



DIPARTIMENTO DI INFORMATICA  
Corso di Laurea Magistrale in Informatica  
Esame di Sistemi Complessi: Modelli e Simulazione

# Simulazione di evacuazione in casi di emergenza

Pretell Kevin - 816725  
Pallini Vincenzo - 907303

Anno Accademico 2022 - 2023

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione . . . . .</b>	<b>2</b>
1.1	Possibili soluzioni . . . . .	2
1.2	Obiettivi del progetto . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Stato dell'arte . . . . .</b>	<b>3</b>
2.1	Approcci per la simulazione di pedoni . . . . .	3
2.2	Automi cellulari . . . . .	3
2.3	Soluzioni in letteratura sull'evacuazione . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Modello . . . . .</b>	<b>6</b>
3.1	Regole del modello . . . . .	6
3.2	Metriche e misure dell'ambiente . . . . .	9
3.3	Posizione delle uscite e dimensioni degli ostacoli . . . . .	9
3.4	Modello base . . . . .	11
3.5	Modello esteso . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Simulazione e Validazione . . . . .</b>	<b>13</b>
4.1	Test con il modello base . . . . .	14
4.2	Test con il modello esteso . . . . .	19
4.3	Analisi dei risultati ottenuti . . . . .	23
<b>5</b>	<b>Conclusioni e Sviluppi futuri . . . . .</b>	<b>26</b>
5.1	Conclusioni . . . . .	26
5.2	Sviluppi futuri . . . . .	26

# 1 Introduzione

L'evacuazione di un gruppo di persone da aree pericolose, sotto limiti fisici e temporali, è un problema importante. Se la folla non riesce a scappare da un edificio in tempo, a causa dell'incapacità di evitare gli ostacoli o di aver scelto l'uscita sbagliata, le persone possono essere ferite e/o uccise (a causa di un incendio, una bomba o un gas tossico). Pertanto, il modo di evacuare diventa praticamente importante per garantire la sicurezza delle persone.

È necessario prendere in considerazione una pianificazione adeguata per garantire la sicurezza delle persone quando si verificano comportamenti insoliti della folla. Una delle cause più frequenti di questo tipo di comportamento è l'evacuazione di emergenza. In tale situazione, un'area chiusa, con un numero relativamente ridotto di uscite fisse, deve essere evacuata per un numero elevato di persone. Tuttavia, per raggiungere tale obiettivo è necessario modellare il movimento e il comportamento della folla nel modo più accurato possibile.

## 1.1 Possibili soluzioni

- Progettazione di percorsi di evacuazione più efficienti: studiare la disposizione degli ambienti e identificare percorsi di evacuazione che riducano il tempo necessario per evacuare i viaggiatori.
- Addestramento dei viaggiatori: sviluppare programmi di formazione per i viaggiatori, al fine di migliorare la loro consapevolezza delle procedure di evacuazione e la loro capacità di reagire in modo efficace in caso di emergenza.
- Comunicazione in tempo reale: implementare sistemi di comunicazione che permettano una rapida diffusione delle informazioni tra i viaggiatori e i soccorritori, facilitando la gestione dell'emergenza e la collaborazione tra i diversi agenti coinvolti.

## 1.2 Obiettivi del progetto

Il nostro obiettivo principale è migliorare la sicurezza delle persone mediante la creazione di un ambiente di simulazione che comprenda agenti (persone), diverse uscite e la presenza di ostacoli. Attraverso questa simulazione, valuteremo e analizzeremo l'evacuazione delle persone in diverse configurazioni ambientali, prendendo in considerazione la posizione e le dimensioni delle uscite e degli ostacoli.

Sulla base dei dati raccolti durante le simulazioni, proporrremo soluzioni ottimali per la progettazione di ambienti affollati, al fine di garantire un'evacuazione efficace.

## 2 Stato dell'arte

### 2.1 Approcci per la simulazione di pedoni

Per modellare un sistema complesso come una folla di pedoni, esistono diversi approcci, ognuno con i suoi vantaggi e svantaggi. È noto che alcune caratteristiche del moto della folla emergono quando la si osserva a scala mesoscopica, ovvero non basta guardare i singoli individui né si può osservare il gruppo nella sua interezza perdendosi i dettagli.

#### **Modello Macroscopico (Fluido Continuo):**

Il primo approccio è quello macroscopico, dove la folla viene modellata come un fluido continuo, con equazioni globali che determinano la velocità e la densità nell'area analizzata. Le equazioni utilizzate sono l'equazione di conservazione della massa (garantendo che il numero di pedoni rimanga costante) e l'equazione della velocità del flusso (determinando la velocità e la direzione del flusso della folla). Questo modello ha costi computazionali inferiori per folle numerose, in quanto tratta la folla come un'unica entità anziché tenere traccia degli individui. Tuttavia, ha una limitata applicabilità, poiché assume che la folla si comporti come un fluido e potrebbe non tener conto accuratamente dei comportamenti o delle interazioni individuali.

#### **Modello Microscopico (Pedoni Individuali):**

Il secondo approccio è quello microscopico, dove ogni individuo viene rappresentato singolarmente con un approccio particle based (pedoni visti come particelle soggette a forze) oppure tramite modelli basati su automi cellulari. Ogni pedone è modellato individualmente, tenendo traccia del loro stato, posizione e decisioni. Misure aggregate, come la densità di folla o il flusso complessivo, derivano da queste decisioni individuali. Questo modello ha una maggiore applicabilità in quanto tiene conto dei comportamenti e delle interazioni individuali. Tuttavia, ha costi computazionali più elevati, specialmente per folle numerose, a causa della necessità di tenere traccia di ogni individuo.

Poiché a livello macroscopico è molto difficile far emergere alcuni fenomeni tipici delle folle (congestionamenti, mantenimento della distanza prossemica, etc...), si tende a preferire l'uso di un modello microscopico. Nonostante una maggiore complessità computazionale, si ottiene una rappresentazione migliore delle dinamiche tra pedoni - anche e soprattutto in caso di evacuazioni d'emergenza caratterizzate da panico.

### 2.2 Automi cellulari

Gli automi cellulari 2D, proposti da Von Neumann negli anni 40, rientrano nella categoria dei modelli microscopici, sono sistemi dinamici con spazio e tempo discreti. La concezione principale riguarda una griglia di celle che interagiscono localmente tra loro. Ogni cella presenta uno stato specifico che varia ad ogni passo secondo una determinata regola locale.

Questa regola può essere vista come una funzione che riceve come input lo stato della cella e dei suoi vicini nello step precedente e restituisce come output lo stato della cella centrale nel passo successivo.

Formalmente, un automa cellulare bidimensionale è rappresentato da una quadrupla  $A = (C, S, V, f)$ , in cui:

- $C = (i, j) | 0 \leq i \leq r - 1, 0 \leq j \leq s - 1$  è una griglia 2D di  $r \times s$  celle, ognuna con uno stato  $a_{ij}^{(t)}$  al tempo  $t$
- $S$  rappresenta lo spazio degli stati, cioè l'insieme dei valori che uno stato di cella può avere. Può essere finito o infinito.
- $V \subset \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$  con  $|V| = m$  è un insieme ordinato di indici, in modo tale che il vicinato per ogni cella  $(i, j)$  sia l'insieme  $V_{ij} = (i + \alpha_1, j + \beta_1), \dots, (i + \alpha_m, j + \beta_m) | (\alpha_k, \beta_k) \in V$ . Ad esempio, il vicinato di Moore può essere rappresentato dall'insieme:

$$V_m = (-1, 1), (-1, 0), (-1, -1), (0, -1), (0, 0), (0, 1), (1, -1), (1, 0), (1, 1).$$

Nei modelli specifici trattati, è conveniente suddividere il vicinato in due gruppi: il primo formato dalle celle diagonalmente adiacenti e il secondo dalle celle adiacenti ortogonalmente. L'insieme delle celle diagonalmente adiacenti è:

$$V_{diag}^M = (-1, 1), (1, 1), (1, -1), (-1, -1).$$

L'insieme delle celle adiacenti ortogonalmente è:

$$V_{adj}^M = (-1, 0), (0, 1), (1, 0), (0, -1).$$

- $f$  è la regola locale che consente di aggiornare lo stato di ciascuna cella ad ogni passo. Il nuovo stato è dato da  $a_{ij}^{(t+1)} = f(a_{i+\alpha_1, j+\beta_1}^{(t)}, \dots, a_{i+\alpha_9, j+\beta_9}^{(t)})$

**Floor field CA:** Uno degli automi più diffusi è quello basato sul concetto di *floor-field* [1], che implica l'assegnazione di un gradiente discretizzato alle celle per guidare i pedoni verso la loro destinazione desiderata. In questo modo, è possibile definire una funzione di utilità per ciascuna cella verso la quale l'agente può muoversi, tenendo conto di fattori come la coesione di gruppo, attrazioni e repulsioni, e così via.

## 2.3 Soluzioni in letteratura sull'evacuazione

La ricerca nel campo della sicurezza dei pedoni e dell'evacuazione di emergenza ha portato allo sviluppo di diversi modelli e metodi per simulare e ottimizzare le procedure di evacuazione. Alcuni studi si sono concentrati sulla modellazione del comportamento umano durante le emergenze, tenendo conto di fattori come il panico, l'altruismo e l'autoconservazione. Negli ultimi decenni molte soluzioni sono state proposte, di seguito riportiamo alcuni dei modelli più rilevanti:

- Cellular automata models:

Gli automi cellulari sono stati applicati con successo a vari sistemi complessi, come il traffico, *Nagel-Schreckenberg model* [2], e la dinamica dei pedoni [3, 4, 5]. Sono stati utilizzati per studiare l'evacuazione di una stanza [5, 6], l'interazione tra pedoni, l'attrito e l'intasamento durante l'evacuazione, e il comportamento pedonale bidirezionale. Tuttavia, i comportamenti della folla sono così complessi che questi modelli possono rappresentare solo una parte delle caratteristiche umane durante l'evacuazione.

- Lattice gas Models:

I modelli a Lattice gas, un tipo di automi cellulari popolarizzati negli anni '80 da Fredkin e Toffoli [7] e da Wolfram [8], sono utilizzati per studiare i flussi pedonali e le dinamiche della folla. Simulano il movimento dei pedoni come particelle attive su una griglia e spesso utilizzano probabilità e statistiche per analizzare le caratteristiche di una folla [3]. Questi modelli sono stati applicati per studiare i flussi pedonali in varie strutture edilizie e i processi di evacuazione. Inoltre, i modelli a Lattice gas sono stati combinati con altri approcci per indagare i processi di evacuazione, come il modello multi-grid proposto da Song et al. e il modello RCA basato su RLG [9].

- Social Force Models:

Noti come modelli *particle-based* introdotti da Helbing e Molnar in [10]. Questi modelli considerano i pedoni come particelle dotate di inerzia, soggette a forze che rappresentano sia le loro tendenze individuali, come il desiderio di muoversi in una determinata direzione, che forze esterne come il volere interagire o mantenere una certa distanza sociale con altri pedoni e con l'ambiente circostante, compresi gli ostacoli. Questi modelli sono stati ulteriormente sviluppati e combinati con altri modelli per studiare l'evacuazione della folla in diversi scenari.

- Fluid-dynamic Models:

I modelli Fluid-dynamic descrivono le folle di pedoni con proprietà simili a quelle dei fluidi, utilizzando equazioni differenziali parziali per studiare come la densità e la velocità cambiano nel tempo. Questi modelli sono stati utilizzati per comprendere la meccanica del movimento della

folla di pedoni, la scelta del percorso e gli effetti del panico sul flusso della folla [11]. I modelli fluidodinamici possono descrivere le caratteristiche tipiche del flusso pedonale e l'impatto del panico sull'evacuazione della folla.

- Agent-Based Models:

Gli ABM sono modelli computazionali che costruiscono strutture sociali "dal basso verso l'alto", simulando gli individui con agenti virtuali e creando organizzazioni emergenti basate su regole di interazione [12]. Gli ABM possono modellare esseri umani eterogenei e sono stati utilizzati per studiare l'evacuazione della folla in varie situazioni. In genere sono più costosi dal punto di vista computazionale rispetto ad altri modelli, ma consentono comportamenti unici dei pedoni.

- Experiments with animals:

Studiare l'evacuazione della folla utilizzando animali è un approccio più recente che aiuta a superare le preoccupazioni etiche e legali associate agli esperimenti sull'uomo. I ricercatori hanno studiato il panico da fuga nei topi [13] e nelle formiche [14, 15] per capire le dinamiche del panico, l'influenza dell'architettura dello spazio e il modo in cui il panico si diffonde per imitazione. I risultati sperimentali mostrano somiglianze nel comportamento collettivo tra uomini e animali in situazioni di panico [13].

### 3 Modello

In questo capitolo, presentiamo il nostro modello che si basa sugli automi cellulari bidimensionali. Introduciamo le regole che governano l'evoluzione dello stato delle celle e successivamente proporremo due scenari di simulazione. È importante sottolineare che il nostro modello è fondato sulla soluzione proposta nel documento di riferimento [16].

#### 3.1 Regole del modello

Nel modello proposto il movimento dei pedoni è basato su probabilità, il pedone in un ambiente a multiple uscite sceglie di spostarsi in direzione di una determinata uscita  $i$  in base alle probabilità calcolate sulla distanza del pedone dall'uscita  $i$  e dal numero di persone presenti all'uscita  $i$ . Gli occupanti cercano sempre di uscire dalla stanza il più velocemente possibile durante l'evacuazione.

Il modello utilizza una griglia bidimensionale per la rappresentazione della stanza, ogni cella assume i seguenti stati:  $\{occupata, non occupata\}$ , oltre ai valori fissi che alcune celle assumono ossia:  $\{muri, ostacoli, uscite\}$ . Ogni pedone occupa una sola cella ad ogni step temporale, si considera il vicinato di *moore* per l'evoluzione del suo stato allo step successivo.

Il pedone si basa sul calcolo di probabilità per spostarsi su una nuova cella e quindi avviarsi verso una determinata uscita che ritiene più plausibile. Di seguito definiamo i diversi concetti utilizzati per il calcolo delle probabilità.

- $CP$ : posizione corrente
- $SD$ : distanza dalla  $CP$  all'uscita
- $Exit Area$ : regione vicina all'uscita
- $OD$ : numero di passeggeri dentro l'exit area
- $PP$ : possibile posizione di un'uscita nel vicinato, solo se la sua  $SD$  è minore rispetto alla  $SD$  corrente. Quindi un'uscita può avere più  $PP$  dentro il vicinato.
- $P_i$ : probabilità dell'uscita  $i$  di essere selezionata

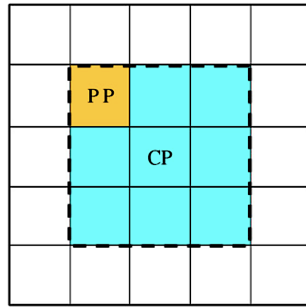


Fig. 1: Definizione di  $CP$  e  $PP$

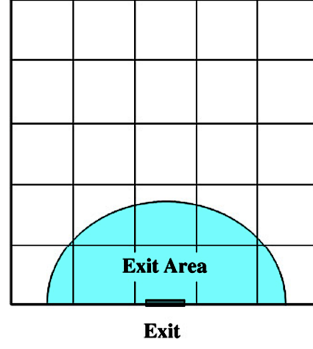


Fig. 2: Definizione di Exit Area

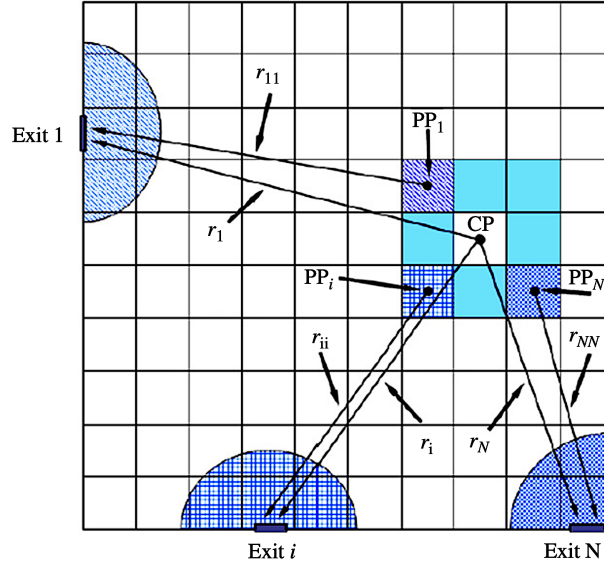


Fig. 3: Stanza con multiple uscite

Gli occupanti devono quindi scegliere un'uscita in base a regole che tengono conto della distanza spaziale e della densità di occupazione nelle vicinanze delle uscite. Il modello propone un processo in quattro passaggi per descrivere come gli occupanti aggiornano le loro *CP* (posizioni correnti):

1. Ogni occupante rimane all'interno di una cella al momento  $t$ . Tutti gli occupanti calcolano le *PP* delle uscite nel loro vicinato per se stessi.
2. Ogni occupante calcola le  $P_i$  delle uscite, seleziona l'uscita più sicura, quindi procede a spostarsi su una cella tra le *PP* dell'uscita per il tempo  $t+1$ .
3. Se una cella viene selezionata contemporaneamente da più occupanti, viene assegnata casualmente a uno di loro, mentre gli altri rimangono nelle loro *CP* fino al passo temporale successivo.
4. Tutti gli occupanti aggiornano le loro *CP* e scelgono nuove celle per il passo temporale successivo.

**Calcolo  $P_i$**  : Per determinare la probabilità  $P_i$  di selezionare l'uscita  $i$ -esima, gli occupanti considerano sia la distanza spaziale (*SD*) che la densità di occupazione (*OD*) delle uscite.

Si calcolano quindi le seguenti probabilità,  $P_{i-r}$  in base alla distanza dall'uscita  $i$  e  $P_{i-d}$  in base al numero di persone presenti all'uscita  $i$ .



$$P_{i-r} = 1 - \frac{(N-1)r_i^{k_r}}{R_{(k^r)}} \quad (1)$$

$$P_{i-d} = 1 - \frac{(N-1)d_i^{k_d}}{D_{(k^d)}} \quad (2)$$

Dove  $N$  rappresenta il numero di uscite,  $r_i$  la distanza dalla posizione corrente all'uscita  $i$ -esima,  $k_r$  è una costante per regolare l'effetto della distanza spaziale (SD),  $R_{(k^r)}$  è la somma di tutte le  $r_i^{k_r}$ .

$d_i$  è il numero di persone dentro l'exit area dell'uscita  $i$ -esima,  $K_d$  è una costante che regola la sensibilità di  $P_{i-d}$  dovuta al numero di persone nell'exit area,  $D_{(k^d)}$  è la somma di tutte le  $d_i^{k_d}$ .

La probabilità complessiva  $P_i$  di selezionare l'uscita  $i$ -esima è quindi data dalla seguente equazione, che tiene conto dell'interazione tra  $P_{i-r}$  e  $P_{i-d}$ .

$$P_i = \frac{\alpha P_{i-r} + \beta P_{i-d}}{\alpha + \beta} \quad (3)$$

$$\text{Dove: } \alpha = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| 1 - \frac{r_j N}{R_{(1)}} \right|^{k_\alpha}, \quad \beta = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| 1 - \frac{d_j N}{D_{(1)}} \right|^{k_\beta},$$

$k_a$  e  $k_b$  sono due costanti scalari che sottolineano l'importanza relativa di  $SD$  e  $OD$ ,  $R_{(1)}$  e  $D_{(1)}$  invece sono definiti rispettivamente in (1) e (2).

Calcolate le probabilità per tutte le uscite e scelta l'uscita, non resta che scegliere la cella verso cui il pedone si sposta. Il modello determina la *Lucky PP* (LPP) per ogni uscita, ovvero la cella che ha la maggiore probabilità di essere occupata dall'occupante nel passo temporale successivo. Se un'uscita ha più di una PP, denotando con  $M$  il numero di PP di ogni uscita si assume che la probabilità  $P_u$  di ciascuna PP di diventare una LPP sia uguale, come indicato dall'equazione:

$$P_u = \frac{1}{M}$$

È noto che il comportamento umano è molto complesso. Tuttavia, i ricercatori hanno scoperto alcune caratteristiche del comportamento umano durante gli incendi, come ad esempio:

**Unadventurous effect:** La maggior parte delle persone proverà ad uscire attraverso lo stesso percorso da dove sono entrate in un edificio, questo perché generalmente le persone non vogliono utilizzare una nuova uscita che non conoscono o con cui non hanno esperienza. Per tener conto di questo effetto per il pedone interessato, il metodo più semplice è allargare contemporaneamente la probabilità dell'uscita  $i$ -esima e ridurre la probabilità delle altre uscite. La  $P_i$  dell'uscita  $i$ -esima nel modello diventerà quindi  $P_{ie}$  semplicemente moltiplicando  $P_i$  per un fattore  $k_e$ :

$$P_{ie} = k_e P_i \quad (4)$$

dove  $k_e$  è uguale o maggiore di 1.

Di conseguenza, tutte le altre uscite  $j$  avranno probabilità più bassa a causa dell'aumento di  $P_i$ . Denotando la differenza  $\Delta P_i = P_e - P_i$ , la nuova probabilità  $P_{je}$  delle uscite  $j$ -esime è così calcolata:

$$P_{je} = P_j - \frac{P_j}{1 - P_i} \Delta P_i \quad (5)$$

**Inertial effect:** Le persone sono creature inerziali, ossia non amano interrompere ciò che stanno facendo. Una volta che si muovono verso una certa uscita, di solito continuano a dirigersi nella stessa direzione.

Simile all'*Unadventurous effect*, l'effetto inerziale può essere modellato modificando la  $P_i$  nel dominio del tempo. Supponendo che un pedone si sposti verso l'uscita  $i$  all'istante  $t$ , a causa dell'effetto

inerziale, è molto probabile che l'occupante selezionerà di nuovo l'uscita  $i$  al successivo passo temporale  $t+1$  perché gli occupanti non vogliono cambiare la direzione in cui si stanno dirigendo. In questo caso, la probabilità  $P_i$  dell'uscita  $i$  ottenuta a  $t+1$  può essere ingrandita usando lo stesso metodo applicato all'*Unadventurous effect*, viene introdotta quindi la costante *inertial* che verrà moltiplicata a  $P_i$ .

**Field of view:** Un'altro aspetto importante per quanto riguarda il movimento delle persone durante l'evacuazione è il comportamento di fronte ad un ostacolo. L'occupante deve considerare lo spazio occupato da ostacoli statici che sorgono quando si cammina, cioè, gli agenti possono evitare le collisioni in modo indipendente. Dagli studi sulla percezione visiva umana sappiamo che entrano quindi in gioco i parametri di *distanza* e di *raggio* del campo visivo umano.

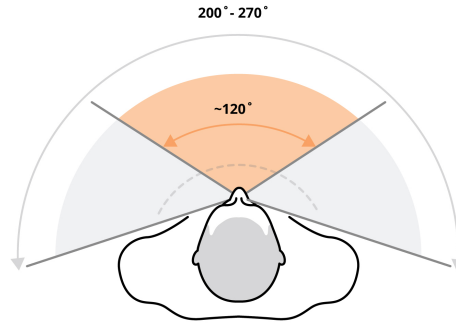


Fig. 4: Campo di vista umano

Quando l'occupante percepisce che la distanza tra se stesso e altri oggetti è inferiore alla distanza dall'uscita viene adottato un comportamento per evitare le collisioni. Sappiamo che gli ostacoli occupano delle celle nell'ambiente, quindi quando verrà percepita la presenza di un'ostacolo da parte dell'agente nella sua traiettoria verso l'uscita si andrà a scegliere la PP con una field of view che contenga meno densità di celle occupate dall'ostacolo in questo modo il pedone sorpasserà a destra o sinistra l'ostacolo.

### 3.2 Metriche e misure dell'ambiente

L'area di modellazione è una stanza rettangolare di dimensioni  $20 \times 16$  metri, di seguito verranno proposti 2 scenari uno con un'uscita e uno con due uscite. Nella simulazione, l'area viene suddivisa in  $50 \times 40$  celle quadrate. In questo modello, la dimensione della cella è impostata a  $0,4 \times 0,4$  metri, che corrisponde allo spazio tipico occupato da un individuo in un'area affollata. Pertanto, lo spostamento medio di un occupante all'interno di ogni intervallo di tempo è di 0,48 metri (movimento parallelo di 0,4 metri o movimento diagonale di  $0,4\sqrt{2}$  metri). Di conseguenza, ogni intervallo di tempo in questo modello è pari a 0,29 secondi, poiché la velocità media di movimento degli occupanti in uno stato di nervosismo è di 1,65 metri al secondo.

### 3.3 Posizione delle uscite e dimensioni degli ostacoli

Da quanto appreso nei lavori di [17], la posizione ottimale dell'uscita si ritiene sia a 0,5 m di distanza dal muro laterale. Per gli scenari con un'uscita larga 1,2 m e 1,6 m, la posizione dell'uscita presenta una forte incertezza in termini di TET (Tempo Totale di Evacuazione). Il TET medio diminuisce leggermente quando l'uscita si sposta dal centro del muro anteriore al muro laterale. La presenza di un ostacolo di fronte all'uscita può portare a un TET più breve, rendendo l'evacuazione più efficiente. viene esplorato l'effetto della lunghezza delle barriere (L) e della distanza dal muro anteriore (D),

trovando che una maggiore lunghezza delle barriere riduce significativamente il TET. Per gli ostacoli a doppia colonna, una distanza di intervallo di 1,0 m mostra un tasso di scarico superiore rispetto agli scenari con una distanza di intervallo di 2,0 m.

Gli studi condotti hanno evidenziato come l'incremento del deflusso sia influenzato dalle dimensioni e dalla posizione dell'ostacolo. Per esempio, è stato osservato che un'architettura che include un'uscita angolare con un ostacolo, una colonna di 60 cm di diametro, posizionata a 100 cm da tale uscita, ha portato a un miglioramento del deflusso del 32,7%. Queste dimensioni e posizione sono state scelte perché hanno dimostrato di essere efficaci nell'aumentare il deflusso.

D'altro canto, un esperimento con una colonna dello stesso diametro (60 cm), ma posizionata a una distanza minore dall'uscita centrale (60 cm), ha mostrato un'inefficienza del 10,6% nel deflusso. Questo suggerisce che la distanza dell'ostacolo dall'uscita può avere un impatto significativo sull'efficienza del deflusso. [18]

### 3.4 Modello base

Per il modello base si è preso in considerazione una sola uscita e l'eventuale presenza di ostacoli, come si può osservare nella figura 5. Si è deciso dunque di provare 2 configurazioni diverse per la posizione dell'uscita, al centro e all'angolo, in quanto da quanto appreso in letteratura [18] [17] questo fattore ha un'effetto importante riguardo i tempi di evacuazione.

Le uscite sono larghe 1.6 m, gli ostacoli invece corrispondono a delle colonne di dimensione 0.8 m x 0.8 m e distano 1.2 m dalle uscite. L'*Exit Area* ossia la regione attorno all'uscita ha dimensioni 2.4 x 2 metri.

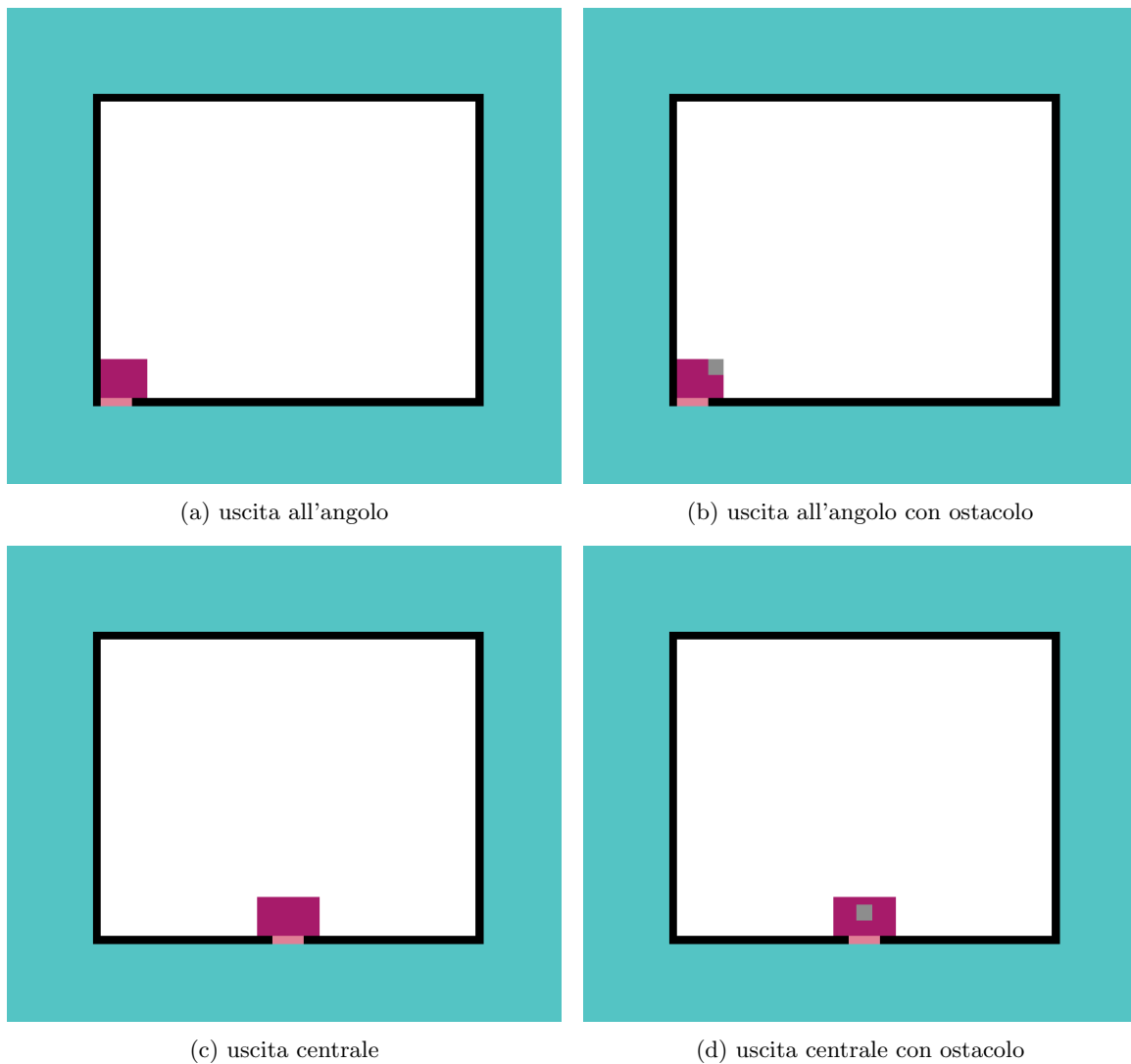


Fig. 5: 4 diversi scenari del modello base

### 3.5 Modello esteso

Consideriamo ora il modello esteso, si è deciso di aggiungere un'altra uscita e prendere in considerazione la presenza di ostacoli. Si è deciso di replicare le 2 configurazioni diverse per la posizione delle uscite come nel modello base, la prima con le posizioni centrali, nella seconda invece le uscite sono distanti 1.2 m dagli angoli, questo perchè dallo studio in [18] è emerso che c'è un aumento dell'efficienza nel flusso durante l'evacuazione. Le uscite sono larghe 2 m, gli ostacoli invece corrispondono a delle colonne di dimensione 1.2 m x 1.2 m e distano 1.2 m dalle uscite. L'*Exit Area* ha dimensioni 3.6 x 2 metri.

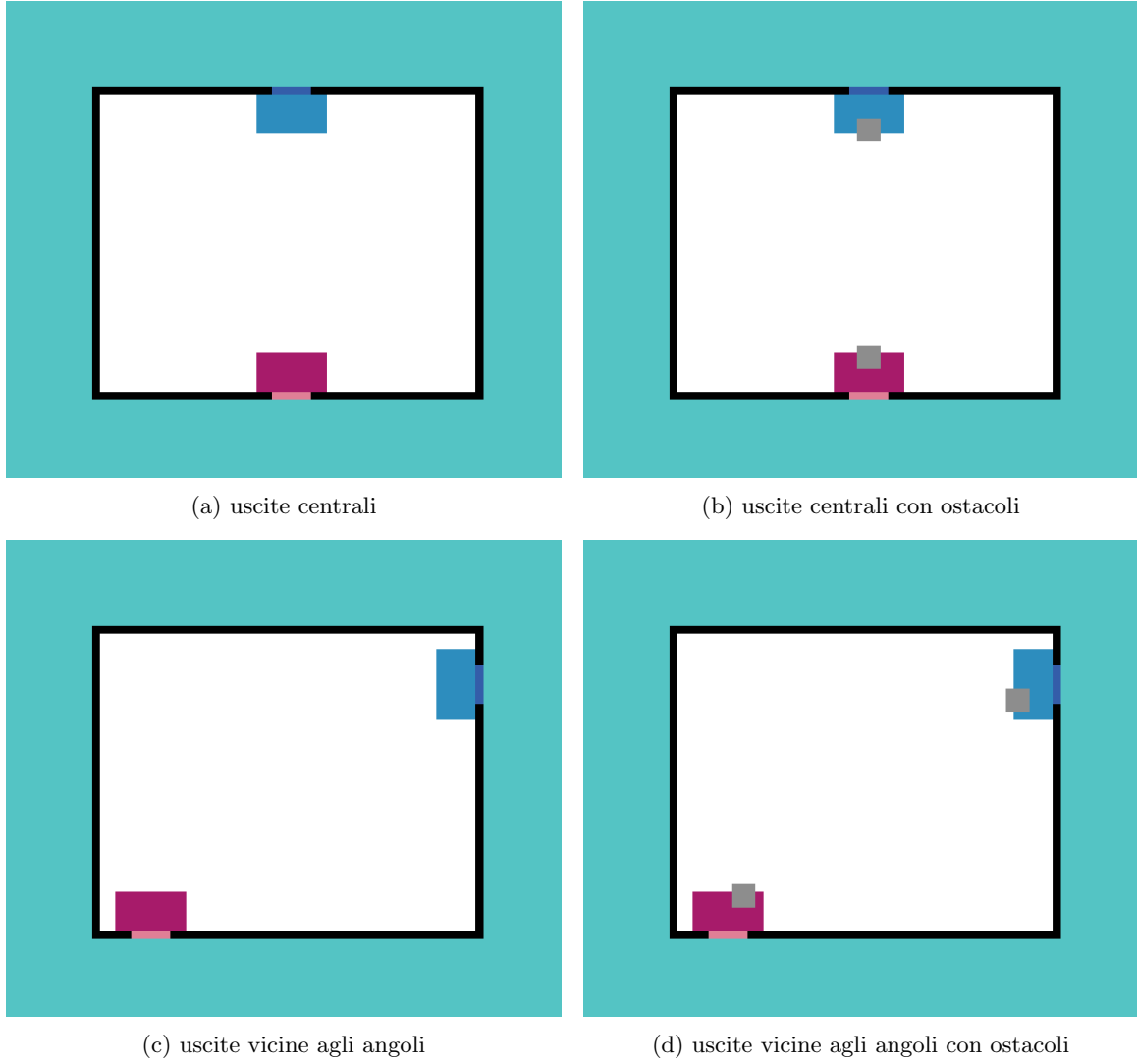


Fig. 6: 4 diversi scenari del modello esteso

## 4 Simulazione e Validazione

Per la simulazione si è scelto di posizionare 250 persone dentro la stanza dalle dimensioni di  $20 \times 16$  metri, si faranno 10 esecuzioni per ogni scenario.

Si partirà con una prima fase di simulazione dell'evacuazione col modello base a un'uscita col fine di verificare quanto detto in [17] [18], ossia se la posizione dell'uscita sia effettivamente importante e se la presenza di un ostacolo davanti all'uscita aiuti affinché l'evacuazione avvenga nel minor tempo possibile.

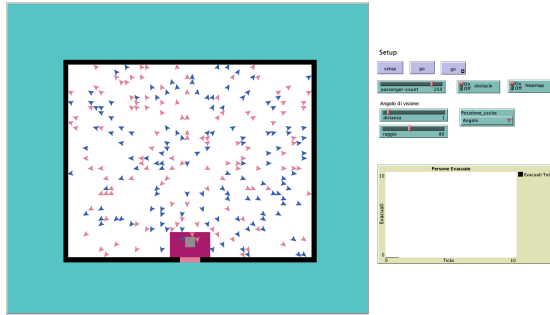
Poi si eseguirà una seconda fase di simulazione col modello esteso a 2 uscite, verificheremo quindi quanto detto in [16], in aggiunta con la presenza degli ostacoli verificheremo se i tempi di evacuazione diminuiscono.

Per l'implementazione del modello, è stato utilizzato il software NetLogo, una piattaforma ampiamente utilizzata per la simulazione di sistemi complessi. Grazie alle sue caratteristiche e alla sua flessibilità, NetLogo ha consentito di creare e eseguire le simulazioni in modo efficace.

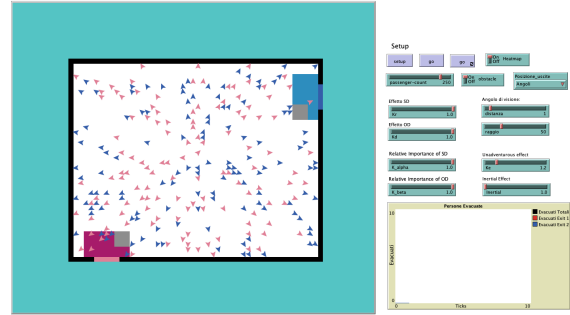
A fine esecuzione verrà mostrata un'heatmap, questa viene calcolata contando il numero di occupanti per ogni cella ad ogni iterazione della simulazione, in questo modo il nostro modello tiene traccia di quante persone hanno attraversato una determinata cella a fine esecuzione.

A simulazione finita andiamo quindi ad assegnare alla nostra griglia un gradiente di colore rosso in base al numero di occupanti delle celle, in questo modo è facile visualizzare la densità, la direzione e il flusso della folla. Sebbene si abbiano dei riferimenti riguardo alla posizione e dimensione ideale degli ostacoli, l'heatmap ci è d'aiuto per capire dove e come è meglio posizionare gli ostacoli nel nostro modello. Infatti sapendo i limiti della modellazione del comportamento umano è necessario tenere in considerazione che il miglioramento nell'evacuazione dato dalla posizione degli ostacoli può essere diverso dagli esperimenti fatti con persone vere.

Passando ai risultati dei test di simulazione, presentiamo di seguito i risultati ottenuti per entrambi i modelli. Questi risultati forniscono una panoramica delle performance del sistema e delle dinamiche osservate durante le simulazioni.



(a) Interfaccia modello base



(b) Interfaccia modello esteso

## 4.1 Test con il modello base

Essendo l'ambiente ad un'unica uscita i parametri  $k_r$ ,  $k_d$ ,  $k_\alpha$ ,  $k_\beta$ ,  $k_e$ ,  $Inertial$  non vengono presi in considerazione dato che i pedoni si dirigono verso l'unica uscita presente. Si sono scelti i seguenti valori per i parametri del campo visivo nello scenario con la presenza di ostacoli:

- *Distanza*: 3
- *Raggio*: 90

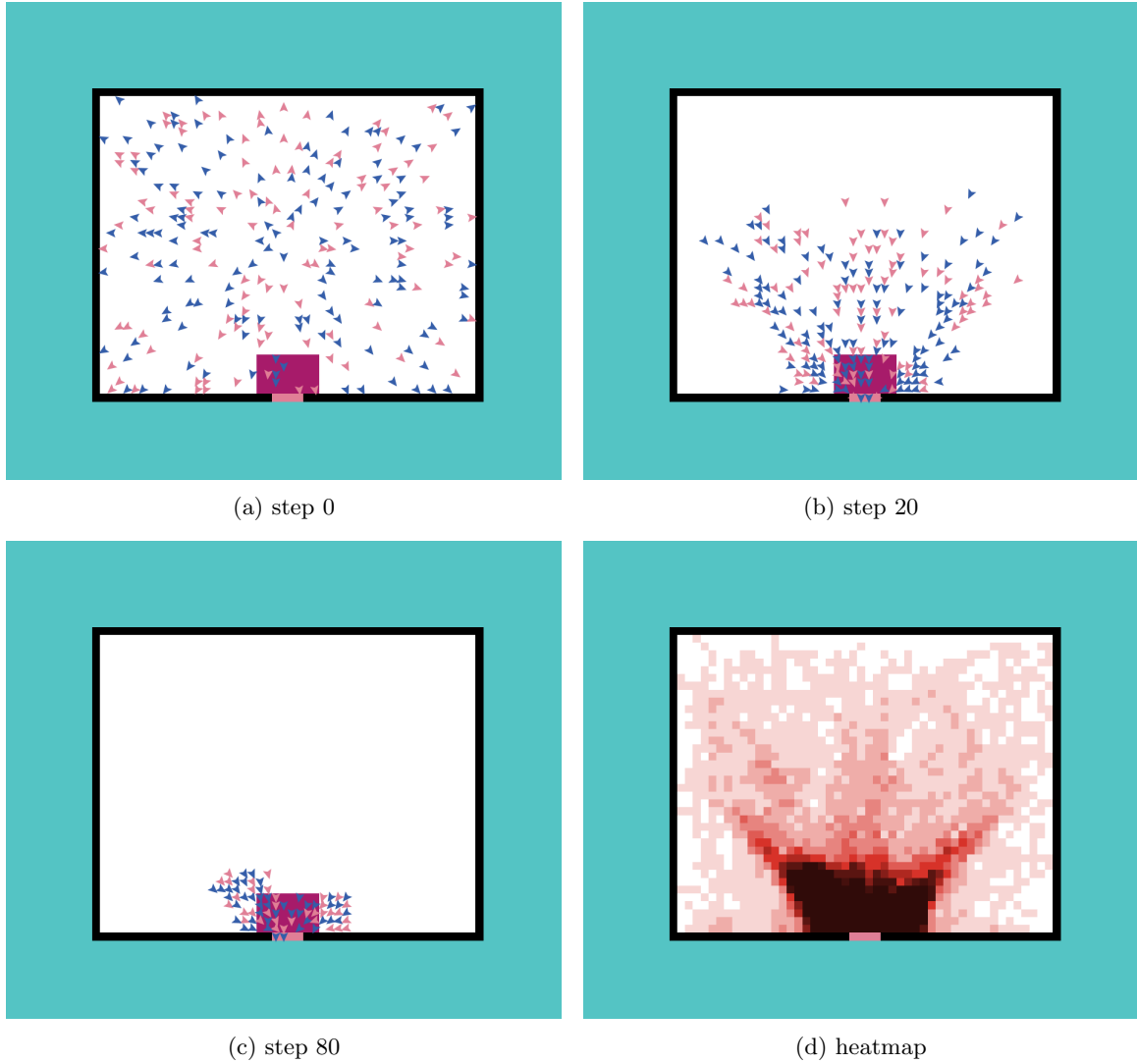


Fig. 8: Caso di test modello base, uscita centrale

Tabella 1: Tempi di esecuzione

Sequenza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Steps	123	128	125	139	127	128	132	124	118	124
Media	126,8									
Media(sec)	36,772									

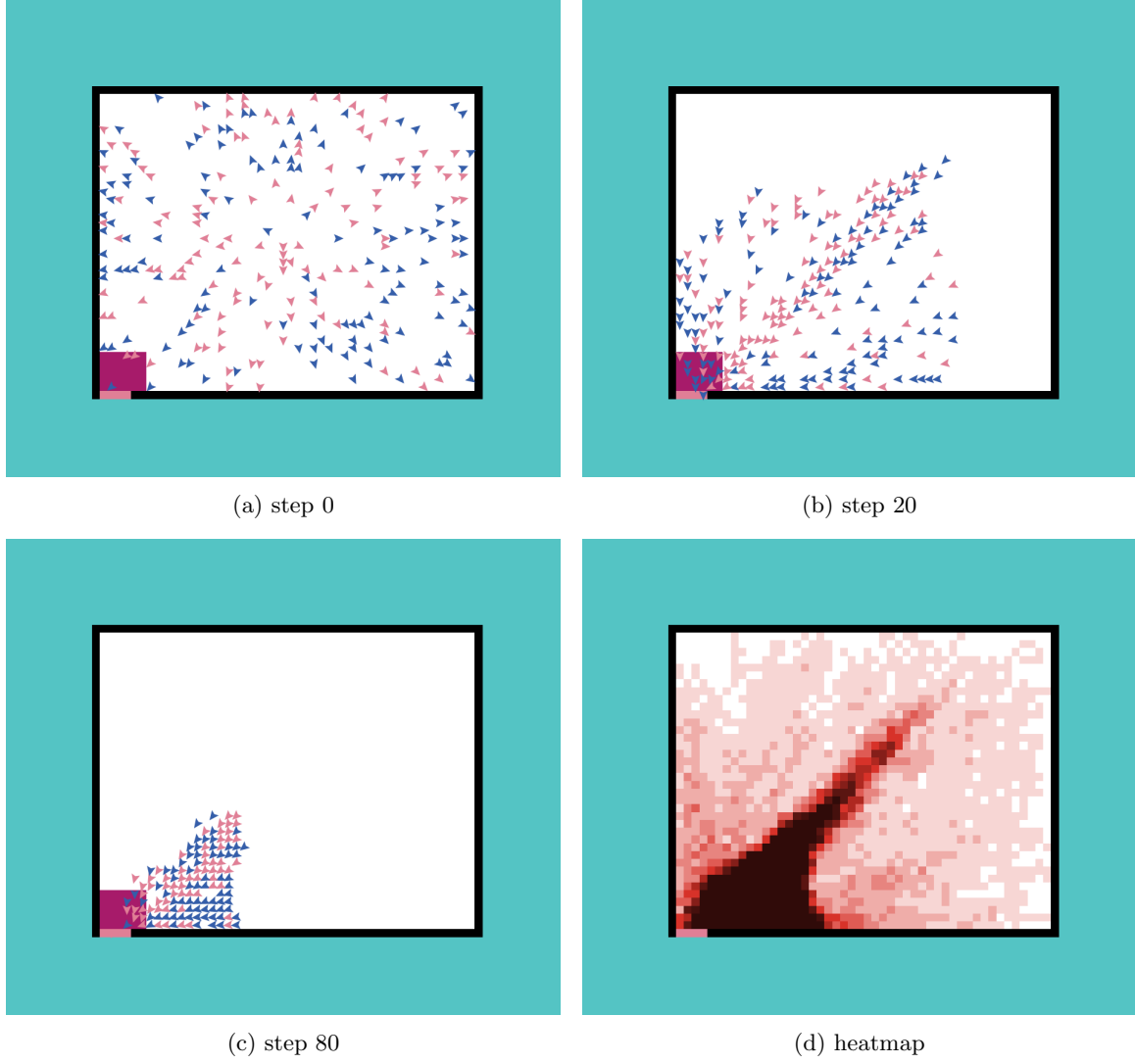


Fig. 9: Caso di test modello base, uscita all'angolo

Tabella 2: Tempi di esecuzione

Sequenza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Steps	217	202	225	217	204	216	227	216	213	219
Media	215,6									
Media(sec)	62,524									



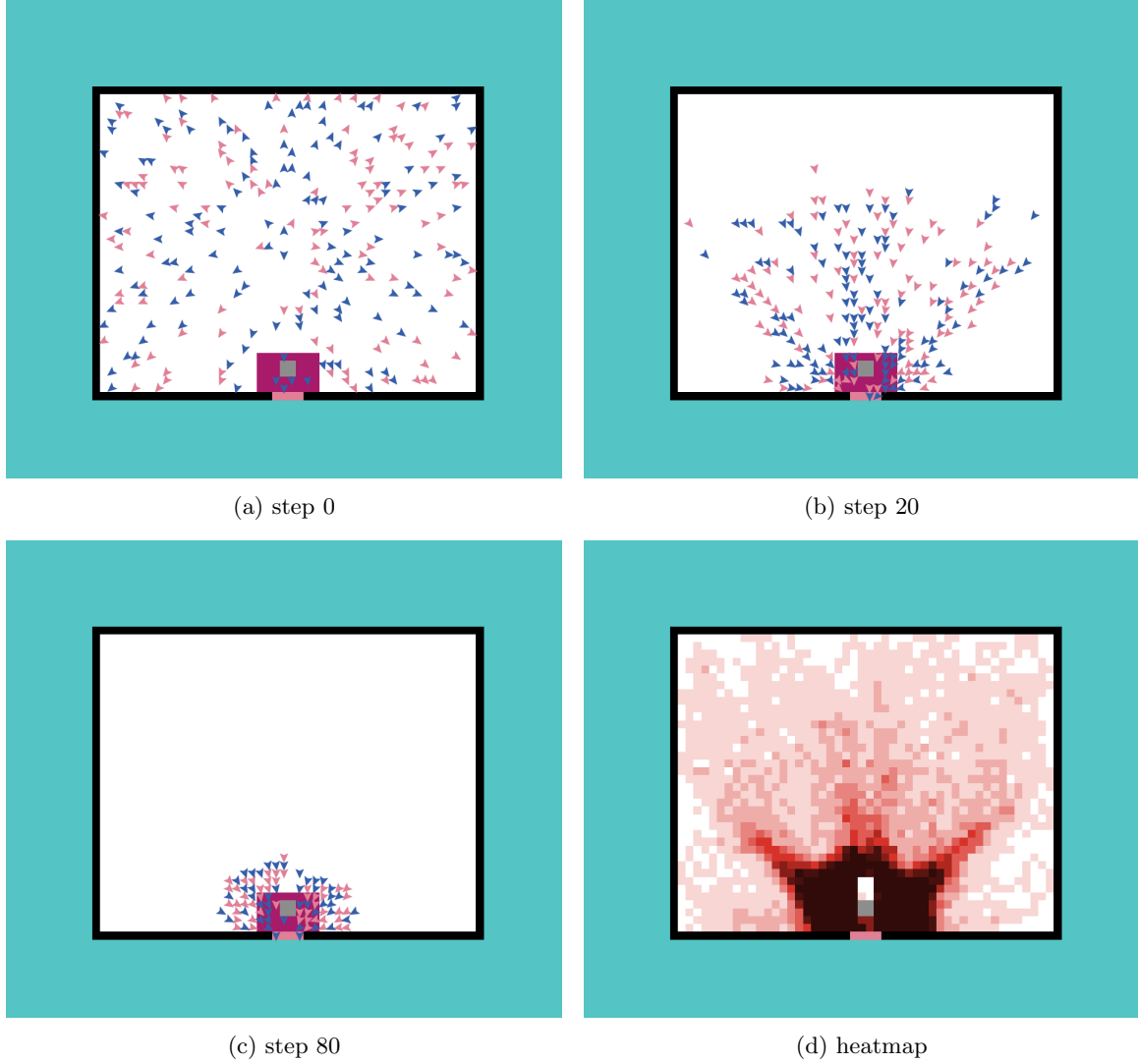


Fig. 10: Caso di test modello base, uscita centrale con ostacolo

Tabella 3: Tempi di esecuzione

Sequenza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Steps	146	148	154	156	154	148	151	156	151	159
Media	152,3									
Media(sec)	44,167									

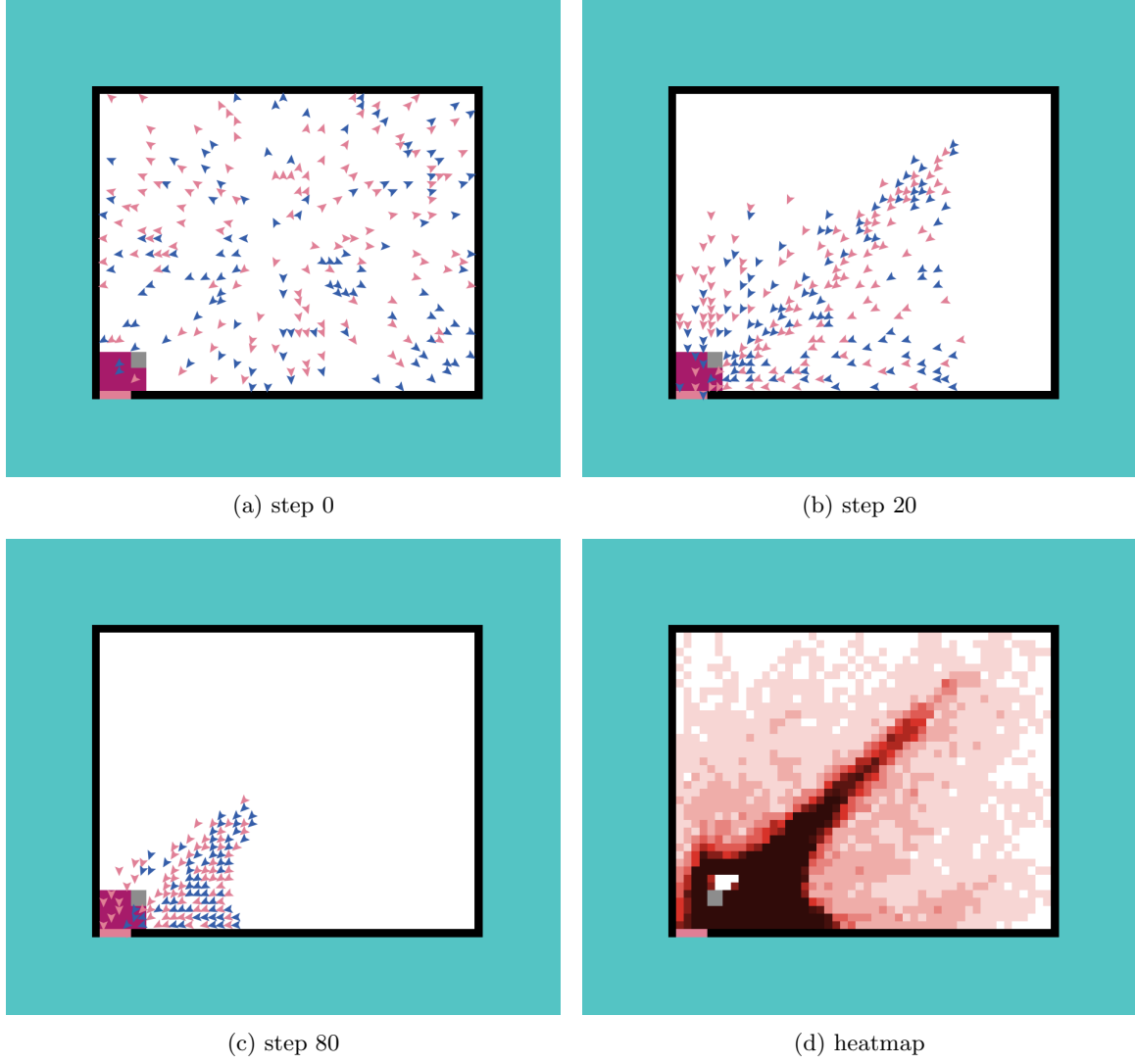


Fig. 11: Caso di test modello base, uscita all'angolo con ostacolo

Tabella 4: Tempi di esecuzione

Sequenza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Steps	199	202	192	202	201	201	192	186	189	192
Media	195,6									
Media(sec)	56,724									

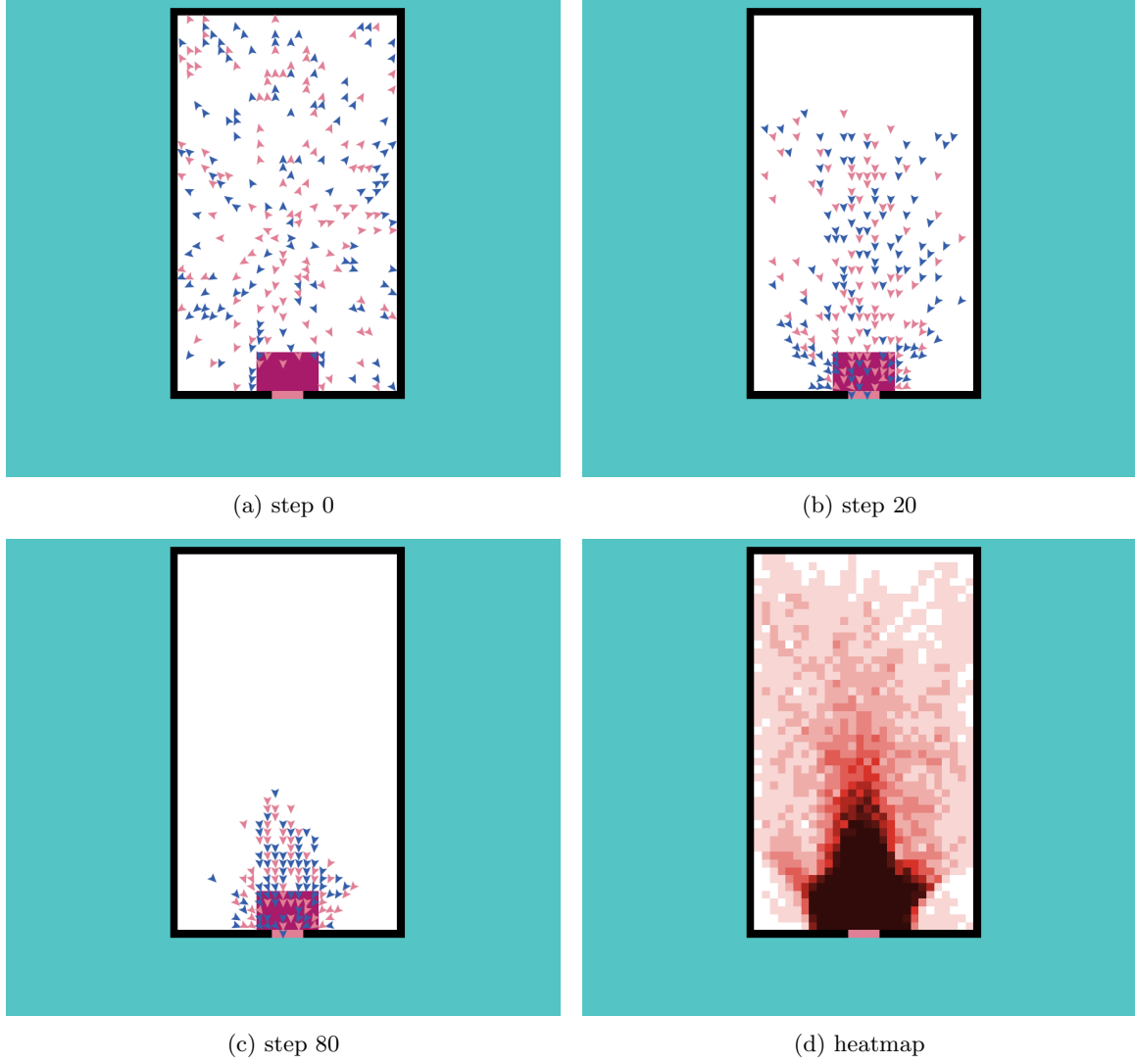


Fig. 12: Caso di test modello base, stanza rettangolare

Tabella 5: Tempi di esecuzione

Sequenza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Steps	120	120	123	119	116	119	122	119	117	120
Media	119,5									
Media(sec)	34,655									

## 4.2 Test con il modello esteso

Si sono scelti i seguenti valori per i parametri del modello esteso  $k_r:1$ ,  $k_d:1$ ,  $k_\alpha:1$ ,  $k_\beta:1$ ,  $k_e:1.2$ ,  $Inertial:1$ ,  $Distanza:1$ ,  $Raggio:60$ .

Si è scelto di settare al 50% i pedoni entrati dall'uscita 1 e l'altro 50% entrati dall'uscita 2. Con il parametro  $k_e$  settato a 1.2 si vuole ottenere un leggero *Unadventurous effect*.

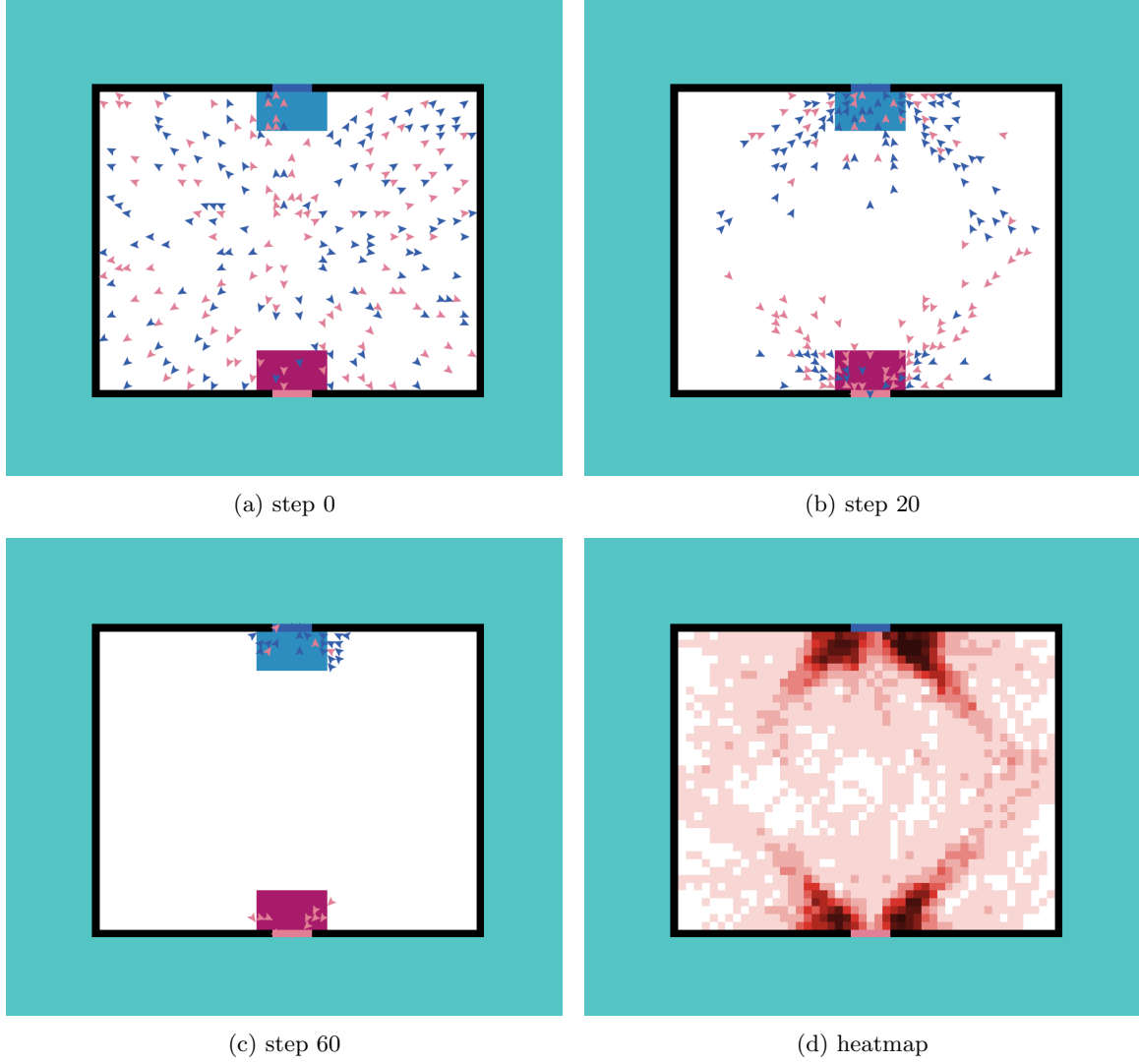


Fig. 13: Test modello esteso, uscite centrali senza ostacoli

Tabella 6: Tempi di esecuzione

Sequenza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Steps	78	74	81	85	76	74	79	74	79	71
Media	77,1									
Media(sec)	22,359									

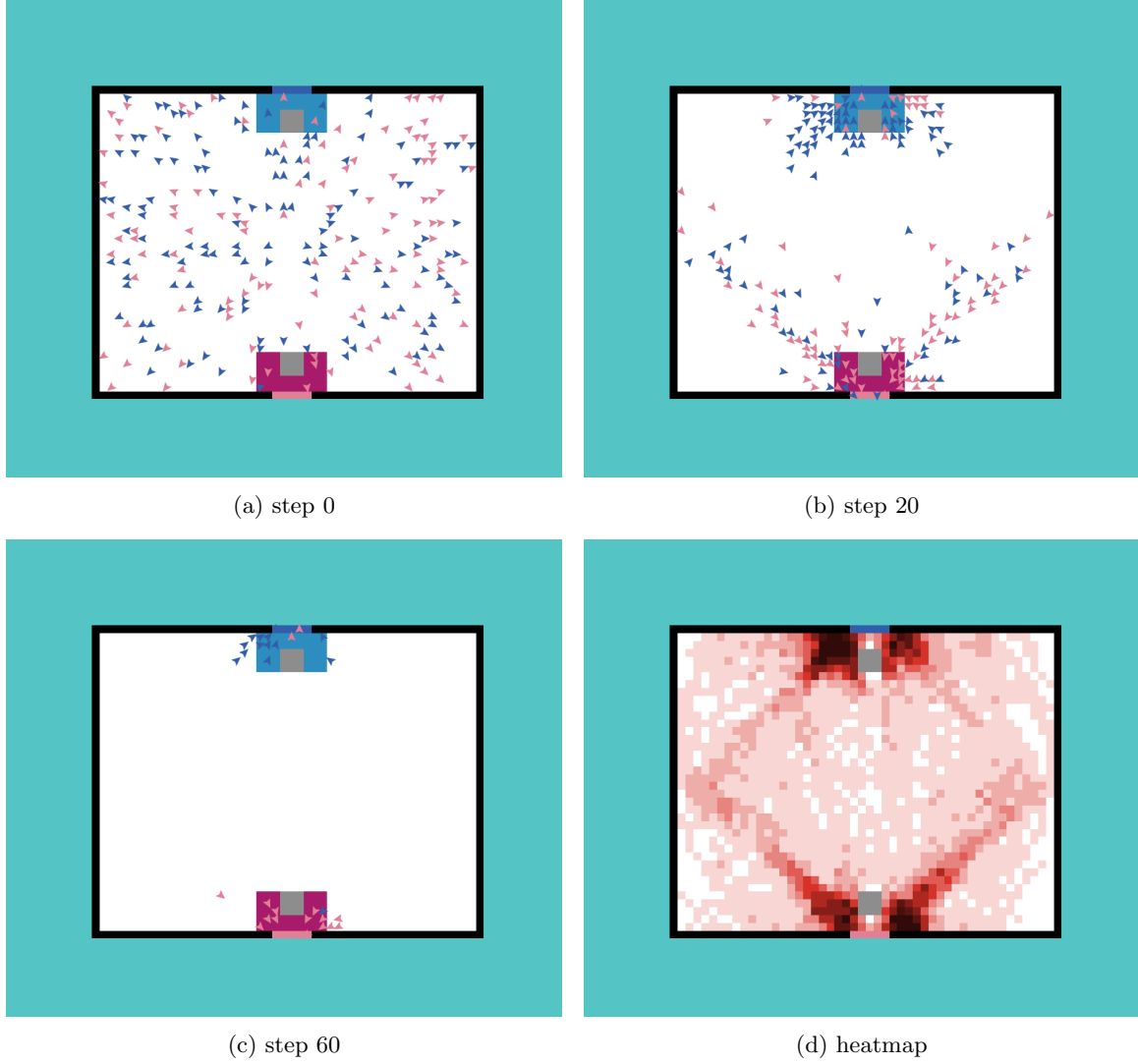


Fig. 14: Test modello esteso, uscite centrali con ostacoli

Tabella 7: Tempi di esecuzione

Sequenza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Steps	82	106	88	105	81	91	110	117	107	104
Media	99,1									
Media(sec)	28,739									

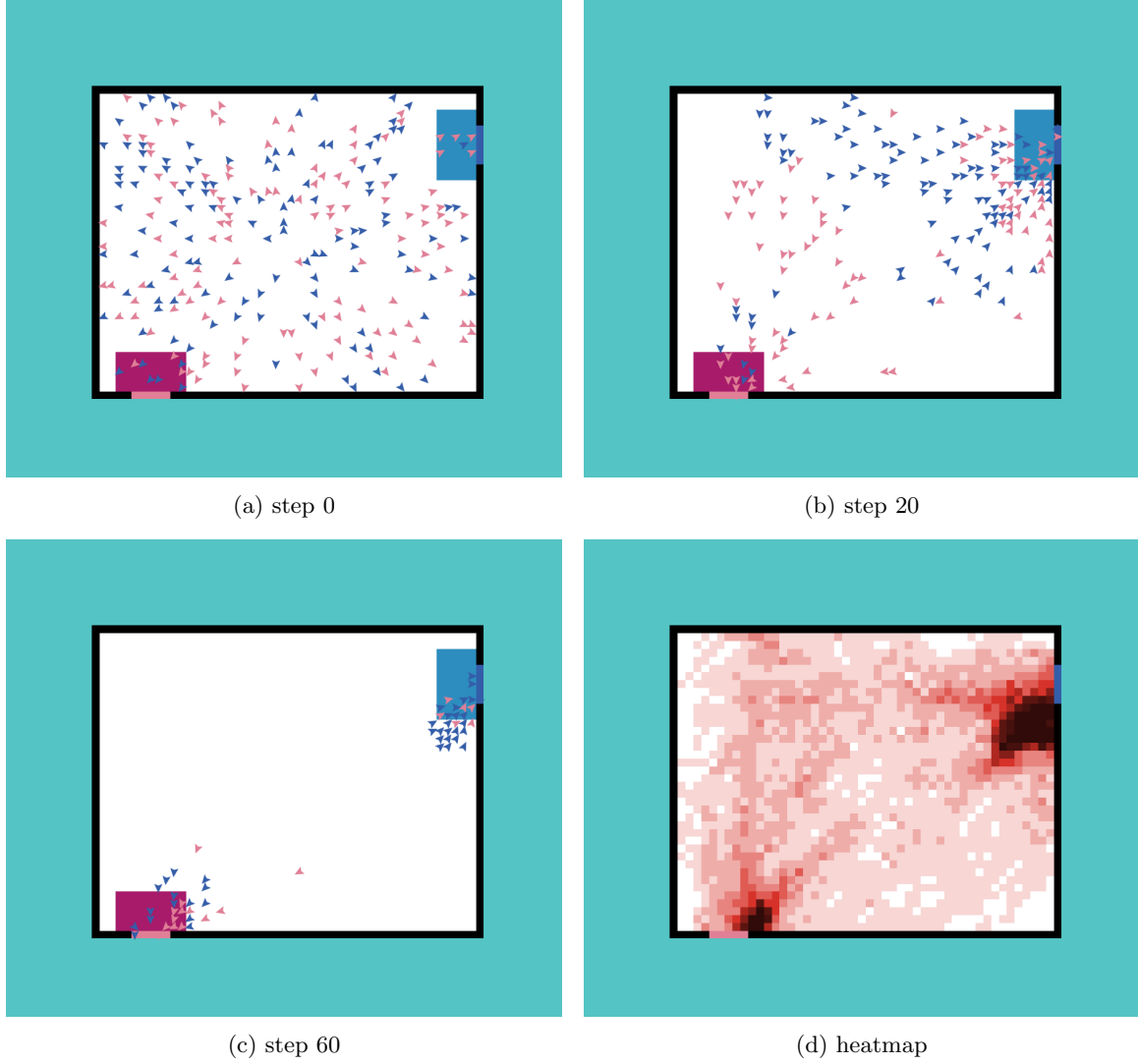


Fig. 15: Test modello esteso, uscite sugli angoli senza ostacoli

Tabella 8: Tempi di esecuzione

Sequenza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Steps	87	86	84	102	102	94	105	99	107	97
Media	96,3									
Media(sec)	27,927									

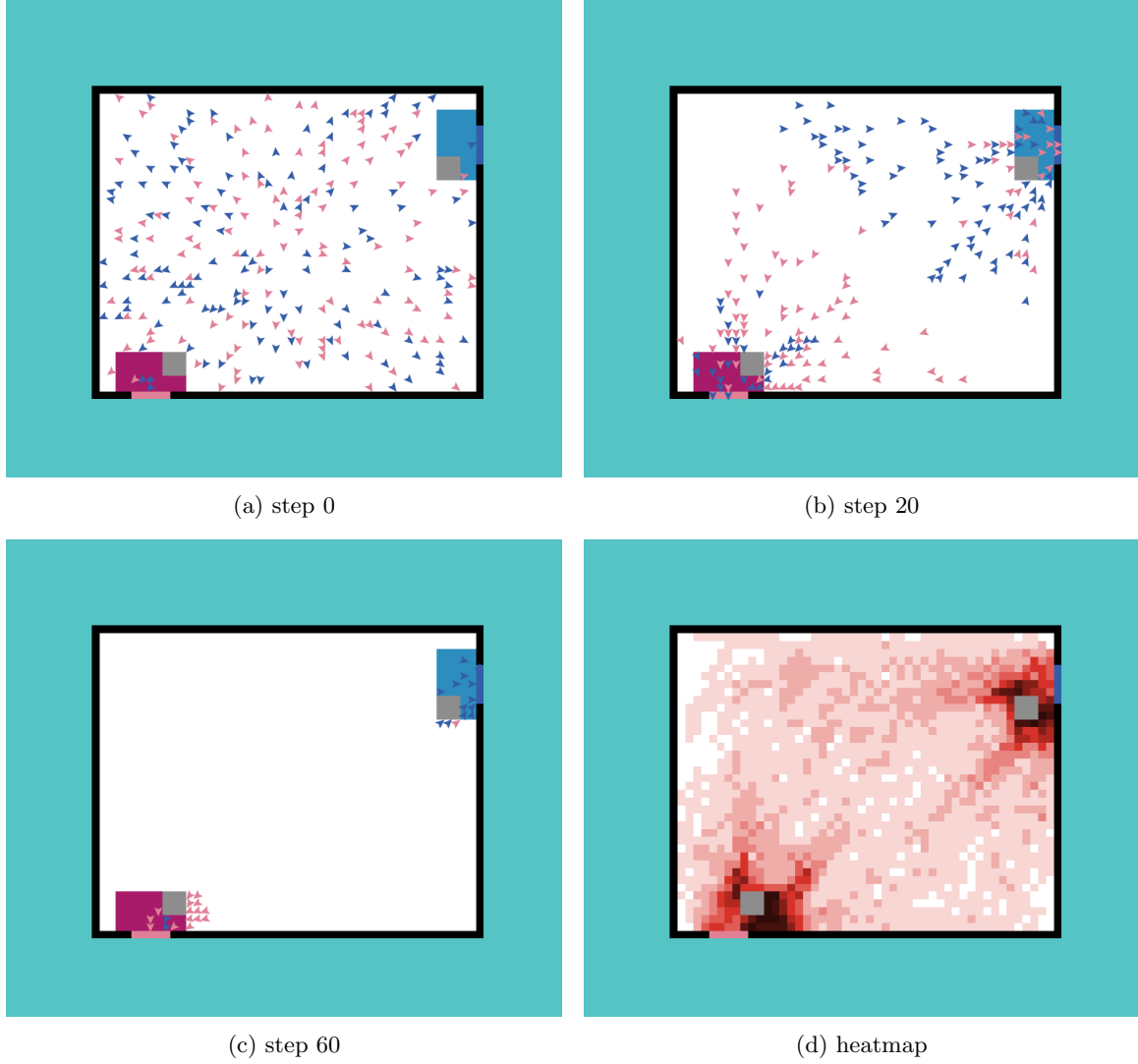


Fig. 16: Test modello esteso, uscite sugli angoli con ostacoli

Tabella 9: Tempi di esecuzione

Sequenza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Steps	78	71	82	82	77	70	78	83	71	82
Media	77,4									
Media(sec)	22,446									

### 4.3 Analisi dei risultati ottenuti

Come si può vedere dalla figura 17 i tempi ottenuti dalle simulazioni in assenza di ostacoli per il modello base corrispondono con quanto affermato da [17] [18] per quanto riguarda la posizione dell'uscita. Dalla figura 18 invece possiamo notare come la presenza dell'ostacolo abbia diminuito l'effetto bottleneck solo nel caso in cui l'uscita si trovi all'angolo, anche in questo caso viene confermato quanto detto in [17] [18]. La presenza degli ostacoli di fronte alle uscite ha avuto un'effetto negativo aumentando il tempo di evacuazione di circa il 20%

Si è scelto poi di condurre delle simulazioni utilizzando una diversa configurazione della stanza, nello specifico una stanza rettangolare con dimensioni di 12 x 20 metri con l'uscita posizionata al centro, figura 12.

Dall'analisi della heatmap è evidente che il flusso di evacuazione non varia significativamente rispetto alla prima tipologia di stanza con uscita centrale. Non si riscontrano cambiamenti sostanziali. Inoltre, rispetto alla configurazione principale della stanza, si è notato un calo dei tempi di evacuazione. Tuttavia, dalle nostre simulazioni è emerso che l'aggiunta di eventuali ostacoli di fronte all'entrata non ha apportato miglioramenti significativi in termini di velocità di evacuazione.

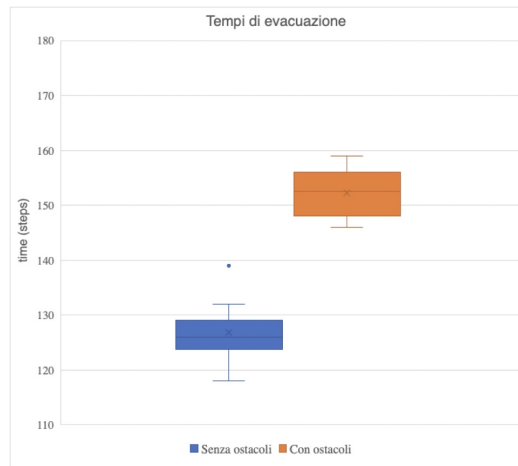


Fig. 17: Tempi di evacuazione con le uscite centrali

Nello scenario con le uscite posizionate in vicinanza agli angoli si può notare l'impatto positivo che hanno avuto gli ostacoli, infatti come si vede dalla figura 18, si può notare come i tempi di evacuazione siano diminuiti di circa il 10%.

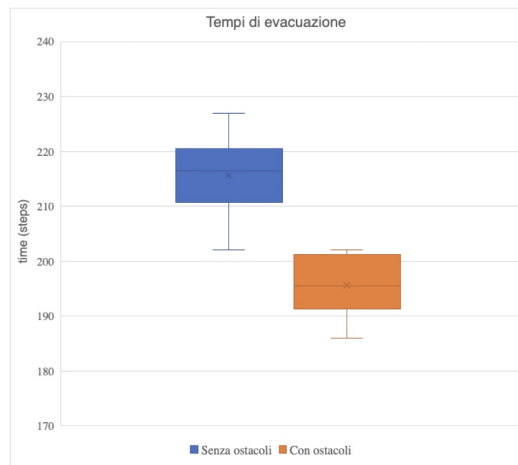


Fig. 18: Tempi di evacuazione con le uscite vicine agli angoli



Inoltre dalla heatmap della figura 9, modello base con l'uscita all'angolo, si è osservato un flusso anomalo durante l'evacuazione. Si è notato che la folla tende ad accodarsi in diagonale e sembra essere schiacciata nella zona a destra dell'uscita lasciando lo spazio nella parte centrale sinistra inutilizzato dagli occupanti.

Questo effetto è congruente con i limiti del nostro modello, il fatto che tutti i passeggeri abbiano lo stesso comportamento e quindi si muovano alla stessa velocità crea il flusso anomalo in quella regione. Una possibile soluzione sarebbe quella di estendere ulteriormente il modello tenendo in considerazione altri comportamenti umani, sappiamo infatti che persone diverse hanno velocità diverse e obiettivi diversi durante l'evacuazione. Ad esempio nella situazione da noi evidenziata, è probabile che le persone nella realtà cerchino di superare la coda che si forma, aumentando la loro velocità e, di conseguenza, spostandosi con una distanza maggiore rispetto a quella predefinita nel nostro modello per raggiungere il prima possibile l'uscita. Integrando tali considerazioni nel nostro modello, potremmo ottenere risultati più realistici e mitigare il problema dell'affollamento nella zona specifica dell'uscita.

In conclusione per il modello base, le analisi mostrano che la posizione delle uscite e la presenza di ostacoli sono fondamentali per un'evacuazione. I tempi di evacuazione corrispondono a quanto previsto da [17] [18]. Quando l'uscita è posizionata centralmente, i tempi sono più brevi. Tuttavia, la presenza di ostacoli ha un impatto significativo, aumentando i tempi di evacuazione del 20%. Al contrario, quando l'uscita è posizionata vicino agli angoli, la presenza di ostacoli sembra avere un effetto positivo, riducendo i tempi di evacuazione del 10%. Questo suggerisce che la disposizione degli ostacoli può influenzare il flusso di persone e potenzialmente ridurre l'effetto bottleneck.

Per quanto riguarda il modello esteso le simulazioni sullo scenario con le uscite centrali hanno avuto un'esito compatibile con quanto detto in [17] [18], infatti come si può vedere dalla figura 19 la presenza degli ostacoli di fronte alle uscite ha avuto un'effetto negativo aumentando il tempo di evacuazione di circa il 28%.

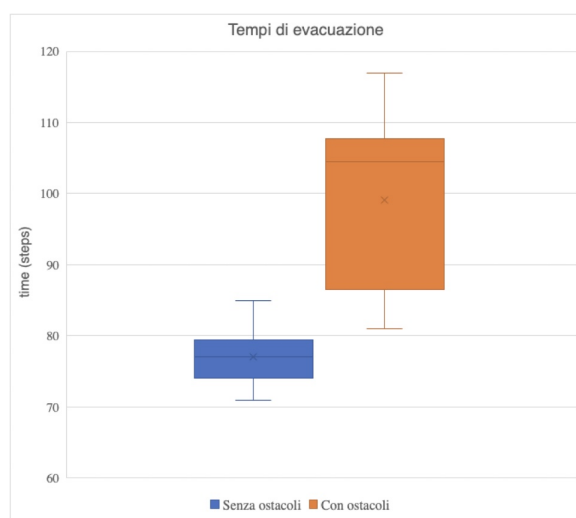


Fig. 19: Tempi di evacuazione con le uscite centrali

Passando allo scenario dove le uscite sono posizionate in vicinanza agli angoli si può notare l'evidente l'impatto positivo che hanno avuto gli ostacoli, infatti come si vede dalla figura 20, si può notare come i tempi di evacuazione siano diminuiti di circa il 20%.

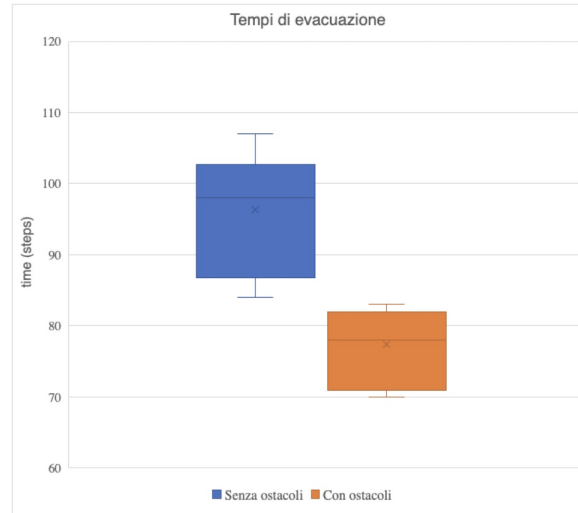


Fig. 20: Tempi di evacuazione con le uscite vicine agli angoli

Infine, si può notare come i range dei tempi del modello esteso siano più ampi. Questo fenomeno è dovuto alla presenza di occupanti che tendevano a cambiare uscita durante il processo di evacuazione.

Quando alcuni occupanti si trovavano in attesa di uscire dall'area di uscita designata, poteva accadere che l'uscita opposta si svuotasse, spingendo gli occupanti a cambiare direzione e dirigersi verso l'altra uscita meno affollata. Di conseguenza, gli occupanti dovevano attraversare la stanza per raggiungere l'altra uscita, aumentando i tempi complessivi di evacuazione se l'uscita originale si era già svuotata nel frattempo.

Un altro aspetto importante, come si può osservare dalle mappe di calore (heatmap), è come l'introduzione degli ostacoli all'interno dell'ambiente di evacuazione può avere un impatto significativo sul miglioramento del flusso pedonale. Uno dei fattori chiave nel determinare l'efficacia degli ostacoli è la loro posizione rispetto alle uscite. Secondo le nostre ricerche, la distanza dell'ostacolo dall'uscita può influenzare significativamente il deflusso delle persone. Ad esempio, abbiamo osservato che la presenza di un'uscita angolare con un ostacolo posizionato a una distanza ottimale di circa 100 cm ha portato a un notevole miglioramento del deflusso, con un incremento del 32,7% rispetto alle condizioni senza ostacoli.

In conclusione, le nostre simulazioni dimostrano che la presenza strategica di ostacoli può giocare un ruolo fondamentale nel miglioramento del flusso pedonale durante l'evacuazione. Tuttavia, è importante considerare attentamente la posizione, le dimensioni e la disposizione degli ostacoli, tenendo conto delle specifiche caratteristiche dell'ambiente di evacuazione.

Pertanto, considerando l'impatto degli ostacoli sul flusso pedonale, si può dedurre che la disposizione ottimale delle uscite dipende dalla presenza o assenza di ostacoli. Nel caso di una stanza senza ostacoli, la configurazione migliore prevede le uscite posizionate al centro delle pareti.

Tuttavia, se si tiene conto dei posizionamenti degli ostacoli rispetto alle uscite, diventa più vantaggioso collocare le uscite vicino agli angoli delle pareti, come illustrato nella figura 6d. Questa disposizione consente di massimizzare l'efficienza del flusso pedonale durante l'evacuazione.

## 5 Conclusioni e Sviluppi futuri

### 5.1 Conclusioni

In questa relazione, abbiamo approfondito il problema dell'evacuazione delle folle da aree pericolose. Durante la nostra analisi, abbiamo esaminato diverse soluzioni proposte in letteratura. Successivamente, abbiamo sviluppato e proposto un modello basato sugli automi cellulari, prendendo spunto da quanto descritto nel documento di riferimento [16].

Per poter valutare l'efficacia del nostro modello, abbiamo creato un ambiente di simulazione completo, che includeva diversi agenti rappresentanti le persone coinvolte, uscite multiple e la presenza di ostacoli. Attraverso questa simulazione, abbiamo eseguito un'attenta analisi e validazione di varie configurazioni di uscite, sia con che senza ostacoli.

Infine, basandoci sui dati raccolti durante le simulazioni, abbiamo formulato le nostre configurazioni migliori per la progettazione di ambienti soggetti a flussi di persone, al fine di garantire un'evacuazione efficace e migliorare la sicurezza delle persone durante situazioni di emergenza.

### 5.2 Sviluppi futuri

Riguardo ai futuri sviluppi, ci sono diverse direzioni in cui potremmo estendere e migliorare il nostro lavoro:

- Evacuazione delle folle da vagoni dei treni:

Potremmo estendere il nostro studio all'evacuazione delle folle sui vagoni dei treni. In questo caso, potremmo implementare il disegno di un vagone di un treno e usarlo come ambiente per le simulazioni. In particolare, potremmo considerare l'introduzione del comportamento di pre-evacuazione, che renderà la simulazione ancora più realistica. Questo comportamento potrebbe includere azioni come l'organizzazione dei passeggeri in gruppi di evacuazione, l'identificazione delle uscite di emergenza e la pianificazione delle rotte di fuga. Integrando queste dinamiche nel nostro modello, saremo in grado di studiare l'efficacia delle strategie di pre-evacuazione nel migliorare il flusso delle persone durante l'evacuazione dei treni.

- Miglioramento dei modelli di comportamento della folla:

I modelli di comportamento della folla utilizzati nelle simulazioni potrebbero essere ulteriormente perfezionati per tenere conto di vari fattori, come la diversità delle età, delle condizioni fisiche e delle abilità delle persone. Inoltre, potremmo considerare il comportamento di gruppo e l'influenza sociale nel prendere decisioni durante l'evacuazione.

- Integrazione di intelligenza artificiale e algoritmi di apprendimento automatico:

Potremmo applicare tecniche di intelligenza artificiale e apprendimento automatico per migliorare ulteriormente la pianificazione delle evacuazioni e la gestione delle emergenze. Ad esempio, potremmo sviluppare algoritmi in grado di apprendere dai dati delle simulazioni e adattarsi alle diverse configurazioni dell'ambiente, migliorando così la progettazione dei percorsi di evacuazione.

## Bibliografia

- [1] Andreas Schadschneider, Ansgar Kirchner, and Katsuhiro Nishinari. “CA Approach to Collective Phenomena in Pedestrian Dynamics”. In: *Cellular Automata*. Ed. by Stefania Bandini, Bastien Chopard, and Marco Tomassini. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002, pp. 239–248. ISBN: 978-3-540-45830-2.
- [2] Kai Nagel and Michael Schreckenberg. “A cellular automaton model for freeway traffic”. In: *Journal de physique I* 2.12 (1992), pp. 2221–2229.
- [3] L.Z. Yang, D.L. Zhao, J. Li, and T.Y. Fang. “Simulation of the kin behavior in building occupant evacuation based on Cellular Automaton”. In: *Building and Environment* 40.3 (2005), pp. 411–415. ISSN: 0360-1323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.005>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132304002082>.
- [4] Zhao Daoliang, Yang Lizhong, and Li Jian. “Exit dynamics of occupant evacuation in an emergency”. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 363.2 (2006), pp. 501–511. ISSN: 0378-4371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2005.08.012>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437105008447>.
- [5] Gay Jane Perez, Giovanni Tapang, May Lim, and Caesar Saloma. “Streaming, disruptive interference and power-law behavior in the exit dynamics of confined pedestrians”. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 312.3 (2002), pp. 609–618. ISSN: 0378-4371. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(02\)00987-1](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(02)00987-1). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437102009871>.
- [6] A. Varas, M.D. Cornejo, D. Mainemer, B. Toledo, J. Rogan, V. Muñoz, and J.A. Valdivia. “Cellular automaton model for evacuation process with obstacles”. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 382.2 (2007), pp. 631–642. ISSN: 0378-4371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2007.04.006>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437107003676>.
- [7] Edward Fredkin and Tommaso Toffoli. “Conservative logic”. In: *International Journal of theoretical physics* 21.3-4 (1982), pp. 219–253.
- [8] Stephen Wolfram. “Statistical mechanics of cellular automata”. In: *Rev. Mod. Phys.* 55 (3 July 1983), pp. 601–644. DOI: 10.1103/RevModPhys.55.601. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.55.601>.
- [9] Kazuhiro Yamamoto, Satoshi Kokubo, and Katsuhiro Nishinari. “Simulation for pedestrian dynamics by real-coded cellular automata (RCA)”. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 379.2 (2007), pp. 654–660. ISSN: 0378-4371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2007.02.040>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437107001835>.
- [10] Dirk Helbing and Péter Molnár. “Social force model for pedestrian dynamics”. In: *Phys. Rev. E* 51 (5 May 1995), pp. 4282–4286. DOI: 10.1103/PhysRevE.51.4282. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.51.4282>.
- [11] Rinaldo M. Colombo and Massimiliano D. Rosini. “Pedestrian flows and non-classical shocks”. In: *Mathematical Methods in the Applied Sciences* 28.13 (2005), pp. 1553–1567. DOI: <https://doi.org/10.1002/mma.624>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/mma.624>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mma.624>.
- [12] Eric Bonabeau. “Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems”. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99.suppl.3 (2002), pp. 7280–7287. DOI: 10.1073/pnas.082080899. eprint: <https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.082080899>. URL: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.082080899>.

- [13] Caesar Saloma, Gay Jane Perez, Giovanni Tapang, May Lim, and Cynthia Palmes-Saloma. “Self-organized queuing and scale-free behavior in real escape panic”. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100.21 (2003), pp. 11947–11952. DOI: 10.1073/pnas.2031912100. eprint: <https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.2031912100>. URL: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.2031912100>.
- [14] E. Altshuler, O. Ramos, Y. Núñez, J. Fernández, A. J. Batista-Leyva, and C. Noda. “Symmetry Breaking in Escaping Ants.” In: *The American Naturalist* 166.6 (2005). PMID: 16475081, pp. 643–649. DOI: 10.1086/498139. eprint: <https://doi.org/10.1086/498139>. URL: <https://doi.org/10.1086/498139>.
- [15] Nirajan Shiwakoti and Majid Sarvi. “Enhancing the panic escape of crowd through architectural design”. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 37 (2013), pp. 260–267. ISSN: 0968-090X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.04.009>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X13000910>.
- [16] Weifeng Yuan and Kang Hai Tan. “An evacuation model using cellular automata”. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 384.2 (2007), pp. 549–566. ISSN: 0378-4371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2007.05.055>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437107006085>.
- [17] Jianyu Wang, Majid Sarvi, Jian Ma, Milad Haghani, Abdullah Alhawsawi, Juan Chen, and Peng Lin. “A modified universal pedestrian motion model: Revisiting pedestrian simulation with bottlenecks”. In: *Building Simulation*. Springer. 2022, pp. 1–14.
- [18] Nirajan Shiwakoti, Xiaomeng Shi, and Zhirui Ye. “A review on the performance of an obstacle near an exit on pedestrian crowd evacuation”. In: *Safety Science* 113 (2019), pp. 54–67. ISSN: 0925-7535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.11.016>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753518300675>.