



Università degli Studi di Milano Bicocca  
**Scuola di Scienze**  
**Dipartimento di Informatica, Sistemistica e Comunicazione**  
**Corso di laurea magistrale in Informatica**

Sistemi Complessi: Modelli e Simulazione

## **Tsunami Evacuation Simulation**

Giuseppe Magazzù  
Gaetano Magazzù

A.A. 2021 - 2022

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Background</b>	<b>3</b>
2.1	Rete stradale / Griglia . . . . .	3
2.2	Distribuzione della Popolazione . . . . .	3
2.3	Rifugi . . . . .	3
2.4	Inondazione da Tsunami . . . . .	3
2.5	Casualty Model . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Stato dell'Arte</b>	<b>4</b>
3.1	Lämmel, Rieser et al. (2010) . . . . .	5
3.2	Goto et al. (2012) . . . . .	5
3.3	Takabatake et al. (2017) . . . . .	7
3.4	Z. Wang e Jia (2021) . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Descrizione del Modello</b>	<b>9</b>
4.1	Ambiente . . . . .	10
4.2	Agenti . . . . .	10
4.2.1	Residenti . . . . .	10
4.2.2	Pedoni . . . . .	11
4.2.3	Auto . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Estensione del Modello</b>	<b>12</b>
5.1	Rete Stradale . . . . .	12
5.2	Gestione delle Intersezioni . . . . .	13
5.2.1	Pedoni . . . . .	13
5.2.2	Auto . . . . .	14
5.2.3	AWSC . . . . .	14
5.2.4	TWSC . . . . .	16
5.3	Velocità dei Pedoni . . . . .	16
<b>6</b>	<b>Simulazione</b>	<b>16</b>
6.1	Parametri Fissati . . . . .	16
6.2	Parametri Variabili . . . . .	17
<b>7</b>	<b>Analisi</b>	<b>18</b>
7.1	Modello Base . . . . .	18
7.2	Modello Esteso . . . . .	19
7.3	Comparazione Modello Base e Modello Esteso . . . . .	21
7.4	Analisi Intersezioni . . . . .	25
7.5	Comparazione con Z. Wang e Jia (2021) . . . . .	27

<b>8 Conclusioni</b>	<b>29</b>
8.1 Sviluppi Futuri . . . . .	30

# 1 Introduzione

Gli tsunami sono eventi naturali pericolosi che negli ultimi decenni hanno causato la morte di oltre 250.000 persone e si verificano spesso dopo un terremoto.

Rispetto agli altri eventi naturali come uragani, eruzioni vulcaniche e inondazioni, i tempi di allerta sono molto più brevi (Katada, Kuwasawa, Yeh et al. 2006). Infatti possono raggiungere la costa dopo 20-40 minuti dalla prima scossa oppure dopo ore. Nel primo caso si parla di near-field tsunami, mentre nel secondo di far-field tsunami.

Considerando le disastrose conseguenze dovute a questi fenomeni è necessaria un'evacuazione efficiente per salvare vite umane.

Simulare un'evacuazione in caso di tsunami rappresenta uno strumento molto utile per prendere delle contromisure e migliorare le modalità di evacuazione.

I modelli agent-based sono ideali per gestire uno scenario complesso come quello di un'evacuazione da tsunami e per modellare le diverse dinamiche che emergono quando diversi individui interagiscono tra loro durante un'emergenza.

Molti modelli non considerano o semplificano alcuni fattori importanti nell'evacuazione da tsunami. Alcuni modelli limitano i pedoni a muoversi solo lungo la strada e non permettono di sfruttare le aree aperte. Altri non gestiscono o riducono in parte le interazioni tra pedoni e altri veicoli nel caso di un'evacuazione multimodale. Spesso non vengono considerati i danni causati dal terremoto prima o durante l'evacuazione.

L'obiettivo di questo lavoro è sviluppare un modello di evacuazione multi-agente in caso di tsunami di auto e pedoni e gestire le interazioni tra gli agenti, in particolare nelle intersezioni. Il modello è stato sviluppato usando come base di partenza quello di Mostafizi et al. (2019).

Nella sezione 2 vengono presentati gli elementi principali di un modello di evacuazione da tsunami. Nella sezione 3 viene riportato lo stato dell'arte. Nelle sezioni 4 e 5 viene descritto il modello base e la sua estensione e nelle sezioni 6 e 7 viene mostrata l'impostazione della simulazione e l'analisi dei risultati. Infine la conclusione nella sezione 8.

## 2 Background

L'evacuazione in caso di tsunami avviene nel contesto di una città e consiste nel raggiungimento di rifugi da parte della popolazione nel minor tempo possibile.

Un modello di evacuazione in caso di tsunami è composto da diversi elementi.

### 2.1 Rete stradale / Griglia

L'ambiente può essere rappresentato da modelli *grid-based* o *network-based*.

I modelli *grid-based* rappresentano la città come griglia e permettono di muovere gli agenti in due dimensioni e sfruttare spazi ampi senza limitarsi alle strade (Makinoshima et al. 2018). Inoltre permettono una rappresentazione più efficace delle dinamiche tra gli agenti, ma il cui costo computazionale cresce con il numero di agenti considerati.

I modelli *network-based* invece rappresentano la rete stradale come un grafo dove i nodi corrispondono alle intersezioni e gli archi alle strade percorribili. Gli archi possono avere associate delle informazioni come la lunghezza e la larghezza della strada che permettono di stabilire i tempi di percorrenza e la capacità.

Con questa rappresentazione gli agenti possono muoversi solo lungo gli archi, al contrario dei modelli *grid-based* in cui hanno maggior libertà. Questi modelli sono più limitati nella rappresentazione delle interazioni tra agenti, ma risultano più efficienti computazionalmente.

### 2.2 Distribuzione della Popolazione

La distribuzione spaziale della popolazione al momento dell'evacuazione varia in base a diversi fattori: l'ora del giorno, la stagione, eventi. Inoltre la popolazione può essere caratterizzata dall'età, dal genere, dalla presenza di disabilità, e si può distinguere in residenti e turisti. In base a questi elementi gli individui si comporteranno diversamente durante l'evacuazione.

### 2.3 Rifugi

I rifugi sono dei luoghi sicuri dove evacuare. Si distinguono in luoghi al di fuori della zona a rischio (rifugi orizzontali) o luoghi che si trovano a una altezza che lo tsunami non raggiunge (rifugi verticali). Solitamente si assume che resistano a terremoti e tsunami e che abbiano una capacità illimitata.

### 2.4 Inondazione da Tsunami

Le inondazioni da tsunami vengono simulate utilizzando un modello di inondazione che fornisce una serie temporale di altezza e velocità delle onde in una determinata area. Con queste informazioni si può stabilire quando lo tsunami raggiunge una determinata zona e se colpisce degli individui durante la simulazione.

## 2.5 Casualty Model

Un casualty model definisce quando un individuo viene considerato una vittima a causa dello tsunami. Spesso si utilizza esclusivamente l'altezza dello tsunami. In alcuni studi vengono considerati altri fattori come la velocità e la temperatura dello tsunami o anche l'età e il genere dell'individuo (Yeh 2010).

## 3 Stato dell'Arte

In questa sezione verrà descritto lo stato dell'arte dei modelli *agent-based* di evacuazione da tsunami, senza focalizzarsi sui modelli di inondazione. Successivamente alcuni lavori verranno approfonditi nelle sottosezioni seguenti, in particolare modelli *network-based* con scenari multimodali.

I primi modelli di evacuazione da tsunami sono stati basati sui modelli *network-based* utilizzati per l'evacuazione da altri disastri come uragani, incendi e inondazioni (Imamura et al. 2001; Usuzawa et al. 1997).

Uno dei primi aspetti che è stato preso in considerazione è il comportamento umano, in particolare le reazioni dei residenti all'arrivo dello tsunami e il tempo che ci mettono per iniziare a evacuare.

Queste informazioni sono state raccolte tramite dei questionari rivolti ai residenti e usate per stimare i tempi di partenza dell'evacuazione (Imamura et al. 2001; Saito e Kagami 2004).

Questi primi modelli *network-based* hanno usato come regola di *path finding* proseguire verso il nodo con altitudine maggiore. Successivamente si è passati a usare il percorso più breve (Katada, Kuwasawa, Kanai et al. 2004) e altre strategie di routing basate sull'apprendimento come Nash equilibrium e system optimal (Lämmel e Flötteröd 2009).

Un altro aspetto importante per l'evacuazione è la conoscenza dell'ambiente da parte degli agenti. Alcuni lavori hanno distinto gli agenti in base alla loro conoscenza e studiato gli effetti di diverse proporzioni tra categorie di agenti. Nguyen et al. (2012) hanno definito *fox agent* un pedone ben informato che segue i segnali stradali fino a un rifugio e *sheep agent* un pedone che non sa come comportarsi e quindi segue i *fox agent* o si muove casualmente. Takabatake et al. (2017) invece hanno distinto gli agenti in residenti e visitatori. I residenti sono agenti che conoscono il percorso più breve per evacuare, mentre i visitatori seguono gli altri scegliendo la strada con più individui o si muovono verso una zona più elevata.

Con l'aumento della potenza di calcolo è stato possibile passare da modelli *network-based* a modelli *grid-based* e ibridi. Inoltre è stato possibile usare una quantità di dati maggiore e sfruttare il calcolo parallelo (Makinoshima et al. 2018; Wijerathne et al. 2013).

Wijerathne et al. (2013) hanno proposto un modello *grid-based* che utilizza un sistema di navigazione basato sulla visione. Gli agenti si muovono verso un luogo sicuro ben visibile scegliendo la strada con una maggiore distanza di visione.

Anche in questo lavoro vengono distinti visitatori, che si affidano alla visione, e non-visitatori, che hanno conoscenza di un'area limita al di fuori della quale vengono considerati visitatori.

In molti modelli vengono considerati esclusivamente solo pedoni, ma alcuni lavori hanno analizzato l'aggiunta della presenza di auto e altri veicoli, e si concentrano nella gestione delle interazioni tra i diversi tipi di agenti (Goto et al. 2012; H. Wang et al. 2016; Z. Wang e Jia 2021).

### 3.1 Lämmel, Rieser et al. (2010)

Questo lavoro utilizza un modello *network-based* per simulare un'evacuazione in larga scala di 450,000 pedoni.

All'inizio della simulazione tutti gli agenti siano nelle loro abitazioni e inizino ad evacuare dopo un certo tempo di partenza individuale.

I pedoni evacuano seguendo il percorso più breve e per alcuni di essi viene effettuato un *re-planning* del percorso tramite Nash equilibrium, considerando i tempi di attraversamento sulle strade.

La simulazione del traffico è implementata con un sistema a coda dove ad ogni link viene assegnata una coda FIFO, limitata nel flusso in uscita *flow capacity* e nella capacità di pedoni al suo interno *storage capacity*.

La velocità viene aggiornata tramite la relazione  $v = \min[v_{max}, FC/D]$ , dove  $v$  la velocità,  $V_{max}$  la velocità massima,  $D$  la densità e  $FC$  è la *flow capacity* (Fig. 1). Inoltre è stata considerata una velocità massima di 1.66 m/s per considerare il flusso dei pedoni in caso di emergenza.

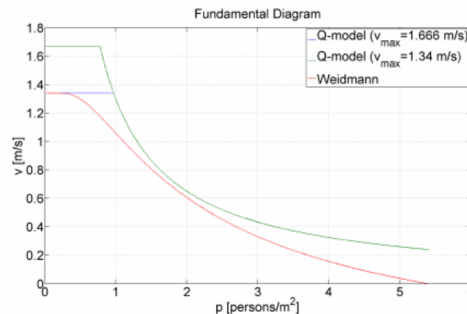


Figura 1: Diagramma fondamentale del modello a coda confrontato con quello di Weidmann (1993).

### 3.2 Goto et al. (2012)

In questo lavoro sono stati modellati diversi tipi di agenti raggruppati in famiglie: pedoni lenti, pedoni normali, motociclisti e occupanti di un'auto. Ogni agente rappresenta una famiglia che è formata da un numero diverso di individui in base

al tipo di agente. La velocità dei pedoni e dei motocicli viene aggiornata in base alla densità e sono state gestite le interazioni tra i diversi agenti all'interno di una corsia stradale e i passaggi da una corsia all'altra.

La popolazione considerata è composta da oltre 20,000 individui ed è stato assunto che tutti si trovino a casa all'inizio dell'evacuazione. Gli agenti evacuano seguendo il percorso più breve verso il rifugio più vicino. Nel caso di traffico elevato le auto possono aspettare o seguire il secondo percorso più breve. Alcuni dei rifugi prevedono una capacità limitata, che nel caso venga raggiunta la capacità massima gli agenti dovranno cambiare destinazione.

Un agente colpito dallo tsunami muore quando la profondità dello tsunami supera 1 m.

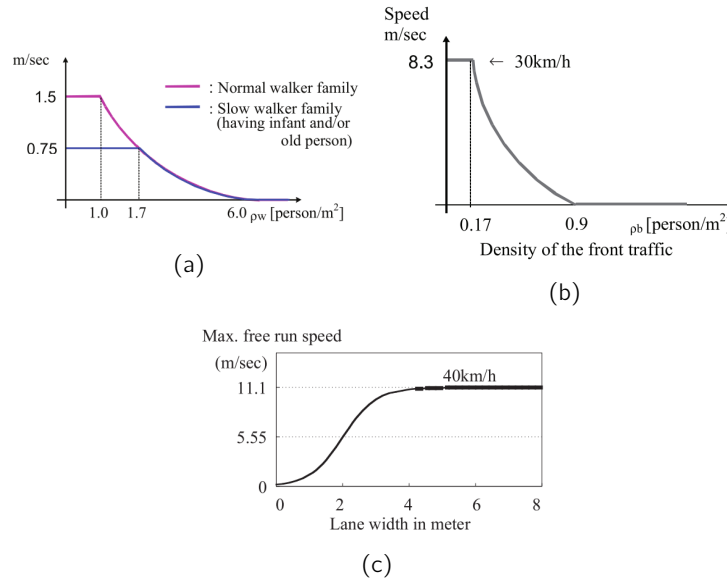


Figura 2: Relazione velocità-densità per i pedoni (a), per i motocicli (b), e relazione velocità-larghezza per le auto (c).

I pedoni sono distinti in *normal walkers*, con velocità massima di 1.5 m/s, e *slow walkers* (famiglie con disabili, anziani o bambini), con velocità massima di 0.75 m/s. La velocità viene aggiornata al variare della densità con un massimo di  $6p/m^2$  (Fig. 2a).

Per i motocicli è stata considerata una velocità massima di 30km/h e una densità massima di  $0.9 p/m^2$  (Fig. 2b).

Per pedoni e motocicli la densità viene calcolata tramite la seguente formula:  $\rho = n/(L \times W)$ , dove  $n$  è il numero di agenti nell'area di fronte all'agente  $L \times W$ ,  $L$  è la lunghezza di ricerca e  $W$  la larghezza della strada.

Le auto in assenza di ostacoli si muovono per  $L_f = V_f \times \Delta_t$ , dove  $L_f$  è la *free run length*,  $V_f$  la velocità massima e  $\Delta_t$  il *time step*. La velocità cambia in base alla

larghezza della strada e può raggiungere una velocità massima di 40 km/h (Fig. 2c). Per le auto invece la densità è definita da  $\rho = n/((W - W_c) \times L_f)$ , dove  $W_c$  è la larghezza di un'auto. In base alla densità l'auto si muoverà fino al prossimo ostacolo, oppure fino alla prossima auto se presente.

Nel calcolo della densità un'auto viene considerata 10 volte un pedone, mentre un motociclo 2 volte un pedone.

### 3.3 Takabatake et al. (2017)

In questo lavoro è stato sviluppato un modello di evacuazione da tsunami che considera 21,238 pedoni distinti tra residenti e visitatori.

I residenti si assume che conoscano il percorso più breve per il rifugio più vicino dal punto in cui si trovano all'inizio dell'evacuazione. I visitatori invece seguono due regole adottando un approccio probabilistico:

- “following other individuals”: ad ogni intersezione seguono la strada con più individui.
- “going to higher ground”: ad ogni intersezione scelgono la strada che porta a un'altezza maggiore.

Sia i residenti che i visitatori vengono distinti in base all'età con una velocità massima di 1.19 m/s (Under 65) e 0.96 m/s (Over 65). Basandosi sul lavoro di Older (1968) hanno assunto una decrescita lineare della velocità da un livello di densità di 0.3 p/m<sup>2</sup> a uno di 3.0 p/m<sup>2</sup> (Fig. 3).

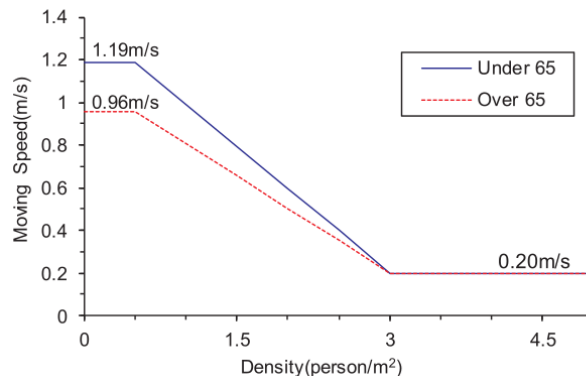


Figura 3: Relazione velocità-densità Takabatake et al. (2017)



Per quanto riguarda i tempi di partenza sono stati usati due approcci sia per residenti che visitatori:

- “all-together”: gli agenti evacuano allo stesso tempo.
- “delayed evacuation”: il tempo di partenza degli agenti viene assegnato secondo la distribuzione di Rayleigh.

I rifugi prevedono una capacità limitata. Quando un agente arriva in un rifugio già pieno si dovrà dirigere a un altro rifugio. Per i visitatori viene applicato un delay di 30 secondi per chiedere informazioni sulla posizione del rifugio più vicino.

Il casualty model utilizzato considera che un agente muore quando l'altezza delle onde nella sua posizione supera i 0.3 m.

### 3.4 Z. Wang e Jia (2021)

In questo lavoro viene proposto un modello di evacuazione da tsunami multimodale e una valutazione dei rischi modellando l'incertezza nei danni sismici nelle strade e in altri parametri del modello.

Sono state considerate diverse popolazioni al variare del numero di agenti: 5000 e 10,000, che rappresentano la popolazione all'inizio dell'estate e 15,000 rappresenta il picco nella stagione estiva.

Gli agenti sono distinti in pedoni e auto ed evacuano verso il rifugio più vicino seguendo il percorso più breve. Si assume che ogni auto contenga 4 agenti e che sia equivalente a 10 volte un pedone in spazio occupato. Gli agenti per poter evacuare in auto dovranno prima raggiungere a piedi degli appositi parcheggi.

Il modello dei pedoni considera una velocità distribuita secondo una normale  $\mathcal{N}(\mu_p, \sigma_p)$  troncata tra 0.75 m/s e 3.83 m/s e con  $\mu_p \sim \mathcal{U}(1.4, 2)$  e  $\sigma_p \sim \mathcal{U}(0.1, 0.6)$ . Inoltre viene aggiornata in base alla densità di fronte all'agente con una *search length* di 4m secondo l'andamento mostrato in figura 4.

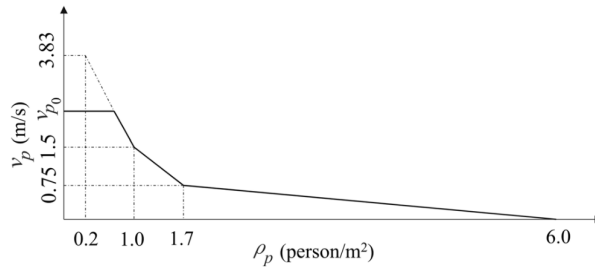


Figura 4: Relazione velocità-densità Z. Wang e Jia (2021) basato su un'approssimazione del modello di Goto et al. (2012)

Per le auto è stato utilizzato il modello di Greenshields et al. (1935) che aggiorna la velocità in base alla densità di fronte lungo la *free run length*, con

una massima velocità di 40 km/h e una densità massima di 160 veh/km per i link senza restrizioni sul traffico date dai danni sismici, altrimenti 120 veh/km.

Per la gestione delle interazioni tra auto e pedoni vengono definite tre fasi di traffico in base al rapporto tra il volume dei pedoni e delle auto: *vehicle-dominated*, *balanced* e *pedestrian-dominated*. Al variare della fase cambia la larghezza della strada occupabile sia per pedoni che per le auto.

Per i tempi di partenza viene utilizzata la distribuzione di Rayleigh dove i parametri invece di essere fissati seguono delle apposite distribuzioni uniformi.

Rispetto ad altri lavori che utilizzano un livello di profondità fissa per determinare la morte degli agenti, in questo lavoro viene considerato che la profondità sia distribuita uniformemente in  $[0.5, 3]$ .

## 4 Descrizione del Modello

In questa sezione verranno descritti i diversi agenti e l'ambiente. I parametri usati per questo lavoro saranno specificati nella sezione 6.

Il modello considerato (Mostafizi et al. 2019) è un sistema multi-agente che prevede l'evacuazione della città di Seaside, Oregon in caso di tsunami di auto e pedoni. L'evacuazione inizia subito dopo il terremoto e non vengono considerati eventuali danni causati dal terremoto.

Il modello utilizza dati GIS per la distribuzione della popolazione, la rete stradale e i rifugi. Per la distribuzione della popolazione è stato considerato uno scenario a mezzogiorno di un fine settimana di estate, che presenta una maggiore concentrazione di residenti sulla spiaggia e nel centro della città. La popolazione sulla costa (40%) e nel centro (30%) è distribuita normalmente, mentre quella nella zona residenziale (30%) è distribuita uniformemente (Fig. 5).

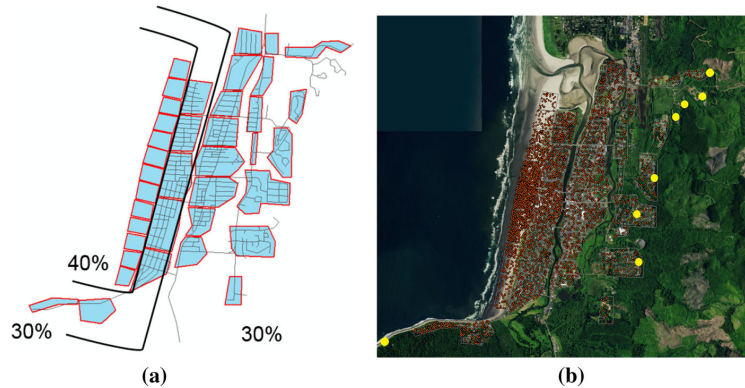


Figura 5: Distribuzione della popolazione nello scenario considerato. (a) Aree in cui è distribuita la popolazione divise nelle tre macro aree: costa, centro, zona residenziale. (b) Immagine satellitare con la distribuzione della popolazione.

## 4.1 Ambiente

L'ambiente è composto dalla rete stradale della città con i relativi rifugi e dallo tsunami.

La rete stradale è rappresentata da un grafo, i cui nodi corrispondono alle intersezioni e gli archi alle strade. Tutte le strade sono considerate a senso unico, con una sola corsia e con una velocità limite di 55 km/h e hanno una lunghezza fissata. 8 delle intersezioni sono marcate come rifugi con capacità illimitata.

Lo tsunami è rappresentato da una griglia discreta, dove ogni cella contiene i valori temporali di altezza delle onde. I dati usati in questo progetto sono quelli calcolati dal modello di inondazione ComMIT/MOST (Titov e Gonzalez 1997) per la zona di subduzione della Cascadia.

## 4.2 Agenti

La simulazione prevede diversi tipi di agenti: residenti, pedoni e auto.

### 4.2.1 Residenti

All'inizio dell'evacuazione i residenti si trovano all'esterno degli edifici e delle auto e scelgono come evacuare autonomamente. Un residente sceglie con una certa probabilità la modalità per evacuare: a piedi o in auto e verso un rifugio verticale oppure orizzontale. Una volta che ogni agente decide in che modo evacuare non cambierà scelta per tutta la simulazione.

Prima di iniziare l'evacuazione i residenti impiegano del tempo per prepararsi che include l'eventuale raggiungimento del veicolo. Questo tempo, chiamato *milling time*, è modellato tramite la distribuzione di Rayleigh (Eq. 1), con un tempo minimo ( $\tau$ ) e un parametro di scala ( $\sigma$ ).

$$f(x; \tau, \sigma) = \frac{(x - \tau)^2}{\sigma^2} e^{-(x - \tau)^2 / (2\sigma^2)} \quad (1)$$

Scaduto il tempo di preparazione l'agente si muove verso l'intersezione più vicina e in base alla modalità scelta viene considerato un agente di tipo pedone o auto. L'agente quindi inizia a seguire il percorso più breve per il rifugio più vicino raggiungibile, trovato tramite l'algoritmo A\* che prende in considerazione esclusivamente la lunghezza delle strade.

Gli agenti durante l'evacuazione possono:

- Continuare sulla strada attuale.
- Cambiare strada seguendo il percorso più breve.
- Morire se rimangono in una zona in cui l'altezza delle onde supera  $H_c$  per un tempo di  $T_c$ .
- Evacuare se hanno raggiunto un rifugio.

#### 4.2.2 Pedoni

La velocità di camminata viene stabilita tramite una distribuzione normale con media  $\mu_p$  e deviazione standard  $\sigma_p$ . La velocità di ogni pedone rimane costante durante tutta l'evacuazione.

#### 4.2.3 Auto

È stato considerato il caso peggiore in cui ogni auto contiene una sola persona. Le auto possono raggiungere la velocità massima imposta dalla strada, ovvero 55 km/h.

Il comportamento delle auto è modellato tramite il modello *General Motors* il quale fa parte dei modelli di tipo *car-following*. Questi modelli descrivono come un veicolo ne segue un altro e cambi il proprio comportamento reagendo a quest'ultimo.

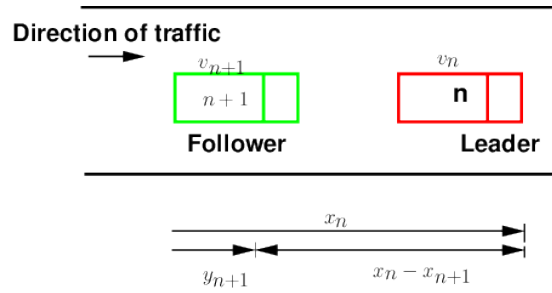


Figura 6: Schema generale dei modelli *car-following*, dove  $n+1$  è il veicolo corrente e  $n$  quello di fronte,  $v_{n+1}$ ,  $v_n$  sono le rispettive velocità, mentre  $x_{n+1}$ ,  $x_n$  sono le rispettive posizioni e  $x_n - x_{n+1}$  è la distanza tra i due veicoli.

Secondo il modello *General Motors* ogni auto risponde alle condizioni del traffico circostante esclusivamente accelerando o decelerando. L'accelerazione dipende dalla velocità del veicolo corrente, dalla sua posizione e dalla sua velocità rispetto al veicolo di fronte.

Più veloce è il veicolo di fronte maggiore sarà la distanza tra i due veicoli, e inoltre deve essere mantenuta una certa distanza di sicurezza dall'auto di fronte.

$$a_{n+1}^t = \left[ \frac{\alpha_{l,m} * (v_{n+1}^t)^m}{(x_n^t - x_{n+1}^t)^l} \right] [v_n^t - v_{n+1}^t] \quad (2)$$

L'equazione 2 mostra il modello *General Motors*, dove  $l$  è un esponente di distanza con il veicolo di fronte che può assumere valori da +4 a -1,  $m$  è un esponente di velocità con valori tra -2 a +2,  $\alpha$  è un coefficiente di sensitività.

## 5 Estensione del Modello

In questa sezione verranno evidenziate le limitazioni del modello base e poi descritte le modifiche e le aggiunte effettuate.

Una delle principali limitazioni riguarda le interazioni tra i vari tipi di agenti. Il modello base considera esclusivamente le interazioni auto-auto tramite il modello General Motors, e non prevede nessuna interazione pedone-pedone o pedone-auto.

Non vengono considerati i danni che potrebbe casuare il terremoto e i rifugi hanno capacità illimitata. Inoltre viene assunto che tutti gli agenti conoscano il percorso più breve per il rifugio più vicino.

Quindi ci si concentrerà sulle interazioni nelle intersezioni introducendo meccanismi di coordinazione tra i vari tipi di agente. Inoltre la velocità dei pedoni verrà modificata in base alla congestione in modo da poter rappresentare uno scenario più realistico.

### 5.1 Rete Stradale

Tutte le strade della rete sono state considerate come strade locali secondo il *Seaside Transportation System Plan* (2010), ovvero strade a doppio senso e a una corsia con una larghezza variabile da 7.3 m a 9 m e opzionalmente con un marciapiede per ogni lato della strada con una larghezza fissa di 1.5 m. È stato assunto che tutte le strade abbiano marciapiedi su entrambi i lati e che la larghezza sia fissata al valore minimo (7.3 m).

Tramite l'utilizzo di OpenStreetMap<sup>1</sup> e Google Maps<sup>2</sup> sono state estratte manualmente le posizioni e le direzioni delle strade con stop delle intersezioni per la città di Seaside, Oregon e classificate in base alla segnaletica stradale:

- All-Way Stop Controlled (AWSC): intersezioni con stop in tutte le strade.
- Two-Way Stop Controlled (TWSC): intersezioni a 4 strade con due stop nelle strade secondarie o intersezioni a T (3 strade) con uno stop nella strada secondaria.

Tutte le intersezioni presenti nella rete hanno massimo 4 strade e non hanno semafori.

In questo lavoro, per semplicità, sono state gestite solo intersezioni a 4 strade. Come mostrato nella figura 7, la rete è composta da 304 intersezioni di cui 206 a 3 strade e 98 a 4 strade. Tra le intersezioni a 4 strade, 20 sono di tipo AWSC e 78 di tipo TWSC.

---

<sup>1</sup><https://www.openstreetmap.org/relation/186505>

<sup>2</sup><https://www.google.com/maps/place/Seaside,+Oregon+97138,+Stati+Uniti>

## 5.2 Gestione delle Intersezioni

La gestione delle intersezioni consiste nel definire quali auto possano passare rispettando le precedenza di auto e pedoni. I pedoni hanno sempre la precedenza e non c'è alcuna attesa per l'attraversamento.

Per gestire queste interazioni tra pedoni e auto è stata introdotta una zona di attraversamento (Fig. 8).

È stato assunto che le intersezioni abbiano lunghezza e larghezza pari alla larghezza della strada, ovvero 10.3 m. Dal momento che la rappresentazione della strada è *network-based* è stato deciso che la zona di attraversamento inizi prima dell'intersezione e termini dopo dell'intersezione a una distanza pari alla metà della larghezza dal centro (5.15 m).

Per rappresentare l'attraversamento dei pedoni e delle auto ad ogni intersezione  $i$  sono state aggiunte le seguenti informazioni:

- $C_{ij}$  = numero di pedoni che stanno usando l'attraversamento pedonale che si trova sulla strada che va dall'intersezione  $i$  all'intersezione  $j$ .
- $Arrival_i$  = coda delle auto nella zona di attraversamento ordinate per tempo di arrivo.
- $Crossing_i$  = insieme delle auto che possono passare contemporaneamente.
- $Stops_i$  = insieme delle intersezioni  $j$  collegate all'intersezione  $i$  in cui è presente uno stop nella strada  $(i, j)$ .

Per stabilire la posizione all'interno della rete stradale, le precedenza e la direzione della prossima intersezione per ogni agente  $x$  vengono definite:

- $x_{prev}$  l'intersezione precedente
- $x_{curr}$  l'intersezione corrente
- $x_{next}$  la prossima intersezione
- $x_{side} \in \{left, right\}$  il lato di marciapiede (solo pedoni)
- $x_{dir} \in \{left, straight, right\}$  la direzione verso  $x_{next}$

### 5.2.1 Pedoni

Data la tripla  $(x_{prev}, x_{curr}, x_{next})$  viene associata ad ogni intersezione collegata a  $x_{curr}$  la direzione per raggiungerla seguendo il senso orario a partire da  $x_{prev}$ , per cui  $I_d$  indica l'intersezione nella direzione  $d \in \{origin, left, straight, right\}$ . La direzione associata all'intersezione  $x_{next}$  è quella dove è diretto il pedone e viene identificata da  $x_{dir}$ .

Quando un pedone  $x$  entra nella zona di attraversamento di  $x_{curr}$  dall'intersezione  $x_{prev}$  e si trova sul marciapiede sul lato  $x_{side}$  ha tre direzioni in cui poter andare: *left*, *straight*, *right* (Fig. 9):

- Se  $x_{dir} = \textit{straight}$  e  $x_{side} = \textit{side}$  viene incrementato  $C_{x_{curr}, l_{side}}$  di 1.
- Se  $x_{dir} = \textit{side}$  e  $x_{side} \neq \textit{side}$  viene incrementato  $C_{x_{curr}, l_{origin}}$  di 1.
- Se  $x_{dir} = \textit{side}$  e  $x_{side} = \textit{side}$  non viene alterato nessun contatore.

Quando il pedone finisce di attraversare il contatore corrispondente viene decrementato di 1.

### 5.2.2 Auto

Quando un'auto  $x$  raggiunge la zona di attraversamento dell'intersezione  $i$  viene aggiunta alla coda  $Arrival_i$  che determina l'ordine di arrivo delle auto. In base al tipo di intersezione viene schedulata (Sez. 5.2.3, 5.2.4).

Tutte le auto in  $Arrival_i$  che possono passare insieme vengono aggiunte a  $Crossing_i$  e rimosse una volta lasciato l'intersezione. Finché  $Crossing_i$  è piena non potranno essere aggiunte altre auto.

Se ci sono pedoni che stanno attraversando le strade  $(x_{curr}, x_{next})$  e  $(x_{prev}, x_{curr})$  l'auto dovrà attendere e passare quando  $C_{x_{curr}, x_{prev}} = 0$  e  $C_{x_{curr}, x_{next}} = 0$  (Fig. 10).

### 5.2.3 AWSC

Nelle intersezioni di tipo AWSC la prima auto che arriva ha la precedenza sulle altre auto e deve aspettare eventuali pedoni come spiegato in precedenza. Inoltre lo scenario in cui 4 auto arrivano contemporaneamente non è stato considerato poiché poco probabile.

La risoluzione delle precedenze avviene tra le auto che arrivano a un'intersezione allo stesso tempo. L'auto che ha la destra libera viene considerata provenire da *origin* e dal suo punto di riferimento vengono identificate le direzioni di provenienza delle altre auto.

Basandosi sulle direzioni di provenienza delle auto e sulle rispettive destinazioni viene verificato in senso orario (*origin*  $\rightarrow$  *left*  $\rightarrow$  *straight*) quali auto possono passare contemporaneamente o meno (Tab. 1, Tab. 2, Tab. 3).

Direction	Car1: Origin	Car2: Left
	Left	Right
	Right	Left
	Right	Right
	Straight	Right

Tabella 1: Tutte le possibili combinazioni di destinazione delle due auto che permettono di passare contemporaneamente nel caso in cui arrivano rispettivamente da *origin* e *left*.

Direction	Car1: Origin	Car2: Straight
	Left	Left
	Right	Right
	Right	Straight
	Straight	Right
	Straight	Straight

Tabella 2: Tutte le possibili combinazioni di destinazione delle due auto che permettono di passare contemporaneamente nel caso in cui arrivano rispettivamente da *origin* e *straight*.

Direction	Car1: Origin	Car2: Left	Car3: Straight
	Right	Left	Right
	Left	Right	Left
	Right	Right	Right
	Straight	Right	Right

Tabella 3: Tutte le possibili combinazioni di destinazione delle tre auto che permettono di passare contemporaneamente nel caso in cui arrivano rispettivamente da *origin*, *left* e *straight*.



#### 5.2.4 TWSC

Nel caso in cui l'intersezione è di tipo TWSC vengono identificate due vie: quella principale che ha la precedenza e quella secondaria in cui sono presenti gli stop.

A differenza dell'intersezioni AWSC, l'ordine di precedenza non importa poiché possono passare al più due auto alla volta che si trovano l'una di fronte all'altra. Quindi viene scelta casualmente come riferimento una delle due auto che viene considerata provenire da *origin*, mentre l'altra da *straight*. Una volta che la via principale è libera viene gestita nello stesso modo quella secondaria.

Per verificare se le due auto possono passare contemporaneamente si procede come già visto per il caso origin-straight (Tab. 3).

### 5.3 Velocità dei Pedoni

La velocità dei pedoni solitamente viene gestita tramite relazioni macroscopiche tra velocità-densità-flusso espresse tramite un diagramma fondamentale (Nikolić et al. 2016). Per estrarre queste relazioni sono richiesti dei dati empirici che non sempre disponibili, soprattutto nei casi di emergenza.

Non avendo a disposizione dati empirici è stato deciso di usare l'approccio di Z. Wang e Jia (2021) che si basa sullo stesso modello di partenza di questo lavoro.

## 6 Simulazione

Per la simulazione alcuni parametri sono stati fissati, mentre altri parametri sono estratti randomicamente o sono stati cambiati manualmente per i diversi esperimenti.

### 6.1 Parametri Fissati

Parametri per il modello *General Motors*:

- **max speed**: 55 km/h. Velocità massima.
- **safe distance**: 1.8 m. Distanza minima tra le auto.
- **acceleration**:  $1.5 \text{ m/s}^2$ . Accelerazione nel caso in cui non è presente un'auto davanti.
- **l**: 2. Esponente di distanza.
- **m**: 0. Esponente di velocità.
- **alpha**:  $0.36 \text{ km}^2/\text{h}$ . Coefficiente di sensitività.

Parametri per il *casualty model*:

- **Hc**: 1 m. Profondità critica alla quale l'agente viene considerato una vittima.

- **Tc**: 120 s. Tempo in acqua che l'agente deve trascorrere per venire considerato una vittima.

Parametri per il tempo di preparazione:

- **Rtau**: 10 min. Tempo minimo per prepararsi prima di evacuare.
- **Rsig**: 1.65. Fattore di scala per la distribuzione di Rayleigh.

Parametri per il comportamento dei pedoni:

- **search\_length**: 4 m. Lunghezza della strada davanti al pedone per calcolare la densità.
- **jam\_density**: 6 ped/m<sup>2</sup>. Densità massima.

Parametri per le dimensioni delle strade:

- **side\_width**: 1.5 m. Larghezza di un marciapiede.
- **lane\_width**: 3.6 m. Larghezza di una corsia.

## 6.2 Parametri Variabili

Parametri per la percentuale di auto e pedoni:

- **R1\_Evac\_Foot**: Probabilità di un residente di evacuare a piedi.
- **R2\_Evac\_Car**: Probabilità di un residente di evacuare in auto.

Sono state provate le seguenti combinazioni di auto e pedoni:

- **R1\_Evac\_Foot**: 0%, **R2\_Evac\_Car**: 100%
- **R1\_Evac\_Foot**: 25%, **R2\_Evac\_Car**: 75%
- **R1\_Evac\_Foot**: 50%, **R2\_Evac\_Car**: 50%
- **R1\_Evac\_Foot**: 75%, **R2\_Evac\_Car**: 25%
- **R1\_Evac\_Foot**: 100%, **R2\_Evac\_Car**: 0%

Parametri per il comportamento dei pedoni:

- $\mu_p$ : media della velocità, distribuita uniformemente in [1.4, 2].
- $\sigma_p$ : deviazione standard della velocità, distribuita uniformemente in [0.1, 0.6].
- **side**: lato del marciapiede all'inizio della simulazione (0 sinistro e 1 destro), assegnato in modo equiprobabile. Durante la simulazione può variare.

Per via della randomicità dei parametri i risultati degli esperimenti sono stati mediati su 30 simulazioni.

## 7 Analisi

In questa sezione verrà effettuata un'analisi sui risultati mediati su 30 simulazioni, comparando il modello base con il modello esteso e infine con un modello allo stato dell'arte.

### 7.1 Modello Base

Nelle figure 11 e 12 vengono mostrate le percentuali di evacuati e di morti nel tempo al variare del numero di auto e pedoni. Come si può notare dalla figura 11, il numero di pedoni non influenza la percentuale di pedoni evacuati nel tempo. Per quanto riguarda le auto, più è alto il numero di auto più tempo è richiesto per evacuare e inoltre più bassa è la percentuale di auto evacuate alla fine della simulazione. Osservando la percentuale di evacuati totali si può notare che un numero minore di auto permette di evacuare il numero maggiore di agenti. I casi con probabilità di pedoni del 75% e 100% si ottiene la stessa percentuale massima di agenti evacuati, tuttavia il caso con probabilità 75% ha un andamento più veloce per la presenza delle auto.

Per quanto riguarda le percentuali di mortalità (Fig. 12), possono essere fatte analisi simili a quelle in precedenza per il numero di evacuati. Per i pedoni in tutti i casi la percentuale di vittime rimane sotto al 1%, mentre osservando le auto e le vittime totali risulta una mortalità maggiore all'aumentare del numero di auto fino a un massimo di circa 39%. I casi con meno vittime sono quelli con probabilità di auto del 25% e quello con solo pedoni, che hanno risultati molto simili.

Nella figura 13 vengono riportate le percentuali di agenti evacuati nel tempo e il tempo in cui evacuano in media. Nel caso con solo pedoni si ha un picco a 31 minuti che corrisponde al tempo medio di evacuazione. All'aumentare del numero di auto il tempo medio si abbassa fino a 20 minuti nel caso con solo auto.

Nel caso con probabilità di auto del 25% sembra formarsi un secondo picco più basso nei primi minuti probabilmente dovuto alle auto, mentre il secondo ai pedoni. Questi picchi tendono ad appiattirsi con l'aumentare del numero di auto.

Inoltre si può notare come con un numero maggiore di auto considerate la percentuale di agenti che evacuano negli ultimi minuti sia più bassa. Questo poiché, come già evidenziato nella figura 11, le auto evacuano più velocemente dei pedoni.

## 7.2 Modello Esteso

Nonostante l'introduzione della variazione della velocità per i pedoni, la percentuale di pedoni evacuati risulta molto simile al variare del numero di pedoni (Fig. 14). Si può notare una piccola differenza tra il minuto 25 e il minuto 35 per il caso con solo pedoni in cui l'andamento è leggermente più basso.

Il caso con solo auto, al contrario di come si possa pensare, non è il caso peggiore e ha un numero di evacuati simile ai casi con probabilità di auto di 75% e 50%, mentre il caso con una percentuale maggiore è quello con una probabilità del 25%.

In generale il numero di auto evacuate è molto più basso rispetto a quello dei pedoni.

Considerando i contributi di auto e pedoni, al diminuire del numero di auto il numero totale di evacuati alla fine della simulazione cresce, fino al caso migliore con solo pedoni.

Come si può vedere nella figura 15, al variare del numero di pedoni considerati non ci sono differenze significative, mentre per le auto la percentuale di vittime sale al crescere del numero di auto considerate.

In generale la percentuale di vittime per le auto è molto più alta rispetto a quella dei pedoni con un massimo di poco più del 45% nel caso con una probabilità di auto del 75% che risulta con una mortalità superiore anche al caso solo auto. Il numero di vittime totali aumenta al crescere del numero di auto e il caso con solo auto è quello con la percentuale di mortalità maggiore.

Nella figura 16 vengono riportate le percentuali di agenti evacuati nel tempo e il tempo in cui evacuano in media. In modo analogo al modello base il tempo medio di evacuazione si abbassa e sembrano formarsi due picchi nel caso con una probabilità di auto del 25% per poi appiattirsi all'aumentare del numero di auto.

### 7.3 Comparazione Modello Base e Modello Esteso

In questa sottosezione verranno comparati il modello base e il modello esteso analizzando le percentuali di evacuati e di vittime per poi passare a comparazioni spaziali, in particolare mostrando l'effetto della gestione delle intersezioni durante la simulazione.

#### Percentuale di Evacuati e di Vittime

Osservando la figura 17 è possibile comparare le percentuali di evacuati e di vittime nel tempo al variare del numero di agenti tra i due modelli. In generale il modello esteso presenta un numero minore di evacuati e un numero maggiore di vittime rispetto al modello base. Questo può essere sintomo dell'effetto delle intersezioni che creando rallentamenti causano una mortalità maggiore, infatti la percentuale di evacuati del modello esteso presenta un andamento più lento rispetto al modello di partenza.

Per entrambi i modelli all'aumentare del numero di auto considerate, la percentuale di evacuati diminuisce e la percentuale di vittime aumenta. Inoltre per entrambi i modelli le prime vittime si verificano poco prima di 40 minuti.

Gli unici casi in cui il modello esteso e quello base hanno risultati molto simili sono il caso con solo pedoni e il caso solo auto. Per quanto riguarda il secondo caso, l'effetto delle intersezioni è minimo rispetto a quanto ci si potrebbe aspettare.

### **Percentuale di Evacuati nel Tempo**

Come già detto in precedenza le distribuzioni della percentuale di evacuati nel tempo del modello base e del modello esteso presentano un andamento simile, in particolare il caso con solo auto (Fig. 18).

La percentuale di evacuati nei casi con sia auto che pedoni nel modello esteso risulta più bassa nella prima metà della simulazione e più alta dopo.

Il tempo medio di evacuazione per il modello esteso risulta leggermente più alto soprattutto nei casi con più pedoni. Questo probabilmente è dovuto al fatto che i pedoni hanno la precedenza negli incroci e hanno velocità variabile, a differenza del modello base.

### **Tempo Impiegato per Evacuare**

Un'ulteriore comparazione riguarda il tempo che impiegano auto e pedoni per evacuare. Come mostrato nella figura 19 per quanto riguarda le auto, il modello base presenta un andamento decrescente per il tempo medio richiesto per evacuare al diminuire del numero di auto considerate. Le auto impiegano in media tempi più alti con il modello esteso rispetto a quello base, in particolar modo considerando un numero maggiore di pedoni. I pedoni invece non presentano alcun cambiamento significativo al variare del numero di agenti e del modello considerato.

Per entrambi i modelli un pedone impiega in media un tempo di 25 minuti per evacuare e un massimo di 47 minuti. Per le auto invece il tempo medio di evacuazione per il modello base è 12 minuti e per il modello esteso 16 minuti, con tempi massimi rispettivamente di 47 e 48 minuti.



La figura 20 mostra i tempi di evacuazione mediati tra gli agenti che partono dallo stesso nodo della rete, mediati a loro volta tra tutte le configurazioni di auto e pedoni.

In generale gli agenti che partono dalla costa impiegano più tempo rispetto agli altri che sono più vicini ai rifugi.

Confrontando i pedoni non si riscontrano cambiamenti significativi nei tempi di evacuazione tra i due modelli. Nel caso delle auto si nota che il modello esteso introduce dei rallentamenti rispetto al modello base, soprattutto lungo la costa.

## 7.4 Analisi Intersezioni

In questa sottosezione verranno descritte le analisi effettuate sulle intersezioni per valutare l'effetto dell'estensione del modello. Per ogni intersezione sono stati analizzati la percentuale di vittime e il flusso in entrata e in uscita, comparando i due modelli. Inoltre solo per il modello esteso sono stati analizzati anche i tempi medi di attesa nelle intersezioni, poichè nel modello base non c'è attesa.

### Percentuale di Vittime

Nella figura 21 vengono mostrate le percentuali di mortalità nelle intersezioni gestite per i due modelli al variare del numero di agenti e il caso mediato. Inoltre le intersezioni sono ordinate per distanza crescente dal mare.

La percentuale di vittime in un'intersezione è il numero di vittime su ogni strada in entrata nell'intersezione sul numero di vittime totale.

In generale le intersezioni hanno una percentuale di mortalità non superiore al 10%. Nei casi con solo pedoni e solo auto i risultati sono molto simili.

Per quanto riguarda il caso con probabilità di auto del 75%, entrambi i modelli condividono valori relativamente alti di mortalità per molte intersezioni, ma nel modello esteso risultano leggermente più bassi.

Nei casi con probabilità di auto del 50% e del 25% il modello esteso ha una percentuale di mortalità distribuita su più intersezioni.

Come si può notare dall'ordine delle intersezioni (Fig. 21), i casi con più pedoni hanno più vittime nelle intersezioni più distanti, mentre i casi con più auto hanno più vittime nelle intersezioni più vicine al mare per via delle code che si formano in caso di congestione.

In media le percentuali di mortalità per i due modelli risultano simili come si può vedere anche nella figura 22.

Nella figura 22 vengono mostrate le percentuali di vittime nella rete distinte in base al tipo di intersezione: TWSC, AWSC.

### Flusso

Per ogni intersezione è stato calcolato il flusso in entrata e in uscita sommando i valori di ogni strada al variare del numero di auto e pedoni.

Come si nota nella figura 23, il flusso dei pedoni non presenta particolari differenze tra modello base ed esteso, nonostante le modifiche apportate ai pedoni.

Per entrambi i modelli il flusso in entrata e in uscita in ogni intersezione è molto simile. Inoltre all'aumentare del numero di pedoni c'è un incremento nel flusso.

Osservando il flusso delle auto (Fig. 24) viene riscontrato un leggero incremento di flusso in entrata all'aumentare del numero di auto. Il flusso in entrata e in uscita non sono perfettamente bilanciati e risultano più sparsi rispetto al flusso dei pedoni. Inoltre in molte intersezioni il flusso in entrata è maggiore del flusso in uscita.

Nel modello esteso il flusso risulta più basso probabilmente a causa della gestione delle intersezioni che genera una diminuzione del traffico in uscita che, propagandosi in tutta la rete, abbassa il flusso in tutte le intersezioni.

### Tempi di Attesa

Infine, esclusivamente per il modello esteso, vengono analizzati i tempi di attesa nelle intersezioni per le auto, ovvero il tempo che passa da quando un'auto arriva all'incrocio a quando ottiene il via libera. Inoltre i tempi sono distinti tra i due tipi di intersezione: AWSC e TWSC.

Come si può vedere nella tabella 4, all'aumentare del numero di auto entrambi i tipi di intersezioni hanno tempi medi di attesa più lunghi.

Per quanto riguarda le intersezioni TWSC, i tempi di attesa medi e massimi in generale sono più alti rispetto agli AWSC, per via della presenza degli stop nelle strade secondarie.

	25% cars	50% cars	75% cars	100% cars	intersection
mean	36 s	56 s	142 s	185 s	AWSC
max	223 s	209 s	962 s	1363 s	AWSC
mean	35 s	111 s	170 s	262 s	TWSC
max	451 s	1136 s	1246 s	1400 s	TWSC

Tabella 4: Confronto dei tempi di attesa massimi e medi per i due tipi di intersezioni al variare della percentuale di auto considerate.

Nella figura 25 vengono riportati i tempi di attesa nella rete al variare del numero di auto.

Al crescere del numero di auto si può notare come la zona in alto vicino al mare composta da una serie di TWSC abbia tempi di attesa più alti.

Spazialmente si può notare che la maggior parte delle intersezioni con tempi di attesa elevati si trovano vicino al mare.

## 7.5 Comparazione con Z. Wang e Jia (2021)

In questa sezione verranno comparati il modello base e il modello esteso con il modello di Z. Wang e Jia (2021), il quale rappresenta un modello recente allo stato dell'arte e considera lo stesso scenario di evacuazione di questo lavoro.

Z. Wang e Jia (2021) hanno effettuato 4000 simulazioni con 5000 agenti e hanno modellato l'incertezza della percentuale di auto con una variabile  $p_c \sim N(\mu_c, \sigma_c)$  troncata in  $(0, 1)$ , dove  $\mu_c$  segue una distribuzione uniforme in  $[0, 1]$  e  $\sigma_c = 0.15$ . Inoltre sono stati considerati diversi casi che introducono o meno diverse caratteristiche nel modello (Tab. 5).

Per comparare con il modello di Z. Wang e Jia (2021) sono state mediate le prove effettuate al variare del numero di auto e di pedoni con un totale di 4502 agenti (Fig. 27). Nella comparazione verranno presi in considerazione esclusivamente i casi C0, C1 e C2, ovvero quelli che non gestiscono i danni sismici.

Come si nota nella figura 26 in entrambi i modelli i primi agenti iniziano a evacuare intorno ai 10 minuti. Nel caso di Z. Wang e Jia (2021) le auto iniziano poco prima dei 10 minuti per via dei parametri della distribuzione di Rayleigh.

Cases	Seismic damage	Pedestrian-vehicle interaction	Speed adjustment
C0	No	No	No
C1	No	No	Yes
C2	No	Yes	Yes
C3	Yes	No	Yes
C4	Yes	Yes	Yes

Tabella 5: Casi di simulazione del modello Z. Wang e Jia (2021).

Nel modello di Z. Wang e Jia (2021) le prime vittime si verificano a circa 28 minuti ovvero quando lo tsunami inizia ad arrivare alla costa, mentre nel modello esteso e nel modello base dopo 40 minuti, ovvero quando lo tsunami ha già coperto l'area vicino alla costa. Dopo 50 minuti lo tsunami ha raggiunto la massima distanza e infatti in tutti i modelli il numero di vittime rimane costante.

Osservando solo i pedoni si può notare come il caso C2 sia lo scenario più simile ai risultati ottenuti dal modello base ed esteso per vittime ed evacuati, con valori leggermente inferiori di evacuati e maggiori di vittime. Sono presenti comunque delle differenze dovute ad diversi tempi di partenza degli agenti, alla larghezza della strada considerata ed un numero diverso di agenti. Infatti nel modello di Z. Wang e Jia (2021) l'andamento risulta leggermente più veloce tra i 20 e i 30 minuti e leggermente più lento dopo i 35 minuti. Inoltre nel modello di Z. Wang e Jia (2021) c'è una differenza più significativa nell'effettuare una variazione della velocità dei pedoni casi C0 e C1, rispetto alla differenza tra il modello base ed esteso.

In tutti i modelli le auto presentano differenze più marcate sia per le vittime che per gli evacuati. Nel modello di Z. Wang e Jia (2021) gli evacuati hanno una curva crescente fino a circa 30 minuti dopo i quali si appiattisce e raggiunge un valore di circa 17%, mentre nel modello base e nel modello esteso la curva continua a crescere fino a 50 minuti e raggiunge un valore di 34% nel modello base e di 26% nel modello esteso. Per quanto riguarda le vittime nel modello di Z. Wang e Jia (2021) l'andamento cresce lentamente tra 28 e circa 50 minuti raggiungendo un valore di 26%, mentre nel modello base e nel modello esteso la maggior parte delle vittime è concentrata vicino a 40 minuti raggiungendo un valore di di 16% nel modello base e di 24% nel modello esteso.

Nel caso totale sono presenti andamenti simili a quelli già descritti nei grafici per i pedoni e per le auto. Il modello base e il modello esteso prevedono un numero maggiore di evacuati e un numero minore di vittime rispetto al modello di Z. Wang e Jia (2021). In particolare si può notare un massimo di evacuati dell'82% per il modello base e un massimo di vittime del 25% per il modello esteso, mentre per i casi C0, C1 e C2 sono previsti un numero massimo di evacuati poco sopra il 60% e un numero massimo di vittime di circa 30%.

## 8 Conclusioni

In questo lavoro è stato implementato un modello agent-based per la simulazione di evacuazione in caso di tsunami. Il modello di H. Wang et al. (2016) è stato usato come base di partenza ed esteso aggiungendo una velocità dinamica ai pedoni e la gestione delle interazioni tra auto e pedoni in particolare nelle intersezioni.

Successivamente sono stati effettuati diversi esperimenti al variare del numero di auto e pedoni. I risultati di ogni esperimento sono stati mediati tra 30 simulazioni per via della randomicità di alcuni parametri e sono stati confrontati con il modello di partenza e in seguito con il modello di Z. Wang e Jia (2021).

Comparato al modello base il modello esteso ha risultati meno ottimistici. La gestione delle intersezioni rallenta l'evacuazione poichè aggiunge dei tempi di attesa nelle intersezioni, abbassa il flusso sia in entrata che in uscita e di conseguenza si ha un numero minore di evacuati e un numero maggiore di vittime rispetto al modello base, soprattutto nei casi con più auto.

In generale i tempi di attesa nelle intersezioni aumentano al crescere del numero di auto e sono più alti nelle intersezioni di tipo TWSC.

Per quanto riguarda i pedoni non sembra esserci alcun cambiamento significativo, infatti si hanno delle percentuali di vittime, evacuati e tempi di evacuazione molto simili con il modello base.

Il numero di evacuati aumenta al diminuire del numero di auto, quindi il caso migliore risulta essere quello con solo pedoni. Infatti come suggerito dal piano di evacuazione della città di Seaside<sup>3</sup> la modalità di evacuazione consigliata è quella a piedi.

Le intersezioni con una mortalità maggiore corrispondono a intersezioni con un flusso in entrata basso, un tempo di attesa alto e che sono situate vicino alla costa.

Infine comparato al modello di Z. Wang e Jia (2021) il modello base e il modello esteso presentano un numero significativamente maggiore di evacuati e un numero minore di vittime, soprattutto per le auto.

Per i pedoni, nonostante le differenze nel numero di agenti, larghezza della strada e tempi di partenza, è riscontrabile qualche similitudine. La differenza maggiore tra i modelli è nelle vittime che per il modello di Z. Wang e Jia (2021) si verificano gradualmente tra il minuto 28 e il minuto 50, mentre nel modello base e nel modello esteso si verificano in poco tempo vicino a 40 minuti. In particolare il modello esteso risulta più ottimistico per evacuati e vittime rispetto al modello di Z. Wang e Jia (2021) nonostante la gestione delle intersezioni che prevede un rallentamento del traffico e più vittime rispetto al modello base.

---

<sup>3</sup>[https://www.oregongeology.org/pubs/tsubrochures/SeasideGearhart-EvacBrochure\\_onscreen.pdf](https://www.oregongeology.org/pubs/tsubrochures/SeasideGearhart-EvacBrochure_onscreen.pdf)

## 8.1 Sviluppi Futuri

Diverse sono le limitazioni riguardanti la gestione delle intersezioni, per i pedoni non viene gestito alcun coordinamento pedone-pedone nelle intersezioni, inoltre potrebbero essere implementate delle attese anche per i pedoni nel caso delle auto stiano attraversando.

Un'altra limitazione è l'utilizzo del percorso più breve, altre strategie di *routing* più realistiche potrebbero essere usate come ad esempio Nash equilibrium. Per i percorsi dei pedoni inoltre si potrebbe creare un secondo grafo per ottimizzare i percorsi tramite i marciapiedi.

In questo lavoro ci si è limitati a intersezioni a 4 strade, esclusivamente di tipo AWSC e TWSC, quindi potrebbero essere considerate ulteriori tipi d'intersezioni come ad esempio quelle con 3 strade oppure quelle regolate da semafori.

Nelle strade secondarie degli incroci di tipo TWSC si potrebbe usare un raggio di visione che vada oltre la linea di stop per stabilire meglio la presenza di auto nella via principale.

Un'altra possibile aggiunta è quella di introdurre una fase di decelerazione prima di raggiungere la zona di crossing e una fase di accelerazione quando si ottiene il via libera.

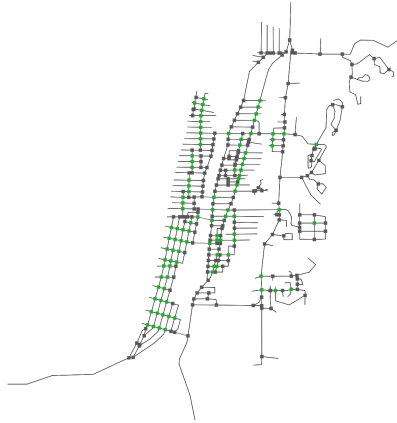
Ulteriori sviluppi futuri potrebbero concentrarsi sulla validazione del modello. Per quanto riguarda la gestione delle intersezioni si potrebbe usare il modello HCM (Council 2000) per comparare il V/C ratio e delay nelle intersezioni rispetto ai valori del piano stradale di Seaside, Oregon (*Seaside Transportation System Plan* 2010).

## Riferimenti bibliografici

- Council, Transportation Research Board National Research (2000). *Highway capacity manual*. TRB Business Office.
- Goto, Yozo et al. (2012). «Tsunami evacuation simulation for disaster education and city planning». In: *Journal of Disaster Research* 7.1, pp. 92–101.
- Greenshields, BD et al. (1935). «A study of traffic capacity». In: *Highway research board proceedings*. Vol. 1935. National Research Council (USA), Highway Research Board.
- Imamura, F, T Suzuki e M Taniguchi (2001). «Development of a simulation method for the evacuation from the tsunami and its application to Aomae, Okushiri Is., Hokkaido». In: *Journal of Japan Society for Natural Disaster Science* 20.2, pp. 183–195.
- Katada, Toshitaka, Noriyuki Kuwasawa, Masanobu Kanai et al. (2004). «Disaster education for Oiwake citizen by using tsunami scenario simulator and evaluation of that method». In: *Sociotechnica* 2, pp. 199–208.
- Katada, Toshitaka, Noriyuki Kuwasawa, Harry Yeh et al. (2006). «Integrated simulation of tsunami hazards». In: *EERI's Eighth US National Conference on Earthquake Engineering*. Vol. 1727.
- Lämmel, Gregor e Gunnar Flötteröd (2009). «Towards system optimum: Finding optimal routing strategies in time-dependent networks for large-scale evacuation problems». In: *Annual Conference on Artificial Intelligence*. Springer, pp. 532–539.
- Makinoshima, Fumiyasu, Fumihiko Imamura e Yoshi Abe (2018). «Enhancing a tsunami evacuation simulation for a multi-scenario analysis using parallel computing». In: *Simulation modelling practice and theory* 83, pp. 36–50.
- Mostafizi, Alireza et al. (2019). «An agent-based vertical evacuation model for a near-field tsunami: Choice behavior, logical shelter locations, and life safety». In: *International journal of disaster risk reduction* 34, pp. 467–479.
- Nguyen, Thi Ngoc Anh et al. (2012). «Simulation of emergency evacuation of pedestrians along the road networks in Nhatrang city». In: *2012 IEEE RIVF international conference on computing & communication technologies, research, innovation, and vision for the future*. IEEE, pp. 1–6.
- Nikolić, Marija et al. (2016). «Probabilistic speed–density relationship for pedestrian traffic». In: *Transportation Research Part B: Methodological* 89, pp. 58–81.
- Older, SJ (1968). «Movement of pedestrians on footways in shopping streets». In: *Traffic engineering & control* 10.4.
- Saito, Takashi e Hiroshi Kagami (2004). «Simulation of evacuation behavior from tsunami utilizing multi agent system». In: *13th World Conference on Earthquake Engineering*, pp. 1–10.
- Seaside Transportation System Plan* (2010). [https://www.cityofseaside.us/sites/g/files/vyhlif6311/f/uploads/seaside\\_tsp\\_final.pdf](https://www.cityofseaside.us/sites/g/files/vyhlif6311/f/uploads/seaside_tsp_final.pdf), Accessed: 12-09-2022.



- Takabatake, Tomoyuki et al. (2017). «Simulated tsunami evacuation behavior of local residents and visitors in Kamakura, Japan». In: *International journal of disaster risk reduction* 23, pp. 1–14.
- Titov, Vasily V e Frank I Gonzalez (1997). «Implementation and testing of the method of splitting tsunami (MOST) model». In.
- Usuzawa, H, F Imamura e N Shuto (1997). «Development of the method for evacuation numerical simulation for tsunami events». In: *Annual meeting of the Tohoku Branch technology research conference, Japan society of civil engineers*, pp. 430–431.
- Wang, Haizhong et al. (2016). «An agent-based model of a multimodal near-field tsunami evacuation: Decision-making and life safety». In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 64, pp. 86–100.
- Wang, Zhenqiang e Gaofeng Jia (2021). «A novel agent-based model for tsunami evacuation simulation and risk assessment». In: *Natural hazards* 105.2, pp. 2045–2071.
- Weidmann, Ulrich (1993). «Transporttechnik der fußgänger: transporttechnische eigenschaften des fußgängerverkehrs, literaturlauswertung». In: *IVT Schriftenreihe* 90.
- Wijerathne, MLL et al. (2013). «HPC enhanced large urban area evacuation simulations with vision based autonomously navigating multi agents». In: *Procedia Computer Science* 18, pp. 1515–1524.
- Yeh, Harry (2010). «Gender and age factors in tsunami casualties». In: *Natural Hazards Review* 11.1, pp. 29–34.



(a) intersezioni classificate per numero di strade: verde a 4 strade (98 nodi) e grigio a 3 strade (206 nodi).



network-based

(b) intersezioni a 4 strade classificate in base al tipo: AWSC in blu (20 nodi) e TW-SC in rosso (78 nodi).

Figura 7: Intersezioni.

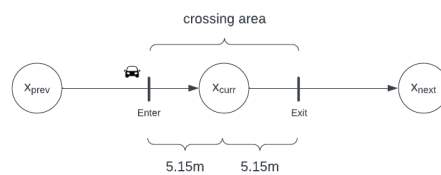


Figura 8: Zona di attraversamento di un'intersezione.

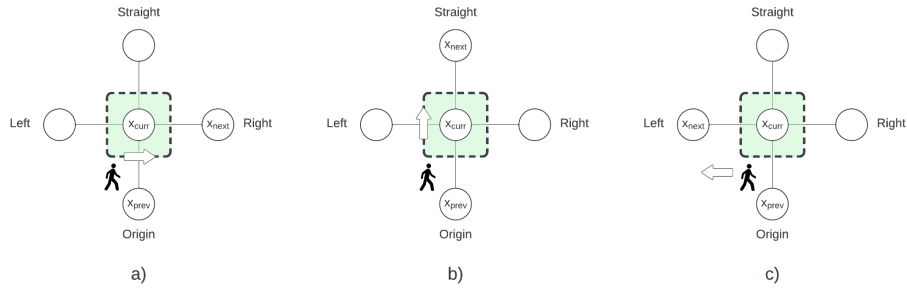


Figura 9: Esempio dei tre casi di attraversamento dal punto di vista del pedone che si trova sul marciapiede sinistro a) il pedone si trova sul lato sinistro e attraversa sul link collegato a origin. b) il pedone attraversa sul lato sinistro dell'intersezione, quindi sul link collegato a left. c) il pedone segue il marciapiede sulla sinistra senza occupare alcun attraversamento pedonale.

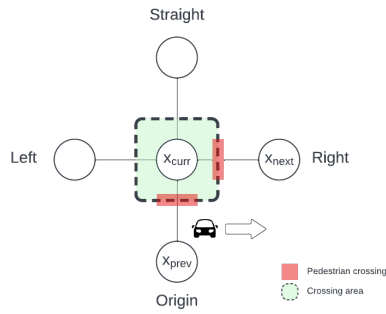


Figura 10: Esempio degli attraversamenti pedonali (in rosso) che vanno controllati per poter passare data la tripla  $(x_{prev}, x_{curr}, x_{next})$  di un'auto  $x$ .

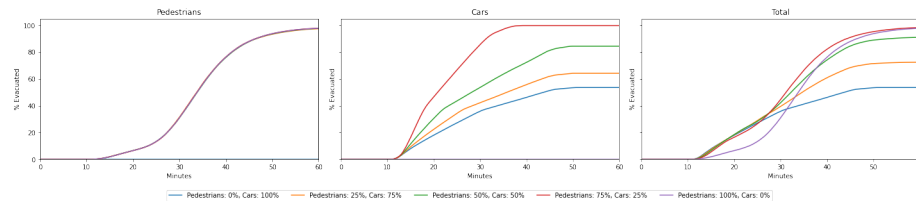


Figura 11: Percentuale degli evacuati nel tempo al variare del numero di agenti con il modello base.

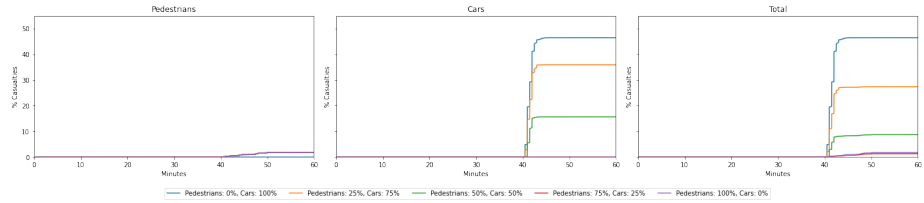


Figura 12: Percentuale delle vittime nel tempo al variare del numero di agenti con il modello base.

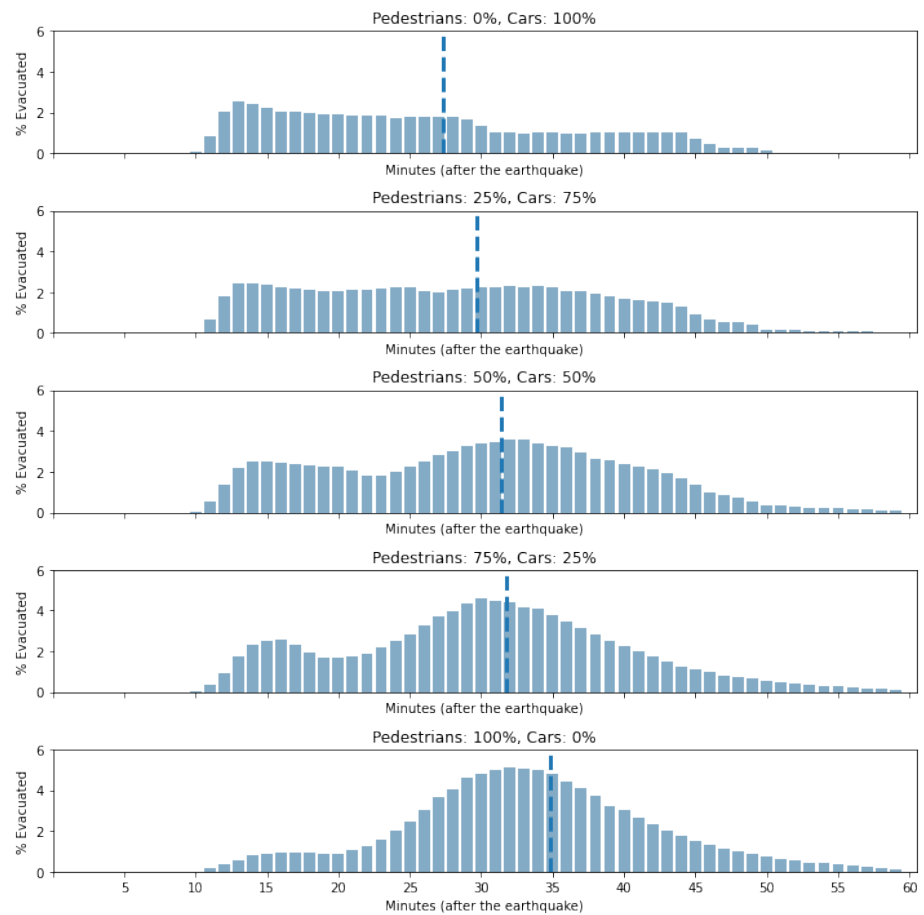


Figura 13: Distribuzione del tempo di evacuazione in percentuale al variare del numero di agenti e tempo medio di evacuazione.

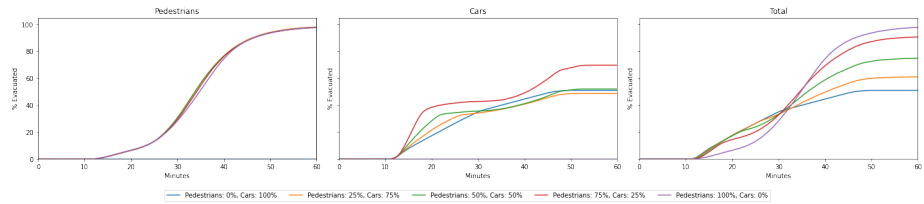


Figura 14: Percentuale degli evacuati nel tempo al variare del numero di agenti con il modello esteso.

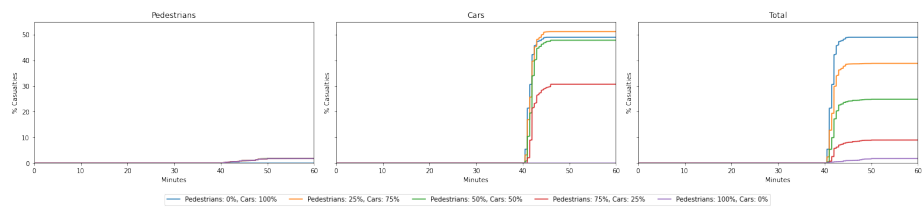


Figura 15: Percentuale delle vittime nel tempo al variare del numero di agenti con il modello esteso.

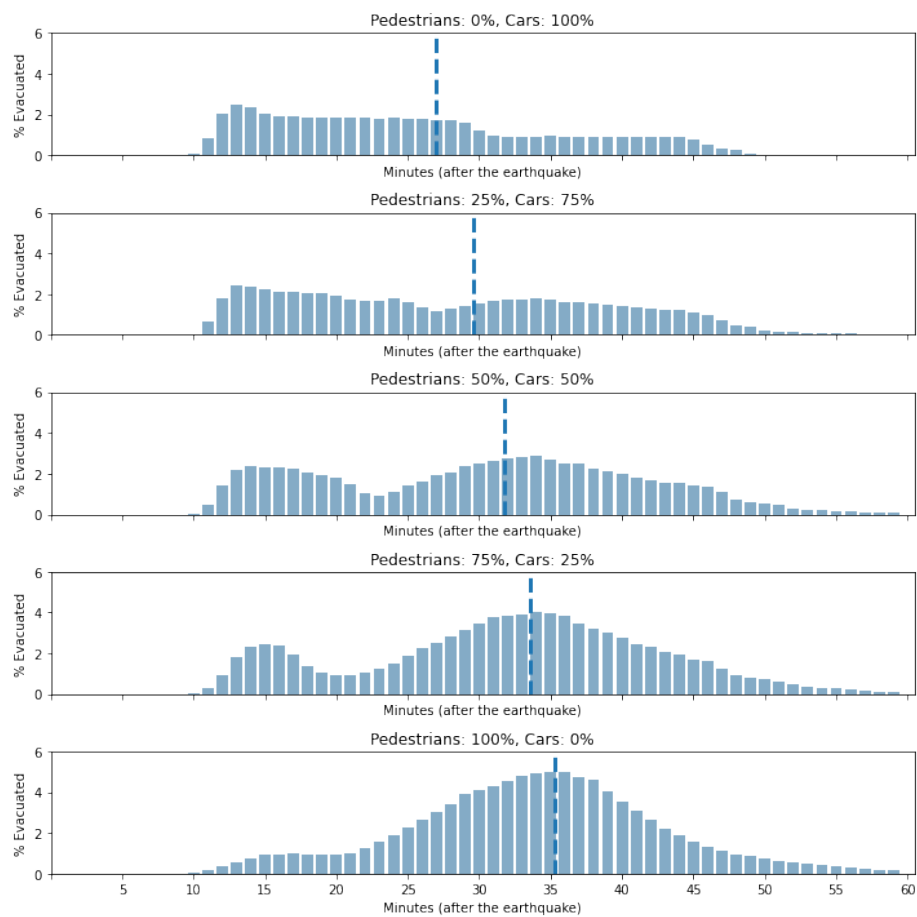


Figura 16: Distribuzione del tempo di evacuazione in percentuale al variare del numero di agenti e tempo medio di evacuazione.

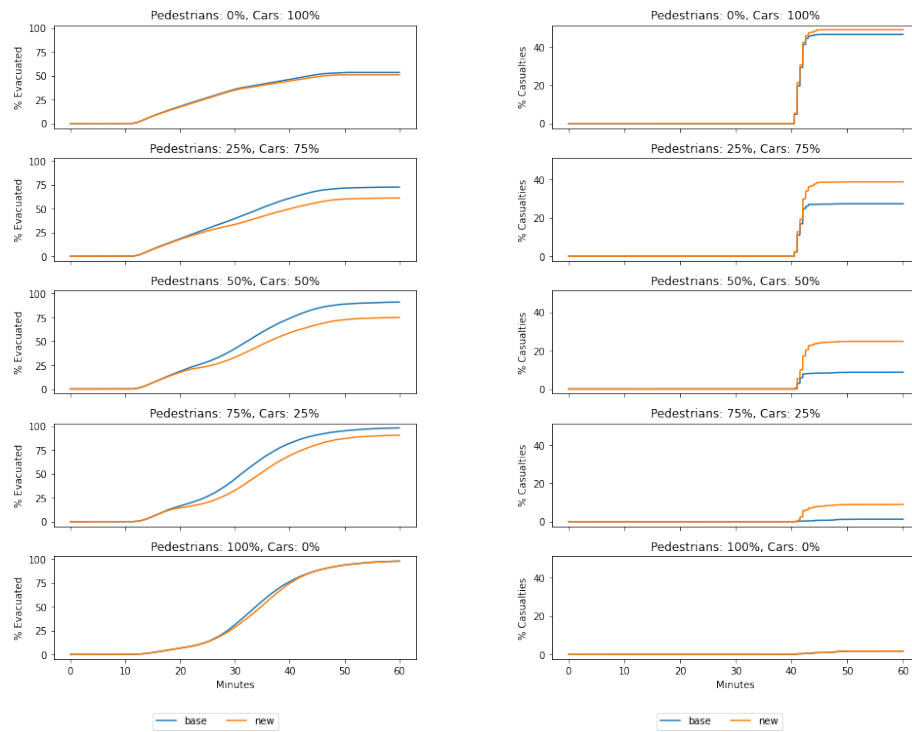


Figura 17: Comparazione tra modello base e modello esteso delle percentuali di evacuati (sinistra) e di vittime (destra) al variare del numero di agenti.

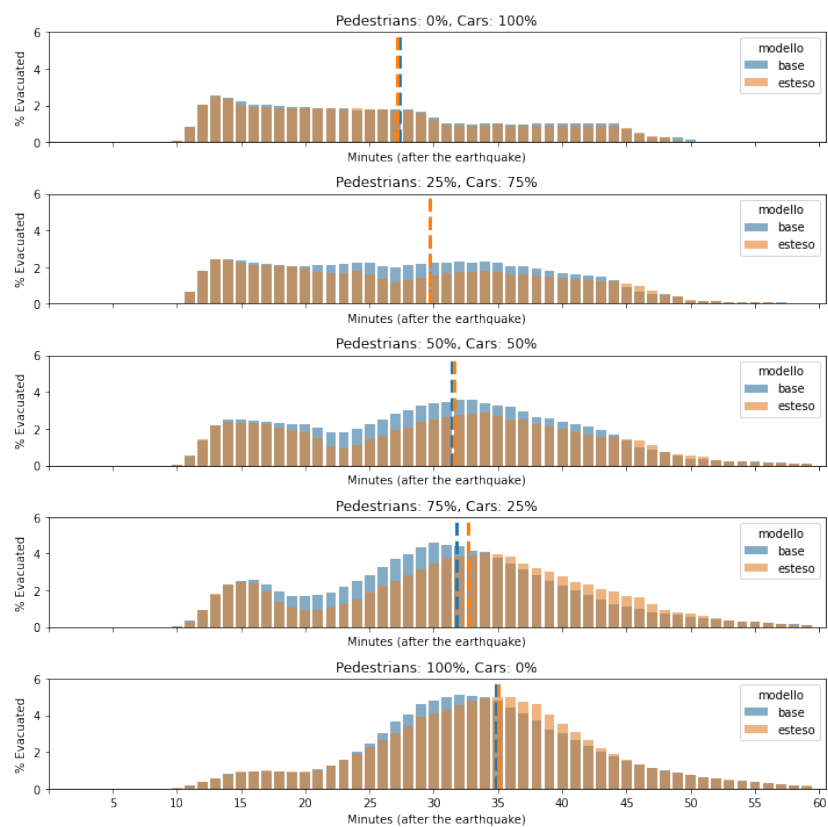


Figura 18: Comparazione delle distribuzioni dei tempi di evacuazione al variare del numero di agenti.



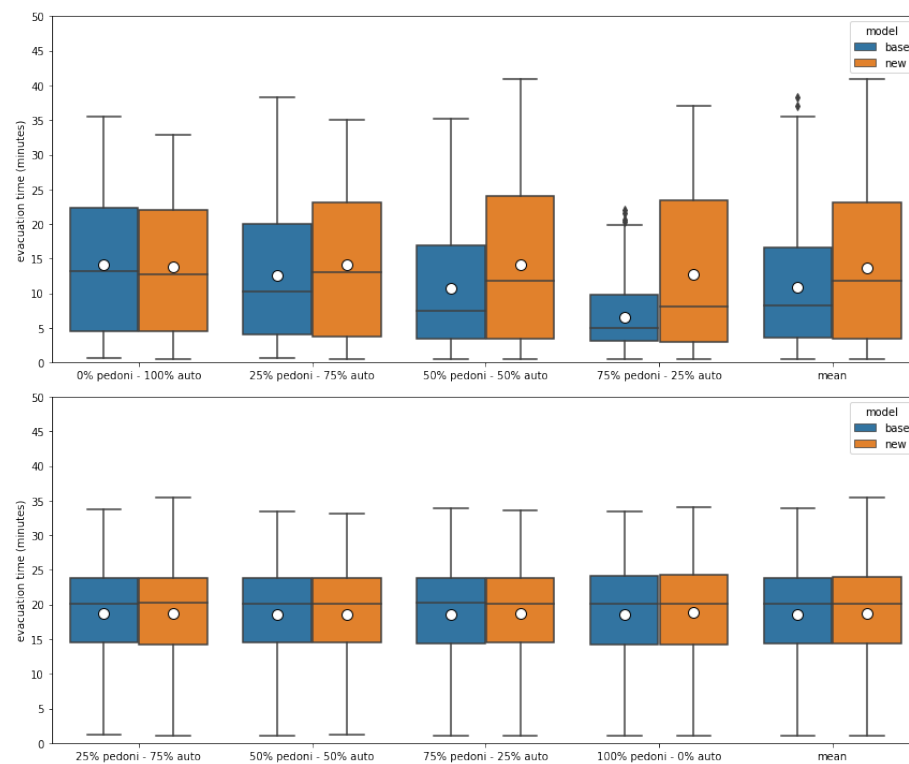


Figura 19: Comparazione dei tempi di evacuazione al variare del numero di agenti e nel caso medio distinti per auto (sopra) e pedoni (sotto).

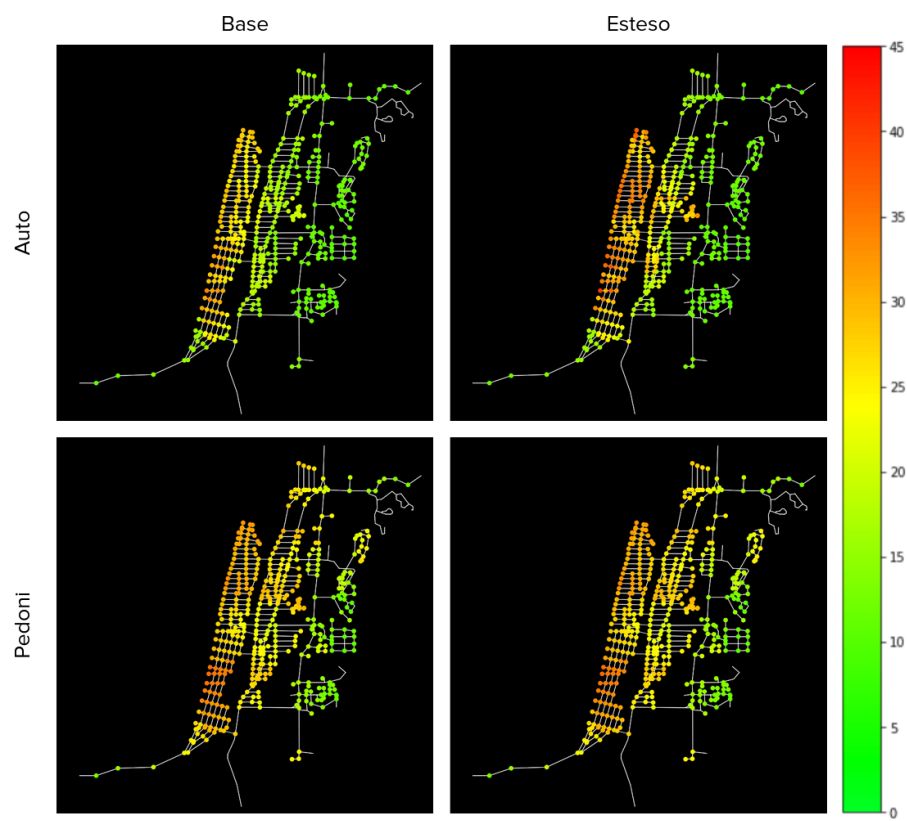


Figura 20: Comparazione dei tempi di evacuazione mediati tra gli agenti che partono dallo stesso nodo della rete.

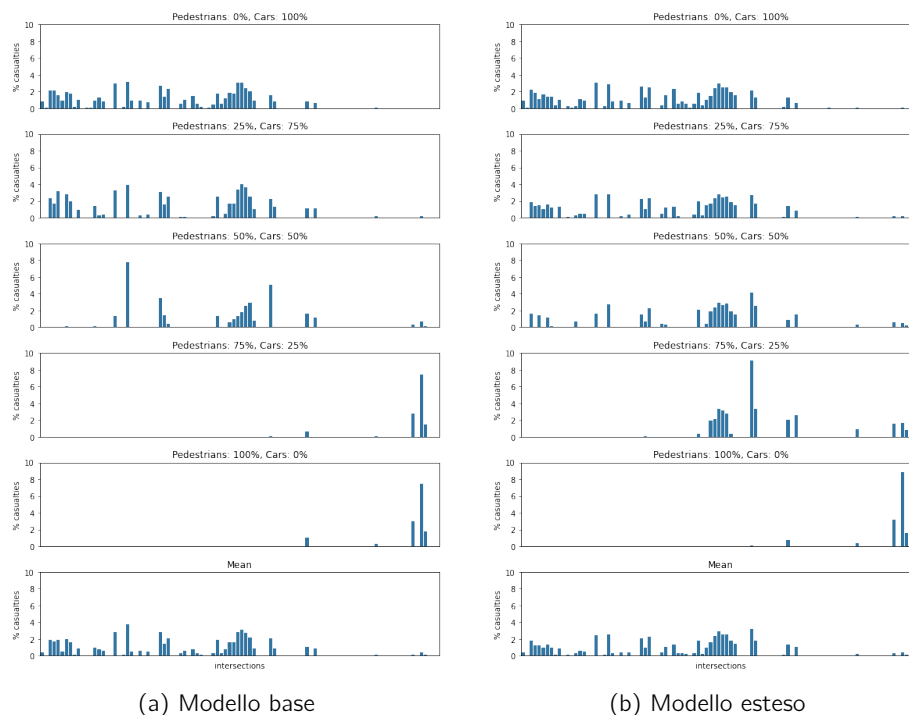


Figura 21: Comparazione delle percentuali di mortalità nelle intersezioni al variare del numero di auto e pedoni. Le intersezioni sono ordinate per distanza crescente dal mare.

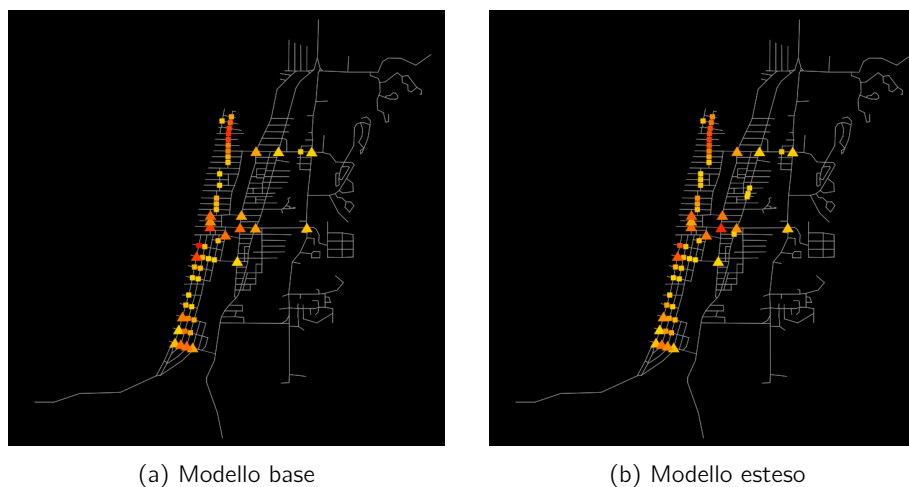
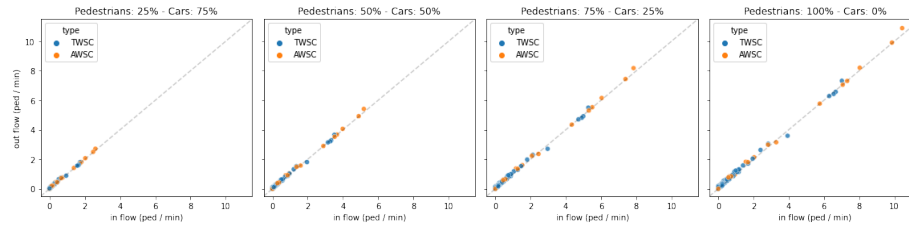
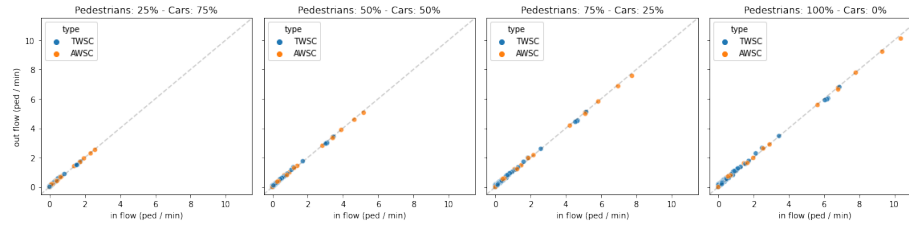


Figura 22: Percentuali di vittime medie per ogni intersezione distinte per tipo: TWSC (quadrati), AWSC (triangoli).

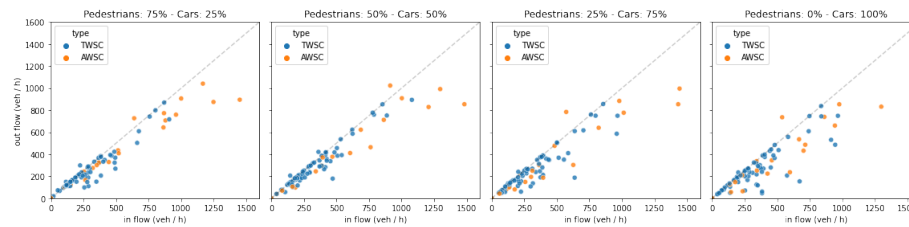


(a) Modello base

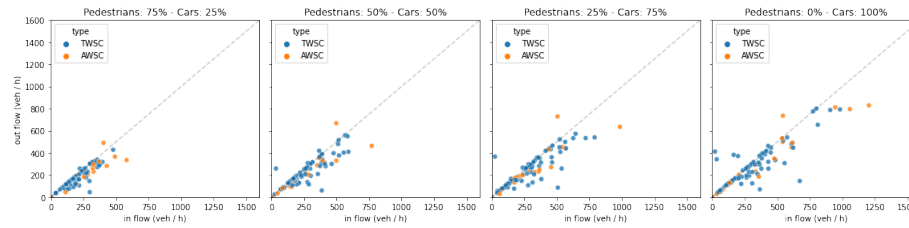


(b) Modello esteso

Figura 23: Confronto tra il flusso dei pedoni in entrata e in uscita per ogni intersezione al crescere del numero di pedoni.



(a) Modello base



(b) Modello esteso

Figura 24: Confronto tra il flusso delle auto in entrata e in uscita per ogni intersezione al crescere del numero di auto.



Figura 25: Tempi di attesa nelle intersezioni al variare del numero di auto, differenziando AWSC (triangoli) e TWSC (cerchi).

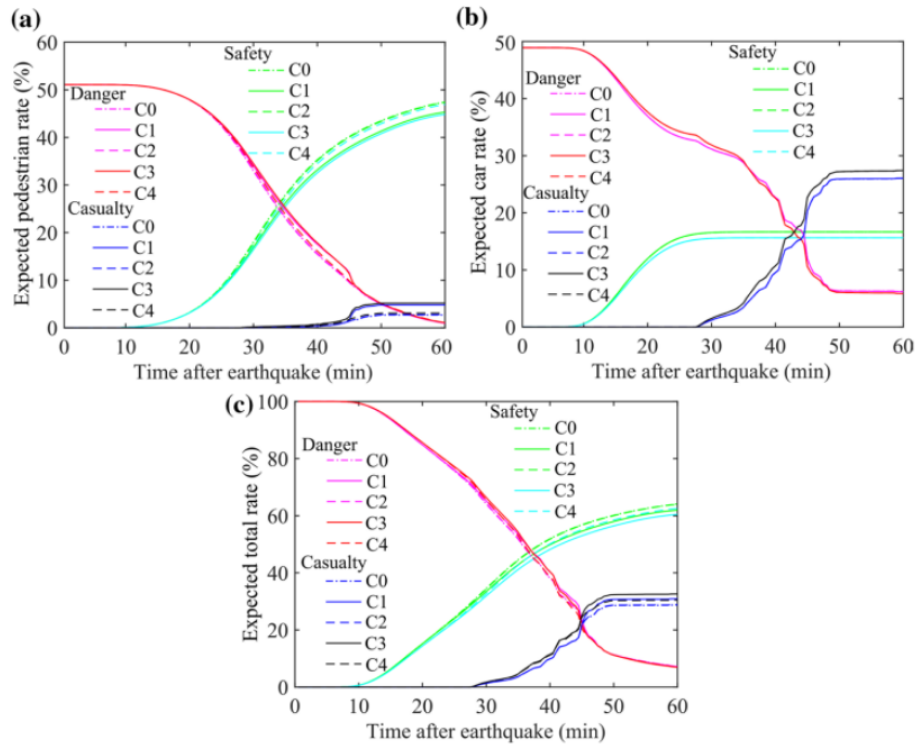


Figura 26: Confronto della percentuali di evacuati e di vittime per auto, pedoni e totale per il modello di Z. Wang e Jia (2021).

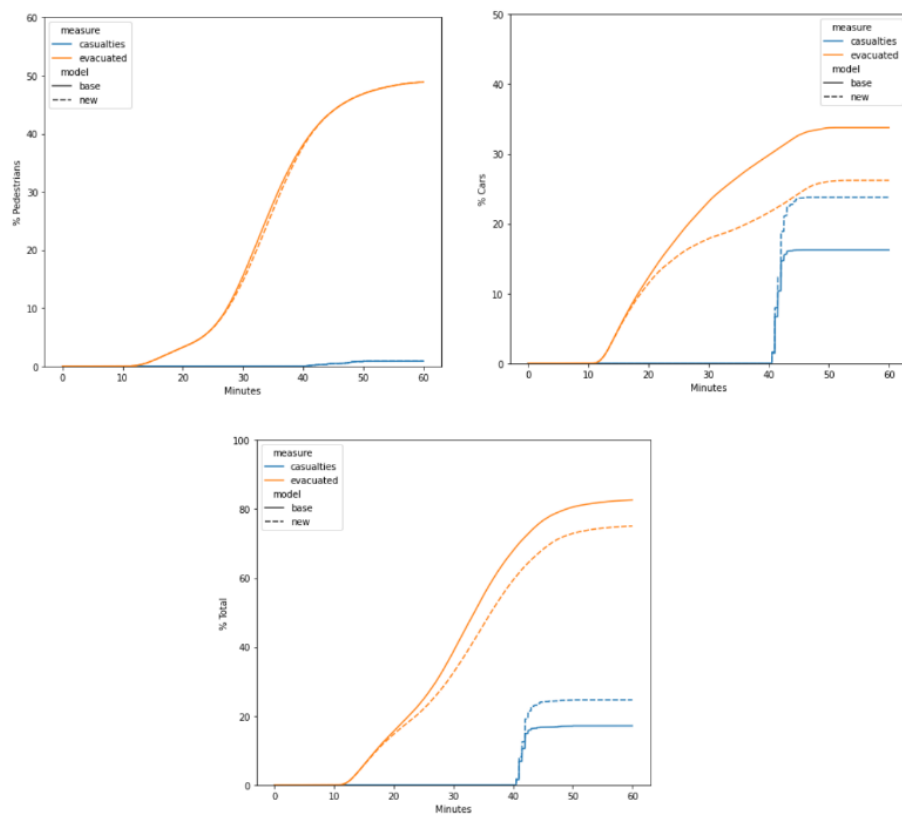


Figura 27: Confronto della percentuali di evacuati e di vittime per auto, pedoni e totale per modello base ed esteso.