. (2011) Silo Clogging Reduction by the Presence of an Obstacle. *Phys. Rev. Lett*, v. 107, p. 1–5.

---

Manuela Marques Lalane Nappi, Dra. (lalppi.ms@gmail.com)

Prof. João Carlos Souza, Dr. (joao.carlos@ufsc.br)

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – PósARQ, Universidade Federal de Santa Catarina  
Campus Reitor João David Ferreira Lima, s/n – Trindade, Florianópolis, SC, Brasil.