



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>1</b>
<b>2</b>	<b>Background</b>	<b>1</b>
2.1	Rete stradale / Griglia . . . . .	1
2.2	Distribuzione della Popolazione . . . . .	2
2.3	Rifugi . . . . .	2
2.4	Inondazione da Tsunami . . . . .	2
2.5	Casualty Model . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Stato dell'arte</b>	<b>3</b>
3.1	Velocità dei Pedoni . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Descrizione del Modello</b>	<b>5</b>
4.1	Ambiente . . . . .	5
4.2	Agenti . . . . .	6
4.2.1	Residenti . . . . .	6
4.2.2	Pedoni . . . . .	7
4.2.3	Auto . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Estensione del Modello</b>	<b>8</b>
5.1	Rete Stradale . . . . .	9
5.2	Gestione degli Intersezioni . . . . .	10
5.2.1	Pedoni . . . . .	12
5.2.2	Auto . . . . .	12
5.2.3	AWSC . . . . .	13
5.2.4	TWSC . . . . .	14
5.3	Velocità dei Pedoni . . . . .	14
<b>6</b>	<b>Simulazione</b>	<b>14</b>
6.1	Parametri Fissati . . . . .	15
6.2	Parametri Variabili . . . . .	15
<b>7</b>	<b>Analisi</b>	<b>16</b>
7.1	Modello Base . . . . .	16
7.2	Modello Esteso . . . . .	19
7.3	Comparazione Modello Base e Modello Esteso . . . . .	21
7.4	Analisi Intersezioni . . . . .	27
<b>8</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>31</b>

# 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 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

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).

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.

Un altro modello grid-based è quello di Mas et al. (2012) in cui è stato proposto un modello di evacuazione statica che da un insieme di informazioni calcola una mappa dei tempi di evacuazione.

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.

In molti modelli vengono considerati solo pedoni oppure pedoni e auto, ma senza gestire le interazioni tra loro.

Goto et al. (2012) hanno considerato gli individui raggruppati in famiglie e categorizzato le famiglie in: pedoni lenti, pedoni normali, motociclisti e occupanti di un'auto e inoltre hanno modellato le interazioni dei diversi agenti all'interno di una corsia stradale.

Z. Wang e Jia (2021) hanno ripreso il lavoro di Goto et al. (2012) e modificato la gestione delle interazioni proponendo un modello che distingue diversi stati di traffico: *vehicle-dominated*, *balanced*, and *pedestrian-dominated*. Inoltre per rendere il modello più realistico sono stati considerati i danni sulla rete stradale causati dal terremoto che si verifica prima dello tsunami.

Altri lavori hanno analizzato come i tempi di partenza influenzano il tempi di evacuazione e il numero di vittime (Takabatake et al. 2017; H. Wang et al. 2016).

### 3.1 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 sono disponibili, soprattutto nei casi di emergenza.

Perciò analizzeremo come questo problema viene trattato da metodi allo stato dell'arte per la simulazione di evacuazione di tsunami.

Alcuni lavori distinguono i pedoni in gruppi in base alla loro velocità sulla base di questionari o altri lavori riguardanti il comportamento dei pedoni. Takabatake et al. (2017) hanno effettuato una distinzione sull'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. 1b). Goto et al. (2012), invece hanno raggruppato i pedoni in famiglie che sono distinte in *normal walkers*, con velocità massima di 1.5 m/s, e *slow walkers* (famiglie con disabili o anziani), con velocità massima di 0.75 m/s (Fig. 1c).

Altri lavori hanno assunto che la velocità sia distribuita normalmente. Z. Wang e Jia (2021) hanno considerato una distribuzione 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  $\sigma_p \sim \mathcal{U}(0.1, 0.6)$ .

In questi lavori la velocità viene aggiustata in base alla densità in un'area davanti ai pedoni (Fig. 1), tramite la seguente formula  $\rho = n/(L \times W)$ , dove  $n$  è il numero di persone nell'area  $L \times W$ ,  $L$  è la lunghezza di ricerca e  $W$  la larghezza della strada. La lunghezza solitamente assume valori tra 3 e 5 m.

Lämmel, Rieser et al. (2010) invece hanno introdotto un modello network-based in cui in 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  $v = \min[v_{max}, FC/D]$  (Fig. 1a), dove  $D$  la densità e  $FC$  è la *flow capacity*. I parametri di tale modello sono stati scelti approssimando la curva velocità-densità del modello a code a quella del diagramma fondamentale di Weidmann (1993). Inoltre è stata considerata una velocità massima di 1.66 m/s poichè i valori considerati da Weidmann sono relativi al flusso dei pedoni in condizioni normali e non in caso di emergenza.

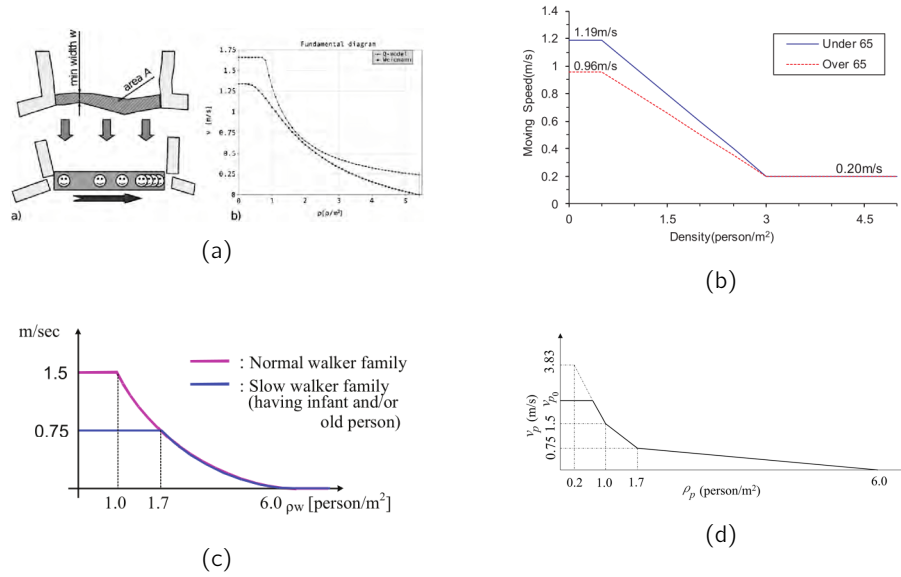


Figura 1: Relazione velocità-densità. a) Lämmel, Rieser et al. (2010), b) Takabatake et al. (2017), c) Goto et al. (2012), d) Z. Wang e Jia (2021).

## 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. 2).

### 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,

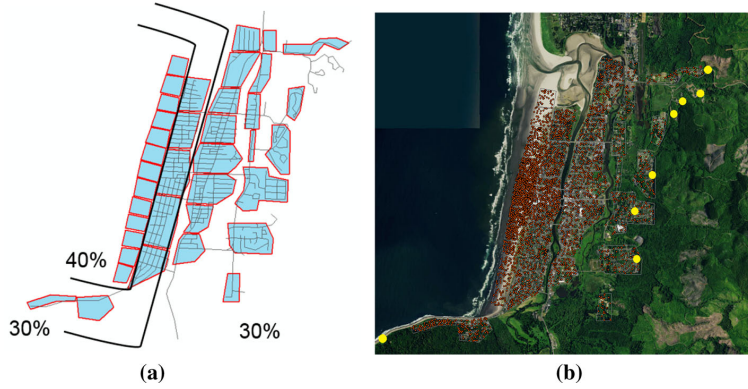


Figura 2: Distribuzione della popolazione nello scenario considerato. (a) Aree in cui è distribuita la popolazione divise nelle tre macro aree: costa, centro, zona residenziale. (b) Immagine satellitare con la distribuzione della popolazione.

con una sola corsia e con una velocità limite di 55 km/h e ha 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.

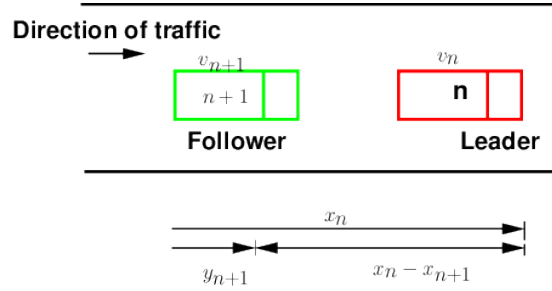


Figura 3: Schema generale dei modelli *car-following*, dove  $n+1$  è il veicolo corrente e  $n$  quello di fronte,  $v_{n+1}$ ,  $v_n$  sono le rispettive velocità, mentre  $x_{n+1}$ ,  $x_n$  sono le rispettive posizioni e  $x_n - x_{n+1}$  è la distanza tra i due veicoli.

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 descritte le modifiche e le aggiunte effettuate al modello base, ma prima verranno evidenziate le limitazioni e le mancanze del modello anche rispetto allo stato dell'arte.

Molte assunzioni sono poco realistiche come la velocità costante dei pedoni, tutte le strade a senso unico e l'assenza di interazioni nelle intersezioni. Inoltre

viene assunto che tutti gli agenti conoscano il percorso più breve per il rifugio. Un'altra limitazione riguarda le interazioni tra i vari tipi di agenti. Questo modello considera esclusivamente le interazioni auto-auto tramite il modello General Motors, ma non prevede nessuna interazione pedone-pedone o pedone-auto.

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**

Prima di descrivere le varie aggiunte in questa sezione verranno elencate le varie modifiche che sono state effettuate alla 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).

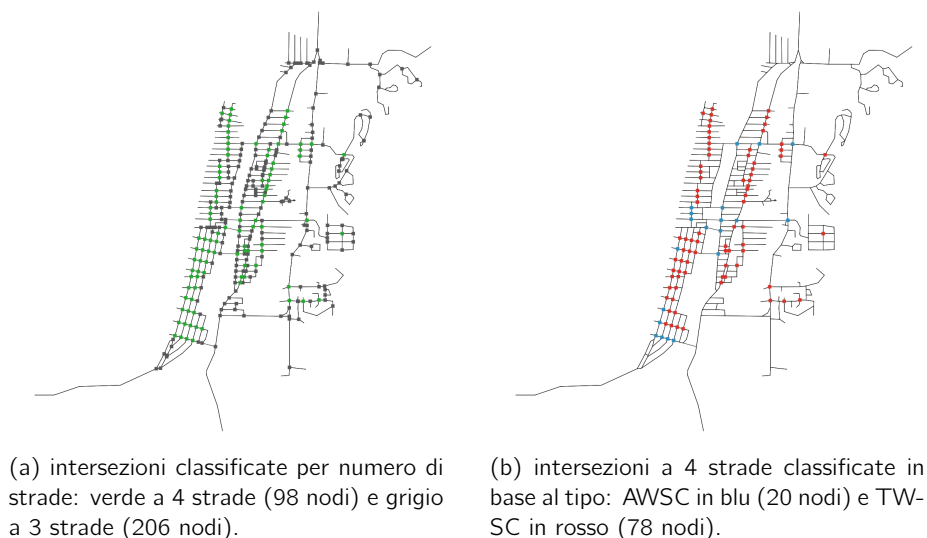


Figura 4: Tipi di intersezioni.

## 5.2 Gestione degli Intersezioni

Per la gestione delle intersezioni sono stati considerati esclusivamente gli incroci a 4 strade e trattati come intersezioni di tipo AWSC (All Way Stop Controlled) o TWSC (Two Way Stop controlled).

Tramite l'utilizzo di OpenStreetMap e GoogleMaps, sono state estratte manualmente le informazioni circa la posizione e nel case dei TWSC la direzione di precedenza di tali tipi di incroci per la città di Seaside, ottenendo la seguente (Fig. 4a).

Inoltre nelle intersezioni è stata introdotta una zona di attraversamento per la gestione delle interazioni tra auto e pedoni. È stato assunto che gli incroci abbiano lunghezza e larghezza pari alla larghezza della strada (10.3 m). Dal momento che la rappresentazione della strada è network-based è stato deciso che la zona inizia prima dell'incrocio e finisce dopo dell'incrocio a una distanza pari alla metà della larghezza (5.15 m) (Fig. 5).

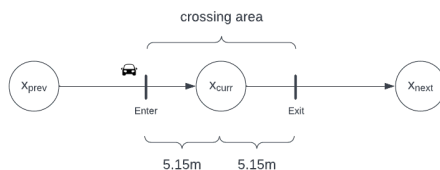


Figura 5: Zona di attraversamento di un'intersezione.

Per rappresentare l'attraversamento dei pedoni e delle auto sono state aggiunte le seguenti informazioni ad ogni intersezione  $i$  a 4 strade:

- $C_{ij}$  = numero di pedoni che stanno usando l'attraversamento pedonale che si trova sulla strada che va dall'incrocio  $i$  all'incrocio  $j$ .
- $Arrival_i$  = 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 a  $i$  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  $x_{side}$  ha tre direzioni in cui poter andare: *left, straight, right* (Fig. 6):

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

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

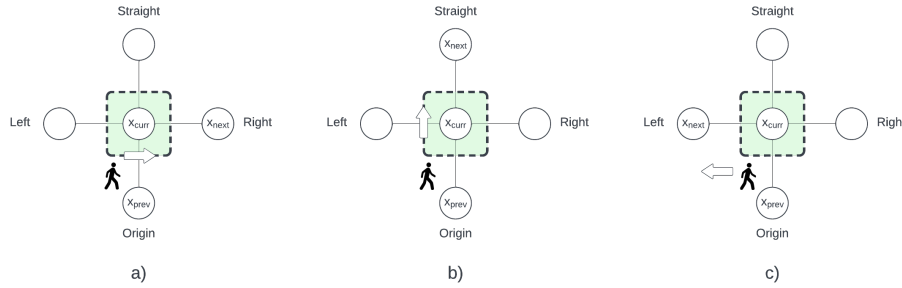


Figura 6: Esempio dei tre casi di attraversamento dal punto di vista del pedone che si trova sul marciapiede sinistro a) il pedone si trova sul lato sinistro e attraversa sul link collegato a origin. b) il pedone attraversa sul lato sinistro dell'incrocio, quindi sul link collegato a left. c) il pedone segue il marciapiede sulla sinistra senza attraversare.

### 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 schedata e una volta avuto il via libera viene aggiunta a  $Crossing_i$  e rimossa una volta lasciato l'incrocio.

Le auto quando raggiungono la zona di attraversamento vengono aggiunte alla coda  $Arrival_i$  e schedate in base al tipo d'intersezione (Sec. 5.2.3), una volta avuto il via libera le auto sono aggiunte a  $Crossing_i$  e rimosse una volta lasciato

l'incrocio. Se ci sono pedoni che stanno attraversando le strade  $(x_{curr}, x_{next})$  e  $(x_{prev}, x_{curr})$  l'auto dovrà attendere, quindi potrà passare se e solo se  $C_{x_{curr}, x_{prev}} = 0$  e  $C_{x_{curr}, x_{next}} = 0$  (Fig. 7).

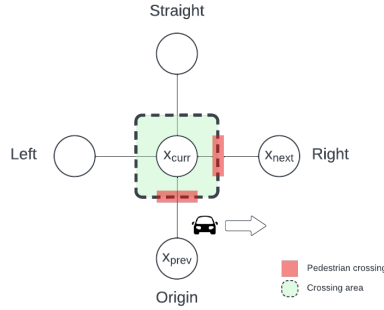


Figura 7: Esempio degli attraversamenti pedonali (in rosso) che vanno controllati per poter passare data la tripla  $(x_{prev}, x_{curr}, x_{next})$  di un'auto  $x$ .

### 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 precedenza 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* → *left* → *straight*) quali auto possono passare contemporaneamente o meno (Tab. 1, Tab. 2, Tab. 3).

Car1: Origin	Car2: Left
Left	Left
Right	Right
Right	Straight
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*.

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

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*.

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

Non avendo a disposizione dati empirici è stato deciso di usare l'approccio di Z. Wang e Jia (2021). Il calcolo della densità è stato effettuato considerando un'area di ricerca di dimensioni 4 m x 1.5 m come in Goto et al. (2012) e Z. Wang e Jia (2021).

## 6 Simulazione

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



menti.

## 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.

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

Sono state provate le seguenti combinazioni di auto e pedoni:

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

Parametri per il comportamento dei pedoni:

- **free\_speed:** velocità massima...
- **side:** lato del marciapiede all'inizio della simulazione (0 sinistro e 1 destro). Durante la simulazione può variare.

Per via di questa randomicità 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 8 e 9 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 8, 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 le evacuazioni totali invece risulta che la configurazione che permette di evacuare più agenti sia la 50% - 50%, mentre la configurazione 0% - 100% sia la peggiore.

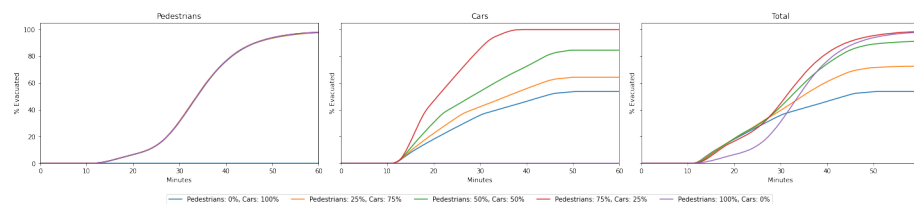


Figura 8: Percentuale degli evacuati nel tempo al variare del numero di agenti con il modello base.

Per quanto riguarda le percentuali di mortalità (Fig. 9), per i pedoni rimangono sotto al 2% in tutti i casi. Per le auto invece nei casi con una percentuale di auto di 25% e 50% non c'è nessuna vittima, mentre con una percentuale di 75% si ha una mortalità di 1.8% e nel caso peggiore, ovvero 100%, si raggiunge circa il 10% di vittime. Infine osservando le morti totali risulta che il caso migliore sia uno scenario bilanciato tra auto e pedoni, mentre i casi con una mortalità maggiore siano quelli con solo pedoni o solo auto.

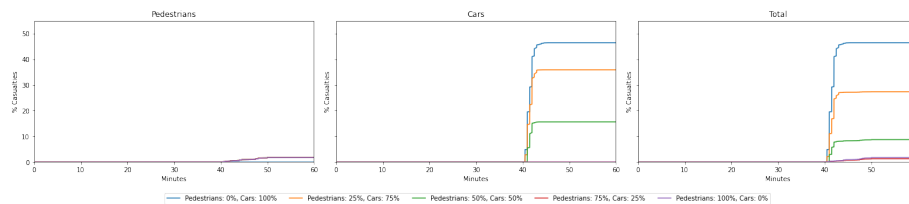


Figura 9: Percentuale delle vittime nel tempo al variare del numero di agenti con il modello base.

Nella figura 10 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 tempo medio di 35 minuti e all'aumentare del numero di auto il tempo medio di evacuazione si abbassa fino a 28 minuti nel caso con solo auto e la distribuzione tende ad appiattirsi. Inoltre si può notare come al diminuire del numero di auto considerate minore è la percentuale di agenti che evacuano negli ultimi minuti. Questo poichè, come già evidenziato nella figura 8, le auto evacuano più velocemente dei pedoni.

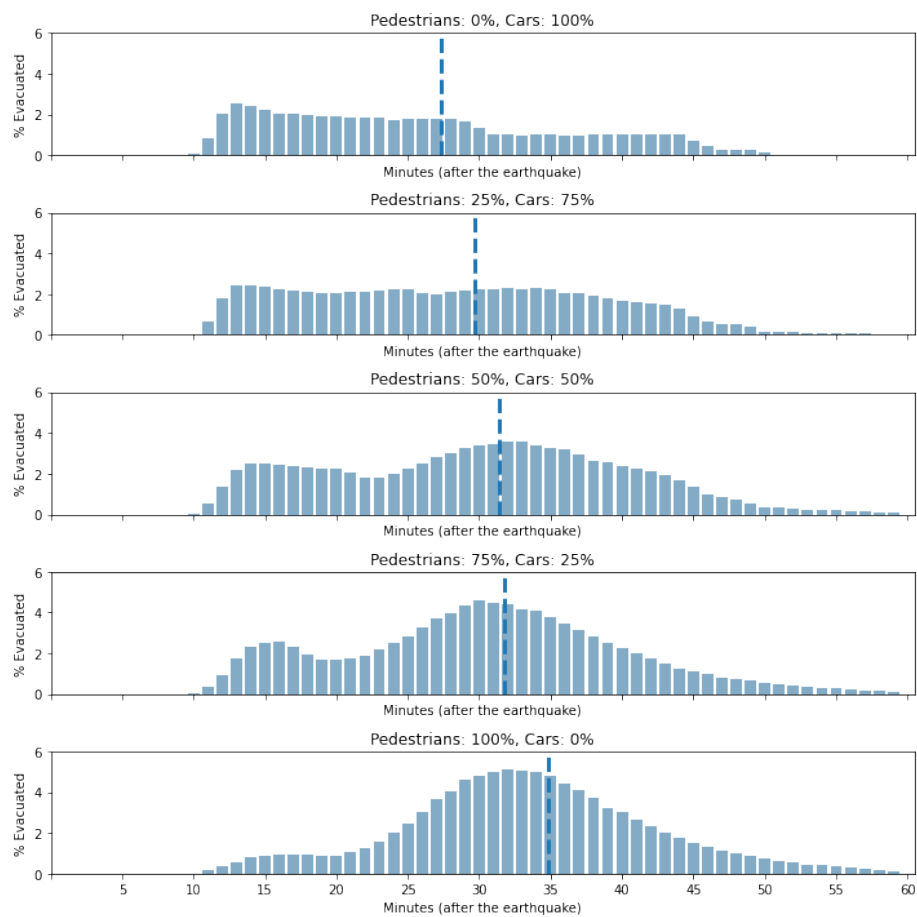


Figura 10: Distribuzione del tempo di evacuazione in percentuale al variare del numero di agenti e tempo medio di evacuazione.

## 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. 11). Si può notare una differenza significativa tra il minuto 30 e il minuto 40 per il caso 100% pedoni.

In generale il numero di auto evacuate è molto più basso rispetto a quello dei pedoni. Il caso con una percentuale di auto evacuate maggiore è quello con il 25% di auto e il 75% di pedoni. 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 75% e 50% di auto. In tutti i casi le auto evacuano prima dei pedoni avendo una velocità superiore.

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

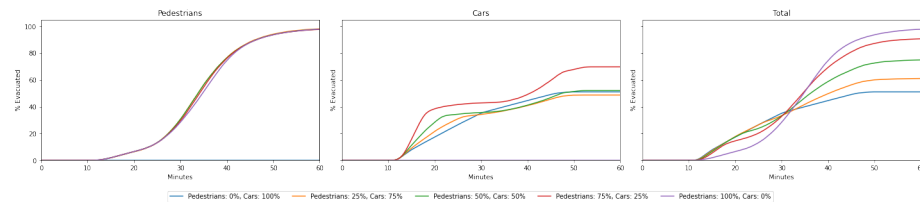


Figura 11: Percentuale degli evacuati nel tempo al variare del numero di agenti con il modello esteso.

Nella figura 12 si può vedere come al variare del numero di pedoni considerati non ci siano differenze significative, mentre per le auto il numero 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 quello dei pedoni, con un massimo di circa 37% nel caso con 75% di auto. Il numero di vittime totali cresce al crescere del numero di auto.

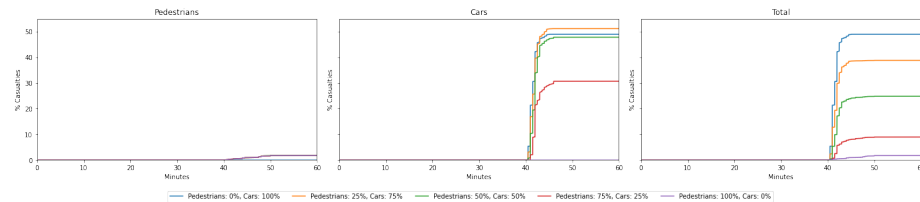


Figura 12: Percentuale delle vittime nel tempo al variare del numero di agenti con il modello esteso.

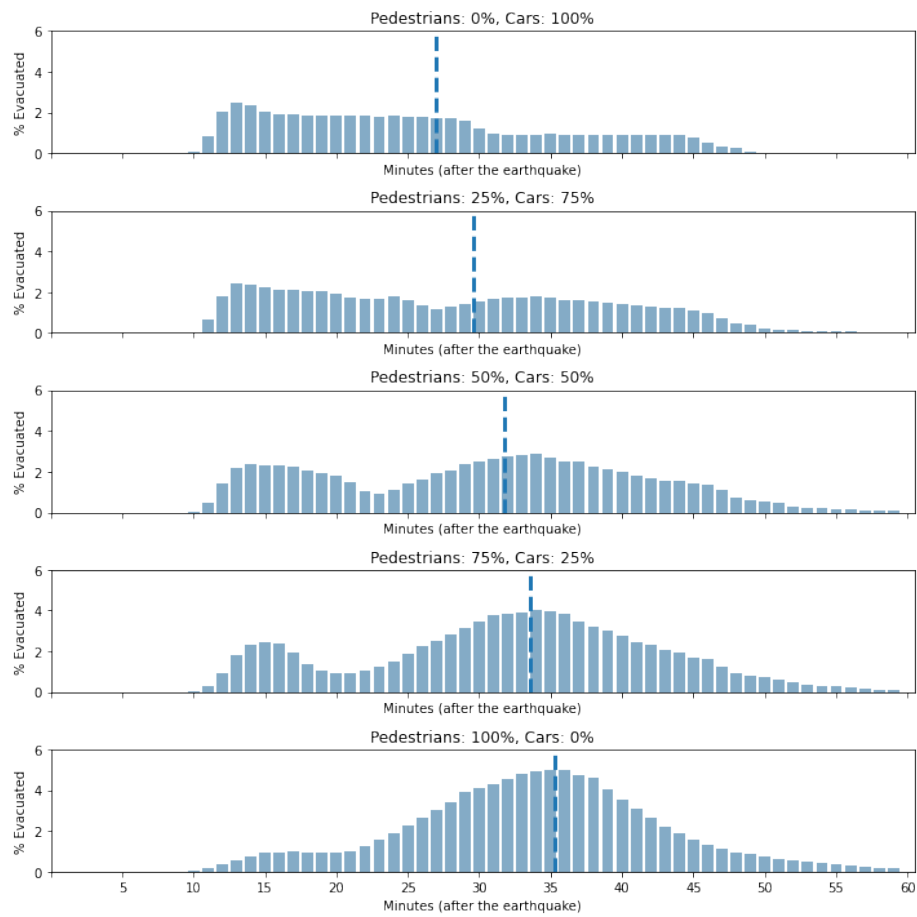


Figura 13: Distribuzione del tempo di evacuazione in percentuale al variare del numero di agenti e tempo medio di evacuazione.

Nella figura 13 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 all'aumentare del numero di auto e la percentuale di evacuati nel tempo si appiattisce.

### 7.3 Comparazione Modello Base e Modello Esteso

In questa sottosezione verranno comparati il modello base con il modello esteso analizzando, le percentuali di evacuati e di morti nel tempo al variare del numero di auto e pedoni per poi passare a comparazioni spaziali, in particolare mostrando l'efficienza delle intersezioni e l'effetto causato durante la simulazione.

#### Percentuale di Evacuati e di Vittime

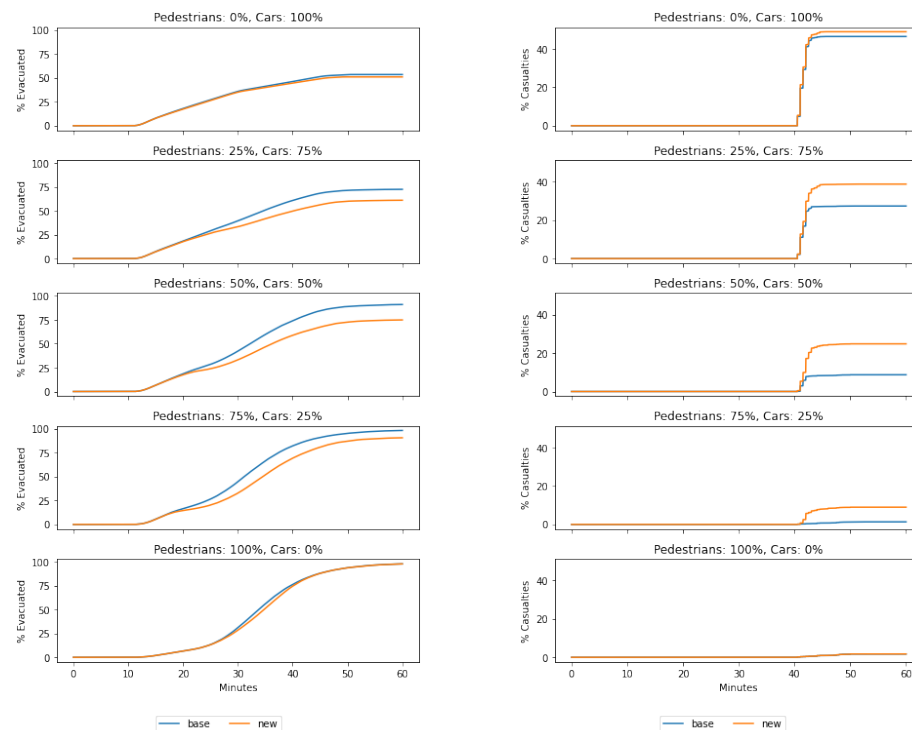


Figura 14: Comparazione tra modello base e modello esteso delle percentuali di agenti evacuati (sinistra) e di agenti morti (destra) al variare del numero di agenti.

Osservando la figura 14 è possibile comparare le percentuali di evacuati e morti a diversi split 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. Per entrambi i modelli la percentuale di evacuati decresce all'aumentare del numero di auto considerate, mentre la percentuale di vittime cresce. Inoltre per entrambi i modelli le prime vittime si verificano dopo 40 min.

Gli unici casi in cui il modello esteso si avvicina ai risultati del modello base sono il caso con solo pedoni ed il caso 75%-25%.

## 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 (Fig. 15). Nel modello esteso si ha un numero di evacuati più alto negli ultimi minuti e in generale la percentuale di evacuati nel tempo è mediamente più bassa rispetto al modello base, a eccezione del caso con solo pedoni. Rispetto al modello base, il modello esteso presenta un tempo di evacuazione medio più alto nei casi con sia pedoni che auto.

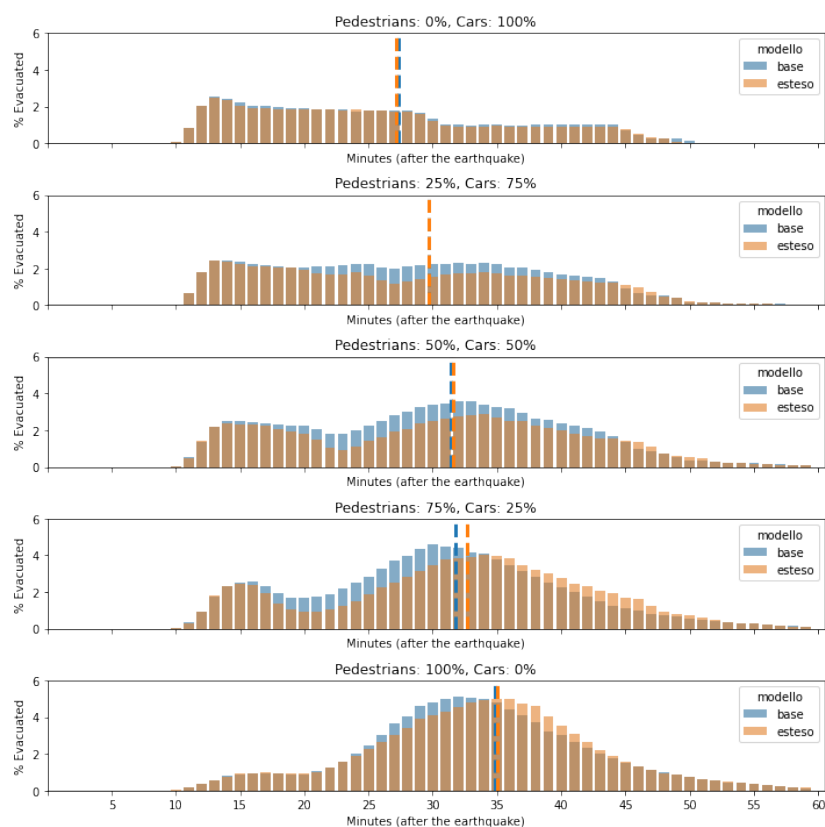


Figura 15: Comparazione delle distribuzioni dei tempi di evacuazione al variare del numero di agenti.



## Tempo Impiegato per Evacuare

Un' ulteriore comparazione riguarda il tempo impiegano auto e pedoni per evacuare. Come mostrato nella figura 16 per quanto riguarda le auto, il modello base presenta un andamento descrescente per il tempo medio richiesto per evacuare al diminuire del numero di auto considerate. Le auto impiegano in media tempi maggiori con il modello esteso rispetto a quello base. 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 21 minuti per evacuare e un massimo di 36 minuti. Per le auto invece il tempo medio di evacuazione per il modello base è 10 minuti e per il modello esteso 16 minuti, con tempi massimi rispettivamente di 32 e 42 minuti.

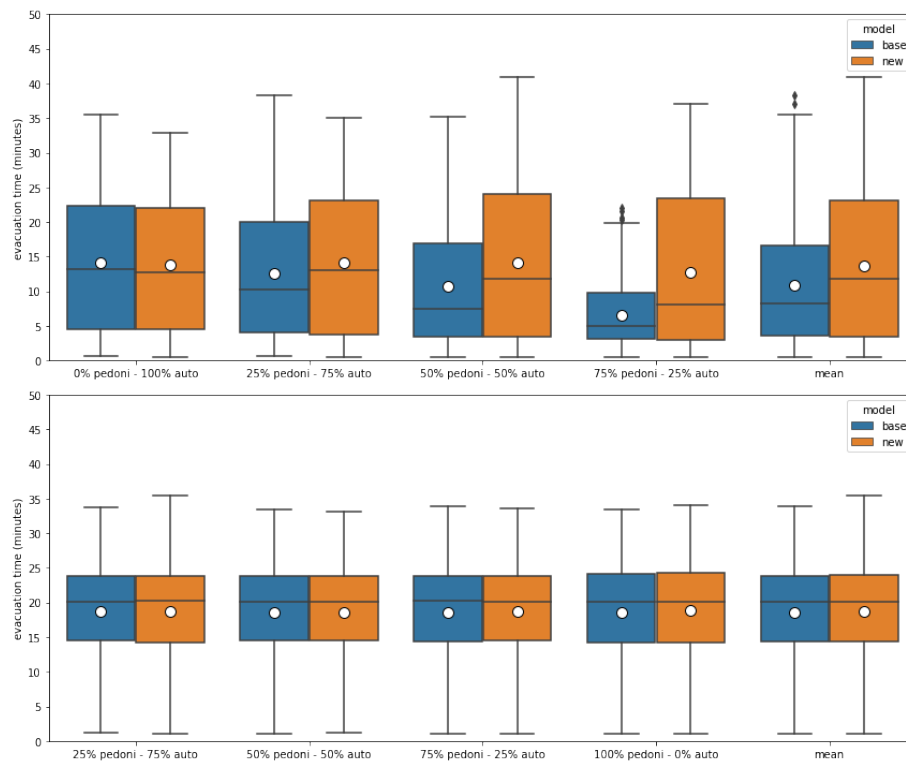


Figura 16: Comparazione dei tempi di evacuazione al variare del numero di agenti e nel caso medio distinti per auto (sopra) e pedoni (sotto).

La figura 17 mostra i tempi di evacuazione mediati tra gli agenti che partono dalla stessa intersezione, 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 al variare del modello usato non si riscontrano cambiamenti significativi nei tempi di evacuazione. Mentre nel caso delle auto si nota che il modello esteso introduca dei rallentamenti rispetto al modello base, soprattutto lungo la costa.

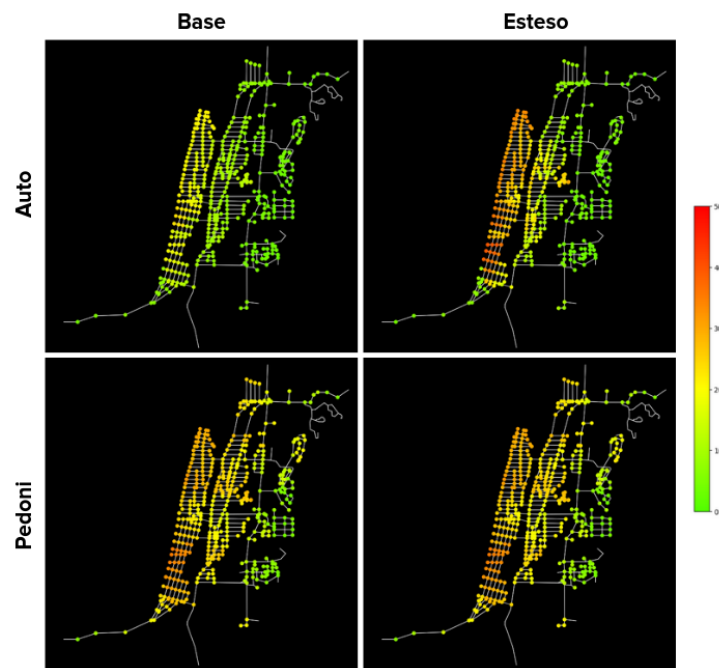


Figura 17: Comparazione dei tempi di evacuazione mediati tra gli agenti che partono dalla stessa intersezione.

## Strade Critiche

Un'ulteriore analisi per valutare l'effetto dell'estensione del modello è quella di evidenziare in quali strade si verificano più vittime al variare del numero di auto e pedoni. Nella figura 19 viene mostrato come si distribuisce la percentuale di mortalità nelle strade al variare del numero di auto e pedoni e riportata la percentuale media.

Il modello base (Fig. 19a) nei casi con un numero di auto minore o uguale al 50% non presenta differenze significative e si hanno tante strade con una percentuale bassa di vittime, mentre negli altri due casi ci sono poche strade con una percentuale alta.

Il modello esteso (Fig. 19b) invece presenta una strada comune per tutti i casi in cui sono presenti delle auto che contribuisce a più del 50% delle vittime. In generale in tutti i casi la maggior parte delle strade con più vittime sono diverse tra i due modelli a eccezione del caso 100% pedoni. Le strade segnate come critiche corrispondono a quelle con una percentuale media maggiore del 5% e sono mostrate nella figura 18.



Figura 18: strade critiche trovate per i due modelli.

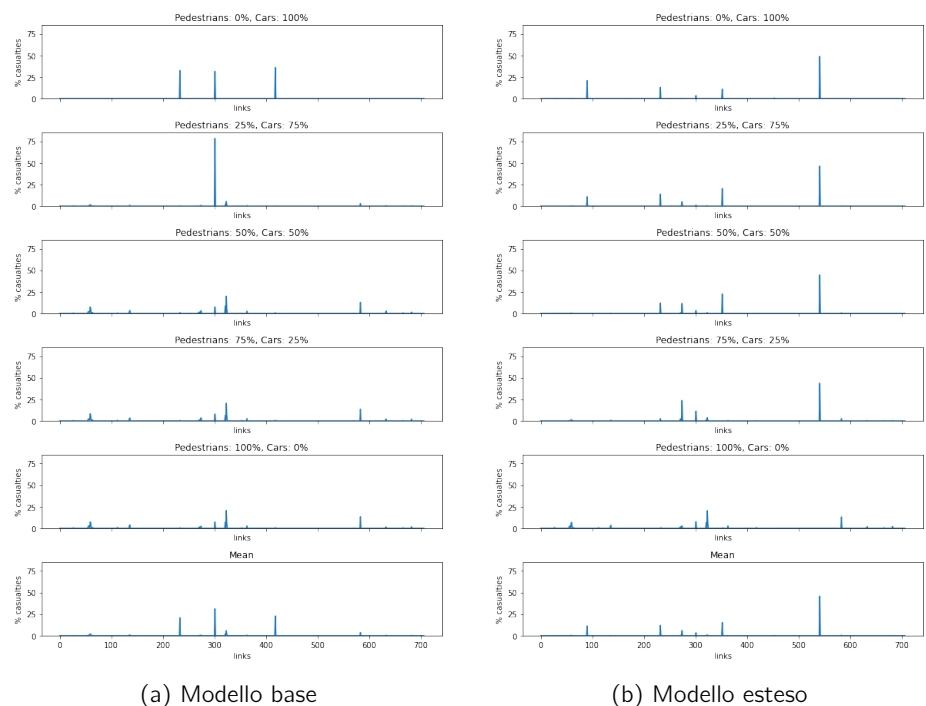


Figura 19: Comparazione delle percentuali di mortalità nelle strade al variare del numero di auto e pedoni.

## 7.4 Analisi Intersezioni

In questa sottosezione verranno descritte le analisi effettuate sulle intersezioni per valutare l'effetto dell'estensione del modello. Sono state identificate le intersezioni critiche, ovvero quelle con un'alta mortalità. Successivamente sono stati analizzati il flusso in entrata e in uscita e i tempi di attesa delle intersezioni, evidenziando le differenze tra le intersezioni critiche e non critiche.

### Intersezioni Critiche

Per identificare le intersezioni critiche (Fig. 21) è stato considerato il numero totale di vittime delle strade in entrata di ogni intersezione e sono state selezionate quelle con una percentuale di vittime superiore o uguale al 5%.

Come effettuato per le strade critiche (Fig. 19), il numero di vittime considerato è quello mediato al variare del numero di auto e pedoni (Fig. 20).

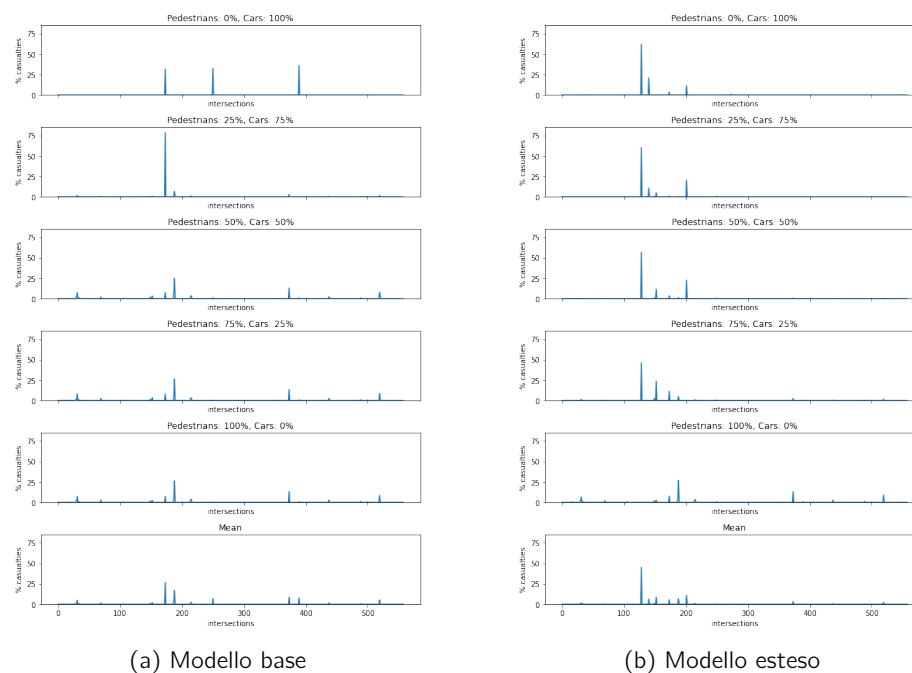


Figura 20: Comparazione delle percentuali di mortalità nelle intersezioni al variare del numero di auto e pedoni.

Nella figura 21 vengono mostrate le intersezioni identificate come critiche e distinte in base al tipo di intersezione: TWSC, AWSC e incroci con 3 strade.

Alcune delle intersezioni critiche sono in comune tra i due modelli, tuttavia contribuiscono in modo diverso al totale di vittime. Nel modello base la percentuale maggiore di vittime si trova più vicino ai rifugi rispetto al modello esteso in cui la percentuale maggiore si trova nel centro.

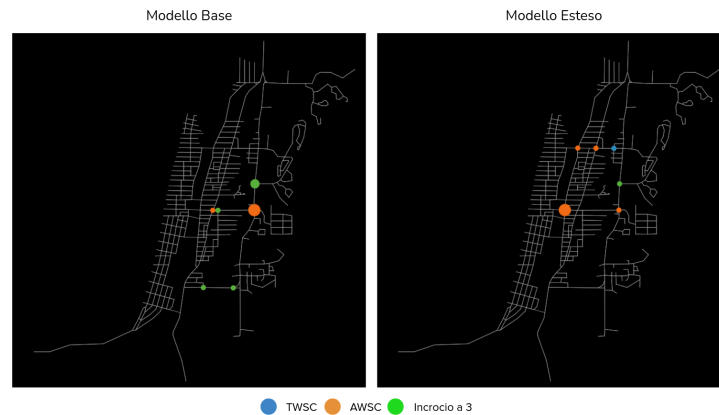


Figura 21: Intersezioni critiche distinte per tipo di intersezione. La dimensione dei punti indica la percentuale di vittime delle strade in entrata.

## 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 22, il flusso dei pedoni non presenta particolari differenze tra modello base ed esteso, nonostante le modifiche apportate ai pedoni.

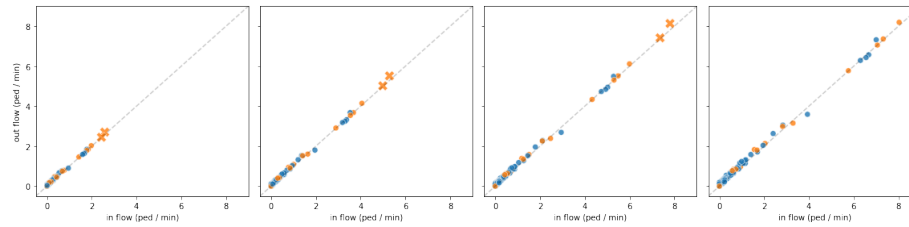
Per entrambi i modelli il flusso in entrata e in uscita in ogni intersezione è molto simile. Inoltre all'aumentare del numero di pedoni c'è un incremento nel flusso.

Nella maggior parte dei casi il flusso delle intersezioni TWSC risulta più basso rispetto a quelle AWSC, poichè la strada secondaria è bloccata finchè la principale è occupata.

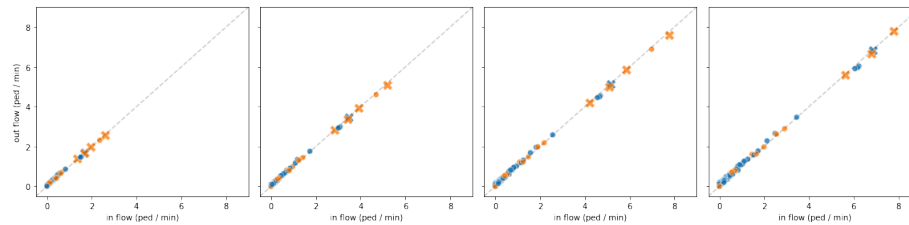
Osservando il flusso delle auto (Fig. 23) viene sempre riscontrato un incremento di flusso all'aumentare del numero di auto.

In questo caso però il flusso in entrata e in uscita non sono perfettamente bilanciati e risultano più sparsi rispetto al flusso dei pedoni. Inoltre il flusso in entrata è quasi sempre maggiore del flusso in uscita.

Nel modello esteso in generale il flusso risulta più basso, probabilmente a causa della gestione delle intersezioni che, combinato all'utilizzo dello *shortest path*, provoca un rallentamento al traffico in uscita che, propagandosi in tutta la rete, abbassa il flusso in tutte le intersezioni.

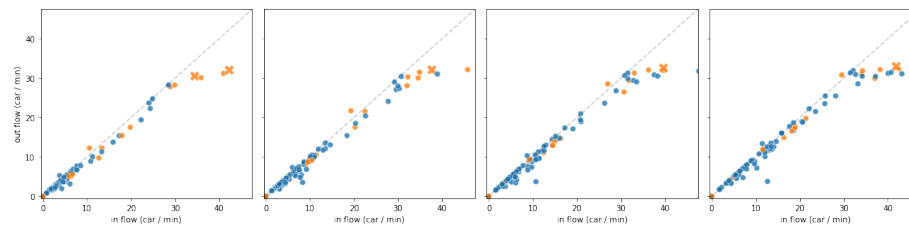


(a) Modello base

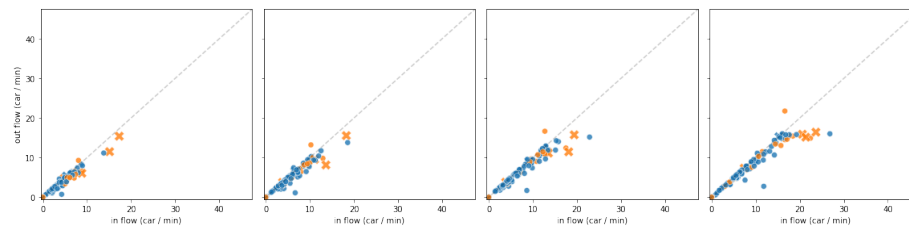


(b) Modello esteso

Figura 22: Confronto tra il flusso dei pedoni in entrata e in uscita per ogni intersezione al variare del numero di auto e pedoni.



(a) Modello base



(b) Modello esteso

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

## 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 ha il via libera. Inoltre i tempi sono distinti tra i due tipi di intersezione: AWSC e TWSC.

Come si può vedere nella tabella 4, con una percentuale più bassa di auto le intersezioni AWSC hanno in media tempi di attesa più lunghi mentre le intersezioni TWSC hanno tempi più brevi.

Per quanto riguarda le intersezioni TWSC, i tempi di attesa massimi sono più alti rispetto agli AWSC in tutti i casi a eccezione di quello con 25% auto, per via della presenza degli stop nelle strade secondarie.

Nella figura 24 vengono riportati i tempi di attesa al variare del numero di auto, per ogni intersezione.

	25% cars	50% cars	75% cars	100% cars	intersection
mean	34 s	32 s	29 s	24 s	AWSC
max	267 s	184 s	202 s	225 s	AWSC
mean	8 s	13 s	18 s	31 s	TWSC
max	142 s	189 s	237 s	406 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.



Figura 24: tempi di attesa nelle intersezioni al variare del numero di auto, differenziando AWSC (triangoli) e TWSC (cerchi).



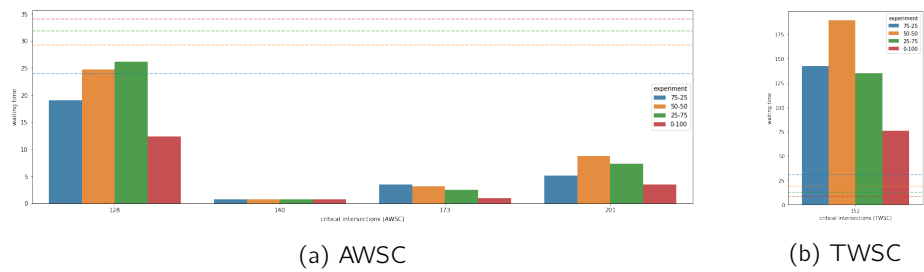


Figura 25: comparazione tempi di attesa delle intersezioni critiche di tipo AWSC (a) e TWSC (b) rispetto a tutte le intersezioni al variare del numero di auto.

## Comparazione Modello Base con Modello Wang 2021

## 8 Conclusioni

## Riferimenti bibliografici

- Goto, Yozo et al. (2012). «Tsunami evacuation simulation for disaster education and city planning». In: *Journal of Disaster Research* 7.1, pp. 92–101.
- 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.
- Lämmel, Gregor, Marcel Rieser et al. (2010). «Emergency preparedness in the case of a tsunami—Evacuation analysis and traffic optimization for the Indonesian city of Padang». In: *Pedestrian and evacuation dynamics 2008*. Springer, pp. 171–182.
- 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.
- Mas, Erick et al. (2012). «Agent-based simulation of the 2011 great east japan earthquake/tsunami evacuation: An integrated model of tsunami inundation and evacuation». In: *Journal of Natural Disaster Science* 34.1, pp. 41–57.
- 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/vyh1if6311/f/uploads/seaside\\_tsp\\_final.pdf](https://www.cityofseaside.us/sites/g/files/vyh1if6311/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, literaturauswertung». 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.