

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi comparativa di software di simulazione di flussi
pedonali e applicazione per la stazione della metropolitana
"Investment park" di Dubai**

Relatore

Prof. Marco Diana

Candidato

Antonio La Vista

Dicembre 2017

Abstract

Questo lavoro di Tesi si pone come principale obiettivo quello di riscontrare le principali differenze nell'utilizzo e nei risultati di tre software commerciali specifici per la simulazione pedonale: Legion SpaceWorks, PTV Vissim/Viswalk e Oasys MassMotion.

In primo luogo è stata condotta una ricerca inerente allo studio del comportamento dei pedoni e al loro inserimento nel contesto metropolitano. Nello specifico l'interesse è ricaduto sull'interazione fra entità in ambienti adibiti alla sola circolazione pedonale: centri commerciali, stadi sportivi, stazioni ferroviarie e metropolitane, ecc. A tale scopo sono stati introdotti diversi Modelli Microscopici in grado di descrivere il comportamento di ogni singolo pedone nei confronti di chi e/o che cosa lo circonda.

Sulla base dei Modelli Microscopici le case Legion, PTV e Oasys hanno formulato gli algoritmi che governano i software protagonisti di questo confronto. Dunque, a seguito di una descrizione sulle caratteristiche generali di utilizzo dei tre software, è stato costruito un "modello base" ispirato alla stazione metropolitana "Dubai Investment Park" in fase realizzativa nella città di Dubai, negli Emirati Arabi Uniti. Utilizzando questo modello base su ognuno dei tre software, è stato possibile ottenere heat-maps descrittive del livello di comfort riscontrato dai pedoni nel corso della simulazione e tabelle contenenti i tempi di percorrenza. Questa procedura ha permesso di portare a termine il confronto in questione, valutando pregi e criticità dei software protagonisti.

Sommario

Abstract.....	1
1. Introduzione.....	1
2. Stato dell'Arte.....	4
2.1 Fondamenti teorici e ricerche scientifiche	4
2.1 Modelli di traffico pedonale	6
2.1.1 Modelli macroscopici.....	6
2.1.1.1 Pedestrian planning and design - Fruin (LoS).....	8
2.1.1.1.1 Dimensioni del corpo umano – “The Body Ellipse”	9
2.1.1.1.2 Pedoni in condizioni di moto piano.....	10
2.1.1.1.3 Pedoni in moto su scale	11
2.1.1.1.4 Equazione del flusso pedonale	12
2.1.1.1.5 Livelli di Servizio di Fruin	14
2.1.1.2 Highway Capacity Manual (HCM 2010).....	23
2.1.1.2.1 Caratteristiche Moto del Pedone	24
2.1.1.3 Considerazioni Modelli Macroscopici	28
2.1.2 Modelli Microscopici	29
2.1.2.1 Cellular Automata (CA).....	30
2.1.2.2. Agent Based Model (ABM)	31
2.1.2.3 Social Force Model (SFM).....	33
2.1.2.3.1 Struttura del SFM.....	33
2.1.2.3.2 Predizioni del SFM.....	36
2.1.2.4 Legion Model (Still).....	37
2.1.2.5 Queueing Models	38
2.1.2.6 Considerazioni Modelli Microscopici.....	39
3. Confronto tra i tre software: interfaccia e funzionamento	41
3.1 Legion SpaceWorks	41
3.1.1 Movimento dei Pedoni in Legion.....	42
3.1.2 Caratteristiche dei profili pedonali.....	45
3.1.3 Realizzazione modello Legion	48
3.1.3.1 Preparazione file input	49
3.1.3.2 Legion Model Builder	50

3.1.3.2.1 Interfaccia Model Builder	50
3.1.3.2.2 Importare file CAD nel Model Builder	52
3.1.3.2.3 Creazione degli Entity Types e del Supply Type	52
3.1.3.2.4 Arrival Profile e Availability Profile	53
3.1.3.2.5 Descrizione e utilizzo degli Activity Object	55
3.1.3.2.6 Collegamento fra Activity Object (Linking e Filtering)	60
3.1.3.3 Legion Simulator	62
3.1.3.4 Legion Analyser	64
3.1.3.4.1 Output di Legion Analyser	65
3.2 PTV Viswalk	67
3.2.1 Movimento dei Pedoni in Viswalk	67
3.2.2 Scelta del percorso in Viswalk	68
3.2.3 Interfaccia Vissim/Viswalk	69
3.2.4 Costruzione modello pedonale Viswalk	70
3.2.4.1 Scale fisse e scale mobili in Viswalk	71
3.2.1.4.2 Flussi ed itinerari pedonali	73
3.2.1.4.3 Inserimento trasporto pubblico	75
3.2.1.4.4 Avvio simulazione e output di Viswalk	79
3.3 MassMotion Oasys	83
3.3.1 Movimento dei Pedoni e scelta del percorso in MassMotion	83
3.3.1.1 Agent Task	84
3.3.1.2 Agent Navigation	84
3.3.1.3 Agent Movement	85
3.3.2 Interfaccia MassMotion	86
3.3.3 Costruzione modello pedonale MassMotion	88
3.3.3.1 Scale fisse e scale mobili in MassMotion	89
3.3.3.2 Elementi per la costruzione del modello MassMotion	91
3.3.3.3 Simulazione trasporto pubblico	95
3.3.4 Avvio simulazione e dati output MassMotion	97
3.4 Confronto software sulla base di un'esperienza "First hand-on"	99
4. Applicazione dei software su un caso studio	103
4.1 "Dubai Investment Park Station"	103
4.1.1 Definizione architettonica "Dubai Investment Park Station"	104

4.2 Creazione di un modello base per la comparazione	109
4.2.1 Risultati applicazione modello base	113
4.2.1.1 “LoS - Densità Media” Legion SpaceWorks	116
4.2.1.2 “LoS - Densità Media” PTV Viswalk	119
4.2.1.3 “LoS - Densità Media” Oasys MassMotion	123
4.2.1.4 Confronto mappe “LoS – Densità Media”	128
4.2.2 Mappe del “Tempo di Occupazione”	137
4.2.3 “Stress Test” Biglietterie	146
5. Analisi dei tempi di percorrenza: Viswalk e MassMotion.....	153
5.1 Piano sperimentale e definizione degli scenari	153
5.2 Analisi dei risultati delle simulazioni	156
5.2.1 Test t di Student di uguaglianza fra i valori medi di tempo di spostamento	157
5.2.2 Istogrammi delle frequenze e medie dei tempi di percorrenza	159
6. Conclusioni.....	167
Bibliografia	171

1. Introduzione

Camminare è da sempre il più semplice ed economico modo di spostarsi a disposizione dell'essere umano. Certamente la distanza coperta non rappresenta una grossa percentuale se si tiene conto del totale degli spostamenti giornalieri di un normale cittadino; tuttavia la gestione del traffico pedonale è senza ombra di dubbio parte fondamentale per l'adeguato funzionamento del sistema di trasporti multi-modale. Tant'è vero che ogni singolo spostamento effettuato nell'arco della giornata necessita perlomeno di una parte iniziale e una parte finale compiute per forza di cose grazie all'ausilio dei nostri piedi: spostarsi alla fermata metro più vicina per recarsi al lavoro, scendere dalla macchina e attraversare il parcheggio per raggiungere il supermercato, legare la bicicletta e raggiungere la palestra al di là della strada tramite un passaggio pedonale, etc.

Lo studio relativo alla “scienza del movimento pedonale” risulta relativamente recente nel mondo della pianificazione urbana e dei trasporti, le prime ricerche risalgono a metà del XX secolo (Older, 1968) (Navin & Wheeler, 1969) (Fruin, 1971). L'interesse attorno ad esso è cresciuto esponenzialmente negli ultimi decenni. Diverse discipline tecniche, come architettura e ingegneria civile, hanno potuto trarre beneficio dallo studio e successiva simulazione dei flussi pedonali sfruttando la possibilità di definire il livello di servizio (LoS) degli edifici e prevenire incidenti.

Osservare il comportamento dei pedoni e riuscire a riprodurlo tramite modelli matematici è stato ed è tuttora oggetto di studio per i ricercatori. Per quanto possa sembrare semplice e naturale, il pedone che cammina differisce sotto diversi aspetti da ogni altro tipo di mezzo di trasporto; diventano estremamente importanti aspetti personali come l'età, il sesso, la forza fisica, il motivo dello spostamento, etc. Infatti i pedoni rappresentano un gruppo eterogeneo di entità e il modo in cui essi si interfacciano e reagiscono al traffico varia a seconda del grado di accettazione relativo alla velocità desiderata e allo spazio di manovra minimo a disposizione del singolo individuo. Inoltre il fatto che essi non vengano ristretti all'interno di una specifica infrastruttura (sede stradale, linea ferroviaria, etc.) e alle rispettive leggi regolatrici, conferisce al pedone un “libero arbitrio” nei movimenti e nella scelta degli itinerari, rendendolo di fatto molto più imprevedibile rispetto al traffico veicolare.

Ma quale è il motivo per il quale si dedica così tanta attenzione agli spostamenti delle persone?

In effetti spendere risorse di tempo e denaro nella pianificazione dei percorsi pedonali, con il solo fine della ottimizzazione dei flussi, potrebbe sembrare un semplice “sfizio” agli occhi di un lettore meno esperto. Un aspetto che però viene spesso dimenticato, quando si ha a che fare con ingenti masse di persone, è quello della sicurezza, specialmente in condizioni di panico. In queste particolari condizioni il comportamento del singolo individuo cambia: tende a camminare più velocemente, si innervosisce, spinge chi gli sta attorno, si conforma al volere della massa, etc. Ogni anno, purtroppo, si viene a conoscenza di incidenti dovuti al sovraffollamento e allo scontro di folle. Still (Still, 2000), col fine di enfatizzare il problema agli occhi dell'opinione pubblica, riporta un elenco di alcune delle maggiori tragedie che forse

si sarebbero evitate (o perlomeno limitate) grazie ad un minimo di programmazione e modellazione pedonale:

1964 - *Lima, Perù*: muoiono 300 persone in una carica dopo l'annullamento di un goal.

1968 - *Buenos Aires, Argentina*: muoiono 74 persone spinte contro un'uscita di sicurezza.

1974 - *Cairo, Egitto*: decesso di 49 persone una volta che la folla aveva rotto le barriere.

1979 - *Nigeria*: 24 morti e 27 feriti da una fuga disordinata dovuta ad un black-out.

1982 - *Mosca, Russia*: 340 morti, tifosi rientrano nello stadio nella direzione opposta al flusso.

1990 - *Mecca, Arabia Saudita*: 1426 morti per un sovraffollamento di un tunnel pedonale.

1998 - *Mecca, Arabia Saudita*: 150 pellegrini Musulmani schiacciati dal sovraffollamento.

Purtroppo la lista risulta essere molto più lunga e tragici eventi, come quelli appena riportati, sono in crescita; ciò è dovuto all'alta densità di popolazione raggiunta in diversi paesi in tutto il mondo e all'organizzazione di eventi quali concerti musicali, manifestazioni (sportive e non) in grado di richiamare migliaia di persone in un unico luogo.

Come suggeriscono Helbing et al. (Helbing D. , Farkas, Molnàr, & Vicsek, 2002), mentre questo comportamento risulta comprensibile in situazioni che minacciano la propria incolumità, come nel caso di incendio in edifici affollati, è difficile giustificarlo quando è dovuto ad una gara di corsa per accaparrarsi un posto migliore ad un concerto.

È principalmente per questo motivo che molto si è fatto e molto ancora si deve fare per sviluppare in maniera ottimale lo studio del comportamento dei pedoni e il loro inserimento nel settore dei trasporti, sempre più in espansione ed evoluzione.

Per uno studio più approfondito degli spostamenti pedonali, sono stati sviluppati software per la simulazione delle folle. Questi strumenti vengono utilizzati in diverse situazioni, ad esempio per lo studio di evacuazioni o per l'analisi di aree congestionate da grandi masse. Più in generale la simulazione pedonale si pone diversi scopi:

- Comprendere gli effettivi percorsi dei flussi pedonali
- Identificare punti di congestione
- Prevedere i probabili effetti della crescita di domanda
- Comprendere gli effetti della congestione sulle fasi di costruzione

- Accertarsi della bontà di uno scenario a medio lungo termine per gestire il sovraffollamento
- Effettuare test di evacuazione antincendio/attentati.

I software pedonali dispongono di un ampio set di applicazioni (stazioni ferroviarie e metropolitane, aeroporti, centri commerciali, stadi e arene, ecc.) e il loro utilizzo comporta notevoli benefici sia per i pedoni sia per chi finanzia la realizzazione dell'infrastruttura: beneficio economico, si ha un netto risparmio sui tempi di viaggio; beneficio sul business, potenziale riduzione dei costi di costruzione; beneficio di sicurezza e controllo, tramite lo sviluppo di piani di evacuazione; benefici operativi, realizzazione di studi di fattibilità e coordinamento dei servizi e delle attività commerciali.

L'obiettivo di questa Tesi è quello di portare a confronto tre diversi software commerciali adibiti alla modellazione dei flussi pedonali. Lo studio include una prima parte di valutazione dei software e delle loro interfacce. Successivamente verrà applicato un caso di studio in modo tale da poter evidenziare differenze e/o similitudini per quanto riguarda i dati in out-put dei programmi. I software in questione sono:

- Legion/SpaceWorks Edition R6.4.4
- MassMotion/Oasys 8.5
- PTV Viswalk: VISSIM 9 con modulo specifico per simulazione pedonale PTV Viswalk

Lo studio verrà condotto attraverso tre fasi per ogni software. La *Fase 1* e la *Fase 2* sono necessarie per la presentazione del software e per comprenderne il funzionamento, la *Fase 3* riguarderà un confronto di dati output ottenuti da modelli realizzati con i tre diversi programmi:

Fase 1: presentazione generale dei tre software utilizzati. Specificazione dei modelli teorici sui quali si basa lo sviluppo degli algoritmi e definizione del criterio di movimento dei pedoni.

Fase 2: studio e valutazione dei software SpaceWorks, Viswalk e MassMotion con particolare attenzione alle modalità di costruzione del modello, al comportamento dei pedoni e più in generale le possibilità di interazione con l'interfaccia utente. Lo scopo è evidenziare similarità e/o differenze, pregi/criticità e grado di difficoltà di apprendimento nel caso in cui per il progettista si tratti della prima esperienza di utilizzo di software dedicati alla progettazione pedonale.

Fase 3: applicazione delle conoscenze acquisite per costruire tre modelli il più possibile simili fra loro facendo riferimento ad un caso studio specifico, ossia la stazione metropolitana "Dubai Investment Park". La stazione è al momento in fase realizzativa nella città di Dubai, negli Emirati Arabi Uniti; rappresenta uno dei centri intermodali logisticamente più importanti per l'Expo 2020). Rappresentazione e valutazione dati in out-put dei software: heat-maps visive e analisi delle distribuzioni dei tempi di percorrenza dei pedone in una varietà di scenari applicativi.

2. Stato dell'Arte

2.1 Fondamenti teorici e ricerche scientifiche

I primi studi empirici relativi all'osservazione del comportamento di gruppi di persone furono portati avanti dall'etnologo e psicologo Gustave Le Bon verso la fine del XIX secolo. Le Bon (Le Bon, 1895)(tr. it. P. Melograni e G. Villa (Melograni & Villa, 1996)) cercò di identificarne i caratteri peculiari della folla e propose tecniche adatte per guidarle e controllarle. I suoi scritti, in particolare *La Psychologie des Foules*, vennero letti persino dai dittatori totalitari del novecento, desiderosi di comprendere il comportamento delle masse intese come "grande quantità indistinta di persone che agisce in maniera uniforme". La folla viene definita "psicologica" e organizzata, costituita da individui riuniti in un luogo specifico con un obiettivo comune: una dozzina di persone che si reca alla messa, centinaia di individui sotto il palco di un oratore o migliaia di persone ad una partita di calcio.

Le Bon mostra come l'individuo possa perdere la propria personalità una volta inserito in una folla organizzata, in questo contesto l'istintività prende il posto dell'intelletto:

"Nelle folle, l'imbecille, l'ignorante e l'invidioso sono liberati dal sentimento della loro nullità e impotenza, che è sostituita dalla nozione di una forza brutale, passeggera, ma immensa. [...] Per il solo fatto di far parte di una folla, l'uomo discende di parecchi gradi la scala della civiltà. Isolato, sarebbe forse un individuo colto, nella folla è un istintivo, per conseguenza un barbaro." (Le Bon, 1895)(tr. it. P. Melograni e G. Villa (Melograni & Villa, 1996))

Questo modo di caratterizzare le masse pedonali come raggruppamenti guidati dall'emotività e non dal razioncinio deve essere tuttavia contestualizzato. Bisogna infatti considerare che l'evoluzione della società e della tecnologia hanno sicuramente gravato sul modo di vivere la città da parte dei pedoni. Con l'affermarsi dell'automobile come mezzo di trasporto alla portata di tutti e l'espansione del trasporto pubblico lo spazio destinato alla mobilità pedonale ha subito un drastico restringimento. La necessità di garantire una rete stradale che coprisse l'intera area urbana e che servisse tutti i cittadini ha fatto sì che i pedoni venissero relegati in corsie dedicate sempre più ristrette (marciapiedi).

Nel corso del XX secolo è cambiato anche lo stile di vita delle persone. Specialmente dopo la seconda guerra mondiale si è assistito alla nascita di edifici capaci di contenere centinaia se non migliaia di persone (stadi, centri commerciali, ecc.). Quel sentimento di rabbia, descritto da Le Bon, che prendeva vita nelle piazze, si trova dunque imprigionato all'interno di luoghi chiusi. Cresce allora il rischio di incidenti nel momento in cui la folla inizia a disperdersi, qualora non fossero state progettate vie di fuga adeguate.

Difatti a partire dagli anni '50 nacquero diversi studi a riguardo; tra i più importanti quelli di Hankin e Wright (Hankin & Wright, 1958) focalizzati sui flussi pedonali nelle stazioni metropolitane e quello di S.J. Older (Older, 1968) riguardante gli spostamenti dei pedoni in zone commerciali.

A seguire, negli anni '70, John J. Fruin (Fruin, 1971) pubblicò una delle pietre miliari sulle quali si basa tuttora la dottrina in questione: *Pedestrian planning and design*. Fruin centrò il suo studio sull'analisi dei livelli di servizio (LoS) del pedone.

I LoS possono essere definiti come indicatori del livello di prestazione percepito dall'utente che viaggia lungo l'infrastruttura. La misura del LoS viene effettuata in funzione della velocità e del tempo di viaggio che influiscono sul comfort percepito e sulla convenienza economica dello spostamento stesso. Ogni livello di servizio rappresenta un determinato range di qualità, partendo dal livello A che esprime il migliore livello di comfort arrivando fino al livello F. Inserito in un contesto ambientale affollato, il lavoro di Fruin verrà ripreso in diverse occasioni e ampiamente descritto nell'ambito dei modelli pedonali macroscopici.

Tuttavia, il principale obiettivo degli studi fin qui elencati era quello di definire le linee guida per il design dei servizi pedonali basandosi sui livelli di comfort considerando solamente l'aspetto macroscopico della progettazione. A partire dagli anni '70 cresce l'interesse per l'aspetto microscopico dei flussi pedonali e nascono modelli in grado di riprodurre realisticamente determinati fenomeni emergenti osservati in condizioni di alto flusso pedonale. Questi fenomeni, chiamati “eventi di auto-organizzazione pedonale”, sono dovuti a scelte comportamentali dei pedoni compiute in maniera autonoma. Tali eventi di auto-organizzazione passano inosservati alla progettazione macroscopica, sono invece strumenti di validazione e classificazione per i modelli microscopici.

Sempre negli anni '70, Henderson (Henderson, 1974) è il primo a confrontare il comportamento dei flussi pedonali a quello dei gas e dei fluidi. Questo approccio teorico è in grado di descrivere gli eventi auto-organizzati citati precedentemente, tuttavia, come sottolinea Helbing (Helbing D. , Farkas, Molnár, & Vicsek, 2002) (Helbing D. , Molnár, Farkas, & Bolay, 2001) (Helbing D. , Model for pedestrian behavior, 1992), una applicazione realistica della dinamica dei fluidi (o della cinetica dei gas) ai flussi pedonali deve per forza essere corretta considerando le particolari interazioni che avviene fra le persone (i.e. manovre di scostamento o decelerazione/accelerazione) che portano alla “non-conservazione” dell'energia.

A partire dagli anni '80, con l'avvento dei primi computer, all'ambito della modellazione è stato affiancato a quello della simulazione pedonale, questo ha permesso di validare i modelli studiati in ambienti virtuali, impostati con geometrie specifiche e governati dalle leggi fisiche; validazione dei modelli avvenuta con successo nel caso in cui si riuscisse a ricreare situazioni di auto-organizzazione pedonale osservate in reali casi di flusso in movimento, come la formazione di linee di flusso con stessa direzione di marcia o le oscillazioni nella direzione di passaggio attraverso sezioni a collo di bottiglia (Helbing D. , Farkas, Molnár, & Vicsek, 2002) (Helbing D. , Model for pedestrian behavior, 1992) (Helbing D. , Molnár, Farkas, & Bolay, 2001).

È quindi evidente come le folle pedonali siano state oggetto di studio per più di 50 anni. I metodi/mezzi utilizzati per la definizione di questi fenomeni sono evoluti assieme allo sviluppo della tecnologia, partendo dalle dirette osservazioni su campo, passando alle fotografie e arrivando ai video time-laps.

Negli ultimi 15-20 anni sono nati diversi modelli pedonali, ognuno di essi basato su differenti

teorie, ma comunque in grado di simulare flussi di persone di diversa entità in svariati contesti ambientali.

2.1 Modelli di traffico pedonale

Esistono due principali metodi di studio per la modellazione pedonale: l'approccio *macroscopico* e quello *microscopico*. Il primo riconosce i pedoni come particelle facenti parte di un unico insieme e si prefissa come obiettivo quello di riprodurre e descrivere il sistema tramite parametri macroscopici, non inerenti al singolo individuo, quali il flusso, la velocità media, la densità media e la direzione principale della massa. Il secondo approccio descrive ogni pedone come singola entità e il suo modo di comportarsi nel sistema di riferimento, in questo modo le caratteristiche dei singoli non vengono “mediate” sul totale come nel caso precedente e si pone rilevanza all'eterogeneità della popolazione.

Sebbene l'analisi macroscopica del traffico pedonale sia un aspetto fondamentale e utile a livello professionale in quanto i suoi output sono comprensibili anche dal “cliente” poco esperto in materia, è chiaro come l'interazione tra le entità costituenti il flusso pedonale sia l'elemento fondamentale sul quale è stato fondato lo stato dell'arte della scienza negli ultimi anni. È molto importante capire come la gente vive l'ambiente che la circonda e il modo in cui interagisce dinamicamente con esso. A questo scopo si sono portati avanti diversi studi analitici incentrati sulla dinamica pedonale, ponendo l'enfasi sul comportamento “in loco” di ogni singolo pedone. Quest'ultimo è contraddistinto da due aspetti principali: *l'atteggiamento sociale*, cioè il modo in cui interagisce con chi si trova nelle vicinanze, e il *raggiungimento del “final goal”*, che è la ragione basilare che spinge le entità a spostarsi all'interno dell'ambiente che le circonda.

2.1.1 Modelli macroscopici

I modelli macroscopici si concentrano direttamente sulle caratteristiche medie del sistema, senza evidenziare in nessun modo l'aspetto di natura microscopica. I dati in output in questo caso sono le relazioni fra il flusso, la densità media e la velocità media (Shiwakoti, Sarvi, & Rose, 2008); questo tipo di analisi risulta utile in casi di alta densità pedonale nei quali il comportamento di massa oscura quello del singolo individuo (Teknomo, Microscopic Pedestrian Flow Characteristics: Development of an Image Processing Data Collection and Simulation Model PhD. dissertation, 2002) (Caramuta, et al., 2017). Questo approccio è stato ereditato dagli studi di traffico veicolare i quali si adattano in maniera migliore a schemi statici che non considerano l'iterazione delle entità all'interno del modello.

Oltre ai già citati studi di Fruin, quelli di Predtechenskii e Milinskii (Predtechenskii & Milinskii, 1978) dimostrarono che la velocità media del flusso pedonale non è solamente funzione della densità. Viene infatti data importanza anche al tipo dei percorsi affrontati e alle condizioni in cui il movimento avviene, prendendo sempre in considerazione il fattore psicologico. Navin e Wheeler (Navin & Wheeler, 1969) evidenziano le differenze fra i flussi

mono e multi direzionali, osservando che in caso di flussi opposti di pari entità la velocità viene ridotta del 4% mentre in presenza di flussi con una distribuzione 10% / 90% la velocità si riduce del 14.5% (valore portato al 19% da Lam et al. (Lam, Lee, & Cheung, 2002)). Mentre Johansson et al. (Johansson, Helbing, & Shukla, 2008), sempre nell'ambito dei modelli macroscopici, enfatizzano l'importanza delle differenze culturali delle popolazioni.

Alcuni dei modelli macroscopici maggiormente conosciuti derivano dall'analogia fra il flusso pedonale e il flusso di mezzi continui e prendono il nome di "Continuum models" o "Fluid-dynamic based models" (Henderson, 1974) (Hughes, 2002) (Al-Gadhi & Mahmassani, 1990). Essi prevedono l'utilizzo di un numero limitato di equazioni relativamente facili da gestire basandosi sulla teoria dei fluidi (equazione di Navier-Stokes). Fra questi particolari modelli, i più conosciuti sono i "Gas-kinetic models" definiti tramite equazioni simili a quelle di Boltzmann.

Henderson (Henderson, 1974) fu il primo ad applicare le teorie gas-cinetiche e fluidodinamiche ai flussi pedonali. Osservando i movimenti degli studenti in un campus universitario egli si accorse che i loro spostamenti combaciavano con la distribuzione di Maxwell-Boltzmann che descrive la velocità delle particelle nei gas ideali. Dunque per poter applicare queste teorie ai pedoni Henderson fece alcune assunzioni e delineò alcune restrizioni; ad esempio il flusso della folla deve essere omogeneo (ogni unità in movimento deve avere la stessa massa e la stessa funzione di distribuzione di velocità). Il flusso pedonale venne paragonato a quelli che lo stesso autore definì "fluidi pensanti" (Henderson, 1974) (Colombo, Goatin, Maternini, & Rosini, 2010).

Negli anni 90' Al-Gadhi e Mahmassani (Al-Gadhi & Mahmassani, 1990) proposero un modello macroscopico col fine di studiare i movimenti circolari dei pellegrini attorno al Caaba, un monumento religioso in Arabia Saudita. I loro studi vennero poi ripresi da Hughes (Hughes, 2002) che descrisse il comportamento dei pedoni utilizzando delle analogie con i fluidi molecolari. Sebbene fosse nata con lo scopo di comprendere al meglio lo spostamento in massa delle persone, questa teoria si rivelò valida anche come strumento di predizione. Lee e Hughes (Lee & Hughes, 2005) hanno notato come la teoria dello stesso Hughes fosse in grado di identificare punti a rischio di incidente pedonale e di motivare inoltre la nascita e lo sviluppo di eventi come il calpestio e schiacciamento. L'ipotesi di continuità tuttavia perde valore qualora fosse necessario studiare flussi pedonali a bassa densità (Shiwakoti, Sarvi, & Rose, 2008).

Come spiega Johansson (Johansson, Helbing, & Shukla, 2008) il principale problema di questi modelli macroscopici è rappresentato dal fatto che essi prevedono la conservazione dell'energia e del momento, condizioni non previste nella interazione fra i pedoni.

Helbing (Helbing D. , 1998) sottolinea che i "Fluid-dynamic based models" classificano i pedoni dentro gruppi sulla base della loro direzione di moto. Tali gruppi sono quindi definiti da caratteristiche medie come la posizione occupata, la velocità di crociera effettiva e quella desiderata. I dati in input necessari per il modello sono il numero di gruppi, la direzione del loro moto e la velocità desiderata (Helbing D. , 1998) (Caramuta, et al., 2017).

Hoogendoorn et al. (Hoogendoorn, Femke van Wageningen -Kessels, Daamen, Duives, & Sarvi, 2015) propongono un'evoluzione dei "Continuum models". L'approccio del modello

diventa multi-classe, ovvero si considerano sia itinerari globali sia itinerari locali col fine di descrivere in maniera ottimale l'ordine strategico delle scelte dei pedoni.

Molti studi negli ultimi anni hanno ripreso i principi fluido-dinamici come base per un modello pedonale, come quelli di Treouille et al. (Treouille, Cooper, & Popovic, 2006) Xiong et al. (Xiong, Tang, & Zhao, 2013) Jiang (Jiang, 2013). Altri invece, ancora più recenti, si sono spinti oltre realizzando "Continuum models" macroscopici basati su principi di base differenti. Degond e Hua (Degond & Hua, 2013) ad esempio si sono ispirati alle interazioni fra individui nelle società animali, Schwandt et al. (Schwandt, Huth, & Barwolff, 2013) hanno basato il modello sui principi termodinamici della diffusione e della convezione.

In generale, dunque, i modelli macroscopici non prendono in considerazione il comportamento dell'individuo sebbene ogni singola entità, una volta influenzata dalle azioni di chi la circonda, sarebbe in grado di cambiare l'intera dinamica del sistema.

Di seguito verranno analizzati due degli studi di riferimento più importanti basati su modelli macroscopici, utilizzati per descrivere le condizioni di comfort nel moto pedonale che si creano nell'ambiente sotto esame: Fruin (Fruin, 1971) e Highway Capacity Manual (HCM 2010 : Highway Capacity Manual, 2010).

2.1.1.1 Pedestrian planning and design - Fruin (LoS)

Gli studi di John J. Fruin sono stati e sono tutt'oggi preziosi strumenti per stabilire gli standard per la pianificazione pedonale in tutto il mondo. Senza ombra di dubbio il più importante contributo è stato quello di approfondire il concetto di *Level of Service* (LoS) pedonale.

In *Pedestrian planning and design* (Fruin, 1971), con l'intento di definire un criterio per la sicurezza delle persone in luoghi pubblici, Fruin definisce diversi livelli di comfort inerenti al movimento pedonale. Fornisce inoltre diversi valori alla qualità di servizio a seconda dell'azione che il pedone sta compiendo; è ovvio che la velocità con la quale ci muoviamo e lo spazio a disposizione (distanza dai nostri "compagni di viaggio") che siamo disposti ad accettare variano a seconda delle azioni che stiamo compiendo. In condizioni di moto piano, come potrebbe essere attraversare una piazza, ci aspettiamo livelli di comfort decisamente più alti rispetto a quando si attende in coda in biglietteria il proprio turno o quando soffermiamo in fila sulle scale mobili.

Fruin sostiene che nella valutazione dei percorsi pedonali l'aspetto qualitativo sia tanto importante quanto quello quantitativo. Lo strumento LoS deve essere utilizzato per assicurare che i servizi pedonali siano conformi e adeguati alla domanda delle ore di picco. Sostiene inoltre che gli standard di servizio dei pedoni dovrebbero essere basati sulla libertà di scegliere la propria velocità di spostamento, la possibilità di sorpassare pedoni più lenti e sulla relativa facilità nei movimenti in caso di flussi avversi o trasversali.

Un design qualitativo delle zone adibite alla circolazione dei pedoni richiede una conoscenza

base relativa alle caratteristiche geometriche del corpo umano e alle capacità fisiche di quest'ultimo. Inoltre, secondo Fruin, particolare peso deve essere dato all'aspetto psicologico dei singoli individui quando si vuole determinare il livello di comfort in situazioni di sovraffollamento pedonale.

2.1.1.1.1 Dimensioni del corpo umano – “The Body Ellipse”

La larghezza delle spalle è la caratteristica del corpo umano che più influisce sul design dei servizi pedonali. Corridoi, porte, scale mobili, scale, ascensori, etc. vengono sempre progettati in modo tale da poter far fluire almeno due persone contemporaneamente. Fruin, basandosi su grandi quantità di dati osservata, ha fornito le dimensioni del 95esimo percentile del pedone completamente vestito: 13 pollici di profondità (33 cm) e 22.8 pollici di larghezza spalla-spalla (58 cm). Questi valori sono destinati a crescere nel momento in cui si considerano articoli personali trasportati dal pedone (borsa, ventiquattrore, giornale, etc.), differenti preferenze psicologiche di spazio desiderato e gli oscillamenti dei corpi dovuti al movimento. Quindi i valori di profondità e larghezza del corpo umano vengono riassetati rispettivamente (Figura 2.1) a 19.7 pollici (circa 50 cm) e 23.6 pollici (60 cm).

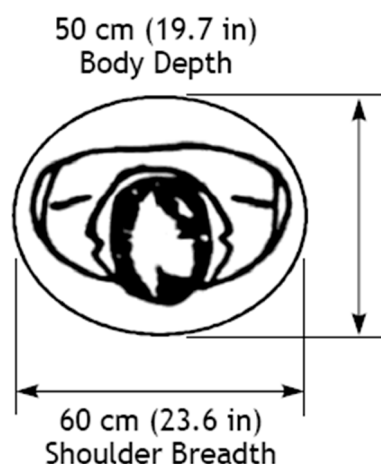


Figura 2.1: “The Body Ellipse”. Immagine tratta da *Pedestrian planning and design* (Fruin, 1971)

Le dimensioni riportate in Figura 2.1 vengono utilizzate nei software moderni per definire la “Buffer Zone” cioè lo spazio personale percepito dall'entità e quindi il comfort restituito al singolo pedone. Per definire i livelli di comfort, Fruin analizza le distanze fra i singoli pedoni, raffigurandoli come ellissi. Per fare ciò si riferisce agli studi dell'antropologo Hall, il quale definisce quattro categorie generali: distanza pubblica, distanza sociale, distanza personale e distanza intima; ciascuna è seguita da una descrizione in base ai movimenti che il pedone è in grado di fare e la condizione psico-fisica che essa comporta. Tuttavia è necessario sottolineare come le caratteristiche sensoriali relative alla “Buffer zone” cambino in funzione del paese e

della cultura dell'individuo. È stato dimostrato ad esempio che i cittadini di paesi orientali/medio-orientali siano disposti ad accettare condizioni di densità ben più gravose del cittadino Americano medio.

2.1.1.1.2 Pedoni in condizioni di moto piano

In caso di moto libero, non soggetto dunque ad alcun tipo di restrizione, la velocità dei pedoni varia sensibilmente da un individuo all'altro. Fruin riporta i dati ottenuti da un'indagine effettuata su 1000 pedoni (privi di bagaglio) all'interno della stazione di Pennsylvania a New York. Da questo studio le velocità medie in condizioni di flusso libero per uomini, donne risultano rispettivamente 1.4 m/s e 1.29 m/s con un minimo assoluto di 0.7 m/s e un massimo di 2.4 m/s (Figura 2.2), valore oltre al quale si considera il pedone in fase di corsa vera e propria.

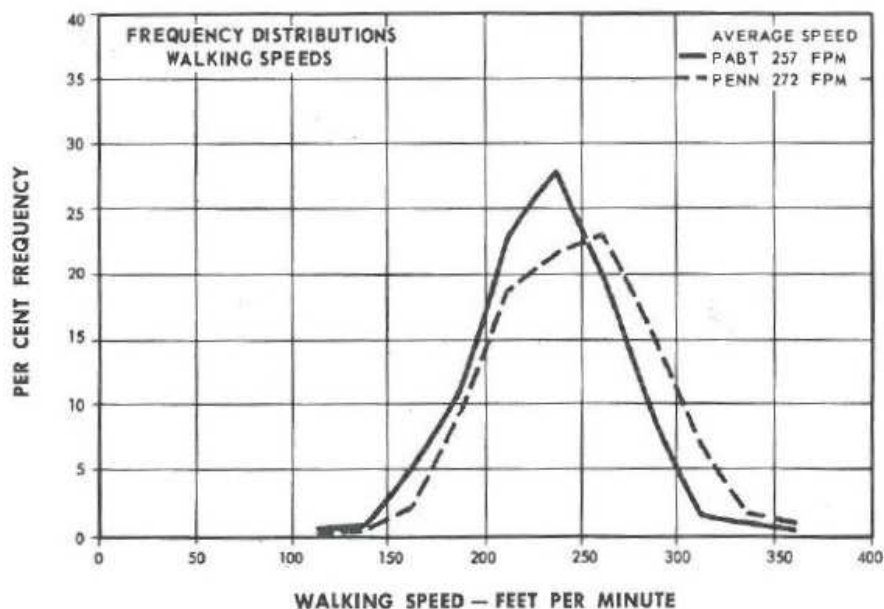


Figura 2.2: Velocità media in condizioni di moto piano e libero. Immagine tratta da *Pedestrian planning and design* (Fruin, 1971)

La velocità di camminamento diminuisce con l'età, in particolar modo dopo i 65 anni, tuttavia i più anziani sono in grado di incrementarla fino al 40% per brevi periodi.

Studi fotografici applicati su flussi pedonali hanno dimostrato che è necessaria un'area personale di almeno 3 m² per persona per mantenere la propria velocità desiderata e per evitare la collisione con altri pedoni.

Infatti Fruin definisce i limiti inferiori di spazio necessari per camminare, riportandoli in *Pedestrian planning and design*. Fruin sostiene che un pedone necessita di uno spazio laterale di 28-30 pollici (70-76 cm) e uno spazio longitudinale di 8-10 piedi (2.5-3.0 m), ciò comporta un'area personale di almeno 20-30 ft² (1.8-2.7 m²) per spostarsi in gruppo percependo il

proprio livello di comfort massimo. Al di sotto di questi valori il pedone si trova costretto a diminuire la propria velocità; questo comporta un decadimento del grado di soddisfazione del singolo individuo, ma anche un'ottimizzazione del flusso del macro-sistema, il quale mostra il suo picco quando l'occupazione media dell'area è di circa 0.5 m^2 per persona. Infine una volta raggiunti valori di circa 0.2 m^2 per persona ogni tipo di spostamento risulta impraticabile; in caso di una grande folla inserita in un ambiente limitato, questo livello di densità potrebbe creare onde d'urto e pressioni potenzialmente fatali.

2.1.1.1.3 Pedoni in moto su scale

Il movimento compiuto su scale è limitato dalla geometria della scala stessa (larghezza rampa, alzata, etc.) e dagli elementi inseriti per garantire la sicurezza, a partire dal corrimano. Questi elementi per forza di cose comportano una diminuzione della velocità e della quantità di flusso rispetto al moto piano.

La velocità di moto ascensionale si assesta su valori compresi fra 0.25 m/s e 1.5 m/s con valore medio di 0.5 m/s (Figura 2.3).

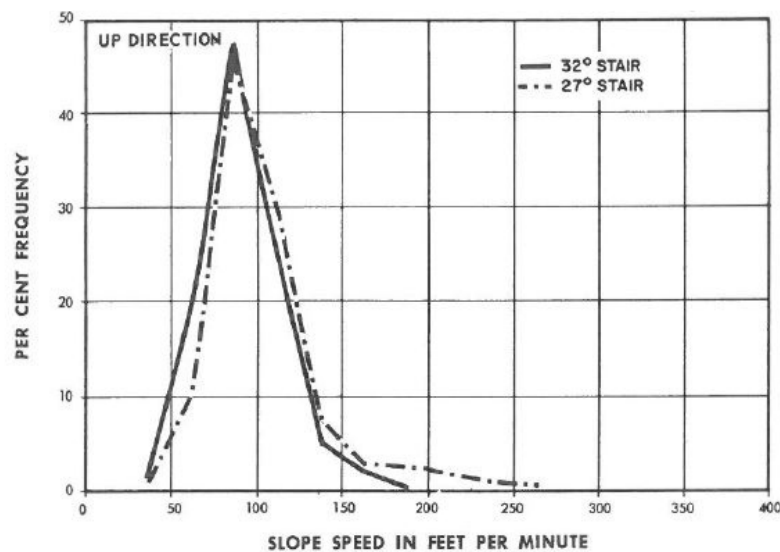


Figura 2.3: Velocità media in condizioni di moto ascensionale su scala. Immagine tratta da Pedestrian planning and design (Fruin, 1971)

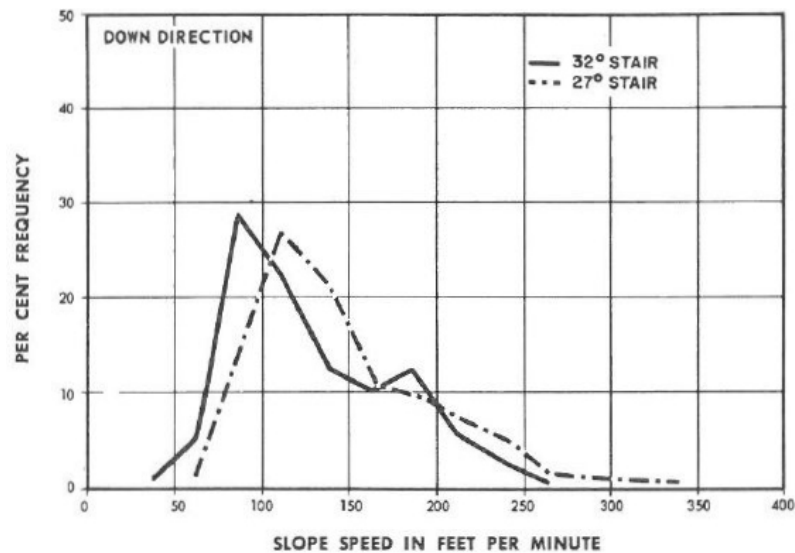


Figura 2.3: Velocità media in condizioni di moto discendente su scala. Immagine tratta da Pedestrian planning and design (Fruin, 1971)

Per quanto riguarda il moto di discesa (Figura 2.4) invece i valori incrementano del 10% in quanto si deve considerare il contributo della forza di gravità.

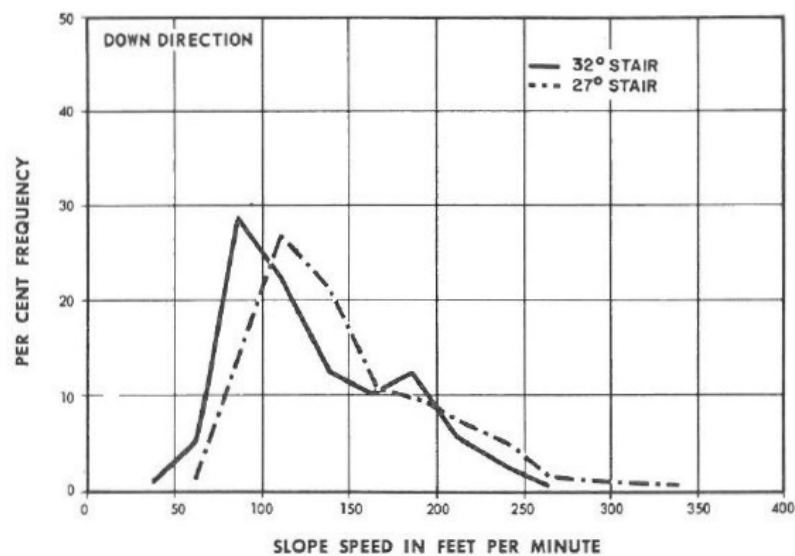


Figura 2.4: Velocità media in condizioni di moto discendente su scala. Immagine tratta da Pedestrian planning and design (Fruin, 1971)

2.1.1.1.4 Equazione del flusso pedonale

Il volume di pedoni, che può essere contenuto all'interno di percorsi pedonali e scale, è strettamente legato alla densità di traffico e alla velocità media sostenibile a quella stessa

densità.

La relazione fondamentale utilizzata per esprimere il flusso pedonale è definita dall' Eq. (2.1):

$$P = S \times D \quad (2.1)$$

dove P indica il flusso pedonale (ped/m*s), S si riferisce alla velocità media dei pedoni all'interno del sistema, infine D è la densità pedonale.

La "densità pedonale" D (ped/m²) è un'unità di misura difficile da osservare, per questo motivo si preferisce tenere in considerazione il reciproco di questo fattore, cioè "area per pedone".

L'Eq. (2.1) può quindi essere riscritta in funzione proprio della "area per pedone", come mostra l'Eq. (2.2):

$$P = S/A \quad (2.2)$$

il denominatore A rappresenta dunque l'area a disposizione per il singolo pedone (m²/ped). Come è facilmente intuibile, l'Eq. (2.1) è ispirata all' equazione della portata idraulica (Eq. (2.3)):

$$Q = A \times v \quad (2.3)$$

Dove Q è la portata in (m³/s), A la sezione (m²) e v la velocità (m/s). Le equazioni (2.1) e (2.3) descrivono rispettivamente la portata pedonale e quella idraulica (volumetrica). La prima indica il numero di pedoni al metro che passano attraverso una determinata sezione (monodimensionale) in un secondo, la seconda i metri cubi di acqua che passano attraverso una sezione (bidimensionale) in un secondo. Analizzando le linee di flusso del moto idraulico, queste si addensano dove la sezione è stretta e si allargano dove la sezione è larga, dunque la distanza fra le linee di flusso è piccola laddove la velocità dell'acqua è grande e viceversa. Analogamente parlando, nel caso di una grande folla che tenta di attraversare una porta, lontano dalla porta la sezione della folla è grande ma la velocità di avanzamento è piuttosto piccola; all'altezza della porta la sezione della folla è piccola (più pedoni al metro) ma la velocità è aumentata.

Tuttavia nel caso di flusso non stazionario nel tempo in una sezione, il comportamento dei pedoni e dell'acqua è differente. L'acqua all'aumentare della velocità è in grado di variare l'altezza del suo profilo di corrente. Il flusso pedonale, invece, all'aumentare della velocità subisce un aumento della densità (ped/m) che porta ad un inevitabile congestione.

Dunque, nei casi in cui i pedoni abbandonano il comportamento a flusso uniforme per combinare assieme diverse attività (camminare, prendere parte ad una coda, flussi multi-direzionali, etc.), bisogna tenere conto che alcune entità spenderanno del tempo

semplicemente camminando attraverso lo spazio preso in analisi, mentre le restanti sosterranno più a lungo con l'intento di compiere differenti funzioni.

2.1.1.1.5 Livelli di Servizio di Fruin

Il concetto di Livello di Servizio fornisce un utile modello per il design degli spazi destinati al flusso pedonale. Gli standard di servizio pedonale dovrebbero essere tarati sulla libertà di scelta della nostra velocità normale di spostamento, sull'abilità di sorpassare pedoni più lenti, e la relativa facilità di attraversare flussi di diversa concentrazione di pedoni, orientati in direzioni diverse da quelle del nostro moto.

I LoS sono per i modellatori uno strumento fondamentale per determinare la qualità dell'ambiente pedonale, tuttavia devono essere affiancati dal giudizio di chi li utilizza. Infatti è necessario esaminare tutti gli elementi costituenti il sistema, incluse le caratteristiche del traffico pedonale come le quantità e la durata dei picchi o l'utilizzazione degli spazi. Quando ad esempio si progetta per eventi estremi con picchi di breve durata, il modellista dovrebbe applicare un LoS standard più basso in modo tale da ottenere un design finale più economico. Ovviamente la scelta degli standard LoS deve essere fatta con la massima attenzione quando si sta progettando in prossimità dei livelli di capacità massima, poiché a questi livelli la densità critica dei pedoni viene spesso superata; questo potrebbe causare flussi pedonali non sostenibili dal design realizzato causando congestione.

Fruin definisce i Livelli di Servizio basandosi sui suoi studi di *pedestrian occupancy* precedentemente riassunti. Vengono distinti differenti range a seconda della azione che il pedone sta compiendo: moto piano (walkways), moto su scale (stairways) e attesa in coda (queueing).

Walkway standards

Nelle condizioni in cui il pedone è libero di muoversi su un piano (marciapiedi, passerelle, corridoi, banchine, etc.), come elementi discriminanti nella definizione dei LoS (Figura 2.5a) sono state assunte la velocità di spostamento, lo spazio a disposizione della singola entità e la probabilità di urtare altri pedoni. La Figura 2.5a mostra come all'aumentare della densità aumenti anche il flusso (PFM – Pedestrian per foot width per minute). Una volta che la densità raggiunge il valore limite del LoS E si registra un crollo quasi istantaneo del flusso pedonale e si raggiunge la congestione. I grafici in Figura 2.5b e Figura 2.5c raffigurano rispettivamente le relazioni flusso-velocità e modulo-velocità; in entrambi è evidente come per determinate condizioni di flusso o modulo la velocità dei pedoni crolli inesorabilmente fino al valore nullo. Nella Figura 2.5 (a,b,c) sono confrontati valori di flusso, velocità e modulo relativi alle indagini di Fruin (Fruin, 1971) in una stazione dei treni a New York, di Older (Older, 1968) sul comportamento dei pedoni in zone commerciali e di Navin & Wheeler (Navin & Wheeler, 1969) sui flussi mono e bi-direzionali.

Questa regolamentazione permette di determinare la qualità del design dei corridoi, dei marciapiedi e delle porte di ingresso. La larghezza di questi elementi, una volta inseriti nel

progetto da modellare, dovrà essere ridotta di circa 45 cm da entrambi i lati, in modo tale da tenere in considerazione la propensione del pedone in movimento a scostarsi dalle pareti, facendo eccezione dei casi di sovraffollamento. Bisogna inoltre tenere conto del contesto in cui il pedone è inserito; nel caso ad esempio di un centro commerciale, la presenza delle vetrine dei negozi costringe il progettista a ridurre di altri 45 cm lo spazio calpestabile a disposizione.

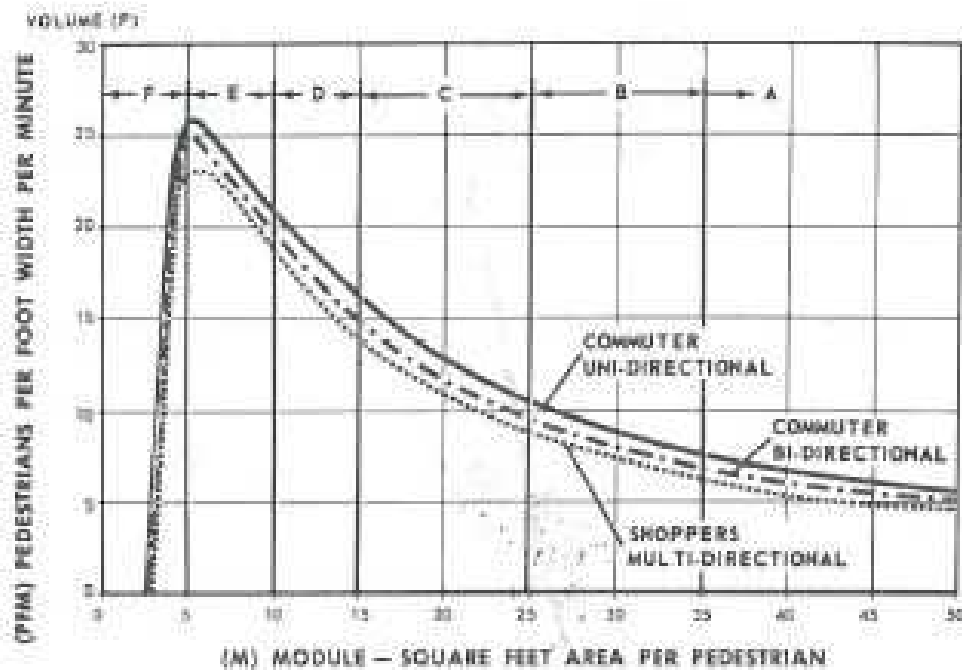


Figura 2.5a: Valori standard per Livelli di servizio in condizioni di moto piano e libero.
Immagine tratta da Pedestrian planning and design (Fruin, 1971)

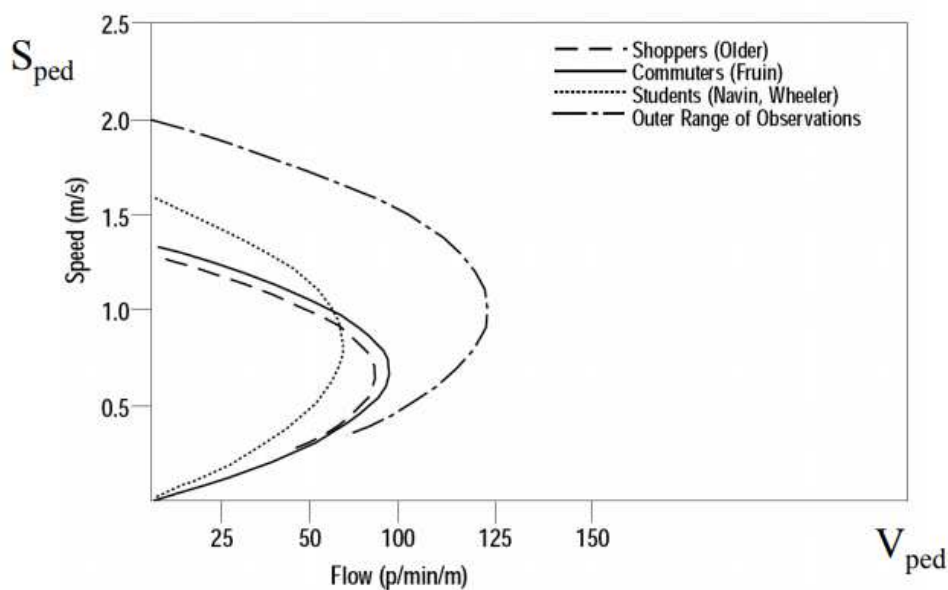


Figura 2.5b: relazioni flusso-velocità per i pedoni secondo gli studi di Older, Fruin e Navin&Wheeler. Immagine tratta da (Crisalli, 2010).

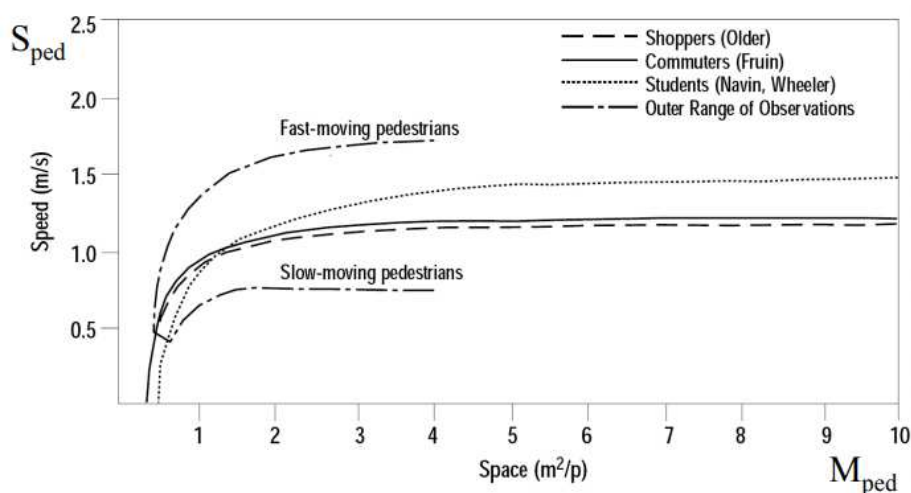


Figura 2.5c: relazioni modulo-velocità per i pedoni secondo gli studi di Older, Fruin e Navin&Wheeler. Immagine tratta da (Crisalli, 2010).

- Livello di Servizio A (LoS A)

La superficie calpestabile media per persona viene assunta pari o superiore al valore di 3.25 m^2 (Figura 2.6). Di conseguenza il flusso risulta aggirarsi al di sotto di 7 PFM (Figura 2.5) (*Pedestrian per Foot width of walkways, per Minute* – Pedoni per larghezza del marciapiede, al minuto).

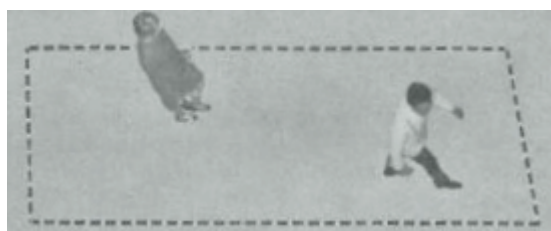


Figura 2.6: Esempio di LoS A. Immagine tratta da *Pedestrian planning and design* (Fruin, 1971)

“[...] sufficient area is provided for pedestrian to freely select their own walking speed, to bypass slower pedestrian, and avoid crossing conflicts with others.”
(Fruin, 1971)

Caratteristiche: edifici pubblici o piazze in cui non vengono registrati alti picchi di flusso e/o severe condizioni di restringimento.

- Livello di Servizio B (LoS B)

La superficie calpestabile media per persona viene assunta compresa fra i 2.5 m² e i 3.25 m² (Figura 2.7). Di conseguenza si registra un flusso pedonale a cavallo fra i 7 e i 10 PFM (Figura 2.5).



Figura 2.7: Esempio di LoS B. Immagine tratta da Pedestrian planning and design (Fruin, 1971)

“[...] sufficient space is available to select normal walking speed, and to bypass other pedestrians in primarily one-directional flows. Where reverse-direction or pedestrian crossing movements exist, minor conflicts will occur slightly lowering mean pedestrian speeds and potential volume.” (Fruin, 1971)

Caratteristiche: nodi di trasporto o edifici in cui si riscontrano frequenti ma poco severi picchi di flusso.

- Livello di Servizio C (LoS C)

La superficie calpestabile media per persona viene assunta compresa fra i 1.4 m² e i 2.5 m² (Figura 2.8). Di conseguenza si registra un flusso pedonale a cavallo fra i 10 e i 15 PFM (Figura 2.5).



Figura 2.8: Esempio di LoS C. Immagine tratta da Pedestrian planning and design (Fruin, 1971)

“[...] freedom to select individual walking speed and freely pass other pedestrian is restricted. Where pedestrian cross movements and revers flow exist, there is a high probability of conflict requiring frequent adjustment of speed and direction to avoid contact.” (Fruin, 1971)

Caratteristiche: nodi di trasporto o edifici pubblici dove si combinano considerevoli picchi di flusso e spazi ristretti.

- *Livello di Servizio D (LoS D)*

La superficie calpestabile media per persona viene assunta compresa fra i 0.93 m² e i 1.4 m² (Figura 2.9). Di conseguenza si registra un flusso pedonale a cavallo fra i 15 e i 20 PFM (Figura 2.5).



Figura 2.9: Esempio di LoS D. Immagine tratta da Pedestrian planning and design (Fruin, 1971)

“[...], the majority of persons would have their normal walking speed restricted and reduced, due to difficulties in bypassing slower-moving pedestrians and avoiding conflicts. Pedestrian involved in reverse-flow and crossing movements would be severely restricted, with the occurrence of multiple conflicts with others.” (Fruin, 1971)

Caratteristiche: aree pubbliche più affollate, dove è necessario alterare la propria velocità e la propria direzione per proseguire.

- *Livello di Servizio E (LoS E)*

La superficie calpestabile media per persona viene assunta compresa fra i 0.46 m² e i 0.93 m² (Figura 2.10). Di conseguenza si registra un flusso pedonale a cavallo fra i 20 e i 25 PFM (Figura 2.5).



Figura 2.10: Esempio di LoS E. Immagine tratta da Pedestrian planning and design (Fruin, 1971)

“[...], virtually all pedestrian would have their normal walking speed restricted, requiring frequent adjustments of gait. At lower end of the range, forward progress would only be made by shuffling. Insufficient area would be available to bypass slower-moving pedestrians. Extreme difficulties would be experienced by pedestrians attempting reverse flow and cross flow movements.” (Fruin, 1971)

Caratteristiche: stadi o stazioni ferroviarie dove si registrano grandi flussi di persone che si dirigono all'unisono nella stessa direzione.

- Livello di Servizio F (LoS F)

La superficie calpestabile media per persona viene assunta pari o inferiore al valore di 0.46 m² (Figura 2.11). Di conseguenza si registra un flusso pedonale superiore ai 25 PFM (Figura 2.5).



Figura 2.11: Esempio di LoS F. Immagine tratta da Pedestrian planning and design (Fruin, 1971)

“[...], all pedestrian walking speeds are extremely restricted, and forward progress can only be made by shuffling. There would be frequent, unavoidable contact with other pedestrians, and reverse or crossing movements would be virtually impossible.” (Fruin, 1971)

Caratteristiche: Perdita di controllo del traffico, questo tipo di LoS è più rappresentativo per le condizioni di coda.

Stairway standard

Nel caso del moto su scale fisse (Figura 2.12), è necessario concentrarsi maggiormente sulle caratteristiche del pedone in quanto esso è sottoposto a maggiori rischi e ad un dispendio di forza più consistente.

Per questo motivo nella progettazione si deve permettere la facile identificazione delle scale,

un adeguato spazio per l'approccio, un'alzata inferiore ai 15 cm per ridurre lo spreco di energie e aumentare l'efficienza del traffico, etc.

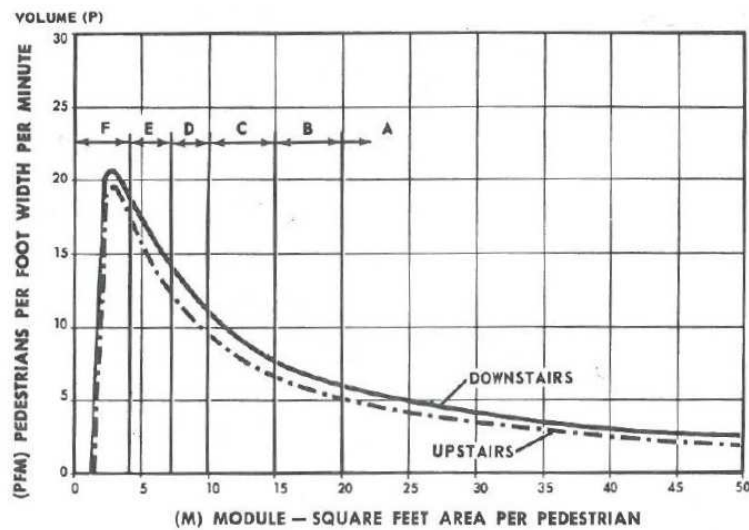


Figura 2.12: Valori standard per Livelli di servizio in condizioni di moto su scala. Immagine tratta da *Pedestrian planning and design* (Fruin, 1971)

- Livello di Servizio A (LoS A)

La superficie calpestabile media per persona viene assunta pari o superiore al valore di 1.86 m^2 . Di conseguenza il flusso risulta aggirarsi al di sotto di 5 PFM (Figura 2.5).

"[...], sufficient area is provided to freely select locomotion speed, and to bypass other slower-moving pedestrians. No serious difficulties would be experienced with reverse traffic flows." (Fruin, 1971)

- Livello di Servizio B (LoS B)

La superficie calpestabile media per persona viene assunta compresa fra i 1.4 m^2 e i 1.86 m^2 . Di conseguenza si registra un flusso pedonale a cavallo fra i 5 e i 7 PFM (Figura 2.5).

"[...], all persons may freely select locomotion speeds. However, in the lower range of area occupancy, some difficulties would be experienced in passing slower-moving pedestrians. Reverse flows would cause minor traffic conflicts." (Fruin, 1971)

- Livello di Servizio C (LoS C)

La superficie calpestabile media per persona viene assunta compresa fra i 1.86 m² e i 0.93 m². Di conseguenza si registra un flusso pedonale a cavallo fra i 7 e i 10 PFM (Figura 2.5).

“[...], locomotion speeds would be restricted slightly due to an inability to pass slower-moving pedestrians. Minor reverse-traffic flows would encounter some difficulties.” (Fruin, 1971)

- Livello di Servizio D (LoS D)

La superficie calpestabile media per persona viene assunta compresa fra i 0.93 m² e i 0.65 m². Di conseguenza si registra un flusso pedonale a cavallo fra i 10 e i 13 PFM (Figura 2.5).

“[...], locomotion speeds are restricted for the majority of persons, due to the limited open tread space and an inability to bypass slower-moving pedestrians. Reverse flows would encounter significant difficulties and traffic conflicts.” (Fruin, 1971)

- Livello di Servizio E (LoS E)

La superficie calpestabile media per persona viene assunta compresa fra i 0.37 m² e i 0.65 m². Di conseguenza si registra un flusso pedonale a cavallo fra i 13 e i 17 PFM (Figura 2.5).

“[...], all persons would have their locomotion speeds reduced, because of the minimum tread length space and inability to bypass others. Intermittent stoppages are likely to occur, as the critical pedestrian density is exceeded. Reverse traffic flows would experience serious conflicts.” (Fruin, 1971)

- Livello di Servizio F (LoS F)

La superficie calpestabile media per persona viene assunta pari o inferiore al valore di 0.37 m². Di conseguenza si registra un flusso pedonale superiore ai 17 PFM (Figura 2.5).

“[...], there is a complete breakdown in traffic flow, with many stoppages. Forward progress would depend on movement of those in front.” (Fruin, 1971)

Queuing standard

Anche in questo caso i livelli di comfort percepiti dai pedoni in coda si riferiscono alle dimensioni del corpo umano e alle preferenze di spazio a disposizione precedentemente discusse. Nel corso della modellazione degli spazi destinati alla mobilità pedonale, il progettista non dovrà tenere in considerazione solamente gli spazi destinati primariamente all'attesa (biglietterie, tornelli, etc.), ma dovrà studiare anche quelle zone in cui è possibile che si venga a creare una coda. Dunque, ad esempio, anche le aree di approccio delle scale devono essere realizzate in modo tale da ospitare un largo numero di pedoni in attesa.

- Livello di Servizio A (LoS A)

La superficie calpestabile media per persona viene assunta pari o superiore al valore di 1.21 m^2 . Di conseguenza lo spazio inter-personale medio è di 1.22 m o superiore.

"[...], space is provided for standing and free circulation through the queuing area without disturbing others." (Fruin, 1971)

- Livello di Servizio B (LoS B)

La superficie calpestabile media per persona viene assunta compresa fra i 0.93 m^2 e i 1.21 m^2 . Di conseguenza lo spazio inter-personale medio è compreso fra i 1.2 m e i 1.1 m .

"[...], space is provided for standing and restricted circulation through the queue without disturbing others." (Fruin, 1971)

- Livello di Servizio C (LoS C)

La superficie calpestabile media per persona viene assunta compresa fra i 0.65 m^2 e i 0.93 m^2 . Di conseguenza lo spazio inter-personale medio è compreso fra i 1.1 m e i 0.9 m .

"[...], space is provided for standing and restricted circulation through the queueing area by disturbing others. It is within the range of the personal comfort body buffer zone established by psychological experiments." (Fruin, 1971)

- Livello di Servizio D (LoS D)

La superficie calpestabile media per persona viene assunta compresa fra i 0.23 m² e i 0.65 m². Di conseguenza lo spazio inter-personale medio è compreso fra i 0.9 m e i 0.6 m.

“[...], space is provided for standing without personal contact with others, but circulation through the queueing area is severely restricted, and forward movement is only possible as a group.” (Fruin, 1971)

- Livello di Servizio E (LoS E)

La superficie calpestabile media per persona viene assunta compresa fra i 0.18 m² e i 0.23 m². Di conseguenza lo spazio inter-personale medio è di 0.6 m o inferiore.

“[...], space is provided for standing, but personal contact with others is unavoidable. Circulation within the queueing area is not possible. This level of area occupancy can only be sustained for short periods of time without physical and psychological discomfort.” (Fruin, 1971)

- Livello di Servizio F (LoS F)

La superficie calpestabile media per persona viene assunta pari a 0.18 m² o minore. Di conseguenza i pedoni si trovano a stretto contatto fisico con le persone circostanti.

“[...], space is approximately equivalent to the area of the human body. Standing is possible, but close unavoidable contact with surrounding standees causes physical and psychological discomfort.” (Fruin, 1971)

2.1.1.2 Highway Capacity Manual (HCM 2010)

La normativa italiana vigente non fornisce indicazioni o metodi per la valutazione dei livelli qualitativi dei percorsi pedonali, nè riguardo al tasso di utilizzazione né riguardo al livello di sicurezza. Per questo motivo per affrontare la tematica del livello di servizio delle infrastrutture pedonali, è assai utile assumere come riferimento il metodo proposto dal Transportation Research Board statunitense nel manuale Highway Capacity Manual (HCM 2010 : Highway Capacity Manual, 2010).

2.1.1.2.1 Caratteristiche Moto del Pedone

Nella valutazione di un'infrastruttura pedonale, l'HCM adotta la stessa "body ellipse" definita da Fruin (0.3 m^2). Tuttavia raccomanda un'area personale di 0.76 m^2 per permettere di camminare evitando movimenti non naturali. Infatti un pedone in movimento necessita di una particolare quantità di spazio, questo spazio determina la modalità e la velocità di spostamento e di conseguenza il flusso che ne scaturisce.

L'analisi del traffico pedonale è generalmente basata sullo studio della velocità media di un gruppo di pedoni. Le caratteristiche del flusso pedonale possono variare, anche considerevolmente, all'interno di ciascun gruppo di pedoni e tra i diversi gruppi, in ragione del motivo dello spostamento, dell'uso del suolo, della tipologia del gruppo, dell'età, e di altri fattori. I più anziani e i più giovani tendono a camminare più lentamente degli altri gruppi di pedoni; se la presenza di anziani (65 anni o più) all'interno della popolazione si mantiene sotto il 20% del totale, allora si può assumere la velocità media pedonale pari a 1.2 m/s ; altrimenti, se la soglia di anziani dovesse superare il 20%, si dovrà assumere una velocità media di 1 m/s . Chi cammina per motivi di lavoro (commuters), utilizzando le stesse infrastrutture ogni giorno, si muove più velocemente rispetto a chi fa shopping (Figura 2.13); chi si sposta per fare acquisti non solo si muove più lentamente dei pendolari, ma può anche ridurre la larghezza utile del percorso pedonale, fermandosi a guardare le vetrine e portando sacchetti o pacchetti.

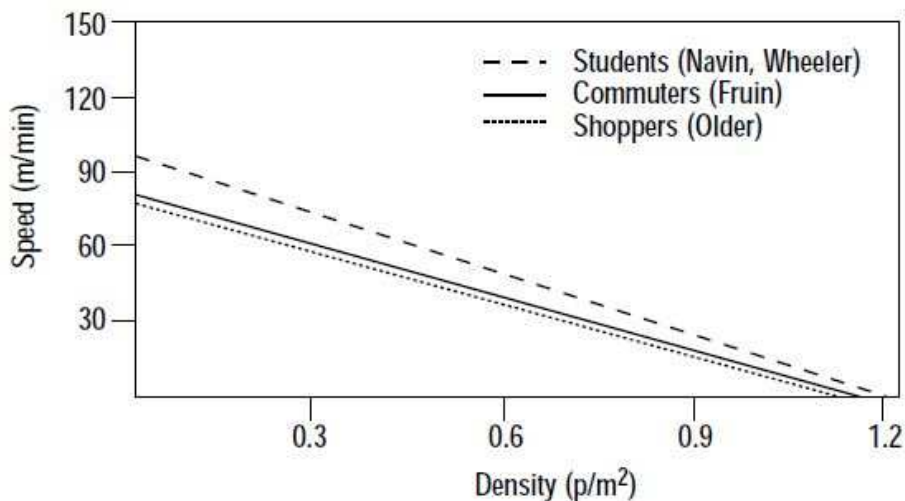


Figura 2.13: Relazione Densità – Velocità a seconda del profilo del pedone. Confronto dati ottenuti dagli studi di Fruin, Navin&Wheeler e Older. Immagine tratta da HCM 2010 (HCM 2010 : Highway Capacity Manual, 2010)

Perciò, nell'analisi del traffico pedonale, bisognerebbe prendere opportunamente in considerazione il comportamento di quegli utenti che si discostano dalle rappresentazioni regolari delle curve fondamentali relative alla velocità, alla portata ed alla densità.

L'inclinazione del percorso pedonale è un'altra componente di rilievo per la velocità di

camminamento. Infatti un aumento di pendenza del 10% o più riduce la velocità di 0,1 m/s. Quelli appena elencati sono solamente alcuni fattori che influenzano la velocità di spostamento; parecchie altre condizioni possono determinare la riduzione o l'aumento della velocità pedonale media, come ad esempio il tipo di ambiente o la percentuale di bambini, coppie o turisti che camminano più lentamente.

L'HCM introduce il concetto di "plotone di pedoni". Progettare un'infrastruttura in funzione del picco massimo di 1 minuto, che si verifica solo l'1% o il 2% delle volte, non risulta affatto adeguato. È infatti necessario determinare, attraverso una valutazione più approfondita delle fluttuazioni a breve termine del flusso pedonale, un periodo di osservazione adeguato.

Fluttuazioni a breve termine sono presenti nella maggior parte dei flussi di traffico pedonale libero, a causa dell'ingresso casuale di nuovi pedoni. Sui marciapiedi, tali fluttuazioni casuali sono enfatizzate dall'interruzione del flusso e dalla formazione di code generate dai dispositivi semaforici. Le infrastrutture di trasporto, rilasciando consistenti gruppi di pedoni in intervalli di tempo ridotti, seguiti da altri intervalli senza flusso pedonale, possono generare impulsi addizionali sulla domanda di spazio. Finché non si disperdono, i pedoni facenti parte di tali gruppi si muovono insieme a forma di plotoni. Plotoni di pedoni si possono anche formare se il percorso non ha una larghezza sufficiente; in quel caso i pedoni più rapidi sono costretti a rallentare, procedendo a seguito di quelli più lenti. Queste valutazioni sono molto importanti per la comprensione delle caratteristiche del flusso pedonale rispetto al livello di servizio. Pertanto, tenuto conto delle considerazioni sopra riportate, l'intervallo di tempo significativo per quantificare il flusso pedonale è di 15 minuti (HCM 2010 : Highway Capacity Manual, 2010).

Come precedentemente visto con Fruin, anche l'HCM fornisce indicazioni riguardanti i livelli di servizio (LoS) dei percorsi pedonali basandosi sui valori medi della portata (Tabella 1.1) ed escludendo a priori la presenza di flussi in forma di plotoni di pedoni.

Tabella 2.1. Valori medi portata e spazio pedonale dei LoS HCM - moto piano.

LoS	Spazio pedonale (m^2/p)	Portata pedonale (p/min/m)
A	> 5.6	< 16
B	3.7 - 5.6	16 - 23
C	2.2 - 3.7	23 - 33
D	1.4 - 2.2	33- 49
E	0.75 - 1.4	49 - 75
F	< 0.75	variabile

- Livello di Servizio (LoS A)
I pedoni camminano secondo i percorsi desiderati, senza modificare i propri movimenti per la presenza di altri pedoni. La velocità è scelta liberamente e la probabilità di conflitto tra pedoni risulta molto bassa. (HCM 2010 : Highway Capacity Manual, 2010)
- Livello di Servizio (LoS B)
Lo spazio disponibile rende libera la scelta della velocità, permette di superare gli altri pedoni e di evitare i conflitti trasversali. La presenza degli altri pedoni tende a divenire elemento di attenzione, determinando la scelta del proprio percorso. (HCM 2010 : Highway Capacity Manual, 2010)
- Livello di Servizio (LoS C)
Lo spazio disponibile consente ancora di mantenere un'andatura normale e di sorpassare gli altri pedoni, soprattutto in correnti di flusso unidirezionali. I movimenti nella direzione opposta o quelli trasversali possono generare conflitti di modesta entità, e decrescono leggermente le velocità e la portata. (HCM 2010 : Highway Capacity Manual, 2010)
- Livello di Servizio (LoS D)
Il grado di libertà nella scelta della velocità e nel superamento degli altri pedoni è limitato. I movimenti trasversali o in senso contrario sono accompagnati da un'alta probabilità di conflitto, determinando frequenti variazioni di velocità e di traiettoria. Il flusso è abbastanza fluido, ma aumenta la probabilità di interazione tra i pedoni. (HCM 2010 : Highway Capacity Manual, 2010)
- Livello di Servizio (LoS E)
La velocità si riduce, poiché i pedoni sono frequentemente costretti a cambiare traiettoria. Lo spazio disponibile è insufficiente per superare i pedoni più lenti e il movimento trasversale o in senso contrario risulta estremamente difficoltoso. (HCM 2010 : Highway Capacity Manual, 2010)
- Livello di Servizio (LoS F)
La velocità è fortemente condizionata e ogni pedone riesce a muoversi solo cambiando continuamente traiettoria. Il contatto con gli altri pedoni è frequente ed inevitabile, mentre risulta praticamente impossibile procedere trasversalmente o in senso contrario. Il flusso è sporadico ed instabile, e lo spazio disponibile è più simile a quello dei pedoni in coda che a quello dei pedoni in movimento. (HCM 2010 : Highway Capacity Manual, 2010)

Nella Tabella 2.2 sono invece riportati i valori di portata pedonale e spazio pedonale medi stimati per lo spostamento su scale.

Tabella 2.2. Valori medi portata e spazio pedonale dei LoS HCM - moto su scala.

LoS	Spazio pedonale (m^2/p)	Portata pedonale (p/min/m)
<i>A</i>	> 1.9	< 16
<i>B</i>	1.6 - 1.9	16 - 20
<i>C</i>	1.1 - 1.6	20 - 26
<i>D</i>	0.7 - 1.1	26- 36
<i>E</i>	0.5 - 0.7	36 - 49
<i>F</i>	< 0.5	variabile

Infine il concetto di spazio medio disponibile come misura per determinare il livello di servizio di un percorso pedonale può essere anche applicato alle aree di coda o di attesa: aree dove i pedoni si fermano temporaneamente, per esempio in attesa di attraversare la strada o di salire su un mezzo del trasporto collettivo. Il livello di servizio delle aree di attesa dipende dallo spazio medio disponibile per ciascun pedone e dal grado di libertà di movimento consentito. In situazioni di elevata densità ed affollamento di pedoni fermi, c'è poco spazio per muoversi, ma una limitata circolazione risulta possibile non appena lo spazio medio disponibile aumenta. Le definizioni dei livelli di servizio per le aree di attesa con pedoni fermi si basano sullo spazio medio disponibile, il comfort individuale e il grado di mobilità interna.

Tabella 2.3. Valori medi di spazio e distanza fra le singole entità dei LoS HCM - attesa in coda.

LoS	Spazio pedonale (m^2/p)	Distanza fra i pedoni (m)
<i>A</i>	> 1.2	> 1.2
<i>B</i>	0.9 - 1.2	1.1 - 1.2
<i>C</i>	0.6 - 0.9	0.9 - 1.1
<i>D</i>	0.3 - 0.6	0.6 - 0.9
<i>E</i>	0.2 - 0.3	< 0.6
<i>F</i>	< 0.2	Stretto contatto

- Livello di Servizio A (LoS A)
Nell'area di attesa si può stazionare e circolare liberamente, senza disturbare gli altri pedoni in coda (HCM 2010 : Highway Capacity Manual, 2010)
- Livello di Servizio B (LoS B)
Lo stazionamento e la circolazione, più limitata che nel caso "LoS A", sono ancora possibili senza che si disturbino le altre persone (HCM 2010 : Highway Capacity Manual, 2010)
- Livello di Servizio C (LoS C)
La circolazione è ancora possibile, disturbando però gli altri pedoni; i valori della densità rientrano comunque nel campo del comfort personale (HCM 2010 : Highway Capacity Manual, 2010)
- Livello di Servizio D (LoS D)
Lo stazionamento può anche non implicare il contatto con gli altri; la circolazione è però molto difficoltosa e l'avanzamento è possibile solo in gruppo. A questa densità l'attesa per un lungo intervallo di tempo crea un senso di disagio (HCM 2010 : Highway Capacity Manual, 2010)
- Livello di Servizio E (LoS E)
Il contatto con gli altri è inevitabile ed è impossibile circolare. Tali condizioni di densità sono sopportabili solo per un breve intervallo di tempo, oltre il quale si manifesta un evidente disagio (HCM 2010 : Highway Capacity Manual, 2010)
- Livello di Servizio F (LoS F)
Le persone in coda sono in contatto fisico le une con le altre. La densità è tale da generare un estremo disagio, impedire qualsiasi movimento e provocare, nel caso di grande folle, il panico (HCM 2010 : Highway Capacity Manual, 2010)

2.1.1.3 Considerazioni Modelli Macroscopici

Per quanto riguarda la modellazione pedonale, le classificazioni LoS di Fruin e dell'Highway Capacity Manual sono studi riconosciuti a livello globale. Ciò è dimostrato anche dal fatto che all'interno dei diversi software pedonali utilizzati nella realizzazione di questa Tesi di Laurea, è possibile trovare impostati di default i valori LoS Fruin e LoS HCM per l'elaborazione dei dati. Sebbene negli anni a seguire l'analisi relativa ai livelli di servizio sia stata portata avanti, come raccontano Asadi-Shekari et al. (Asadi-Shekari, Moeinaddini, & Shah, 2013), gli studi successivi hanno sempre avuto un forte richiamo ai lavori di Fruin e a quello dell'HCM.

Osservando i due modelli presi in esame precedentemente, è evidente come siano presenti punti in comune ma anche discordanze. Per quanto riguarda lo spazio occupato dal singolo

pedone, l'HCM ha adottato la medesima "body ellipse" definita da Fruin. I livelli di servizio sono stati introdotti dall'HCM per indicare la densità dei veicoli; Fruin, invece, definisce i LoS in uno spazio architettonico collegando i valori LoS ai pedoni, ottenendo così risultati differenti. Inoltre deve essere tenuto in considerazione il fatto che, sebbene la "body ellipse" sia la stessa per entrambi gli studi, l'HCM consiglia l'utilizzo di un'approssimazione dell'area totale occupata dal pedone a 0.76 m^2 .

La ragione principale delle variazioni nei risultati LoS dei due diversi studi può essere dunque collegata a come l'approccio LoS viene condotto, in quanto i valori LoS sono direttamente collegati alla scala antropometrica. Fruin evidenzia l'importanza delle dimensioni del corpo e descrive le differenze antropometriche come segue: "Body depth and shoulder breadth are the primary human measurements used in considering pedestrian spaces and facilities. Shoulder breadth is a major factor in the design of doorways, stairways, and so on" (Fruin, 1971). Fruin tuttavia è cosciente anche delle differenze, sia antropometriche ma anche antropologiche, che possono essere presenti fra diverse etnie e società. Diversamente l'HCM fissa semplicemente le dimensioni della "body ellipse" e dichiara che questa zona gioca un ruolo importante nella progettazione dello spazio.

Dunque, non è necessario trovare un accordo universale sui LoS, ma è utile sviluppare un metodo di determinazione LoS prestando attenzione alle caratteristiche antropometriche e antropologiche (Erkan & Hastemoglu, 2016). Per questo motivo l'HCM è stato spesso oggetto di critiche (Asadi-Shekari, Moeinaddini, & Shah, 2013) in quanto metodo realizzato sulla base della cultura Americana, senza trarre ispirazione anche da contesti esterni.

2.1.2 Modelli Microscopici

I modelli microscopici descrivono ogni singolo individuo presente e la sua interazione con gli altri pedoni che condividono con esso l'ambiente circostante. Ciò significa dunque che, diversamente da quello visto con i modelli macroscopici, i valori descritti non saranno più quelli medi (statici), ma nei modelli si darà molto più peso all'eterogeneità della popolazione. Dunque si potrà controllare per ogni singola entità differenti parametri relativi alla propria dinamica del moto; si potrà facilmente notare come il controllo sulla velocità del singolo conduca alla possibile valutazione e conseguente gestione della interazione dei moti individuali.

Revisioni dei modelli di propagazione pedonale come quelle condotte da Duvies et al. (Duvies, Daamen, & Hoogendoorn, 2013), Caramuta et al. (Caramuta, et al., 2017) e (Shiwakoti, Sarvi, & Rose, 2008) forniscono un'ampia panoramica sui modelli microscopici realizzati negli ultimi due decenni.

Di seguito verranno descritti quattro dei principali modelli microscopici. Importante però tenere a mente che questa categorizzazione viene effettuata col fine di discutere alcuni particolari interessanti di ogni singola categoria; tuttavia questi modelli nella realtà vengono parzialmente sovrapposti l'uno all'altro, non esiste quindi una distinzione netta e marcata.

2.1.2.1 Cellular Automata (CA)

Questi modelli discretizzano sia il tempo sia lo spazio e sono stati i primi ad essere utilizzati per la simulazione microscopica in quanto non richiedono un'alta intensità di calcolo computazionale.

Una delle caratteristiche più rappresentative dei CA è la rappresentazione dello spazio attraverso una griglia, ogni unità di spazio viene definita “cella” e può essere occupata da un pedone o da un ostacolo, oppure può essere lasciata vuota (Blue & Adler, Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways, 2001) (Bierlaire, Antonini, & Weber, 2003) (Burstedde, Klauck, Schadschneider, & Zittartz, 2001) (Buzna, 2004) (Teknomo, Takeyama, & Inamura, 2001). Questo significa che le dimensioni delle entità vengono per forza di cose considerate costanti e che il minimo spostamento concesso è quello fra due celle adiacenti l'una all'altra (Blue & Adler, 2001). Sebbene questa discretizzazione di spazio possa essere vista come un'approssimazione, bisogna tenere conto del vantaggio che essa porta dal punto di vista dell'efficienza computazionale. Infatti i modelli CA sono stati approfonditi da diversi studiosi, ad esempio Blue et al. (Blue & Adler, 2000) partendo da un modello mono-direzionale sono arrivati a definirne uno quadri-direzionale. Tale modello si regge su un set di regole esteso e considera tre tipi di movimento: comportamento dei pedoni che seguono, comportamento dei pedoni a capo del flusso (head-on conflicts) e comportamento dei pedoni nei confronti dei pedoni aventi direzioni perpendicolari (cross-directional conflicts).

Per i pedoni inseriti all'interno dei modelli CA la “cella successiva” preferita è quella che riduce in maggior quantità la distanza rimanente alla destinazione del pedone stesso. Tuttavia la navigazione all'interno della griglia di celle è influenzata (e di conseguenza modificata) dalla presenza di altri pedoni, tenendo così in considerazione la forza di interazione fra le entità del modello (Blue & Adler, 2001) (Buzna, 2004) (Teknomo, Takeyama, & Inamura, 2001).

I modelli CA sono stati utilizzati a lungo per la simulazione di traffico veicolare, ma possono essere adattati ai flussi pedonali, come dimostrato dagli studi di Gipps e Marksjo (Gipps & Marksjo, 1985). Per rappresentare diverse velocità Gipps e Marksjo utilizzano uno “schema di movimento sequenziale” dove i pedoni più veloci hanno la possibilità di muoversi più spesso rispetto a quelli più lenti. Questo “schema di movimento sequenziale” permette inoltre di evitare l'utilizzo di leggi che regolino i conflitti fra le entità, necessarie invece nei casi di “schema di movimento parallelo”.

Dijkstra et al. (Dijkstra, Timmermans, & Jessurun, 2000) (Dijkstra, Jessurun, & Timmermans, 2001) portano a termine uno studio sull'utilizzo di un modello microscopico CA col fine di simulare il comportamento pedonale in luoghi pubblici. In questo modello vengono considerati diverse classi di entità: gli user-agent, che rappresentano le persone all'interno della simulazione, i subject-agent e actor-agent, che navigano sfruttando la griglia che costituisce l'ambiente, ognuno con il proprio comportamento e le proprie intenzioni.

Studi simili sono stati condotti da Wang et al. (Wang, Zhang, Shi, Yang, & Hu, 2015). Anche in questo caso vengono adottate diverse classi di entità (età e sesso) inserite in situazioni di congestione e panico.

Anche Chen et al. (Chen, Chen, Wang, Wang, & Feng, 2015) realizzando un "multi-agent CA

model” suddivide i pedoni all’interno di tre categorie: *unaffected*, pedoni che non risentono dell’influenza di un determinato incidente; *stopped*, se sono attratti dall’incidente ma non desiderosi di avvicinarsi al luogo in cui è avvenuto; *on-looking*, se dimostrano forte interesse nei confronti dell’incidente.

La necessità di introdurre un’interazione a lungo raggio fra i pedoni spinse Schadschneider (Schadschneider, 2001) e Burstedde (Burstedde, 2001) ad introdurre una griglia di celle dinamica; questa particolare soluzione permette ad ogni singolo pedone di interagire direttamente con i suoi vicini più prossimi e indirettamente con i pedoni più distanti, grazie alla griglia dinamica.

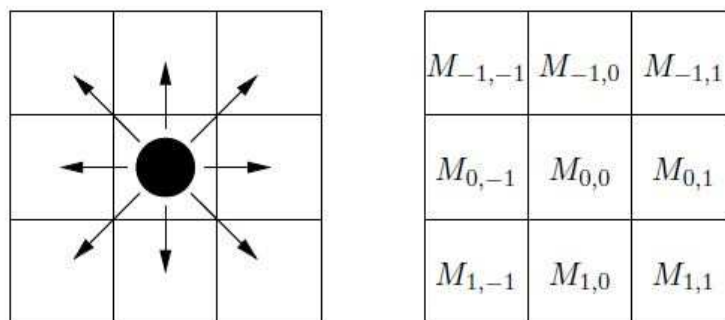


Figura 2.14: Entità inserita nel sistema CA e matrice associata delle preferenze $M=(M_{ij})$.
Immagine tratta da “Cellular Automation Approach to Pedestrian Dynamics”
(Schadschneider, 2001)

Questo accorgimento ha come fine quello di produrre percorsi preferenziali, rendendo le celle recentemente occupate da un pedone più attrattive nei confronti dei pedoni che marciano nella stessa direzione (più tempo la cella rimane vuota, più il suo potere di attrazione per quella direzione cala).

Il modello è stocastico, le preferenze dei pedoni sono espresse tramite la probabilità di scelta del prossimo spostamento. In questo caso inoltre lo schema di movimento è parallelo, e sebbene risulti più intuitivo rispetto a quello sequenziale di Gipps e Marksjo, richiede una particolare attenzione nel caso di conflitto fra due entità che vogliono occupare la stessa cella; col fine di trovare una soluzione a tale problema, gli studi di Schadschneider e di Burstedde propongono l’utilizzo di un sorteggio casuale, utilizzando le probabilità di conflitto dei pedoni precedentemente calcolate come probabilità relative al fine di determinare quale pedone possa spostarsi per primo. Bandini et al. (Bandini, Mondini, & Vizzari, 2014) hanno creato invece un’estensione di modello che permette ai pedoni in transizione di sovrapporsi in situazioni di alta densità.

2.1.2.2. Agent Based Model (ABM)

Con il complicarsi delle leggi che governano lo spostamento dei pedoni all’interno del modello si è assistito ad un passaggio dai modelli CA a quelli chiamati Agent Based Model.

In generale gli ABM possono essere sia continui sia discreti, sia nello spazio sia nel tempo e possono essere governati da qualsiasi tipo di legge; hanno spesso un ampio set di regole comportamentali, ognuna di esse definita per una particolare situazione.

In questo caso lo schema di movimento è composto da due fasi, in primo luogo il pedone riconosce il contesto nel quale è collocato attraverso uno o più test, una volta fatto ciò esegue le regole che il modello prevede per il contesto individuato (Musse, Babski, Capin, & Thalmann, 1998) (O'Sullivan & Haklay, 2000).

Negli ABM il processo decisionale dei pedoni può essere definito come *backward-looking*: gli agenti apprendono dal passato, sviluppando delle regole di comportamento che condizionano i loro movimenti futuri basandosi sulla propria storia e su quella dell'intero sistema (O'Sullivan & Haklay, 2000). In altre parole sono mossi, come detto in precedenza, da una razionalità adattiva alla situazione; si adattano cioè ad un ambiente disordinato e complesso usando delle deduzioni che possono variare nel tempo. Il punto importante da sottolineare è che proprio tali assunzioni cognitive determinano la complessità e al tempo stesso la complessità implica tali assunzioni cognitive. Quando, infatti, una molteplicità di entità interagisce in un ambiente e al contempo tali entità utilizzano delle strategie adattive piuttosto che ottimali, dedurre le conseguenze è spesso impossibile, proprio perché l'interazione tra agenti adattivi produce degli effetti non-lineari. I modelli generati sono quindi, per definizione, *dinamici*. Inoltre, proprio per questa loro caratteristica, tali modelli risultano analiticamente intrattabili da un punto di vista matematico, mentre possono essere oggetto di una investigazione sistematica attraverso una simulazione al computer.

Bonabeau (Bonabeau, 2007) definisce quelle che sono le caratteristiche base degli ABM:

- Gli agenti possono mostrare schemi comportamentali complessi e fornire informazioni preziose sulle dinamiche dell'ambiente che stanno simulando;
- Gli agenti costituiscono un modo naturale per descrivere sistemi complessi di entità individuali con comportamenti autonomi (come traffico veicolare e le folle);
- Il modo migliore per implementare gli ABM nella simulazione pedonale è attraverso un sistema Multi-agent, in cui ciascuno agente virtuale possiede diversi livelli comportamentali e li sfrutta autonomamente.

Non bisogna però pensare che gli agenti possano prendere sempre la “decisione migliore”. In primo luogo trovare la soluzione ottimale di una funzione o la sequenza ottimale delle azioni è spesso un problema dal punto di vista computazionale. Inoltre, come riportano Rosenfeld e Kraus (Rosenfeld & Kraus, 2009), basare il comportamento umano su strategie ottimali risulta errato, in quanto è dimostrato che le persone possiedono uno scarso livello di ottimizzazione. Si dovrà dunque fare riferimento ad agenti “rational bounded” in grado di raggiungere il proprio obiettivo tramite scelte non-ottimali.

Gli ABM sono molto popolari e sono stati applicati in diversi studi con differenti scopi. Gilbert (Gilbert, 2007) applica un ABM ai suoi studi di scienze sociali per modellare i comportamenti delle popolazioni. Sono stati inoltre utilizzati negli studi di Schelling (Schelling, 1971) con lo scopo di analizzare la segregazione razziale nelle città statunitensi, in quelli di Deffuant et al. (Deffuant, Neau, Amblard, & Weisbuch, 2000) per comprendere il

diffondersi delle opinioni politiche e trattati da Izquierdo et al. (Izquierdo & Izquierdo, 2007) per esaminare l'interazione fra i diversi fattori (pubblicità, moda, amicizie, ecc.) che influenzano i clienti a comprare un determinato prodotto. Più recentemente Chen et al. (Chen, Li, Miao, Jiang, & Jiang, 2017) hanno condotto uno studio di applicazione di un ABM per la simulazione dei pedoni in una stazione metropolitana.

2.1.2.3 Social Force Model (SFM)

Il “Social Force Model” di Helbing e Molnàr (Helbing & Molnàr, 1995) è un modello microscopico nel quale ogni singolo individuo è soggetto alla risultante di forze locali istantanee (esterne ed interne) che stimolano il pedone.

Helbing e Molnàr sostengono che un approccio basato su una simulazione pedonale microscopica sia appropriato dal momento che le persone sono abituate a camminare in ambienti affollati, hanno dunque sviluppato nel loro subconscio strategie automatiche che gli permettono di evitare la collisione con altri pedoni. Più semplicemente queste strategie del subconscio possono essere definite semplicemente come regole comportamentali basate sull'obiettivo finale del pedone e sulle condizioni ambientali che lo circondano. L'idea principale del SFM è dunque quella di esprimere l'influenza degli elementi presenti nell'ambiente sul comportamento delle entità. Per fare ciò vengono inserite all'interno del modello tre grandezze vettoriali che condizionano il movimento dei pedoni: *preferred force*, *interaction & obstacle force*, *attraction force*. Questa social force descrive la motivazione del pedone a cambiare velocità; condizionato da determinate situazioni all'interno dell'ambiente, compie accelerazioni e decelerazioni per controllare il proprio moto.

Il SFM lavora in uno spazio continuo, non discretizzato, permettendo così una rappresentazione geometrica dell'ambiente precisa e evitando la perdita di accuratezza dovuta alla discretizzazione del sistema vista nei CA. Ovviamente questo vantaggio di precisione va a gravare sulla complessità computazionale del modello.

Molto importante sottolineare come il modello sia in grado di generare previsioni sui flussi pedonali in scala molto maggiore rispetto a quella sulla quale il modello stesso lavora; il SFM è in grado di riprodurre le caratteristiche microscopiche del traffico (come ad esempio la distanza fra i pedoni), ma è in grado di fornire anche aspetti macroscopici, come la densità e la velocità del flusso pedonale.

2.1.2.3.1 Struttura del SFM

Secondo Helbing e Molnàr (Helbing & Molnàr, 1995) le forze costituenti la “social force” si possono distinguere in 4 categorie (Figura 2.15): la *preferred force* che rappresenta il desiderio dei pedoni di camminare seguendo una velocità preferibile; la *interaction force*, cioè la volontà dei singoli di evitare collisioni con chi li circonda; la *obstacle force* la quale permette di evitare l'urto con ostacoli presenti nell'ambiente; e infine la *attraction force* utile

per simulare gruppi di pedoni che si muovono assieme (attrazione fra entità per diversi motivi). Ciascuna di queste quattro può essere meglio definita come segue:

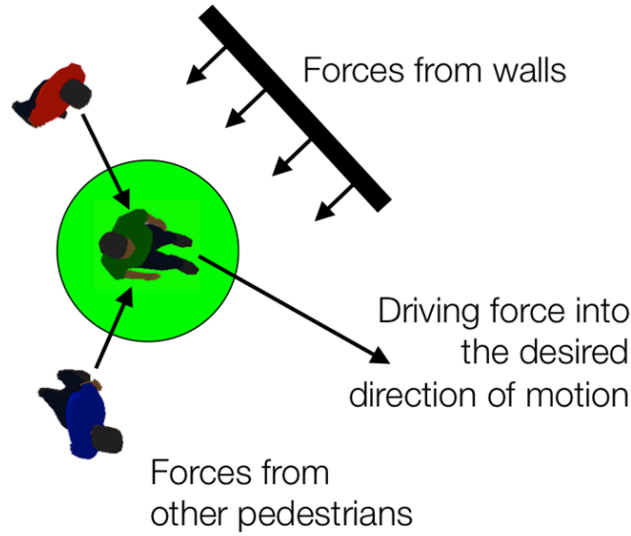


Figura 2.15: descrizione illustrata dei vettori delle forze che influiscono il movimento del pedone secondo il SFM.

- *Preferred Force*

Ogni pedone ha come obiettivo quello di raggiungere la propria destinazione finale, indicata da Helbing e Molnàr (Helbing & Molnàr, 1995) come $\mathbf{r}_{(0, \alpha)}$. Per raggiungere tale destinazione nella maniera più diretta possibile verrà adottato uno schema di spostamento poligonale con spigoli. Dunque il pedice 0 si riferisce all'ultimo punto della polilinea, cioè la destinazione, il pedice α viene utilizzato per attribuire un nome al singolo pedone soggetto alla Social Force.

Assunto quindi $\mathbf{r}_{(k, \alpha)}$ come lo spigolo successivo appartenente alla poligonale che si sta percorrendo (il pedice k indica il punto successivo della polilinea), è possibile definire la direzione desiderata $\mathbf{e}_{\alpha}(\mathbf{t})$ come nell' Eq. (2.3):

$$\mathbf{e}_{\alpha}(\mathbf{t}) = \frac{\mathbf{r}_{(k, \alpha)} - \mathbf{r}_{\alpha}(\mathbf{t})}{|\mathbf{r}_{(k, \alpha)} - \mathbf{r}_{\alpha}(\mathbf{t})|} \quad (2.3)$$

Dove $\mathbf{r}_{\alpha}(\mathbf{t})$ descrive la posizione attuale del pedone α al tempo t .

Se il moto del pedone non verrà disturbato esternamente, esso camminerà seguendo la direzione desiderata $\mathbf{e}_{\alpha}(\mathbf{t})$ mantenendo una definita velocità desiderata $v_{(0, \alpha)}$. Dovendo introdurre eventuali processi di decelerazione viene introdotta con l'Eq. (2.4) una particolare variazione della velocità desiderata $v_{(0, \alpha)}(\mathbf{t})$:

$$\mathbf{v}_{(0, \alpha)}(\mathbf{t}) = v_{\alpha}^0 \mathbf{e}_{\alpha}(\mathbf{t}) \quad (2.4)$$

questa deviazione viene rappresentata da un tempo di rilassamento τ_α con il quale viene approssciata la velocità desiderata $\mathbf{v}_{(0, \alpha)}(\mathbf{t})$. Tutto ciò viene descritto da un termine di accelerazione (Eq. (2.5)):

$$\mathbf{F}_{(0, \alpha)}(\mathbf{v}_\alpha, v_\alpha^0 \mathbf{e}_\alpha) = \frac{1}{\tau_\alpha} (v_\alpha^0 \mathbf{e}_\alpha - \mathbf{v}_\alpha) \quad (2.5)$$

- *Interaction Force & Obstacle Force*

Come già affermato in precedenza il moto di un pedone α è influenzato dai pedoni β che lo circondano. Nello specifico, secondo Helbing e Molnàr (Helbing & Molnàr, Social force model for pedestrian dynamics, 1995), un pedone mantiene una determinata distanza da chi lo circonda in funzione del flusso pedonale e della propria velocità desiderata $\mathbf{v}_{(0, \alpha)}$. Viene data molta importanza dunque alla “sfera personale” delle entità, infatti più ci si avvicina a persone sconosciute più il livello del comfort percepito decresce. Questo determina la nascita di un effetto di repulsione nei confronti degli altri pedoni $V_{\alpha\beta}$ indicato tramite l’Eq. (2.6) del vettore:

$$\mathbf{f}_{\alpha\beta}(\mathbf{r}_{\alpha\beta}) = -\nabla_{\mathbf{r}_{\alpha\beta}} V_{\alpha\beta}[b(\mathbf{r}_{\alpha\beta})] \quad (2.6)$$

Si assume che il potenziale di repulsione $V_{\alpha\beta}(b)$ sia una funzione monotona decrescente di b , rappresentata da linee equipotenziali disposte a formare un’ellisse, la quale è diretta nella direzione del moto; questo poiché il pedone necessita di spazio sufficiente per compiere il passo successivo e questo viene tenuto in considerazione dagli altri pedoni. Dunque b rappresenta il semi-asse minore dell’ellisse, mentre il vettore $\mathbf{r}_{\alpha\beta}$ indica la profondità del passo del pedone β .

Oltre ai pedoni che lo circondano, un pedone α deve tenere conto anche degli ostacoli B presenti nell’ambiente, e anche in questo caso viene definito un effetto repulsivo $U_{\alpha B}(|\mathbf{r}_{\alpha B}|)$ monotono decrescente che può essere descritto, come mostra l’Eq. (2.7), dal vettore:

$$\mathbf{F}_{\alpha B}(\mathbf{r}_{\alpha B}) = -\nabla_{\mathbf{r}_{\alpha B}} U_{\alpha B}(|\mathbf{r}_{\alpha B}|) \quad (2.7)$$

In questo caso il vettore $\mathbf{r}_{\alpha B}$ denota la distanza fra il pedone e lo spigolo dell’ostacolo più vicino ad esso.

- *Attraction Force*

Esistono situazioni nelle quali i pedoni vengono attratti da altri pedoni (amici, famiglia, ecc.), per questi casi è bene valutare un effetto di attrazione $\mathbf{f}_{\alpha i}$ (Eq. (2.8)). Il pedone i rappresenta le entità all’interno della simulazione che attraggono il pedone α :

$$\mathbf{f}_{\alpha i}(|\mathbf{r}_{\alpha i}|, t) = -\nabla_{\mathbf{r}_{\alpha i}} W_{\alpha i}(|\mathbf{r}_{\alpha i}|, t) \quad (2.8)$$

dove W_{ai} rappresenta il potenziale monotono crescente di attrazione. Da specificare come in questo caso la attrazione diminuisca con il passare del tempo t .

Una volta elencate e descritte le forze che agiscono sul pedone e che costituiscono il SFM, è importante specificare come questi effetti repulsivi e attrattivi siano percepiti solo per la direzione del moto desiderata $e_a(t)$. Ciò che accade alle spalle del pedone deve per forza avere un'influenza minore; pertanto Helbing e Molnàr (Helbing & Molnàr, Social force model for pedestrian dynamics, 1995) introducono dei pesi $w(e, f)$ dipendenti dalla direzione che variano da 0 a 1 a seconda del moto desiderato e della disposizione degli altri pedoni e degli ostacoli.

In conclusione si può dunque definire l'equazione che esprime la *Social Force*, poiché tutti gli effetti sopra menzionati influenzano simultaneamente le decisioni dei pedoni, si assume che il loro effetto totale possa essere descritto dalla semplice somma di forze (Eq. (2.9))

$$F_a(t) = Preferred + \sum Interactions + \sum Attractions \quad (2.9)$$

Infine è solito aggiungere un termine di fluttuazione che tiene conto delle variazioni casuali del comportamento del pedone. Queste fluttuazioni nascono, da una parte, da situazioni ambigue in cui due o più alternative comportamentali sono equivalenti (ad esempio se l'utilità di passare un ostacolo sul lato destro o sinistro è uguale). D'altra parte, le fluttuazioni sono dovute a variazioni accidentali dalle normali regole di movimento.

2.1.2.3.2 Predizioni del SFM

Cosa si intende quando si parla di “predizioni” nei modelli microscopici? Un buon modello deve essere in grado di restituire autonomamente determinate situazioni, cioè dei fenomeni emergenti, non inseriti nella formulazione del modello stesso, che sono osservati in condizioni di alto flusso pedonale. Questi fenomeni devono emergere dalla interazione fra i pedoni e vengono utilizzati come controprova della bontà del modello; l'accurata predizione di queste situazioni rappresenta una delle ragioni che rendono così valido il SFM. Quando due flussi pedonali monodirezionali opposti si intersecano, i pedoni iniziano automaticamente a disporsi in quelle che vengono chiamate “bande dinamiche” (Figura 2.15); cioè in situazioni con densità elevata si riscontrano linee costituite da entità aventi la stessa direzione di spostamento (Helbing D. , Molnàr, Farkas, & Bolay, 2001).

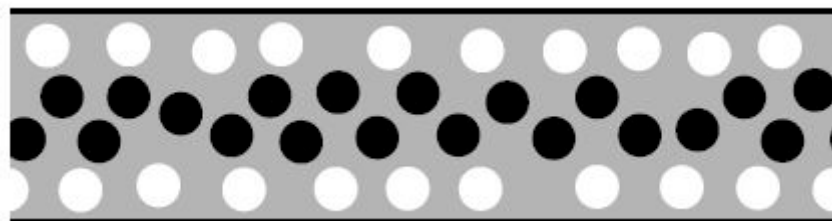


Figura 2.15: Formazione di linee di scorrimento in una situazione di flusso inizialmente disordinato. Immagine tratta da “Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations” (Helbing D. , Farkas, Molnàr, & Vicsek, 2002)

Un altro caso di predizione riuscita da parte del SFM è rappresentato dalle oscillazioni di flusso in presenza di un collo di bottiglia, cioè un restringimento della sezione di passaggio (Figura 2.16). Quando la densità raggiunge livelli alti, si verificherà un malfunzionamento nel passaggio dei pedoni attraverso il restringimento; su entrambi i lati, per entrambe le direzioni, i pedoni non avranno libertà di procedere. Tuttavia ad un certo punto un'entità riuscirà a farsi strada permettendo ad altre entità di seguirlo, creando così un corridoio preferenziale. Dopo un certo lasso di tempo, questo evento cesserà e si creerà una situazione simile per i pedoni intenzionati a procedere nella direzione opposta.

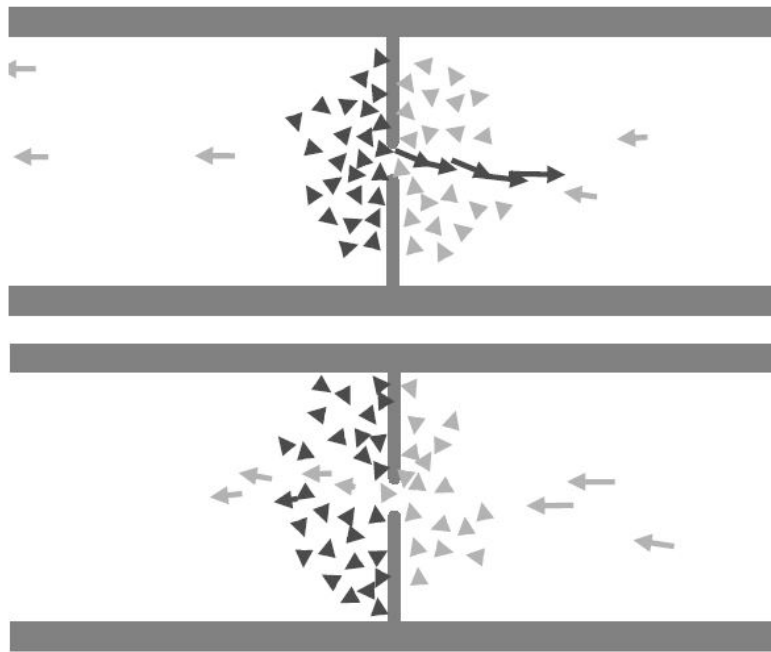


Figura 2.16: Formazione di oscillazioni di flusso in presenza di sezione a collo di bottiglia. Immagine tratta da “Self-organizing pedestrian movement” (Helbing D. , Molnàr, Farkas, & Bolay, 2001)

2.1.2.4 Legion Model (Still)

Il modello Legion è caratterizzato da entità in grado di analizzare autonomamente la situazione, obbedendo a quelle che vengono definite le regole OMCA (Still, 2000). OMCA è l'acronimo di: *Objective*, i pedoni cercano di muoversi diretti verso una destinazione desiderata; *Mobility*, si cerca di mantenere la velocità desiderata; *Constraint*, il pedone cerca di mantenere una determinata distanza fra esso stesso e gli oggetti che lo circondano; *Assimilation*, tempo di reazione dovuto alla interpretazione del sistema.

Le entità del modello Legion, dunque, si muovono all'interno di un paesaggio bidimensionale realizzato al computer, leggendo i cambiamenti all'interno dell'ambiente e reagendo di conseguenza; ovviamente queste reazioni dipendono principalmente dal comportamento dei pedoni nelle vicinanze.

Secondo Still (Still, 2000) le entità all'interno del modello possono essere viste come formiche in una colonia, simili a robot limitati in intelligenza. Questa caratteristica è necessaria per soddisfare i criteri di sicurezza di Legion, se infatti le entità fossero troppo intelligenti, queste non si esporrebbero mai a situazioni di pericolo. La simulazione è invece progettata per scoprire le condizioni in cui i pedoni possono causare danni (a sé stessi e agli altri), permettendo così una progettazione che riduca, o addirittura annulli, tali rischi.

In Legion vengono definiti due tipi di componenti principali che determinano la struttura per l'elaborazione delle informazioni che vengono trasmesse:

Entità – Qualsiasi componente del sistema che mantiene la propria identità nel tempo durante la simulazione.

Information Space – Qualsiasi componente del sistema che possiede l'abilità di cambiare nel tempo dimensioni, disposizione, caratteristiche. Still (Still, 2000) utilizza l'abbreviazione iSpace.

Occorre ora definire come la comunicazione fra entità possa avvenire all'interno di Legion. Come detto in precedenza ogni entità possiede informazioni relative all'ambiente e può interpretare e reagire a ciò che la circonda. La comunicazione fra entità avviene quando un'entità trasferisce da un ambiente all'altro le informazioni acquisite; le entità possiedono strumenti per decifrare e comprendere le informazioni dell'iSpace (lo stato di un determinato ambiente, le dimensioni, la velocità e la posizione dei pedoni).

Still riporta un esempio molto utile per comprendere il funzionamento "Entità-iSpace":

"Consider an entity leaving a room in iSpace, where a fire has been lit. Its information from the fire room is *leave* by any one of the available exits - carrying with it an information segment *fire present*. It enters the corridor iSpace and is interrogated by that iSpace (which now knows fire is present and where - each entity carries only the flag *fire* and *last destination* [...])" (Still, 2000)

Dunque ogni entità è così collegata alle altre entità tramite gli iSpace, dunque la struttura risulta costantemente e totalmente in comunicazione con ogni elemento costituente l'ambiente.

Dunque ai fini della modellazione delle masse Legion utilizza l'algoritmo chiamato *least effort*, questo algoritmo nasce sulla struttura Entità-iSpace appena descritta. Tuttavia non è dato conoscere nello specifico il funzionamento del *least effort* in quanto algoritmo soggetto ad un accordo di non divulgazione e restrizioni commerciali.

2.1.2.5 Queueing Models

Questi modelli si basano sul concetto che una coda o una linea di attesa vengono a crearsi nel momento in cui i pedoni, una volta giunti a destinazione (biglietteria, tornello, ecc.), necessitano di un maggior numero di servizi rispetto a quelli che sono messi a disposizione (Rahman, Ghani, Kamil, Mustafa, & Chowdhury, 2013).

Lovas (Lovas, 1994) nel suo modello descrive ogni pedone come singola entità di flusso che interagisce con le altre entità. L'ambiente è invece raffigurato come un insieme di archi e nodi: i primi rappresentano la presenza di corridoi, i secondi vengono inseriti nel modello per simboleggiare le stanze o varchi/porte.

In ogni nodo vengono registrati i percorsi e i tempi di evacuazione, inoltre al nodo iniziale viene conferito al pedone un determinato tempo di reazione (tempo necessario al pedone per reagire). Gli elementi che caratterizzano un "queueing model" sono: il tempo di arrivo, il meccanismo dei servizi, la strategia di coda e il numero di nodi destinati a servire i pedoni.

I Queueing models sono stati utilizzati in diversi campi. Heidemann (Heidemann, 1997) e Vandaele et al. (Vandaele, Woensel, & Verbruggen, 2000) hanno descritto il comportamento del traffico veicolare alle intersezioni segnalate e a quelle non segnalate.

Per quanto riguarda il tema pedonale, Li e Han (Li & Han, 2011) hanno proposto un modello a griglia per la simulazione di code considerando la fisiologia e la psicologia umana. Questo modello è in grado di riprodurre e descrivere il fenomeno denominato "traffic shock wave", zone di transizione tra uno stato di congestione e uno di libera circolazione che si propagano attraverso l'ambiente come se fossero un'onda.

Successivamente Kim et al. (Kim, Galiza, & Ferreira, 2013) hanno modellato il sistema delle biglietterie di un cinema attraverso un queueing model. Duives et al. (Duvies, Daamen, & Hoogendoorn, 2013) invece propongono una variazione al queueing model, vengono invertiti gli archi e i nodi: i primi rappresentano le stanze della struttura, i secondi le zone di connessione (corridoi e varchi).

I Queueing model sono in grado di calcolare e predire il numero di persone in attesa e il tempo di attesa negli spazi della coda. Tuttavia, non sono in grado di modellare pesanti congestioni e movimenti di pedoni troppo complicati. Nei grandi spazi urbani, molti flussi pedonali si fondono e si intersecano. Questo fa sì che gli spazi destinati alle code si convertano in spazi di circolazione che influenzano la dinamica della coda stessa. Quindi i Queueing model funzionano se applicati alla dinamica della coda stessa senza considerare influenze esterne.

Esistono studi inerenti alla teoria delle code più complessi. Okazaki e Matsushita (Okazaki & Matsushita, 1993) si concentrano sul comportamento dei pedoni in entrata e in uscita da una coda; Chalmet et al. (Chalmet, Francis, & Saunders, 1982) hanno invece fatto uso di un modello a code per simulare l'evacuazione da un edificio.

2.1.2.6 Considerazioni Modelli Microscopici

A differenza dei Modelli Macroscopici, nel caso dei Modelli Microscopici le differenze sono più marcate, tanto quanto i modelli risultano essere più complessi. Tuttavia è necessario ricordare come le quattro diverse categorie elencate possano essere visualizzate come parzialmente sovrapponibili e non bene definite (Johansson F., 2013). Ad esempio è possibile raggruppare tutti i Modelli Microscopici come ABM, ma suddividerli in categorie risulta utile per descrivere con più attenzione alcune caratteristiche.

Legion e Social Force Model seguono una struttura comune, rappresentata da due fattori: un primo fattore, che spinge i pedoni verso il loro obiettivo e un secondo fattore, che rappresenta gli effetti di repulsione dagli altri pedoni e dagli ostacoli.

Il primo fattore è rappresentato dal guadagno nel modello costi-benefici e dalla velocità prevista nel Social Force Model. Il secondo fattore è rappresentato invece dal costo nel modello costi-benefici e dalle forze di interazione del Social Force Model.

Due tipi di modelli non seguono esplicitamente la struttura precedente: i modelli CA e i “Queueing Models”. I primi sono disciplinati da un insieme di “regole di aggiornamento”, da cui si potrebbero derivare i due fattori citati precedentemente; i secondi utilizzano un “weighted random choice” per permettere ai pedoni di spostarsi verso il loro obiettivo e delle leggi prioritarie per governare l’interazione pedonale.

3. Confronto tra i tre software: interfaccia e funzionamento

I pedoni costituiscono un importante gruppo nella mobilità. Sebbene si conoscano i benefici e l'importanza che comporta il camminare in società, esistono tutt'oggi diverse difficoltà nel modellare i pedoni e il loro ruolo nella pianificazione del traffico è spesso indefinito. Per sopperire a questo problema sono stati creati diversi software basati su modelli microscopici pedonali col fine di ottenere una simulazione verosimile dei flussi e di come i pedoni stessi percepiscono e vivono l'ambiente che li circonda.

I modelli di simulazione pedonale sono sempre più utilizzati da consulenti tecnici, investitori e operatori. La loro funzione è quella di aiutare a progettare luoghi più sicuri, efficienti e consoni all'ospitare visitatori, come ad esempio terminal di trasporto di massa, stadi e piazze. Nel corso degli anni sono stati proposti diversi modelli teorici alcuni dei quali sono stati ulteriormente implementati come software commerciali.

3.1 Legion SpaceWorks

SpaceWorks è un software di simulazione pedonale sviluppato dalla casa Legion International Limited. Permette di compiere delle simulazioni a livello microscopico sfruttando un modello matematico calibrato grazie ad approfondite indagini effettuate in 14 città, in tre diversi continenti e in più di 30 contesti ambientali differenti.

L'algoritmo di Legion segue i principi del least-effort: ogni entità al suo interno desidera raggiungere la propria destinazione minimizzando il costo del proprio spostamento.

Il modello microscopico multi-agent che regola il software SpaceWorks è stato sviluppato a partire dal 1997 dal MAIA Institute di Monaco e pone le sue fondamenta sul modello microscopico Legion di G.K. Still, presentato precedentemente nel capitolo 2.1.2.4 di questo elaborato. Ogni entità è raffigurata bi-dimensionalmente da una semplice circonferenza e si muove nello spazio continuo 2D. Le geometrie dell'ambiente che si vuole raffigurare vengono acquisite da un file CAD, anch'esso 2D. Ovviamente la bi-dimensionalità sulla quale si basa SpaceWorks non limita le possibilità di applicazione. È possibile infatti gestire ambienti costituiti da più piani grazie all'utilizzo di scale, scale mobili ed ascensori grazie all'utilizzo di strumenti come "Level Entrances" ed "Level Exits".

Ogni entità dunque si sposta all'interno del modello verso il proprio obiettivo, ogni passo è fatto con l'intento di minimizzare il costo oggettivo dello spostamento (least effort). Questo costo è costituito da una somma pesata di tre componenti:

- **Frustrazione:** equivalente in costo energetico per il non raggiungimento della velocità di spostamento desiderata. I profili pedonali possiedono una determinata distribuzione di velocità desiderata, ogni singola entità è caratterizzata una velocità desiderata di default campionata dalla distribuzione sopracitata. Nel momento in cui il pedone non riesce a raggiungere tale velocità cresce il livello di frustrazione. Ciò influenza la scelta dei passi successivi.

- **Discomfort:** equivalente in costo energetico dovuto al non-mantenimento della distanza desiderata dai vicini e dagli ostacoli. I pedoni in Legion possiedono preferenze di spazio personale e, quando gli è concesso, le entità si spostano in aree che permettono il mantenimento di queste distanze. Un pedone vede aumentare il proprio livello di discomfort nel momento in cui nel procedere lungo il proprio tragitto si vede costretto a scendere al di sotto dei suoi standard di prossimità rispetto ad altre entità o ostacoli. Ciò influenza la scelta dei passi successivi.
- **Disagio:** rappresenta il lavoro compiuto in eccesso per muoversi, superando l'importo necessario e sufficiente per raggiungere la propria destinazione. Ogni pedone possiede una destinazione finale prefissata e per raggiungerla utilizza dei “focal target” intermedi che, in condizioni di moto indisturbato, indicano la direzione dello spostamento. Il disagio (Inconvenience) aumenta nel momento in cui il pedone deve attuare deviazioni dalla direzione di moto preferita. Ciò influenza la scelta dei passi successivi.

Questi tre fattori si sommano a costituire l'**Insoddisfazione**. Dunque gli agenti che generalmente influenzano il gradimento allo spostamento da parte del pedone sono: preferenze personali, consapevolezza di ciò che li circonda e del tempo, i propri obiettivi, percezione del comportamento degli altri, limitazioni fisiche e l'interazione con gli altri.

I pedoni cercano di minimizzare il costo del loro spostamento, tuttavia la percezione di ciò che li circonda è imperfetta. La loro visibilità, infatti, è limitata da distanze e ostacoli, per forza di cose i pedoni si trovano spesso nella condizione di dover predire la posizione di chi o cosa è nelle vicinanze. Mentre si muovono, le entità imparano dall'esperienza recente e adattano i pesi di discomfort, frustrazione e disagio alle circostanze locali (spazio disponibile, geometria locale, densità, velocità dei compagni di viaggio, ecc.). Vengono definiti “compagni” coloro che viaggiano nella stessa direzione, per distinguerli da altre entità che vengono approciate in flussi incrociati. I pedoni comunicano con i vicini immediati per impedire o risolvere eventuali congestioni.

3.1.1 Movimento dei Pedoni in Legion

Una volta entrate all'interno del modello, le entità si trovano a dover affrontare una prima fase di scelta (Choice). In questo primo step i pedoni dovranno identificare un obiettivo per poi trasformarlo nella propria destinazione. Successivamente è la fase di navigazione (Navigation) che viene suddivisa in Macro e Micro; la prima (Figura 3.1) consiste nell'identificazione del tragitto da compiere per raggiungere la destinazione, la seconda concerne i movimenti necessari al pedone per interagire con chi lo circonda e per raggiungere target intermedi.

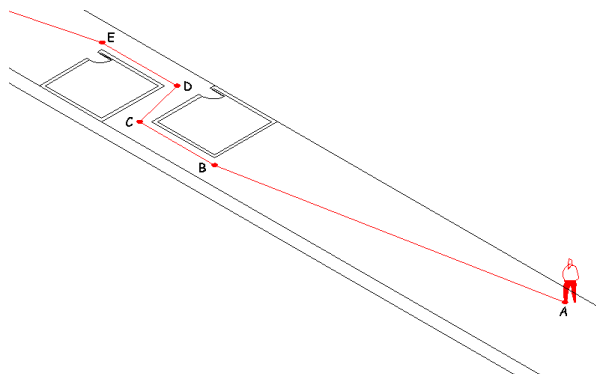


Figura 3.1 Macro-navigation. Scelta del percorso idoneo per raggiungere la destinazione. I punti B, C e D rappresentano i target intermedi. Che se considerati assieme costituiscono la “shortest route”. Immagine tratta da (Legion SpaceWorks™ R6.4 User Guide, 2016).

Come mostrato in Figura 3.1 il pedone situato nel punto A desidera raggiungere il punto E, per fare ciò cercherà di compiere il percorso più breve sfruttando i cosiddetti “focal targets” (B, C e D). In Figura 3.2 il concetto viene mostrato con l’interfaccia del software Legion; il rettangolo verde rappresenta l’area di partenza del pedone, quello rosso è invece la destinazione finale da raggiungere percorrendo la minima distanza.

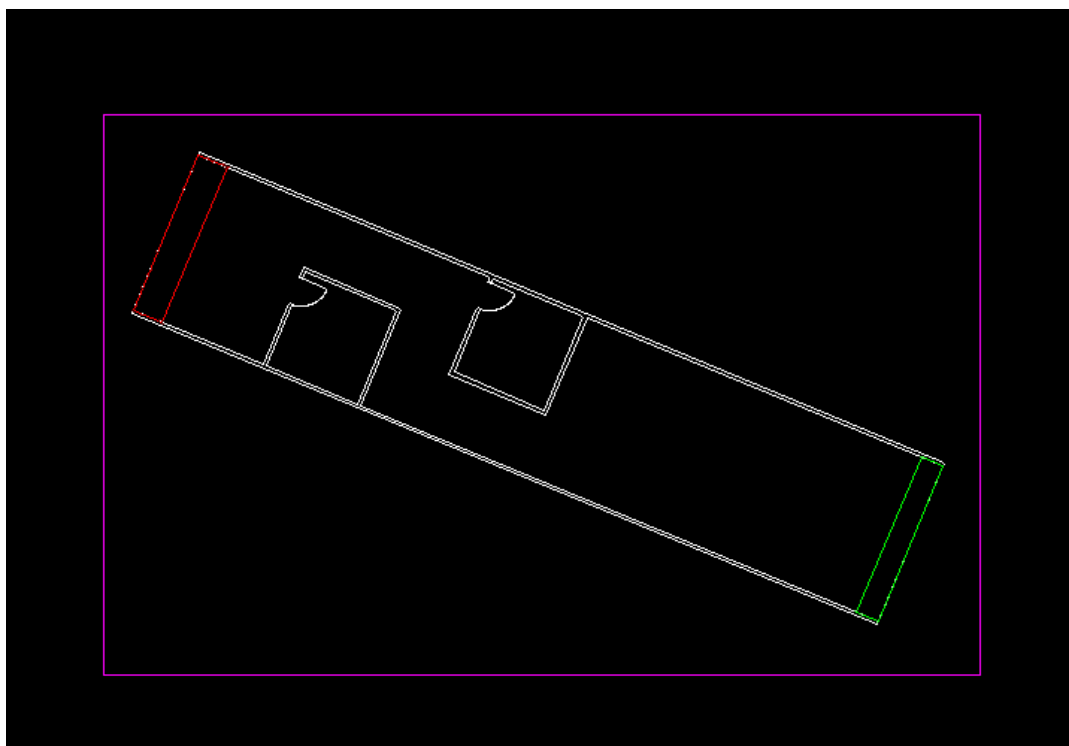


Figura 3.2: Rappresentazione Macro-navigation in SpaceWorks. Immagine tratta da (Legion SpaceWorks™ R6.4 User Guide, 2016).

In Figura 3.3 e 3.4 è invece possibile comprendere il concetto di Micro-navigation. In questo caso l'obiettivo non è più quello di raggiungere la destinazione finale (punto E Figura 3.1), ma quello di evitare gli ostacoli e le altre entità in prossimità, raggiungendo così il “focal target” successivo.

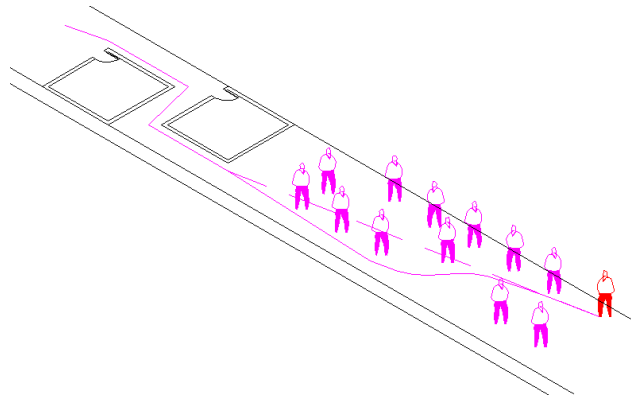


Figura 3.3: Micro-navigation. I “focal target” non vengono interpretati come obiettivi ma come semplici strumenti per far sì che il pedone corregga la propria direzione nel corso del suo spostamento. Immagine tratta da (Legion SpaceWorks™ R6.4 User Guide, 2016).

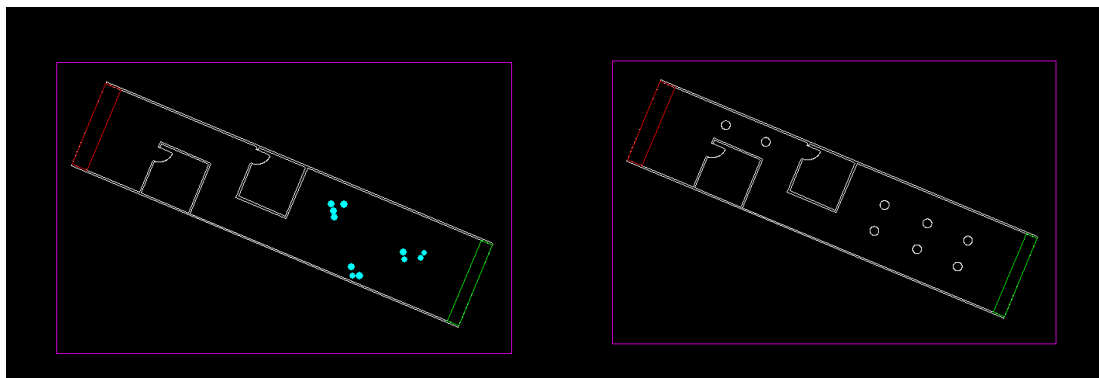


Figura 3.4: Raffigurazione Micro-navigation in SpaceWorks. A sinistra in azzurro sono raffigurate le entità che il pedone deve evitare per sopraggiungere al “focal target” successivo. A destra sono stati modellati eventuali ostacoli (ad esempio colonne strutturali) che il pedone deve evitare per sopraggiungere al “focal target” successivo”. Immagine tratta da (Legion SpaceWorks™ R6.4 User Guide, 2016).

Purtroppo, come già sottolineato in precedenza, non è dato conoscere nello specifico il funzionamento del *least effort* di Legion in quanto algoritmo soggetto ad un accordo di non divulgazione e restrizioni commerciali fra G.K. Still e il MAIA Institute.

3.1.2 Caratteristiche dei profili pedonali

I pedoni che vengono simulati all'interno di Legion sono chiamati "Entity". La loro raffigurazione viene realizzata grazie all'utilizzo di circonferenze che approssimano la dimensione di un pedone reale. Il raggio della circonferenza, nel caso di Legion, non richiama la "Body Ellipse" descritta nel capitolo 2 da Fruin e HCM. Le dimensioni dell'entità raffigurante il pedone all'interno della simulazione possono variare a seconda del tipo di entità configurata e dalla scelta di "dimensione-bagaglio" effettuata. Tali dimensioni, come l'algoritmo di Still, sono coperte da copyright in quanto risultato di indagini compiute da Legion nel corso degli anni.

Nel momento della creazione del tipo di pedone è possibile scegliere tre diverse componenti (Tabella 3.1) (Figura 3.5 e 3.6):

- **Entity profile:** ogni entità all'interno di Legion appartiene ad un gruppo definito come "Entity profile". Questi profili raccolgono parametri relativi alla dimensione media delle singole entità. Sarà possibile scegliere fra cinque diverse categorie: Asian, Chinese, North American, Southern European e UK.
Oltre alle differenti dimensioni di ingombro, è necessario riportare come, durante l'utilizzo del software, i profili UK si siano mostrati più abili e intelligenti nelle situazioni di alta densità. Questo lascia presupporre che oltre alle differenze fisico-geometriche, la scelta dell'"Entity profile" abbia un peso anche sull'algoritmo che regola i movimenti dei pedoni.
- **Speed Profile:** in questo caso i profili di velocità a disposizione del modellista sono dieci (Tabella 3.1). Essi rappresentano una distribuzione di velocità desiderata relativa all'attività che il pedone sta svolgendo all'interno dell'area di studio. Ovviamente la scelta degli "Speed profile" deve avvenire in sintonia con quella presa in precedenza per l'"Entity profile": non avrebbe alcun senso attribuire una distribuzione di velocità "Chinese commuter" ad un "Entity profile UK".
- **Luggage size:** viene data la possibilità di assegnare eventuali zaini (small) o valige (medium e big) alle entità. Ciò comporta ad un aumento dello spazio occupato dalle entità stesse.
Questa scelta può essere regolata da percentuali, è possibile infatti definire il numero di entità che viaggiano con e senza bagaglio.

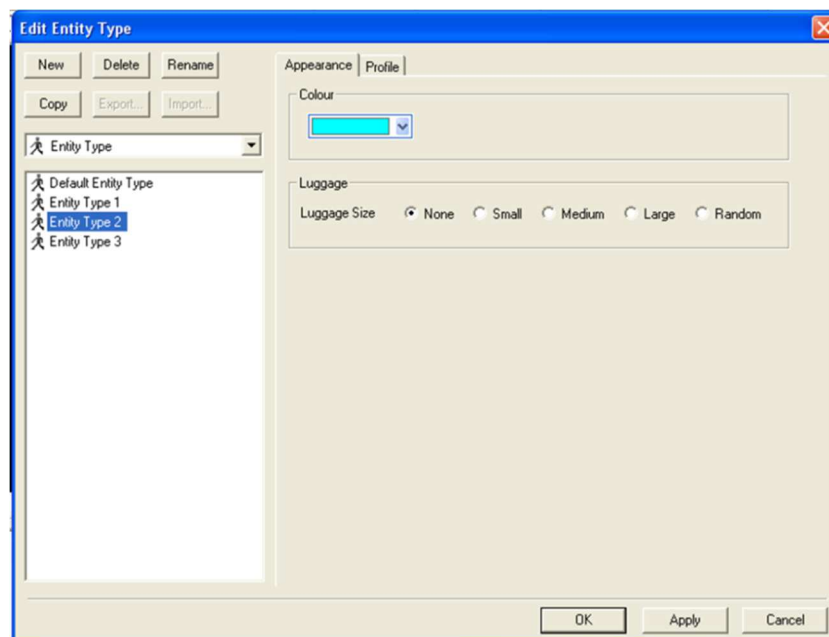


Figura 3.5: creazione dell' Entity type tramite definizione dell'apparenza (colore) e del "Luggage profile". Immagine tratta da (Legion SpaceWorks™ R6.4 User Guide, 2016).

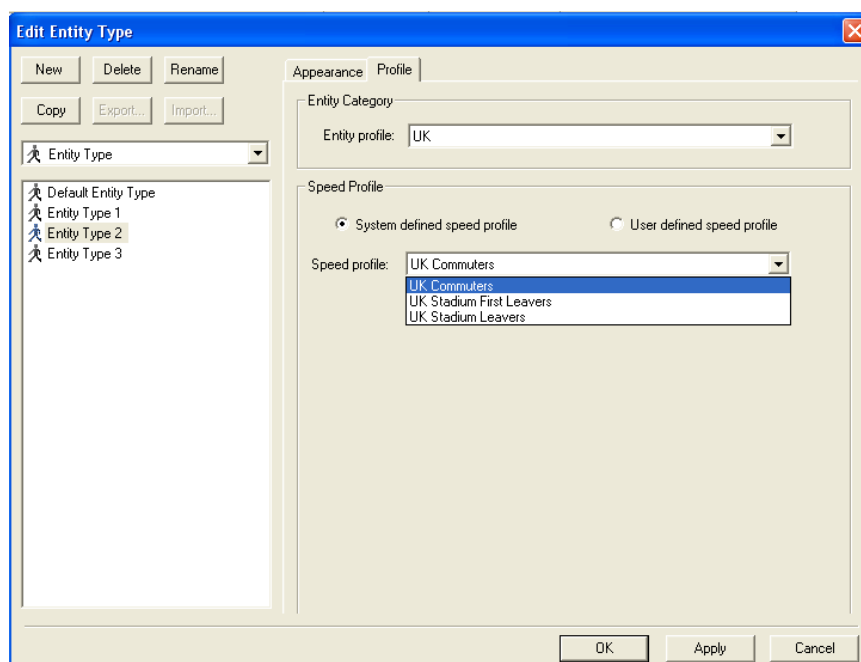


Figura 3.6: creazione dell' Entity type tramite definizione di Entity profile, Speed profile. Immagine tratta da (Legion SpaceWorks™ R6.4 User Guide, 2016).

Tabella 3.1: elenco dei profili utilizzabili per la definizione delle entità all'interno del modello.

Entity profile

ASIAN	CHINESE	UK	NORTHERN AMERICAN	SOUTHERN AMERICAN
-------	---------	----	----------------------	----------------------

Speed profile

<i>Chinese commuters</i>	<i>Chinese WE commuters</i>	<i>Runners</i>	<i>Stadium users</i>	<i>UK commuters</i>
<i>Asian commuters</i>	<i>Asian WE passengers</i>	<i>N. American commuters</i>	<i>Tourist</i>	<i>S. American commuters</i>

Luggage Size

<i>None</i>	<i>Small</i>	<i>Medium</i>	<i>Big</i>	<i>Any</i>
-------------	--------------	---------------	------------	------------

L'insieme di questi tre profili porta alla creazione di un "Entity type". All'interno del modello Legion è possibile caratterizzare gli "Entity types" realizzati conferendo nomi e colori differenti a classi differenti di entità. Il passo successivo consiste nel realizzare le "Supply types" (Figura 3.7), combinazioni di "Entity types" che permettono di costituire una popolazione mista all'interno dell'ambiente di simulazione. Ad esempio, nel caso di una stazione metropolitana, sarebbe utile e verosimile inserire sia entità "UK commuters" (ipotizzando che la stazione si trovi in Inghilterra) sia una componente di entità "tourists".

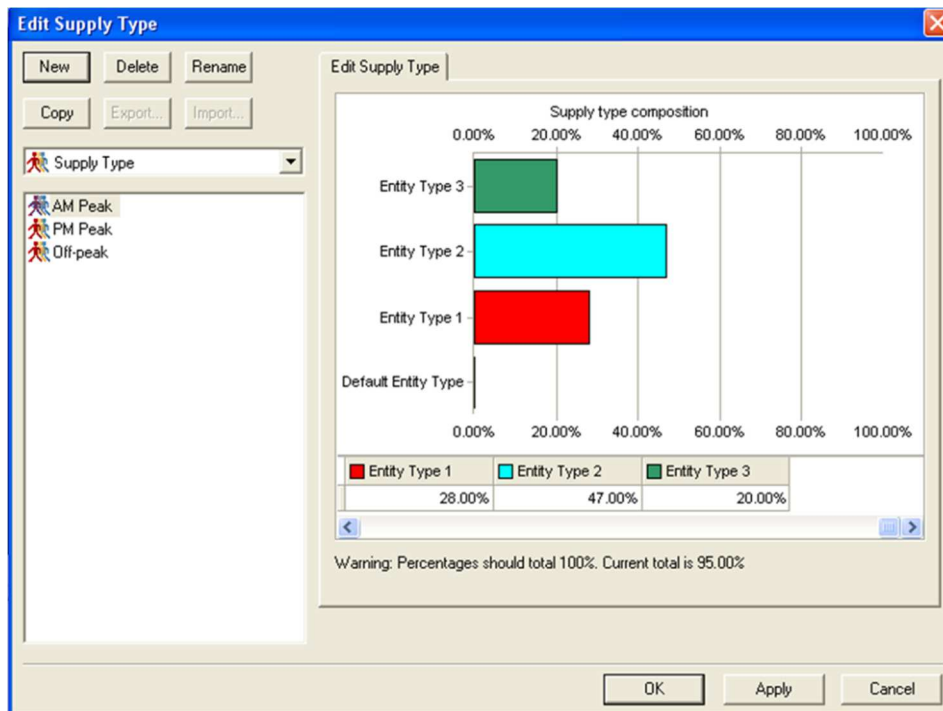


Figura 3.7: Creazione dell'Entity supply. Possibilità di dare un peso in percentuale ai differenti Entity type creati precedentemente. Immagine tratta da (Legion SpaceWorks™ R6.4 User Guide, 2016).

Come per l'algoritmo del *least effort*, per motivi di riservatezza commerciale non vengono forniti dati numerici relativi alla effettiva dimensione dei pedoni (Entity profile) e alle distribuzioni di velocità (Speed profile). Questi dati sono infatti frutto di studi e osservazioni compiuti da Legion nel corso degli anni, per questo motivo non è possibile interagire con le informazioni relative ai profili.

3.1.3 Realizzazione modello Legion

La licenza fornita da Legion è composta principalmente da tre applicazioni: Model Builder, Simulator e Analyser:

- *Legion Model Builder*: è sostanzialmente il piano di lavoro del pacchetto Legion/SpaceWorks. Questa applicazione viene utilizzata per creare un modello accurato di ciò che si vuole simulare. Permette di importare le piante architettoniche CAD per definire l'ambiente fisico di simulazione e di inserire al suo interno la domanda pedonale desiderata (Entity supply). Una volta fatto ciò si procede con l'utilizzo di strumenti interni al software che permettono la simulazione vera e propria del modello (aree O/D, aree d'attesa, code, ecc.). Il Model Builder, infine, permette il salvataggio e l'estrazione di un file in formato proprietario ORA da importare nell'applicazione Legion Simulator.

- *Legion Simulator*: questa applicazione avvia la simulazione del file ORA ricevuto dal Model Builder. Sostanzialmente in questa fase il modellista non può intervenire, può solamente osservare come l'algoritmo agisce sul modello creato. I pedoni si muovono all'interno dell'ambiente seguendo le istruzioni che sono state impartite nel Model Builder. Finita la simulazione, un file-video viene salvato in formato proprietario RES da importare nell'applicazione Legion Analyser.
- *Legion Analyser*: si visualizza il file-video RES potendo interagire col filmato. È possibile fermare il video e procedere con l'analisi dei movimenti pedonali gradualmente. L'applicazione Analyser costruisce le mappe LOS e permette l'esportazione dei risultati tramite grafici, video, immagini e tabelle per la realizzazione di presentazioni o report.

3.1.3.1 Preparazione file input

Per la costruzione di un modello il più possibile preciso e fedele alla realtà, Legion prevede l'utilizzo di disegni CAD come input per il Model Builder. Le piante CAD importate ("Simulation CAD") rappresentano la geometria dell'ambiente di simulazione per le entità che si muovono in uno spazio bi-dimensionale. Bisogna però prestare attenzione nel momento della importazione, poiché i disegni CAD sono composti da linee, testi, numeri e altri elementi geometrici. Al fine di ottenere una simulazione veritiera e scorrevole è necessario "pulire" il file da ogni elemento che non rappresenti un vero ostacolo per i movimenti dei pedoni. Legion, infatti, considera ogni linea come un ostacolo, perciò è necessario eliminare tutti gli elementi di pura utilità architettonica: linee di alzata nelle scale, testi e quote, tratteggi, swing delle porte, ecc.

Per comodità è possibile importare un ulteriore layer denominato "Presentation CAD", all'interno del quale vengono riportati tutti gli elementi eliminati dal Simulation CAD. Il Presentation CAD risulta utile sia al modellista sia in sede di presentazione del modello al cliente, in quanto fornisce una visione dettagliata e ricca di riferimenti dell'ambiente simulato.

Il manuale utente fornito da Legion fornisce una guida step-by-step per realizzare un Simulation CAD idoneo per il Model Builder:

1. Salvare il file CAD con un nuovo nome in modo tale da preservare l'originale.
2. Orientare il disegno secondo al sistema "world coordinate" del programma CAD.
3. Esploredere tutti gli elementi come le poli-linee, blocchi e testi.
4. Attivare tutti i layers ed eliminare tutti gli oggetti che non rappresentano ostacoli.
5. Specificare la scala del disegno CAD.
6. Eliminare tutte le eventuali coordinate 3D.
7. Associare ad ogni singolo layer un colore di riferimento.
8. Semplificare gli elementi geometrici complessi il più possibile. Ad esempio le biglietterie possono essere raffigurate da semplici rettangoli.
9. Creare un nuovo layer contenente le linee del Simulation CAD.

10. Assicurarsi che il Simulation CAD sia costituito esclusivamente da linee che rappresentano reali ostacoli per i pedoni.
11. Se il modello è costituito da più piani derivanti da file CAD separati, si deve correlare tutti i piani in un singolo file CAD. Orientare e disporre i piani secondo una logica che permetta la comprensione dell'ambiente e dell'organizzazione.
12. Una volta riorganizzati i piani, spostare tutti il modello in modo che il centro del foglio dei piani sia più o meno corrispondente alle coordinate 0,0 del file CAD.
13. Salvare il file.

3.1.3.2 Legion Model Builder

Una volta “pulito” il file CAD viene caricato nel Model Builder di Legion. In questa applicazione è possibile aggiungere gli Spatial Objects, elementi fondamentali per modellare l'ambiente di simulazione. È possibile dividerli in tre categorie: Activity Objects, CAD Objects e Analysis Objects.

Gli **Activity Objects** sono gli strumenti che permettono di modellare il percorso e le attività che si desiderano far compiere ai pedoni. Tramite gli Activity Objects si possono definire origini e destinazioni. Inoltre consentono la modellazione di attività quali: inserimento in coda, attesa in banchina e sosta in determinati luoghi di interesse.

I **CAD Objects** sono semplici strumenti che, in caso di necessità, permettono la correzione o l'aggiunta di particolari al Simulation CAD.

Gli **Analysis Objects**, infine, sono largamente utilizzati nell'applicazione Legion Analyser. Tuttavia risultano utili anche durante la fase di modellazione. In Legion Analyser vengono utilizzati per identificare aree specifiche di una simulazione che si desidera "interrogare" in modo analitico, utilizzando una vasta gamma di metriche (densità, numero di entità, velocità media, ecc.). Queste analisi sono conosciute con il nome di "Reporting". Nel Model Builder, invece, gli Analysis Objects trovano spazio per adottare misure operative in risposta a sovraffollamenti o ad altri eventi dinamici. Questi tipi di analisi sono noti con il nome di “Conditions” e funzionano tramite il semplice linguaggio logico “if-then-else”. Ad esempio, nel caso si volesse evitare una elevata densità ai piedi di una scala mobile, è possibile inserire un'area-Analysis che registri la densità istantanea nella zona di interesse. Una volta raggiunta la densità critica impostata dal modellatore, una percentuale delle entità provvederà a cambiare itinerario.

3.1.3.2.1 Interfaccia Model Builder

La Figura 3.8 illustra l'interfaccia dell'applicazione Model Builder una volta lanciata in esecuzione. Sebbene sia possibile personalizzare a piacimento la visualizzazione della schermata, in Figura 3.8 sono raffigurate le componenti più importanti del software.

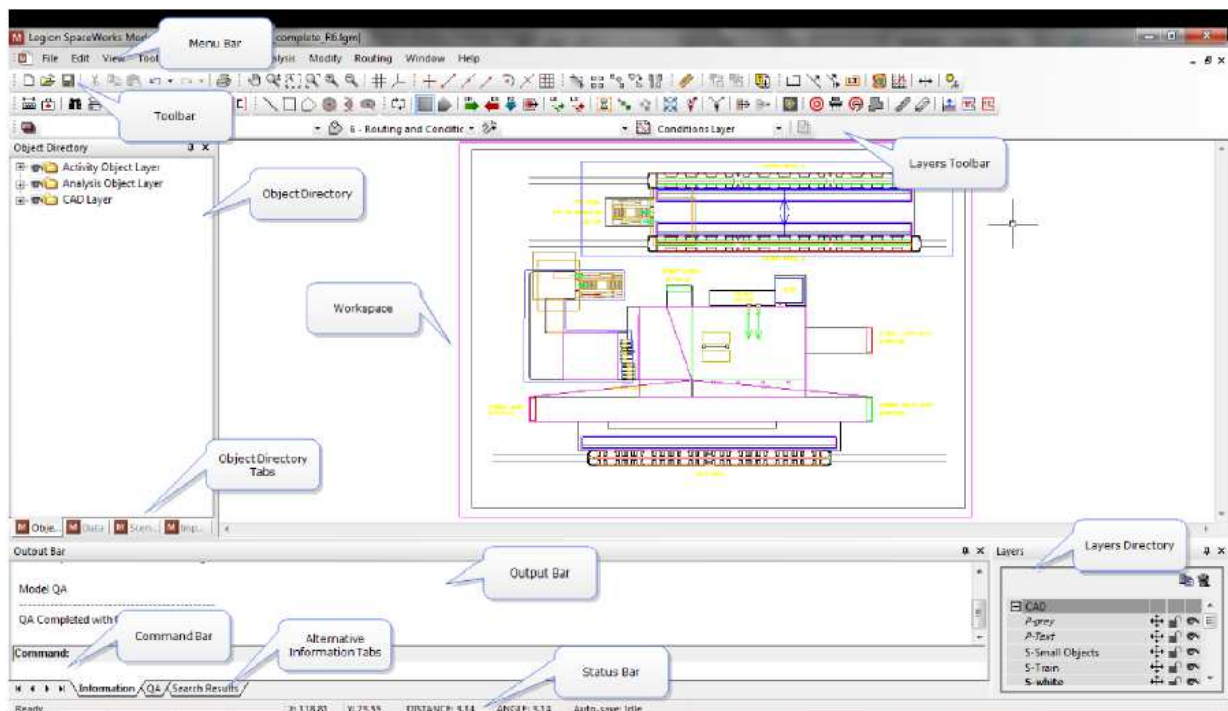


Figura 3.8: interfaccia SpaceWorks: Model Builder. Immagine tratta da (Legion SpaceWorks™ R6.4 User Guide, 2016).

Il modello che si sta realizzando è visibile nella finestra “Workspace” al centro della schermata. Nel Workspace sono riportati tutte i file CAD caricati e gli Spatial Object inseriti successivamente dall’utente.

Nella fascia superiore della schermata si trovano il “Main Menu Bar” e i “Toolbars” che permettono l’accesso a tutte le funzionalità del Model Builder.

A sinistra invece è presente l’”Object Directory”, un elenco di tutti gli elementi che costituiscono il modello, suddivisi in tre cartelle principali: Activity Object layers, CAD layers e Analysis Object layers. Entrando nelle cartelle principali è possibile interagire con i diversi elementi costituenti il modello, evitando così una lenta ricerca nel “Workspace”.

L’”Output Bar” fornisce dei feedback delle attività effettuate durante la simulazione, in generale è suddivisa in tre sottocategorie: Information, QA e Search Results. *Information* restituisce una cronologia dei comandi precedenti; *QA (Quality Assurance)* visualizza i risultati quando si effettua un controllo sul modello per eventuali errori avvenuti durante il processo di costruzione fungendo da check prima di esportare il file modello nel Simulator; *Search Results* è un semplice strumento di ricerca per trovare più velocemente gli strumenti desiderati.

Infine in basso a destra è presenta la tabella “Layers Directory” un modo alternativo e più diretto rispetto all’”Object Directory” per gestire i layer presenti nel modello.

3.1.3.2.2 Importare file CAD nel Model Builder

È possibile importare tre tipi di file: ‘dgn’ (Microstation files), ‘dwg’ (AutoCAD files) e ‘dxf’ (Drawing interchange Format). Una volta aperto il Model Builder, scegliendo la voce “Import CAD” nel menù a tendina “File”, si aprirà l’Esplora Risorse del terminale e sarà possibile scegliere il file CAD preparato in precedenza tramite il comando “Open”. Successivamente Legion aprirà autonomamente la finestra di dialogo “Layer selection” (Figura 3.9) e sarà possibile scegliere nello specifico quali layers si desidera importare (Import) all’interno del Model Builder.

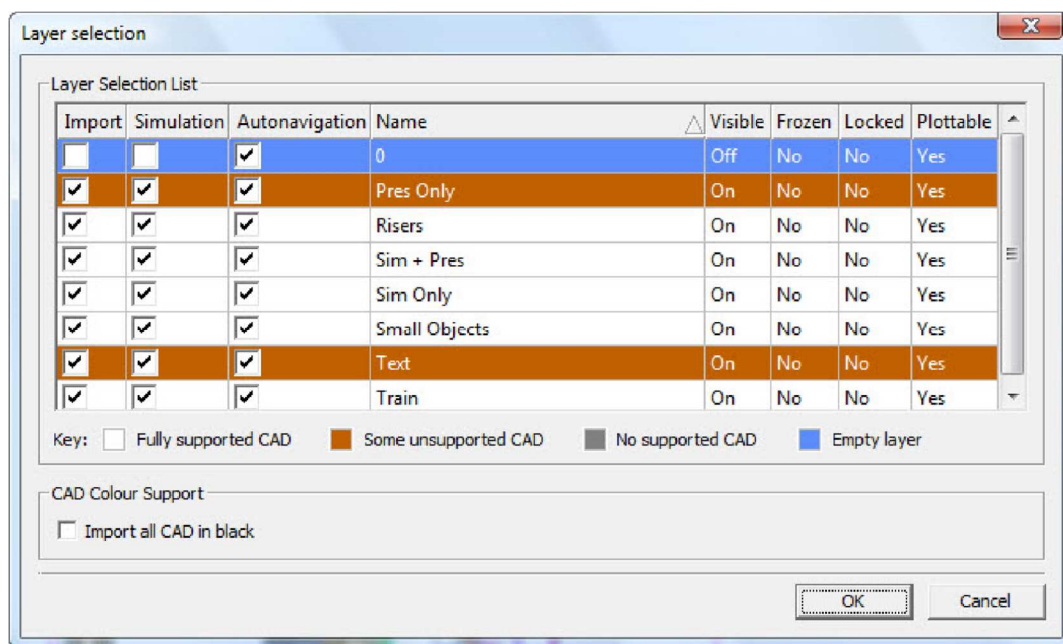


Figura 3.9: scelta dei layer da importare. Possibilità di abilitare o meno la voce “Simulation”. Nel caso non venisse abilitata, il layer sarà visibile ma non influenzerà la simulazione pedonale. Immagine tratta da (Legion SpaceWorks™ R6.4 User Guide, 2016).

3.1.3.2.3 Creazione degli Entity Types e del Supply Type

Una volta caricato il disegno CAD raffigurante l’ambiente di simulazione, il passaggio successivo è quello di delineare i profili delle entità che prenderanno parte alla simulazione. Cliccando sulla voce “Entity Types” nel menu a tendina “Data” viene visualizzata la finestra di dialogo specifica per la creazione dei profili pedonali. Sebbene sia già presente un “Default Entity Type” basato sui parametri degli UK commuters, cliccando il tasto “New” si ha la possibilità di creare nuovi “Entity Type” (ognuna caratterizzata da un colore differente) regolando a piacimento gli “Entity profile”, gli “Speed profile” e i “Luggage profile”. Una volta compiute le proprie scelte, cliccando su “Apply” il nuovo “Entity Type” verrà automaticamente aggiunto nel Object Directory del Model Builder.

Il “Supply Type” è un gruppo formato da due o più “Entity Type”. Ogni “Entity Type”

contribuisce alla creazione del “Supply Type” tramite una percentuale definita dal modellatore.

Cliccando sulla voce “Supply Type” nel menu a tendina “Data” si apre la finestra di editing (Figura 3.10) dalla quale è possibile creare un nuovo “Supply Type”, definendo le percentuali delle “Entity Type” presenti nella maschera di inserimento dati presente in basso nella finestra di dialogo.

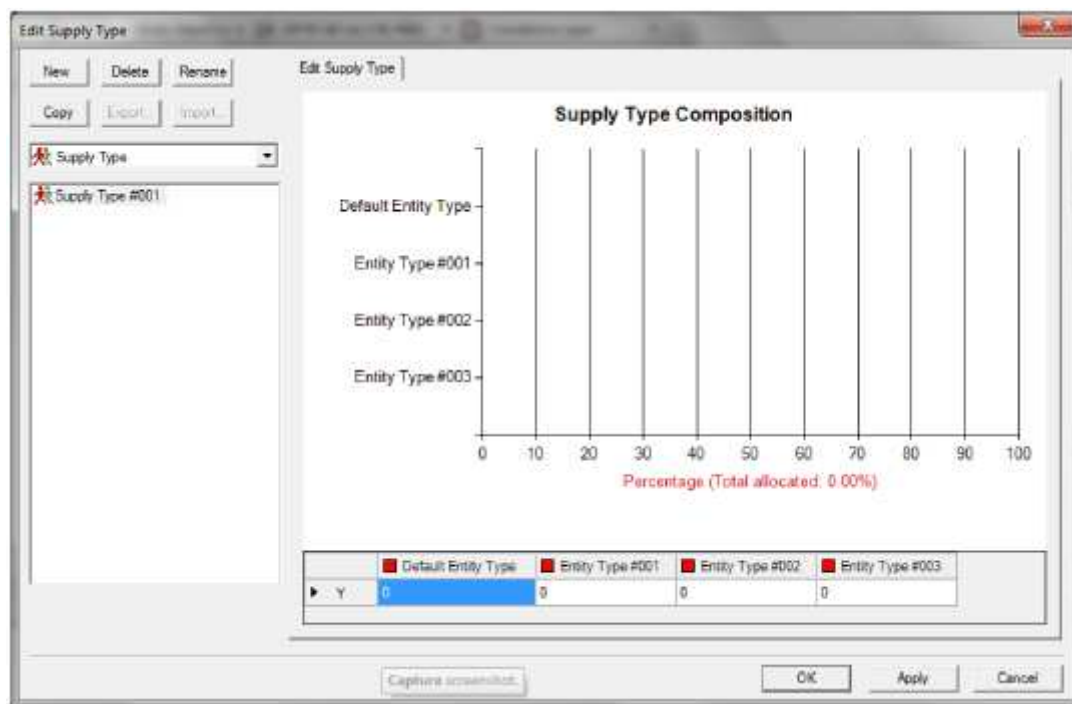


Figura 3.10: editing del “Supply Type”. Il grafico mostrerà le percentuali degli “Entity Type” una volta inserite nella maschera di inserimento dati presente in fondo alla finestra. Immagine tratta da (Legion SpaceWorks™ R6.4 User Guide, 2016).

3.1.3.2.4 Arrival Profile e Availability Profile

Nel Model Builder è possibile creare manualmente i profili di ingresso all’interno del sistema, cioè definire quanti pedoni e in quale momento esatto essi prendono parte alla simulazione. Cliccando sulla voce “Data Profiles” nel menu a tendina “Data” il programma apre la finestra “Edit Data Profile” nella quale è possibile generare un numero di “Arrival Profile” a piacimento.

Nel caso in cui non si fosse in possesso di dati relativi all’ingresso dei pedoni nel modello, risultano utili i “modification tools”. Una volta inserita l’intera domanda all’interno di una casella qualsiasi della maschera di inserimento dati presente nell’ Edit Data Profile, si possono applicare delle modifiche utilizzando una di queste tre opzioni:

- *Set to Value*: la quantità della domanda nelle caselle selezionate viene fissata ad un valore specifico.

- *Change by Value*: la quantità della domanda nelle caselle selezionate viene corretta di un valore specifico.
- *Set Percentage*: la quantità della domanda nelle caselle selezionate viene corretta secondo una percentuale specifica.

L' Edit Data Profile del Model Builder include inoltre funzioni che consentono di manipolare i dati della richiesta in modo non uniforme. Queste funzioni sono:

Pulse: consente di definire rapidamente un impulso standard (singolo valore fisso su un intervallo di tempo dato) oppure quello che viene definito Pulse Train (impulso standard ripetuto per un periodo specificato di tempo).

Spread: prende la domanda di una singola casella e la distribuisce in un determinato periodo di tempo, a partire dal momento al quale fa riferimento la casella selezionata (Figura 3.11).

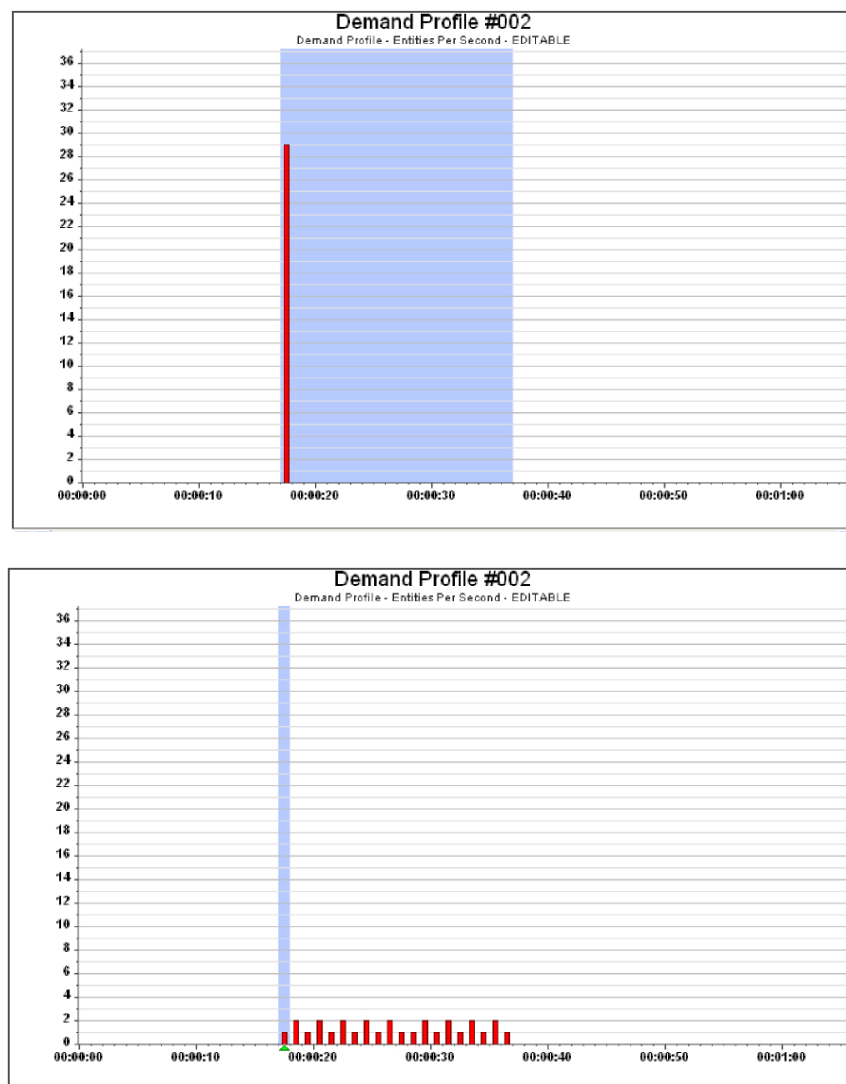


Figura 3.11: distribuzione della domanda effettuata tramite la funzione Spread. Immagine tratta da (Legion SpaceWorks™ R6.4 User Guide, 2016).

Interpolation: prende i valori delle domande all'inizio e alla fine di un range di tempo selezionato. Sulla base di tale intervallo procede con un'interpolazione lineare da estremo ad estremo, generando automaticamente i valori compresi nell'intervallo stesso (Figura 3.12).

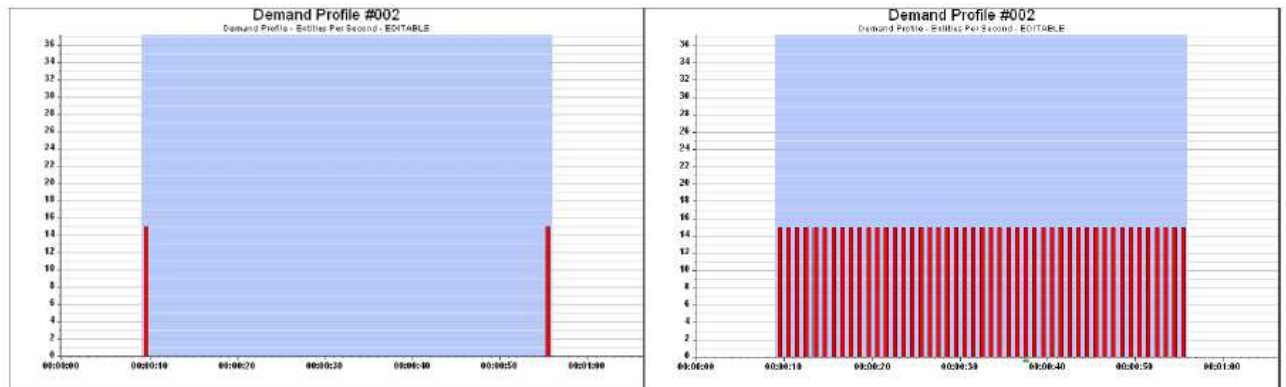


Figura 3.12: distribuzione della domanda tramite la funzione Interpolation. Immagine tratta da (Legion SpaceWorks™ R6.4 User Guide, 2016).

Random Noise: altera casualmente (aggiunge o sottrae) il valore di ogni casella di un range prefissato. Questa funzione fornisce una domanda più "naturale". È possibile definire i valori estremi di alterazione e specificare se si vuole mantenere fissa la domanda totale.

Split: prende un range di dati selezionati e lo divide in una serie di valori più piccoli (uguali e distribuiti in modo uniforme o stocastico).

L'utilizzo combinato degli strumenti appena elencati risulta utile nel momento in cui non si possedesse una tabella arrivo-orario dei pedoni e la si volesse creare ex novo all'interno del Model Builder. Grazie agli stessi strumenti si può creare gli Availability Profile per simulare la cadenza degli arrivi e delle partenze dei mezzi di trasporto pubblico.

3.1.3.2.5 Descrizione e utilizzo degli Activity Object

Gli Activity Object rappresentano le origini e le destinazioni per le entità, devono dunque essere collocati all'interno del modello secondo le informazioni fisiche fornite dal Simulation CAD. Possono anche consentire alle entità di svolgere determinate attività, come ad esempio l'attesa sulla banchina o la coda in biglietteria e ai tornelli. In sostanza forniscono la struttura e principi di scelta per le entità. A seguire un elenco degli Activity Object più importanti:

- Entrance: strumento che permette l'ingresso delle entità nel modello. Viene utilizzato anche per simulare l'arrivo di treni o di altri mezzi di trasporto pubblico.
- Exit: strumento che attribuisce alle entità la destinazione finale e le rimuove dalla simulazione. Viene utilizzato anche per simulare la partenza di treni o di altri mezzi di

trasporto pubblico.

- Level Exit: permette alle entità di abbandonare il livello (piano) sul quale si trovano; nello stesso istante le trasporta su un livello successivo grazie ad un Level Entrance.
- Level Entrance: permette alle entità che hanno abbandonato un livello tramite un Level Exit di rientrare nella simulazione su un nuovo livello.
- Stair: rappresentazione delle scale fisse.
- Escalator: rappresentazione delle scale mobili.
- Delay Point: servono a rallentare le entità facendole sostare in un luogo per un determinato intervallo di tempo. Dopodiché le entità riprendono il loro movimento verso la destinazione successiva. Strumenti utilizzati per simulare tornelli e biglietterie.
- Queue: simula la forma e la funzione di una coda, costringendo le entità a formare una linea con una direzione definita. Quando un'entità raggiunge la testa della coda viene indirizzata ad un Delay Point.
- Queue Group: sistemi di accodamento composti da una serie di code singole; raccogliendo le code dentro questi gruppi è possibile definire i criteri di scelta da parte delle entità: la coda più vicina, la coda libera più vicina, ecc.
- Waiting Zone: raggiunta una Waiting Zone, le entità sono costrette ad attendere l'inizio di un evento programmato dal modellatore. Una volta che questo evento si è verificato, tutte le entità che stavano aspettando vengono rilasciate e re-indirizzate da un Direction Modifier appositamente sovrapposto alla Waiting Zone. Questo strumento viene utilizzato per la simulazione dei pedoni che attendono l'arrivo del treno. Applicando un filtro è possibile specificare quali entità debbano risentire della Waiting Zone.
- Direction Modifier: una volta che le entità raggiungono un Direction Modifier vengono re-indirizzate verso un target differente dalla destinazione finale. Tramite un Direction Modifier è possibile variare l'Entity Type e assegnare destinazioni finali differenti. Infine, vengono utilizzate per regolare la percentuale di pedoni che preferiscono le scale mobili a quelle fisse. Applicando un filtro è possibile specificare quali entità debbano risentire del Direction Modifier.
- Focal Nodes: attraggono le entità in un determinato punto per poi re-indirizzarle ad un altro oggetto.

- Drift Zone: quando le entità entrano nell'area di una Drift Zone possono muoversi in una certa direzione, o cambiare la velocità, secondo i parametri definiti dalla Drift Zone stessa. Utile per alleviare la congestione oppure per la correzione di un movimento insicuro. Viene utilizzata anche per simulare una percentuale di pedoni che rallenta la propria marcia in presenza di luoghi di interesse (ad esempio negozi).

Gli Activity Objects hanno l'aspetto di semplici elementi CAD e possono essere disegnati direttamente sul Workspace (Figura 3.13). Molti Activity Objects (Exit, Level Exit, Delay Point, Queue Group, Focal Node, Escalator, Stair e Waiting Zone) necessitano, durante la loro costruzione, della specificazione di un "Focal Segment".

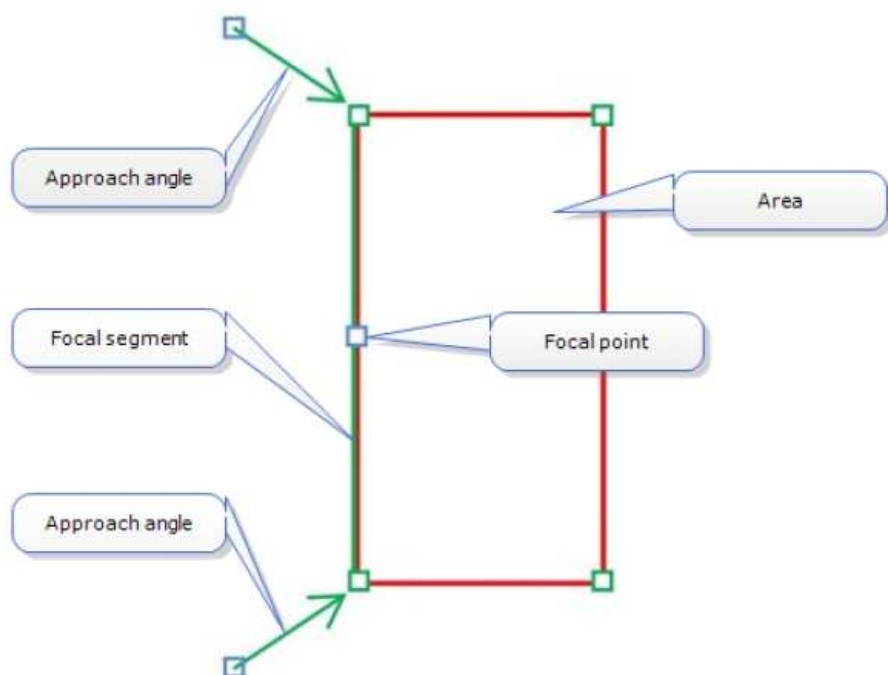


Figura 3.13: area di un Exit Activity Object con i diversi elementi che la caratterizzano. Immagine tratta da (Legion SpaceWorks™ R6.4 User Guide, 2016).

Il "Focal Segment" garantisce che le entità, una volta in grado di scorgere il segmento, si avvicinino all'Activity Object con movimenti realistici. Infatti impedisce che si venga a creare congestione negli angoli e contribuisce a generare un comportamento fluido agli imbocchi di scale fisse e scale mobili senza la necessità di apposite Drift Zones.

Il "Focal Segment" è composto da un lato del poligono dell'Activity Object, da un "Focal point" e dagli "Approach angles". Il Focal Point è utilizzato dall'algoritmo di Legion per guidare verso l'Activity Object quelle entità che non sono ancora in grado di visualizzare il Focal Segment; gli Approach angles possono essere direzionati a piacere durante la costruzione dell'Activity Object e definiscono gli angoli massimi entro i quali le entità avvicinano il Focal Segment.

3.1.3.2.5.1 Creazione Scale fisse e mobili

Poiché l'applicazione Legion Model Builder lavora su disegni CAD 2D, la creazione e il funzionamento degli Activity Object Stair e Escalator è un argomento che richiede un approfondimento specifico.

Lo strumento “Stair” è molto flessibile e permette la simulazione di diverse configurazioni: rampa scale singola, più rampe di scale con pianerottoli, intero vano scale con pianerottoli, ecc. Durante la creazione delle scale è permesso realizzare i pianerottoli sia rettangolari sia sfruttando geometrie poligonali tramite una polilinea. Una volta schematizzato il pianerottolo, si sceglie il lato presso il quale riprenderà la rampa di scale: in questo modo è possibile realizzare figure geometriche più complesse, come l'intero vano scala con pianerottoli.

In quanto il modello sul quale si svolge il lavoro è un CAD 2D, l'elemento “Stair” si troverà compreso fra due livelli differenti. Durante l'applicazione dell'Activity Object sarà necessario “spezzare” l'elemento scala in un determinato punto. Definita poi l'“area di sovrapposizione” tra i due elementi “Stair” che si vengono a creare (per fare ciò si utilizzano di norma tre alzate della rampa), si situa la seconda porzione di “Stair” nella posizione corretta del livello successivo. L'area di sovrapposizione rappresenta una coppia di Level Entrance/Level Exit, interna allo strumento “Stair”, che permette il trasferimento immediato delle entità da un livello all'altro (Figura 3.14).

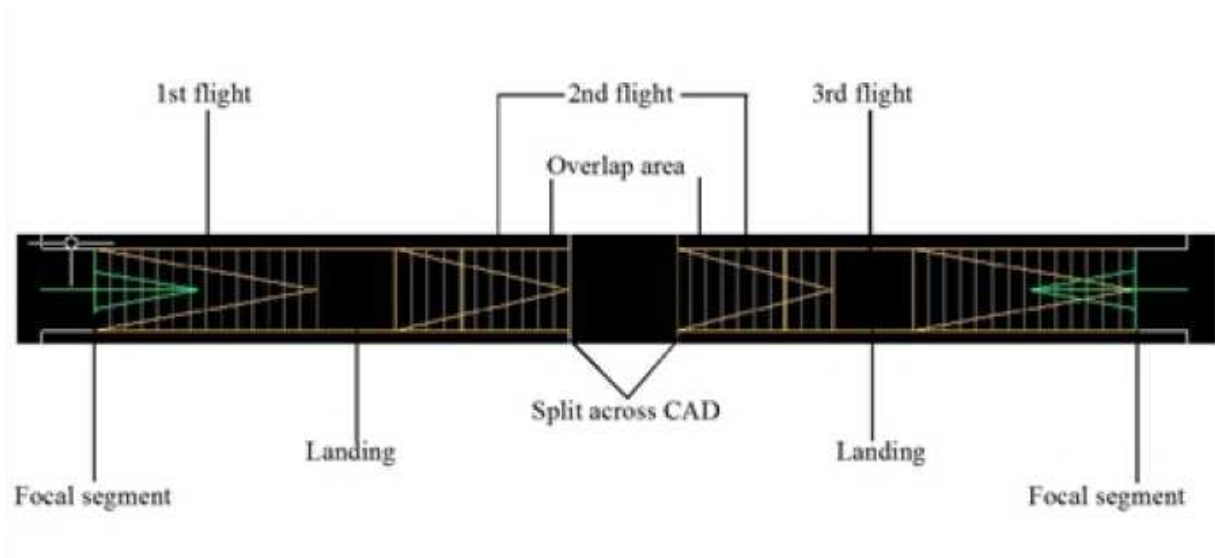


Figura 3.14: esempio di costruzione di una singola rampa di scale bi-direzionale.

L'Overlapping area rappresenta il passaggio da un livello ad un altro del modello. Immagine tratta da (Legion SpaceWorks™ R6.4 User Guide, 2016).

Dal punto di vista pratico, per la realizzazione di un elemento “Stair” si deve:

1. Selezionare la voce “Stair” nel menu a tendina “Object”.
2. Cliccando col tasto sinistro nel Workplace, disegnare il segmento che contrassegna l'inizio della prima alzata e spostarsi col mouse nella direzione della rampa. Se la

rampa termina all'interno dello stesso livello e non sono presenti pianerottoli, è possibile terminare la costruzione cliccando il tasto sinistro del mouse. Altrimenti...

3. Nel caso in cui la rampa si trovasse compresa fra due livelli, tenendo premuto il tasto **Ctrl** e cliccando il tasto sinistro è possibile “spezzare” l’elemento “Stair”. Viene così richiesto di definire l’area di sovrapposizione: premendo **Enter** si accetta l’area di sovrapposizione definita da Legion, digitando **n** e successivamente **Enter** è possibile disegnare a mano l’area di sovrapposizione preferita dal modellatore.
4. Una volta fatto ciò il programma chiede di definire l’area di sovrapposizione nel livello CAD successivo. Una volta definita, premendo **Enter**, si può completare la costruzione della rampa.
5. Cliccando il tasto sinistro, Legion chiede se si vuole terminare la rampa (**Enter**); viceversa, se si vuole inserire un pianerottolo, basta digitare il tasto **n** e successivamente **Enter**.
6. Terminato il disegno dell’oggetto “Stair”, si aprirà una finestra di dialogo dove sarà possibile definire le caratteristiche della rampa: mono direzionale o bidirezionale.

Per quanto riguarda le scale mobili, l’Activity Object da utilizzare è “Escalator”. L’oggetto “Escalator” è composta da diversi componenti: area che si estende dall’estremità delle balaustre fino al “pettine” di inizio scala, porzione piana della rampa che porta dall’inizio del pettine fino alla prima alzata, rampa inclinata (riser), porzione piana che porta dall’ultima alzata fino al pettine e infine area che porta dalla fine del pettine alle balaustre. Nel momento di realizzazione dell’oggetto “Escalator”, è necessario raffigurare ognuna delle sopracitate componenti. Durante la simulazione le entità appariranno ferme sul posto durante l’utilizzo delle scale mobili.

Come per le scale fisse, anche in questo caso vi è la necessità di “spezzare” la scala mobile per simulare il passaggio da un livello CAD a quello successivo, definendo l’area di sovrapposizione. L’area di sovrapposizione rappresenta una coppia di Level Entrance/Level Exit, interna allo strumento “Escalator”, che permette il trasferimento immediato delle entità da un livello all’altro (Figura 3.15).

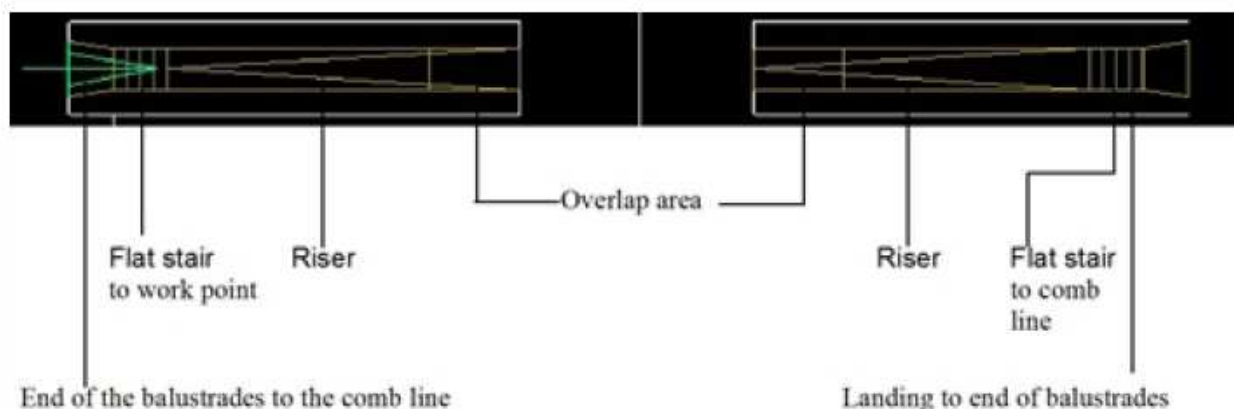


Figura 3.15: esempio di costruzione di una singola rampa di scale mobili. L’Overlapping area rappresenta il passaggio da un livello ad un altro del modello. Immagine tratta da (Legion SpaceWorks™ R6.4 User Guide, 2016).

Per disegnare un “Escalator” si deve sempre partire dal basso (a valle) per poi chiudere l’Activity Object in alto (a monte):

1. Disegnare la prima area che va dalle balaustre all’inizio del pettine. Cliccare il tasto sinistro del mouse.
2. Ora sarà possibile delineare la parte piana che si estende dal pettine fino al primo gradino rialzato (escluso). Cliccare nuovamente il tasto sinistro.
3. Successivamente si potrà disegnare la sezione di area rappresentante la rampa. Arrivati in fondo si dovranno specificare nuovamente la zona piana compresa fra l’ultima alzata e il pettine e quella che va dal pettine fino alla balaustra. Cliccando col tasto sinistro del mouse si pone fine alla realizzazione.
4. Nel caso in cui le scale mobili abbiano gli estremi in due livelli CAD differenti, premendo **Ctrl** e cliccando il tasto sinistro si potrà definire l’area di sovrapposizione. Premendo **Enter** si accetta l’area di sovrapposizione di default; digitando **n** e successivamente **Enter** si procede con la definizione manuale dell’area di sovrapposizione.
5. Il programma permette a questo punto la definizione dell’area di sovrapposizione nel nuovo livello CAD e cliccando il tasto sinistro si potrà delineare la restante sezione della scala mobile.
6. Terminato il disegno dell’oggetto Escalator, si aprirà una finestra di dialogo dove sarà possibile definire le caratteristiche della rampa: direzione, velocità, inclinazione, fattore di distanza fra le entità, comportamento sulle scale mobili delle entità, ecc.

3.1.3.2.6 Collegamento fra Activity Object (Linking e Filtering)

È importante sapere come le entità all’interno della simulazione raccolgano e interpretino le informazioni fornite dagli Activity Objects. Una volta che un pedone attraversa un elemento di simulazione del Model, è possibile si verifichino variazioni di percorso.

Il processo più utilizzato e collaudato viene chiamato **Linking**. Tramite questo processo vengono specificati dal modellatore una sequenza di obiettivi (target) che le entità potrebbero incontrare durante il loro percorso verso la loro destinazione finale. Effettuando un “link” fra un Activity Object e uno (o più) “target”, quello che era l’obiettivo (uscire dalla simulazione, andare in coda, attraversare i tornelli) viene portato a termine grazie ad un Activity Object (Exit, Queue, Delay Point). Si viene così a creare un percorso preferenziale per le entità, allo scopo di raggiungere la loro destinazione finale o intermedia.

Gli Activity Objects che possono ospitare l’origine dei link sono: Entrance, Level Entrance, Delay point, Queue, Queue Group, Direction Modifier. Focal Node, Stair e Escalator. Gli Activity Objects che fungono invece da punto di arrivo dei link sono: Focal Node, Delay Point, Waiting Zone, Queue, Queue Group, Level Exit, Stair, Escalator e Exit.

Esistono quattro metodi differenti per creare un Linking:

- Link per percentuale: questa è l'opzione di default per qualsiasi Activity Object. Per ogni "target" /Activity Object viene assegnata una percentuale delle entità partenti dall'Activity Object di origine.

Procedura:

1. Aprire l'edit dell'Activity Object di origine.
 2. Cliccando sulla voce "Links" compare una finestra di dialogo con un elenco di possibili "target" Activity Object e una serie di colonne che riportano il valore in percentuale (tutte momentaneamente fissate sul valore 0%).
 3. Per definire le percentuali che si desiderano, basta cliccare sul nome di ogni singolo "target" /Activity Object che è stato scelto.
 4. Cliccando **OK** si salvano i cambiamenti effettuati.
- Link per Entity Type: questo metodo attribuisce ad un link un solo tipo di entità. Risulta utile quando all'interno della simulazione vengono introdotti due tipi di pedoni con ruoli completamente differenti (ad esempio commuters e staff).

Procedura:

1. Aprire l'edit dell'Activity Object di origine.
 2. Cliccando sulla voce "Links" si può selezionare la voce Link by **Entity Type**.
 3. Una volta definito il "target" Activity Object, è possibile trascinare le Entity Types di interesse nell'apposita finestra di riferimento.
 4. Cliccando **OK** si salveranno i cambiamenti effettuati.
- Link per Entity choice: permette alle entità di scegliere il proprio target a seconda di alcuni parametri. Viene spesso utilizzato nel momento in cui l'entità deve scegliere il tornello basandosi sul numero di persone in coda o la vicinanza con esso.

Procedura:

1. Aprire l'edit dell'Activity Object di origine.
 2. Cliccando sulla voce "Links" si può selezionare la voce Link by **Entity Choice**.
 3. Selezionare uno dei due criteri di scelta disponibili. *Shortest distance*: le entità si dirigono verso l'Activity Object più vicino a loro (distanza entità-focal point). *Shortest queue* o *Fewest occupant*: le entità si dirigono verso l'Activity Object con meno entità in coda.
 4. Cliccando **OK** si salvano i cambiamenti effettuati.
- Link per Final Destination: metodo utilizzato per collegare le entità agli Activity Object secondo la destinazione finale delle entità stesse. Viene spesso utilizzato quando si ha la necessità di collegare Direction Modifier, Waiting Zone per simulare l'attesa dei pedoni sulla banchina.

Procedura:

1. Aprire l'edit dell'Activity Object di origine.

2. Cliccando sulla voce “Links” si può selezionare la voce Link by **Final Destination**.
3. Una volta definito il “target” Activity Object, è possibile trascinare le Entity Types di interesse nell’apposita finestra di riferimento.
4. Cliccando **OK** si salvano i cambiamenti effettuati

Esiste poi un nuovo tool inserito da Legion nell’ultima versione del software SpaceWorks e prende il nome di **Filtering**.

Alcuni Activity Object permettono di filtrare le entità a seconda del tipo, dell’attività o della destinazione: Direction Modifier, Level Exit, Waiting Zone, Drift Zone, Stair e Escalator. Quando le entità incontrano questi oggetti, le impostazioni di “filtraggio” determinano quali entità saranno affette dal comando dell’Activity Object. Il Filtering rappresenta una soluzione molto utile per la creazione di modelli estremamente semplici. Tuttavia risulta macchinosa e incompleta nel momento in cui siano presenti variazioni al percorso (tipo biglietterie e tornelli), in questi casi la simulazione dovrà essere supportata anche da una componente di Linking.

3.1.3.3 Legion Simulator

In Legion Simulator è l’applicazione nella quale viene avviata la simulazione pedonale e vengono registrati tutti i dati necessari per utilizzare successivamente Legion Analyser. Ogni volta che viene dato inizio alla simulazione, Legion Simulator calcola il movimento di ogni singola entità durante il suo viaggio attraverso il modello creato nel Model Builder. A causa degli elementi stocastici presenti all’interno di Legion, ogni nuova simulazione è leggermente diversa dalla precedente.

L’interfaccia del Simulator richiama fortemente quella del Model Builder (Figura 3.16), una delle differenze sostanziali è rappresentata dalla presenza del Playback Toolbar. Quest’ultima è posizionata nella parte bassa dello schermo e contiene i comandi che permettono al modellatore di gestire la simulazione (play, stop, pausa, fast forward, ecc.)

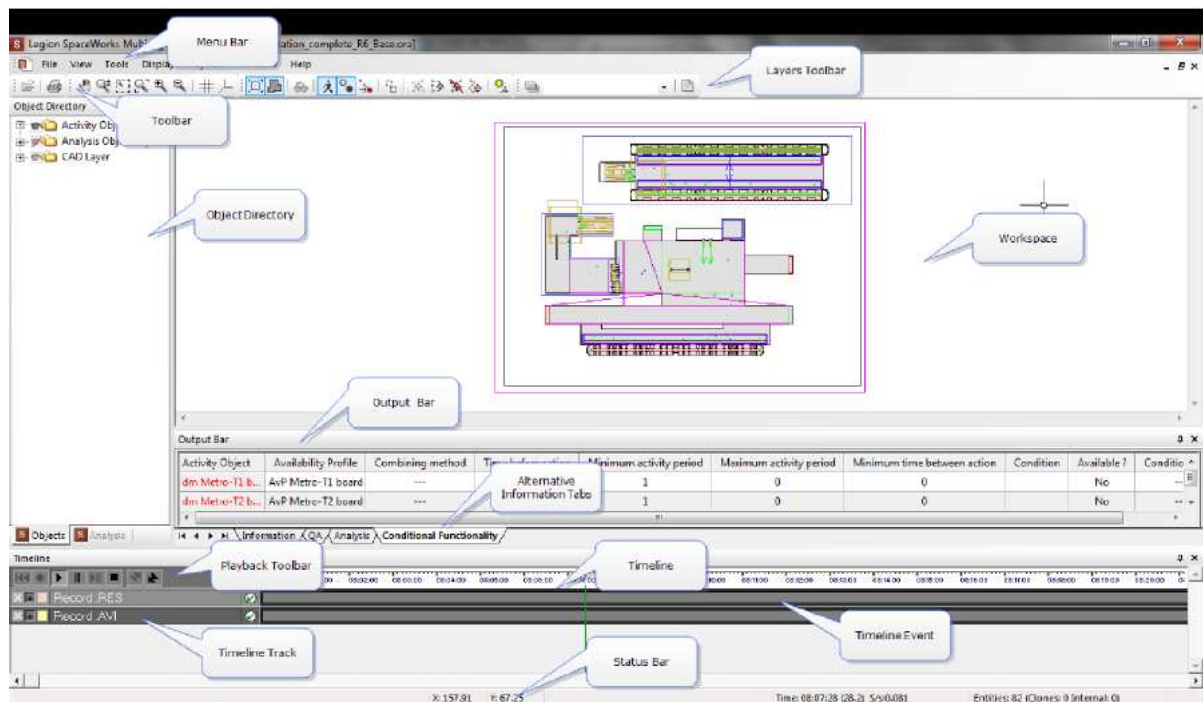


Figura 3.16: interfaccia Legion Simulator. Immagine tratta da (Legion SpaceWorks™ R6.4 User Guide, 2016).

Durante la simulazione non è possibile intervenire sul modello. Si dovrà osservare il comportamento delle entità e verificare se la costruzione del modello sia stata effettuata correttamente. In caso di evidenti errori si dovrà bloccare Legion Simulator e tornare sul Legion Model Builder per correggere il modello. Per fare partire la simulazione nel Simulator è necessario aprire il file ORA ottenuto dal Model Builder.

Durante la simulazione è possibile consultare le informazioni relative alle singole entità (Figura 3.17); premendo il tasto di pausa e cliccando col tasto destro su una di esse si aprirà una finestra di informazioni dettagliate.

 Entity ID: 1448 Default Entity Type	
Position X:	27.02 metres
Position Y:	-11.79 metres
Last Travelled Direction:	333.95 degrees
Last Travelled Speed:	1.07 metres / second
Last Travelled Distance:	0.64 metres
Last Visited Target:	Not Set
Last Preferred Direction:	347.33 degrees
Last Travelled Speed (preferred direction):	1.04 metres / second
Last Travelled Distance (preferred direction):	0.62 metres / second
Density Around:	1.13 people / sqr metre
Total Travelled Distance:	157.99 metres
Total Time in Model:	00:01:45.0
Activity:	Walking
Origin:	Entrance #001
Current Destination:	Exit #001
Final Destination:	Not Set
Status:	None
Inconvenience	0.38
Frustration	1.67
Discomfort	0.22
Dissatisfaction	2.27

Figura 3.17: informazioni relative alla singola entità: posizione, indicazioni di velocità-direzione-destinazione, tempo di percorrenza nel modello, informazioni relative all’algoritmo, ecc. Immagine tratta da (Legion SpaceWorks™ R6.4 User Guide, 2016).

3.1.3.4 Legion Analyser

Dal Legion Simulator viene salvato un file video in formato RES che può essere caricato sull’ultima applicazione: Legion Analyser. Questa applicazione permette di interagire con la simulazione fornendo output come: densità, velocità, flussi, tempi di percorrenza, grado di soddisfazione, ecc.

Il Legion Analyser crea un file formato ANA che funge da modello di richiamo per memorizzare le impostazioni delle mappe, dei grafici e in generale delle analisi che vengono estratte dai file RES. In questo modo è possibile analizzare diversi modelli usando sempre le stesse impostazioni preferenziali. Questa procedura è utile per confrontare diversi scenari con lo stesso metro di giudizio.

Come nel caso di Legion Simulator, anche il Legion Analyser si presenta con un’interfaccia simile al Legion Model Builder (Figura 3.18). Sulla sinistra è presente una “Map legend” che indica i range dei valori delle heat-maps visualizzate nel Workspace. Inoltre vi è la possibilità

di visualizzare grafici relativi a diversi dati input come: conta dei pedoni entrati nel modello, quantità delle entità presenti in un determinato istante in un determinato luogo, ecc.

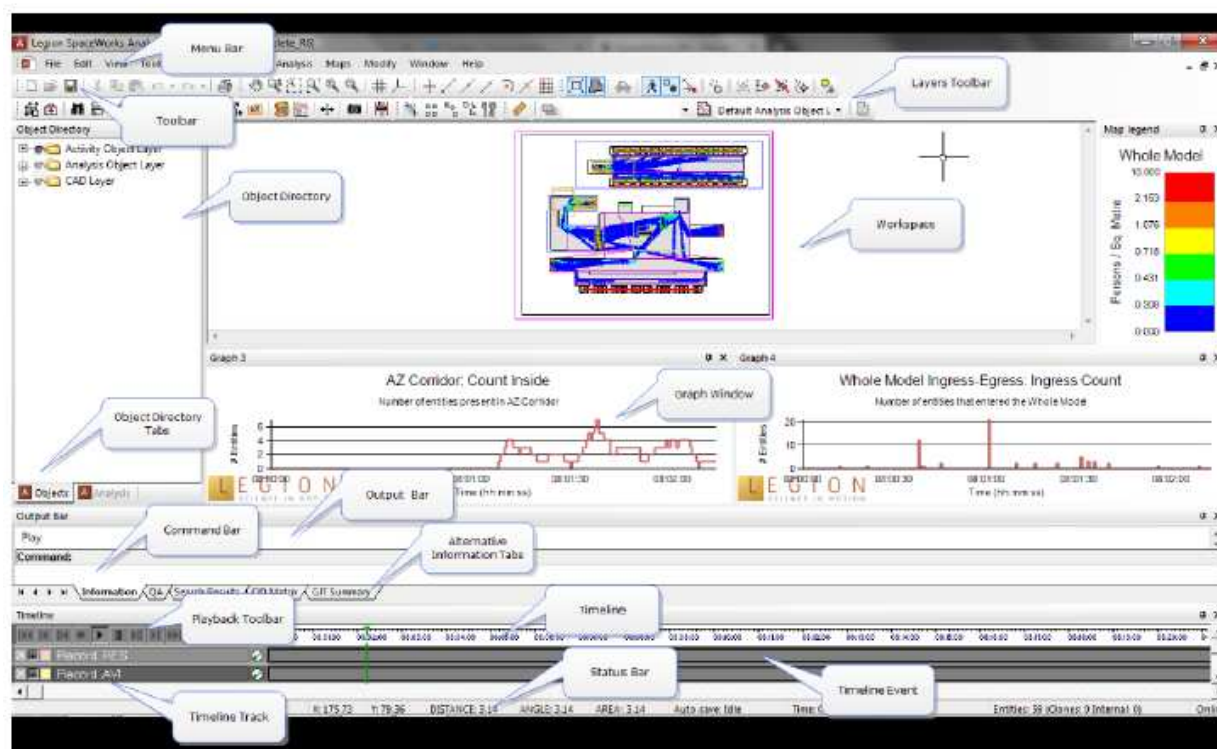


Figura 3.18: interfaccia Legion Analyser. Immagine tratta da (Legion SpaceWorks™ R6.4 User Guide, 2016).

3.1.3.4.1 Output di Legion Analyser

Legion Analyser restituisce delle heat-maps, rappresentazioni colorate della simulazione che si sta analizzando. Ciò consente di visualizzare in modo chiaro l'esperienza vissuta dalle entità durante la simulazione e le caratteristiche di flusso come ad esempio densità e utilizzo dello spazio. Sono strumenti di visualizzazione estremamente utili per ottenere una panoramica delle prestazioni del modello costruito; inoltre sono facilmente interpretabili anche dalla clientela poco affine alla disciplina.

La colorazione delle heat-map di Legion può avvenire seguendo due categorie di range:

- Range di valori: questi range sono costruiti sui valori forniti da Fruin e dall'HCM e si trovano già inseriti di default nel programma. Vengono utilizzati per valutare gli standard di qualità del modello.
- Range di colori: scala di colori utilizzata per descrivere condizioni locali: numero di entità all'interno di un'area, velocità massima raggiunta all'interno di un'area, densità massima raggiunta all'interno dell'area, ecc.

Legion Analyser fornisce diverse mappe di default:

- *Comulative High Density*: mostra per quanto tempo è stata registrata una densità superiore a quella limite specificata, il range dei colori rappresenta il tempo. Le aree che hanno vissuto un elevato livello di densità per lungo tempo appaiono di colore rosso, quelle che hanno vissuto un elevato livello di densità per periodi più brevi si manifestano in blu. Questa mappa è ideale per identificare i cosiddetti "hotspot" all'interno del modello: aree in cui devono essere sostenuti elevati livelli di densità.
- *Comulative Max, Mean, Min Density*: vengono visualizzati i livelli massimi, medi e minimi della densità registrata in un'area dall'inizio della simulazione fino alla conclusione. Sono generalmente utilizzate in combinazione con i valori corrispondenti ai LoS (Fruin e HCM). Risultano utili per misurare le prestazioni di un ambiente rispetto a standard prestabiliti. Dal momento che gli standard di comfort variano a seconda dell'azione che si sta compiendo (come visto nel capito 2), è possibile creare heat-maps relative a situazioni di comportamento: di flusso libero, su scala e in coda.
- *Evacuation Time*: rappresentano il tempo trascorso dall'ultimo istante in cui l'area è stata occupata da un'entità. Sono molto utili per valutazioni di sicurezza e valutazioni di evacuazione.
- *Space Utilisation*: indicano quanto come e quanto viene sfruttato lo spazio all'interno di un modello. Viene registrata la posizione id ogni singola entità passo dopo passo. Le aree maggiormente utilizzate sono generalmente colorate in rosso, quelle meno calpestate in blu. Le aree del modello che non vengono utilizzate rimangono nere (o bianche, a seconda del colore scelto per lo sfondo).

Per quanto riguarda i dati output, Legion permette l'estrazione delle tabelle "Generalised Journey Time - GJT", in italiano "Costo Generalizzato di Spostamento". Questo tipo di dato riporta la somma dei costi monetari (e non) sostenuti da ogni singolo pedone nel compiere il proprio itinerario all'interno della simulazione. In Tabella 3.2 sono riportati i valori dei pesi assegnati ad ogni azione compiuta dalle entità ("CF" è un fattore addizionale di congestione). Per definire questi valori, Legion ha preso spunto dall'ente per il trasporto pubblico "Transport for London"; tramite queste grandezze il programma riesce ad indicare ai programmatori il costo stimato di spostamento per ogni entità.

Tabella 3.2: pesi attribuiti ad ogni attività compiuta dai pedoni su Legion SpaceWorks.

GJT Zone Pesi	Walk	Waiting	Queue	Delay	Stairs Up	Stairs Down	Escalator Up	Escalator Down
	2,000 + CF	2,500 + CF	3,400	2,500	4,000	2,500	1,500	1,500

3.2 PTV Viswalk

PV Vissim è un software di simulazione multimodale sviluppato dal 2010 dal Gruppo PTV (Planung und Transport Verkehr AG). Vissim viene utilizzato per il traffico veicolare, pedonale e per la loro interconnessione. Per poter simulare un ampio numero di pedoni è necessario l'utilizzo di Viswalk, modulo aggiuntivo di PTV Vissim che permette la simulazione di pedoni in ambienti complessi come stadi, stazioni metropolitane, centri multimodali, ecc.

3.2.1 Movimento dei Pedoni in Viswalk

L'algoritmo che regola i movimenti pedonali in Viswalk è costruito sul Social Force Model di Helbing e Molnar visto nel paragrafo 2.1.2.3. Il SFM presenta i pedoni come entità che si auto-guidano all'interno del modello nel corso della simulazione. Il modello considera le forze repulsive, di attrito e di attrazione che si concentrano in un'unica forza che guida il pedone nelle sue scelte. I fattori che influenzano il pedone nel SFM di Viswalk sono riassunti nella Tabella 3.3.

Tabella 3.3: elenco fattori-effetto-descrizione per la Social Force Model di PTV Viswalk.

Fattore	Effetto	Descrizione
Direzione desiderata	Direzione	I pedoni scelgono il percorso più breve per raggiungere la destinazione
Velocità desiderata	Accelerazione	Velocità di flusso libero. Definita per ogni classe di pedone
Tempo di rilassamento	Accelerazione	Tempo in cui il pedone raggiunge la propria velocità desiderata
Altri pedoni	Effetto repulsione	I pedoni evitano di entrare in contatto con sconosciuti
Ostacoli	Effetto repulsione	I pedoni evitano di urtare ostacoli
Attrazione	Effetto attrazione	I pedoni sono attratti da amici/parenti, vetrine, ecc.
Angoli di visuale	Influenza visuale	I fattori (entità o ostacoli) di fronte ai pedoni influenzano maggiormente il comportamento del pedone
Fluttuazioni	Variazioni stocastiche	Sono inserite alcune scelte stocastiche (ad esempio scelta fra due opzioni equivalenti)

Per realizzare l'implementazione del SFM all'interno di PTV Viswalk sono stati assestati parametri specifici. Questi parametri, a differenza di Legion, sono consultabili e addirittura regolabili da parte del modellatore (Figura 3.19).

Comportamenti pedonali												
Seleziona layout...												
Total	Num	Nome	Tau	ReagisciAdN	ASocIso	BSocIso	Lambda	ASocMedio	BSocMedio	VD	Rumore	PrefLat
1	1	Default	0,400	8	2,720	0,200	0,176	0,400	2,800	3,000	1,200	Nessuna
2	2	Elevator (In Cab)	0,400	8	2,720	0,200	0,176	0,400	2,800	3,000	0,300	Nessuna
3	3	Elevator (Alighting)	0,200	8	2,040	0,300	0,176	0,400	2,800	3,000	1,200	Nessuna

Figura 3.19: valori algoritmo SFM di Viswalk, sotto la voce “Comportamenti pedonali”.

I valori riportati dalla Figura 3.19 verranno utilizzati dall'algoritmo del SFM per simulare il comportamento dei pedoni:

- Tau: è il tempo di rilassamento, cioè tempo in cui il pedone raggiunge la propria velocità desiderata.
- ReagisciAdN: quantità di pedoni nelle vicinanze che influenzano la direzione presa dalla entità di riferimento.
- ASocIso (ASocMedio) e BSocIso (BSocMedio): parametri che regolano la SFM fra due pedoni in base alla intensità di forza fra due pedoni e alla distanza che li separa.
- Lambda: fattore anisotropo. Fattore che specifica l'influenza degli oggetti sul pedone in base alla loro posizione.
- VD: simboleggia l'impatto che le velocità relative dei due pedoni hanno sui due pedoni stessi. Se $VD > 0$ allora le velocità avranno influenza sulla forza presente fra i due pedoni.
- Rumore: forza stocastica. Inserita per prevenire situazioni di stallo nei casi di indecisione.

Come detto in precedenza Viswalk permette la variazione manuale di tali parametri in modo tale da creare a piacimento un proprio tipo di pedone. Su Viswalk un “tipo di pedone” viene caratterizzato sia da parametri comportamentali ma anche da dettagli relativi a forma e colore. Viene data la possibilità di creare una “Composizione pedonale” scegliendo uno o più “tipi di pedone” (ad esempio pedestrian e/o commuters at station, ecc.), definendo le velocità desiderate per ogni tipo e fissando le percentuali della composizione. La velocità desiderata viene fissata scegliendo un profilo di velocità di default oppure creato dall'utente.

3.2.2 Scelta del percorso in Viswalk

I parametri del SFM di PTV Viswalk hanno una forte influenza sulla scelta del percorso dei pedoni. Essi infatti sono stati calibrati attraverso diversi studi in modo tale da fornire al pedone un potenziale dinamico sufficiente per scegliere il percorso al fine di raggiungere la destinazione finale.

Per definire la destinazione finale (o intermedia) di ogni entità viene utilizzato un sistema di “route statici” di default. Questo sistema permette di creare coppie O/D fisse e l'algoritmo sceglie un percorso ottimale per ognuna di esse; le entità tenderanno a seguire questo percorso durante la simulazione. Viene inoltre data la possibilità di implementare il potenziale dinamico per determinati percorsi, in questo caso i pedoni avranno la capacità di ricalcolare ad ogni passo il percorso più breve. Il modellatore definisce in che misura questi calcoli

dovrebbero influenzare la scelta del percorso, questo procedimento, tuttavia, richiede un'elevata capacità di calcolo.

Oltre ai route statici O/D, è possibile creare dei route intermedi che vengono gestiti come “destinazioni a metà strada”; il percorso dall'origine al punto intermedio e il percorso dal punto intermedio alla destinazione finale vengono calcolati separatamente. I route intermedi, chiamati “partial route”, sono dunque utilizzati per cambiare il percorso dei pedoni a livello locale. Le entità deviano dal loro percorso originale fino a quando non avranno portato a termine l'obiettivo del loro partial route.

La scelta del percorso può avvenire sia in modo statico che in modo dinamico: nel primo caso i pedoni scelgono il percorso più breve possibile, che viene definito statico in quanto la distanza dalla destinazione rimane invariata nel corso della simulazione; nel secondo caso il percorso scelto dalle entità si basa sulla ricerca del percorso più veloce e non più sul percorso più breve.

Nel caso si scegliesse di utilizzare una scelta di percorso dinamica, Viswalk procederà con un calcolo per la stima del percorso più veloce secondo la seguente procedura (Kretz et al., 2011):

1. Viene costruita una griglia composta da piccole aree. Ogni area fornisce informazioni sulla velocità di spostamento prevista al suo interno; la velocità dipenderà ad esempio dalla geometria dell'area stessa e dalla presenza di ostacoli e/o altri pedoni.
2. A partire dall'area di destinazione vengono integrati fra di loro i tempi di spostamento previsti da ogni singola area. Si ottiene così una mappa di tempi di spostamento, stimati per raggiungere la destinazione, per ogni singola area.
3. Infine vengono calcolati i tempi per le aree occupate. I gradienti negativi vengono usati per ciascuna zona come direzione della velocità desiderata dei pedoni. Almeno un pedone dovrà portare a termine il proprio spostamento affinché Viswalk sia in grado di definire quale percorso sia quello più veloce.

3.2.3 Interfaccia Vissim/Viswalk

A differenza di Legion SpaceWorks, PTV Viswalk è composto da una singola applicazione contenente gli strumenti necessari per definire il modello, avviare la simulazione ed estrapolare i risultati (Figura 3.20).

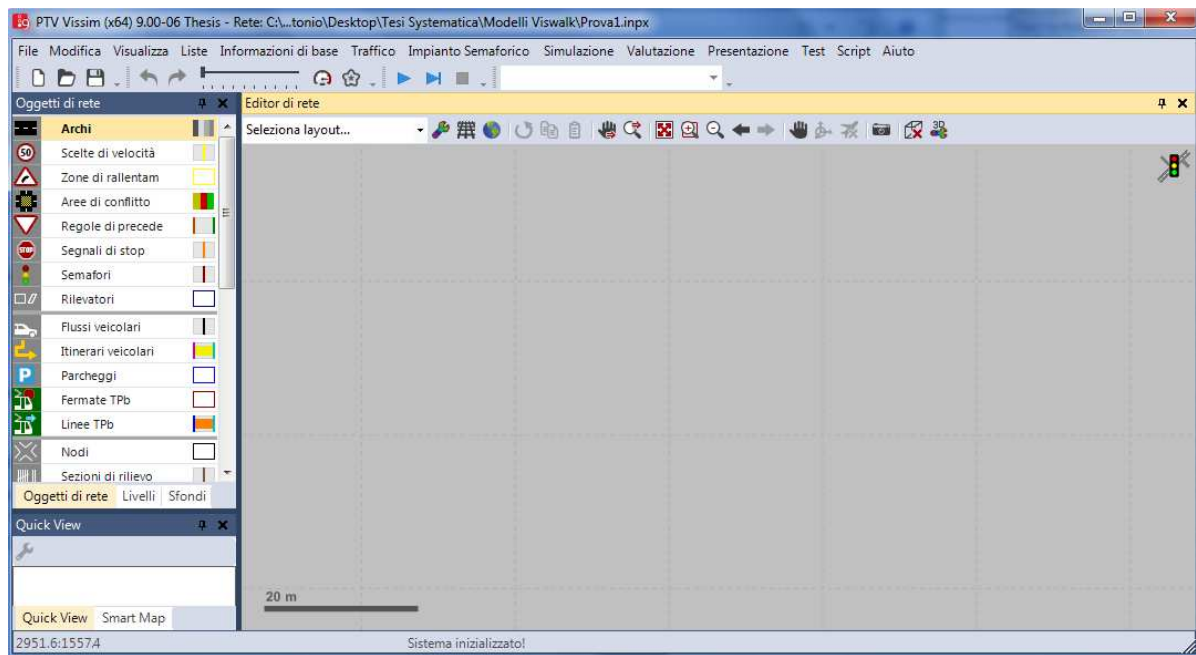


Figura 3.20: interfaccia PTV Vissim/Viswalk al lancio del programma.

La schermata è suddivisa in tre finestre principali. La finestra “Oggetti di Rete” sulla sinistra racchiude tutti gli elementi che possono essere utilizzati per la costruzione del modello. In particolar modo quelli contraddistinti dal colore giallo sono gli strumenti da utilizzare per la costruzione del modello pedonale (Figura 3.21).



Figura 3.21: in giallo elementi necessari per la costruzione del modello pedonale.

La finestra “Quick View” fornisce informazioni generali riguardo all’elemento selezionato sul “Network Editor”, che è lo spazio destinato alla costruzione effettiva del modello e alla sua simulazione.

3.2.4 Costruzione modello pedonale Viswalk

A differenza di Legion SpaceWorks, Viswalk permette una modellazione 2D/3D complementare. Non si dovrà più fare uso di strumenti quali “Level Entrance” e “Level Exit” ma si dovrà costruire il modello come se lo si stesse visualizzando in 3D.

Per prima cosa è necessario definire i livelli di progettazione. Questi livelli indicano le differenti altezze che vengono attribuite ai layer dei singoli piani dello spazio di simulazione. Per fare ciò è sufficiente cliccare nel menu a tendina “Livelli” in Figura 3.21 e aggiungere i livelli desiderati. Successivamente, durante la costruzione del modello pedonale, Viswalk fornisce due metodi differenti per definire quella che saranno le aree pedonali (cioè la base del modello). La più semplice consiste nel importare un file CAD 2D per ogni piano e ricalcare la geometria utilizzando lo strumento “Immagini di sfondo” presente nella finestra “Oggetti di rete”. Questa procedura permette di disegnare a mano le geometrie necessarie per ogni livello, tuttavia risulta lenta e poco precisa.

Alternativamente è possibile importare le geometrie da file CAD facendo in modo che Viswalk le riconosca immediatamente come aree pedonali. In questo caso il metodo è meno intuitivo e diretto dal punto di vista dell'utilizzo dell'interfaccia, ma più veloce ed estremamente più preciso. Nel menu a tendina “File”, scegliendo la voce “Importazione” e cliccando su “CAD per aree pedonali” viene data la possibilità di scegliere il file CAD di riferimento. Il file CAD deve essere preparato su AutoCAD 2D, i piani della struttura che si sta modellando devono essere sovrapposti e rigorosamente bi-dimensionali (creati da polilinee). Ai fini dell'esportazione su Viswalk è consigliato organizzare i layer del CAD in base ai diversi piani che compongono la struttura. Quando il file CAD viene caricato su Viswalk si assegnano i layer ai diversi livelli prestabiliti. Vengono così create le aree (e/o gli eventuali ostacoli) sull’“Editor di rete” ed è possibile visualizzare il modello sia in 2D sia in 3D (Figura 3.22).

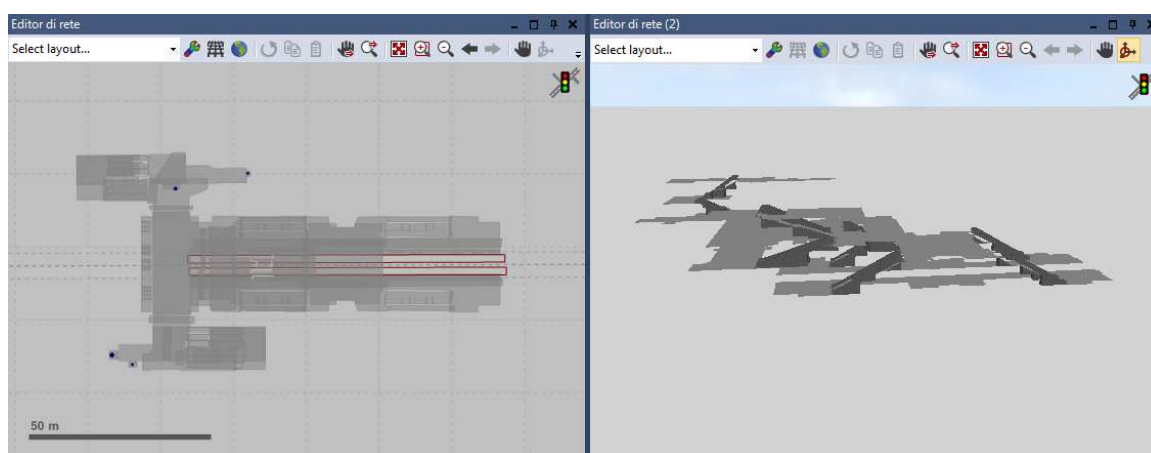


Figura 3.22: Editor di rete 2D e 3D. Creare un doppio Editor di rete per le due visioni è utile per la creazione del modello.

3.2.4.1 Scale fisse e scale mobili in Viswalk

Per la creazione delle scale fisse e mobili è consigliabile eliminare il vano scale dal modello CAD 2D e lasciare uno spazio vuoto. La costruzione dell'intero modello-scala avviene nell'editor di Viswalk.

Una volta caricato il modello nell'editor, per completare lo spazio di simulazione è necessario inserire gli “elementi scala”. Nella finestra “Oggetti di rete”, selezionando la voce “Scale & Rampe” e premendo “**Ctrl + tasto sinistro**” si disegna il contorno di quello che sarà

l'elemento scala finale. Per terminare la delineazione si preme nuovamente il tasto sinistro e appare una finestra di editing per l'elemento scala (Figura 3.23).

Figura 3.23: editor comandi per il setting dell'elemento scala/rampa/scala mobile.

Nella prima parte dell'editor dell'elemento scala è necessario specificare il livello di partenza e quello di arrivo con eventuali offset dovuti alla presenza di pianerottoli intermedi. Viswalk permette la modellazione di tre diversi tipi di scala: scala fissa, scala mobile, rampa e tappeto mobile. Infine si devono definire le caratteristiche relative al comportamento su scala dei pedoni.

Definiti tutti i parametri necessari, premendo il tasto "OK", si procede alla localizzazione precisa della scala ricercando una coerenza geometrica fra la scala e l'ambiente di inserimento circostante.

3.2.1.4.2 Flussi ed itinerari pedonali

Per creare i flussi pedonali all'interno della simulazione si deve in primo luogo fissare le coppie di origine e destinazione del modello, utilizzando gli strumenti combinati “Flussi Pedonali” ed “Itinerari pedonali” nella finestra “Oggetti di rete”. Cliccando su un'area pedonale col tasto sinistro del mouse viene applicato un nodo che raffigura l'origine del flusso, cliccando nuovamente col tasto destro sul nodo appena creato si apre una finestra per la regolamentazione dei flussi pedonali (Figura 3.24).

Total	Num	Nome	Area	Volume(0)	ComposizionePed(0)
1	2		36	1295,0	1: Pedestrians
2	3		34	1295,0	1: Pedestrians
3	4		33	1295,0	1: Pedestrians
4	5		35	1295,0	1: Pedestrians

Totale	Continuato	IntTempo	Volume	ComposizionePed	TipoVol
1	☐	0-MAX	1295,0	1: Pedestrians	Stocastico

Figura 3.23: finestra per la definizione dei flussi pedonali in PTV Viswalk.

Nella parte sinistra sono elencate le aree che rappresentano le origini per i diversi flussi, il volume totale di pedoni nell'ora di simulazione e la composizione pedonale. Nella parte a sinistra, per ogni area di origine è possibile definire gli intervalli di tempo secondo cui i pedoni entrano all'interno del modello durante la simulazione.

Successivamente utilizzando lo strumento “Itinerari Pedonali” nella finestra “Oggetti di rete”, si definiscono le vere e proprie coppie di aree O/D. Si posiziona il primo nodo (in colore rosso) su un'area di origine definita con lo strumento “Flussi Pedonali”, il secondo nodo (in colore azzurro) si posiziona sull'area di destinazione preferita (Figura 3.24). Si possono inoltre posizionare dei punti intermedi (in colore blu) per implementare il funzionamento dei “partial route” (Figura 3.24).

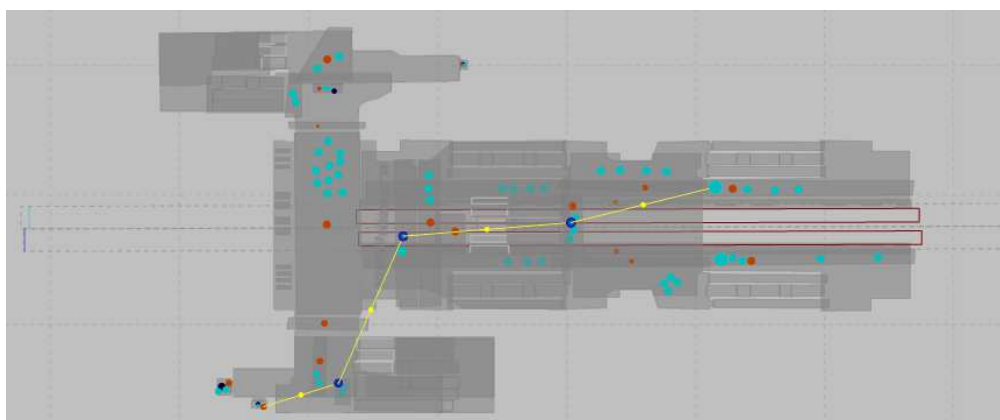


Figura 3.24: route statico creato con “Itinerari Pedonali”. Il nodo rosso rappresenta l'area di partenza, quello azzurro la destinazione. I nodi blu intermedi sono utili per l'utilizzo dei route statici.

Per simulare step intermedi come la sosta alle biglietterie e il passaggio attraverso i tornelli Viswalk prevede l'utilizzo dei “partial route”. Il procedimento di applicazione è il medesimo

di quello visto nel caso dei “route statici”, è necessario selezionare la voce “parziale” nella selezione dell’oggetto “Itinerari Pedonali” (Figura 3.25).



Figura 3.25: esempio di route parziale. Una volta che il pedone calpesta l’area in cui è presente il nodo di colore rosso gli verrà imposto di dirigersi al nodo intermedio blu (tornello) e raggiungere l’area in cui è presente il nodo azzurro. Finito tale procedimento il pedone continuerà il suo percorso prestabilito dal route statico.

La simulazione delle code avviene tramite lo strumento “Area” nella finestra “Oggetti di rete”. All’interno delle impostazioni (Figura 3.26) dell’area disegnata, selezionando la voce “coda”, i pedoni si disporranno in fila una volta raggiunta l’area stessa. È possibile scegliere l’intervallo di tempo medio speso dal pedone una volta raggiunta la testa della coda. Questo procedimento viene utilizzato per definire il ritardo accumulato durante l’attraversamento dei tornelli e l’attesa alle biglietterie.

Area Pedonale

Num: 48 Nome:
Livello: 5: concourse
Offset Z: 0,000 m
Spessore (3D): 0,050 m
Tipo di visualizzazione: 21: Pedestrian area gray

☒ Mostra singoli pedoni ☒ Registro pedoni attivo
☒ Mostra valori classificati ☐ Usa sempre come area di origine
☒ Mostra etichetta ☐ Usa sempre come area di destinazione

Comportamento di area: Trasporto pubblico & Ascensori
Tipo comportamento:
Distribuzione di tempo: 30: 30 s ±
☐ Waiting time is relative to the start of simulation
☒ Coda
☒ Valutazione coda attiva

Totale	ClassePedoni	LinearitàCoda	OrdineCoda
1	10: Man, Woman	0,600	0,700

OK Annulla

Figura 3.26: impostazioni area con comportamento pedonale a coda.

3.2.1.4.3 Inserimento trasporto pubblico

A differenza di Legion e MassMotion, Viswalk è l'unico software dei tre che permette una simulazione intermodale fra pedoni e veicoli. Per la simulazione della salita/discesa dei pedoni dal mezzo di trasporto di utilizzano gli strumenti “Archi”, “Linee TPb” e “Fermate TPb”.

In primo luogo è necessario costruire gli “Archi” lungo i quali transitano i mezzi di trasporto (automobili, treni, tram, ecc.). Nella Figura 3.27 è rappresentato l'editor degli archi, in questa finestra è possibile definire tutti i dettagli prettamente visivi del trasporto pubblico.

Totale	Indice	Larghezza	ClassiVeicE	TipoVisual	NoCambio	NoCambio	NoCambio	NoCambio
1	1	3,50			☐	☐	☐	☐

Figura3.27: editor archi PTV Viswalk, è possibile realizzare corsie per auto o rotaie per metro e tram.

Una volta costruiti gli archi necessari e selezionato lo strumento “Linee TPb”, cliccando col tasto sinistro e trascinando il cursore lungo l'intera lunghezza dell'arco, si attribuisce all'arco stesso la funzione a linea di trasporto pubblico.

In Figura 3.28 è raffigurato il prompt dei comandi per le “Linee TPb”. Nelle Informazioni di base è possibile definire l'arco di partenza, il tipo di veicolo, velocità del veicolo e il colore con il quale il veicolo si presenterà all'interno dell'editor di rete. È fondamentale specificare gli orari di partenza, cioè ogni quanti secondi un nuovo mezzo di trasporto si ferma alla “Fermata TPb”, e il numero di occupanti per ogni veicolo.

Linea TPb

Num: 1 Nome:

Informazioni di base Orari di partenza Impulsi TPb

Arco di partenza: 2

Tipo di veicoli: 400: Tram

Distribuzione velocità desiderata: 30: 30 km/h

Distanziamento: 0 s

Distribuzione del tempo di accesso:

Margine sull'orario: 1,00

Colore:

OK Annulla

Linea TPb

Num: 1 Nome:

Informazioni di base Orari di partenza Impulsi TPb

Total	Part	CorsaImpulso	Occupanti
1	30,0	0	50
2	150,0	0	50
3	270,0	0	50
4	390,0	0	50
5	510,0	0	50
6	630,0	0	50
7	750,0	0	50
8	870,0	0	50
9	990,0	0	50
10	1110,0	0	50
11	1230,0	0	50

OK Annulla

Figura 3.28: tabella informazioni base e orari di partenza per linea di trasporto pubblico Viswalk.

In Figura 3.29 è raffigurato il prompt dei comandi per le “Fermate TPb”. In questa finestra si impostano le caratteristiche relative alla fermata del trasporto pubblico: percentuale di passeggeri scesi, offset orario di partenza, composizione dei pedoni scesi, lato di discesa e salita dal mezzo, ecc.

Fermata di linea TPb

Linea TPb 1 Fermata TPb 2 Transito 1

☒ Fermata TPb attiva Offset orario di partenza: 0 s

☐ Fermata facoltativa Door lock duration before departure: 1,0 s

Tempo di attesa

☐ Minimo:

Calcolo: Perc. di discesi: 70,00 %

Discesa e salita dei passeggeri

Composizione discesi: 1: Pedestrians

Posizione discesa: 1: Uniform

sinistra destra

Discesa possibile ☐ ☒

Salita possibile ☐ ☒

☒ Attendi salita pedoni

Door closure delay: 3,0 s

OK Annulla

Figura 3.29: finestra di dialogo per le “Fermata di linea TPb” in Viswalk.

Infine nella Figura 3.30 sono raffigurate le liste Linee TPb/ Fermata di linea TPb che forniscono le informazioni generali riguardo alle preferenze impostate nelle due finestre precedenti (Figura 3.28 e 3.29).

Linee TPb / Fermata di linea TPb									
Seleziona layout...  Fermate di linea 									
Total	Num	Nome	ArcoEntrante	ArcoDest	PosDest	TempoIngrOffset	TipoVeicoli	DistrVelDes	Colore
1	1		2	2	204,322	0,0	400: Tram	30: 30 km/h	(255, 190, 0, 0)
2	2		1	1	204,200	0,0	400: Tram	30: 30 km/h	(255, 0, 168, 0)
									
Totale: 1	LineaTPb	FermataTPb	Attivo	FermataFacoltativa	OffsetPart	PedComePass	DefTempoSosta	RitardoChiusuraPorta	DoorLockDurBefDep
1	1	2	☒	☐	0,0	☒	Calcolo	3,0	1,0

Figura 3.30: tabelle di riepilogo relative al TPb in Viswalk.

Adiacente alla “Fermata di Linea TPb” si costruisce un’area (Figura 3.31) che ha lo scopo, grazie ad un route statico, di indirizzare verso una destinazione le entità appena entrate nella simulazione tramite il trasporto pubblico.

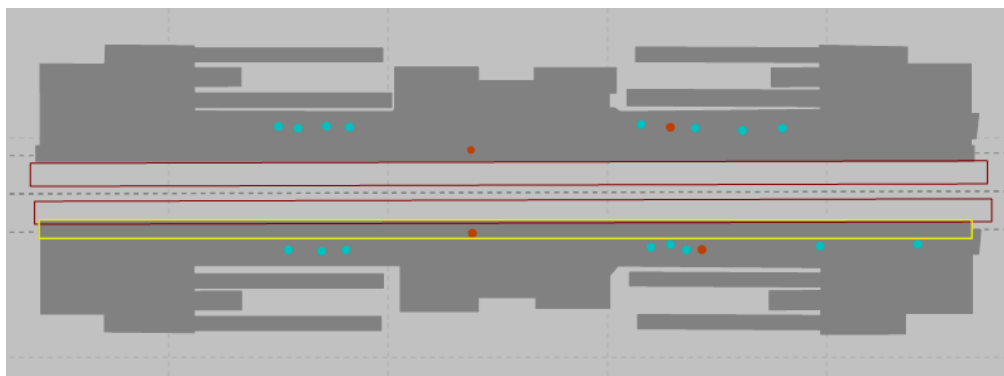


Figura 3.31: schema area pedonale di attesa (in grigio) per i pedoni che aspettano la metro, banchina (grigio contorno giallo) e fermata TPb (rettangolo rosso).

Come mostra la Figura 3.32 nel menu “Trasporto Pubblico & Ascensori” è possibile definire a quale banchina l’area in questione farà riferimento (cioè a quale dei due archi di trasporto pubblico). Tramite questo semplice procedimento viene simulato l’arrivo dei pedoni all’interno del modello, attraverso l’utilizzo di un veicolo qualsiasi.

Per quanto riguarda la simulazione dei pedoni in attesa del mezzo di trasporto pubblico, si attribuisce all’area grigia in Figura 3.31 l’uso ad “Area d’attesa”, specificando anche in questo caso la banchina di riferimento (1 o 2 nel caso della Figura 3.31). Così facendo i pedoni

attenderanno l'arrivo del mezzo di trasporto pubblico che gli permetterà di uscire dalla simulazione.

Area Pedonale

Num: 10 Nome: Layer vagoni: 3

Livello: 10: platform

Offset Z: 0,000 m

Spessore (3D): 0,000 m

Tipo di visualizzazione: 1: Road gray

☒ Mostra singoli pedoni ☒ Registro pedoni attivo

☒ Mostra valori classificati ☒ Usa sempre come area di origine

☒ Mostra etichetta ☐ Usa sempre come area di destinazione

Comportamento di area Trasporto pubblico & Ascensori

TPb

Uso: Banchina

Per fermata(e) TPb: ☐ 1 ☒ 2

Posizione salita:

Ascensori

Area di attesa per gruppo di ascensori:

Trasporto pubblico & Ascensori

Comportamento di attesa: Attesa in posizione fissa

OK Annulla

Figura 3.32: editor dell'area pedonale che funge da banchina per i pedoni che sopraggiungono nel modello tramite il trasporto pubblico.

3.2.1.4.4 Avvio simulazione e output di Viswalk

Cliccando la voce “Configurazione” nel menu a tendina “Valutazione” si apre una finestra di dialogo chiamata “Configurazione di Valutazione” (Figura 3.33). All’interno di questa finestra si trova un elenco di classi (“Attributi di risultato”) che specificano quali informazioni dovranno essere raccolte dal programma durante la simulazione.

	Colleziona informazioni	Da orario	A orario	Intervallo
Analisi di rete pedonale	☐	0	99999	99999
Analisi di rete veicolare	☐	0	99999	99999
Archi	☐	0	99999	99999
Aree & Rampe	☒	0	3600	3600
Celle della griglia pedonale	☒	0	3600	3600
Contatori di coda	☐	0	99999	99999
Meso-segmenti	☐	0	99999	99999
Misurazioni di area	☒	0	3600	3600
Nodi	☐	0	99999	99999
Perditempo	☐	0	99999	99999
Relazioni OD	☐	0	99999	99999
Sezione di rilievo	☐	0	99999	99999
Tempi di percorrenza pedonale	☐	n	00000	00000

Figura 3.33: per la simulazione pedonale le voci che interessano maggiormente sono “Aree&Rampe”, “Celle della griglia pedonale” e “Misurazioni di area”.

Per ottenere le classiche heat-maps LoS, prima del lancio della simulazione, cliccare sull'icona “Modifica i parametri grafici” presente affianco agli oggetti “Aree” e “Rampe&Scale” nella finestra “Oggetti di rete”. In primo luogo è necessario selezionare la voce “utilizza schema di colori” in “Modalità di disegno”, successivamente cliccando su “Configurazione schema di colori” si apre la finestra in Figura 3.34.

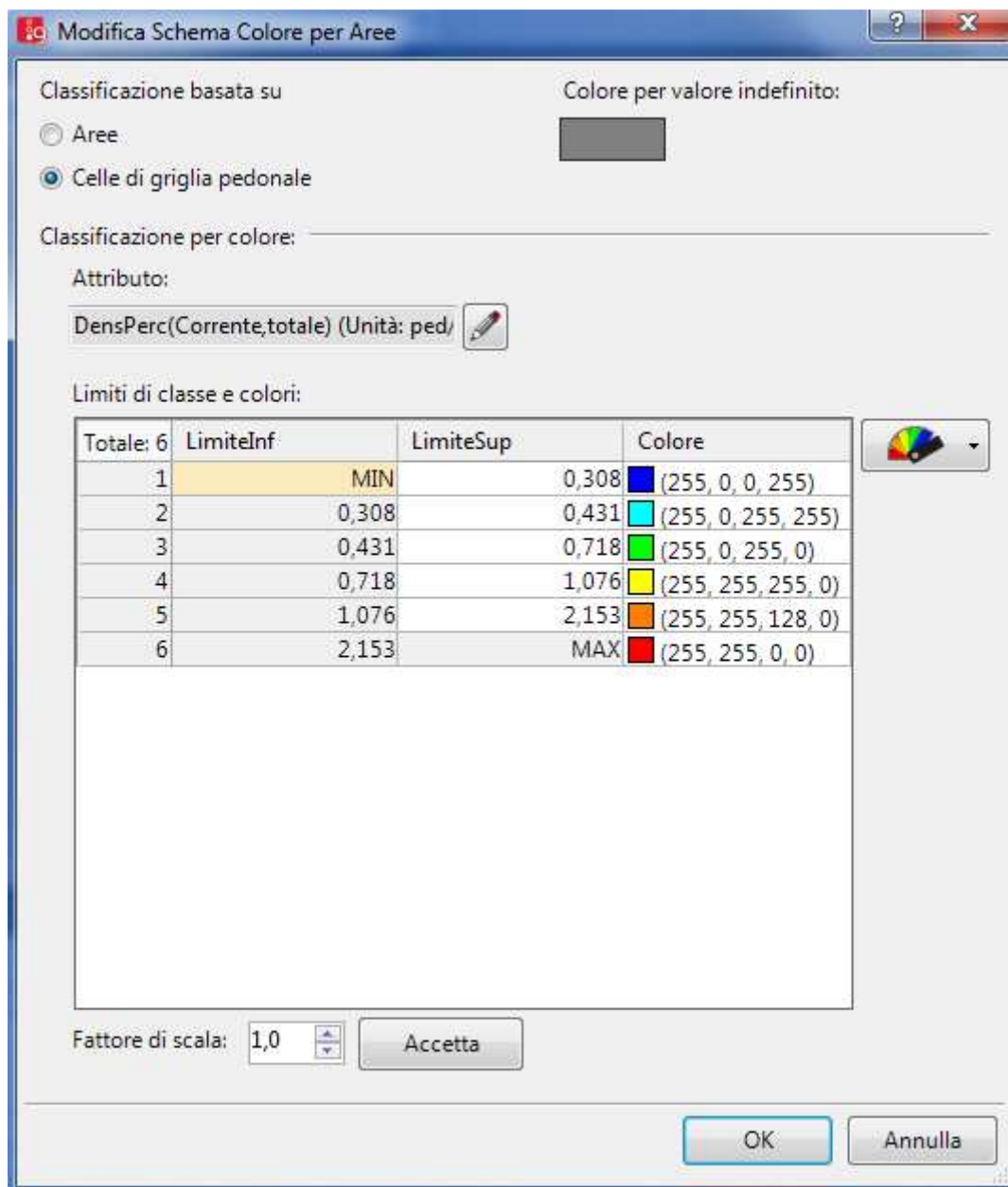


Figura 3.34: finestra editing per la definizione dei dati output della simulazione in Viswalk.

Una volta definito l'attributo "Densità percepita media" e impostati i limiti di classe e colori (è fornita una larga scala di classi, fra cui quelle di Fruin e HCM) è possibile lanciare la simulazione. Finita la fase di simulazione, sotto la voce "liste dei risultati" nel menu a tendina "valutazione", si hanno a disposizione i dati estratti dal software (Figura 3.35).

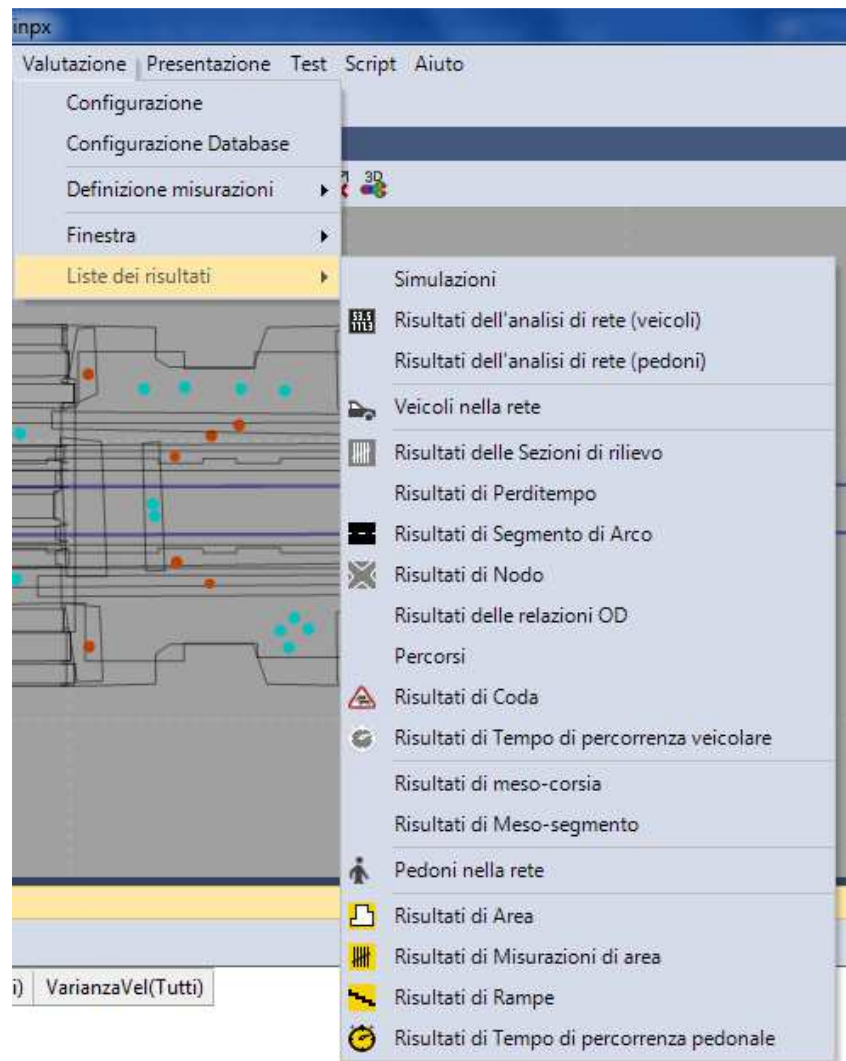


Figura 3.35: elenco risultati estraibili dal software Viswalk una volta effettuata la simulazione.

Questi risultati forniscono valori medi (velocità, densità, lunghezza coda, ecc.) specifici per ogni area e/o rampa di scale costituenti il modello. Aprendo la finestra “Risultati di Tempo di percorrenza pedonale” è possibile ottenere il tempo medio di percorrenza pedonale da una specificata coppia origine/destinazione.

Il comando “Pedoni nella rete” in Figura 3.35, permette un monitoraggio istantaneo delle entità che prendono parte alla simulazione; vengono forniti dati inerenti alle dimensioni fisiche, alla velocità desiderata e effettiva, alle coordinate di posizionamento, ecc.

Cliccando sulla voce “Output diretti” presente in Figura 3.33, è concesso selezionare le voci di interesse per la creazione di un file .txt contenente informazioni inerenti agli spostamenti pedonali (Figura 3.36). Nello specifico è possibile ottenere dati relativi alle tempistiche del viaggio di ogni singolo pedone selezionando “Pedestrian travel time (raw data)”.

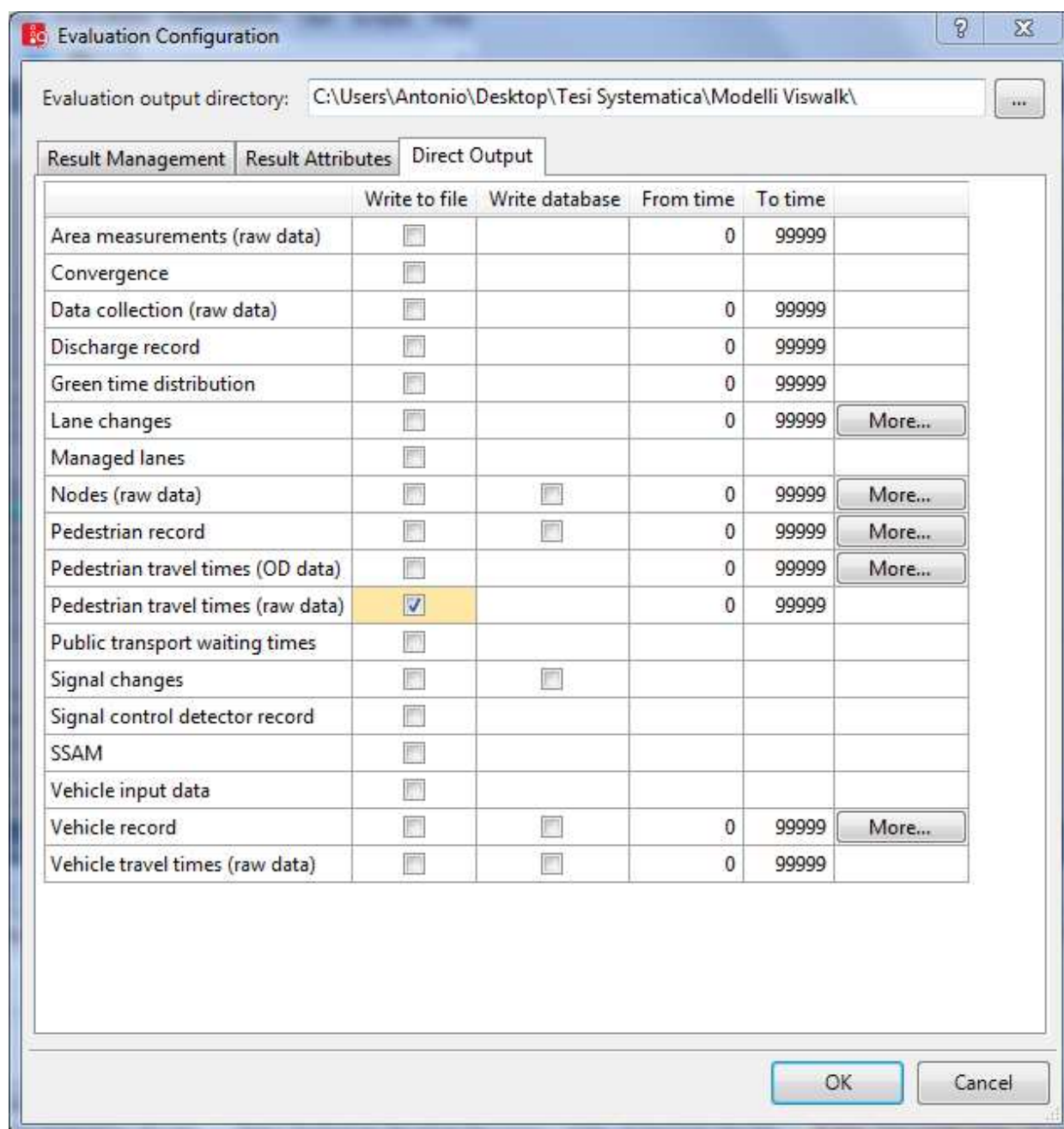


Figura 3.36: finestra di PTV Viswalk per la creazione di dati output diretti sotto forma di file .txt.

3.3 MassMotion Oasys

MassMotion è un software per la simulazione dinamica pedonale sviluppato a partire dal 1976 dalla casa Oasys (Ove Arup SYstem). La costruzione del modello avviene all'interno di un ambiente tridimensionale, caratterizzata da una navigazione automatica delle entità e da un'interfaccia semplice ma completa sotto ogni aspetto permettono all'utente di simulare differenti tipi di scenario.

3.3.1 Movimento dei Pedoni e scelta del percorso in MassMotion

In MassMotion i pedoni si muovono in base alle caratteristiche personali (ad esempio sesso, età, dimensioni corporee, ecc.), alla geometria dello spazio che li circonda e alla prossimità di altre entità. L'algoritmo che governa la simulazione è basato sul Social Force Model di Helbing, ad ogni passo compiuto, delle "forze" agiscono sugli agenti inducendoli a muoversi di conseguenza.

Una volta inserite nel modello, le entità svolgeranno i compiti ("Task") che gli sono stati assegnati facendo uso di due sistemi differenti: Navigation e Movement (Tabella 3.4).

Tabella 3.4: distinzione fra il sistema di Navigation e il sistema di Movement in MassMotion.

Task	Specifica l'obiettivo dell'entità. L'entità cerca sempre di portare a termine la sua "task" corrente
Navigation	Il sistema Navigation è responsabile per la determinazione del modo migliore per svolgere una task. Nel ricercare la propria destinazione, l'entità deve valutare l'ambiente circostante e valutare il percorso ottimale per raggiungere la destinazione. Questa analisi si basa sulla conoscenza dell'ambiente, sia in termini di distanze sia in termini di congestione. Una volta scelto il percorso, questa scelta viene periodicamente reiterata in quanto l'agente progredisce all'interno del modello e variano le condizioni da valutare.
Movement	Una volta che l'entità ha scelto la sua meta, il suo sistema di navigazione la guida attraverso il modello verso il suo obiettivo. Questo sistema si basa sull'algoritmo del Social Force Model.

Quindi in MassMotion ogni pedone è una entità autonoma che possiede la capacità di monitorare e reagire all'ambiente circostante. Le caratteristiche del pedone (dimensioni, velocità, ecc.) vengono definite all'interno dell'"Agent Profile". Successivamente le entità sono inserite nella simulazione tramite quelli che sono chiamati "Events". Tutti gli eventi specificano uno o più luoghi di origine per le nuove entità all'interno del modello. L'Event-Journey assegna al pedone un singolo compito mentre l'Event-Evacuate dà al pedone una serie di compiti da eseguire in ordine prima di uscire dal modello.

3.3.1.1 Agent Task

Ogni entità all'interno della simulazione possiede una lista di Task da svolgere. Le entità sono capaci di svolgere solo una Task alla volta e quella che viene portata a termine nell'attualità prende il nome di "active Task". Ogni decisione e ogni passo che l'entità prende sono compiuti per portare a termine l'"active Task".

Tipicamente le Task più utili al fine della simulazione pedonale sono:

- Muoversi verso un portale-destinazione.
- Muoversi verso l'inizio di un processo a catena.
- Evacuare la zona.
- Attendere in un'area per un certo periodo di tempo.
- Eseguire una serie di sub-Tasks.
- Uscire dalla simulazione.

3.3.1.2 Agent Navigation

L'Agent Navigation gestisce l'utilizzo delle aree del modello, assegnando i percorsi migliori per il raggiungimento delle destinazioni. Durante la scelta fra i diversi percorsi disponibili, le entità analizzano gli oggetti facenti parte del livello/piano (scale fisse, mobili, server di code, ecc.) e sceglieranno quelli che permettono un minor costo di spostamento. Il percorso scelto viene chiamato "local target" che cambierà una volta che l'entità sarà entrata su un nuovo livello/piano. Le entità sono coscienti solo del livello di congestione del piano sul quale transitano, non hanno alcuna informazione riguardo i piani successivi.

Un "local target" è quindi scelto basandosi sul confronto dei costi per i possibili spostamenti sul piano calpestato dall'entità. Per definire questi vengono considerate queste componenti:

- *Downstream Horizontal Distance*: la distanza più breve fra il local target e la destinazione finale.
- *Weighted Downstream Vertical Displacement*: lo spostamento verticale misurato lungo il percorso tracciato per misurare la distanza orizzontale a valle. Le componenti dello spostamento verticale sono moltiplicate per un fattore basato sul tipo di oggetto (scale, rampe, ascensore, ecc.).
- *Near Horizontal Distance*: distanza orizzontale fra l'entità e il local target.
- *Queue time*: quantità di tempo spesa in coda per raggiungere il local target. Viene calcolata considerando il numero di persone in fila davanti alla entità e il flusso di uscita attraverso il local target.
- *Opposing Flow*: una penalità in tempo basata sul flusso in direzione opposta che l'entità incontra dirigendosi verso il local target.
- *Closed Penalty*: una penalità in tempo basata sulla possibilità che il local target sia momentaneamente inaccessibile all'entità.
- *Backtrack Penalty*: una penalità in tempo se l'entità risulta aver già utilizzato il local target.

Nella scelta di navigazione di MassMotion sono stati inseriti anche due processi stocastici relativi alla personalità delle entità e alla variabilità di scelta. Ogni entità infatti possiede un set personale di coefficienti legati ai costi di spostamento. Un'entità con un elevato coefficiente per il Queue Cost e un basso coefficiente per il Downstream Horizontal Distance tenderà ad evitare lunghe code a favore di un percorso più lungo.

Ogni scelta di percorso è associata ad un piccolo fattore stocastico. Questo fattore sarà diverso per ogni entità e ogni qualvolta l'entità compie a termine un passo. Di conseguenza, le entità non sempre sceglieranno il percorso ottimale. Ciò assicura che, in caso di percorsi con costi equivalenti, non tutte le entità compiano la medesima scelta.

3.3.1.3 Agent Movement

Le entità che si spostano verso il local target determinano la direzione da intraprendere per raggiungere tale obiettivo valutando la linea di approccio più diretta. L'entità estende quelle che potrebbero definirsi delle “sonde” in diverse direzioni, con queste sonde misura la distanza dal local target e sceglie la direzione che garantisce uno spostamento più corto (Figura 3.37).

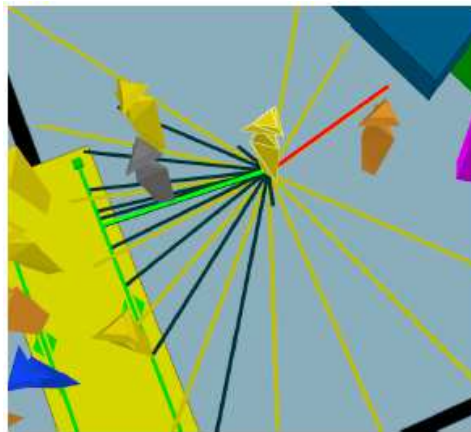


Figura 3.37: raggiera di sonde per definire il percorso più breve per raggiungere il local target. Immagine tratta da (MassMotion Help Guide, 2017)

Ogni entità è consapevole della presenza di altre entità (chiamati “Neighbours”) entro una certa distanza. Questa distanza varia con la velocità dell'entità stessa e con la densità locale. In generale dunque un'entità all'interno della simulazione conoscerà la posizione, la velocità e le dimensioni solamente dei suoi “Neighbours” (Figura 3.38).

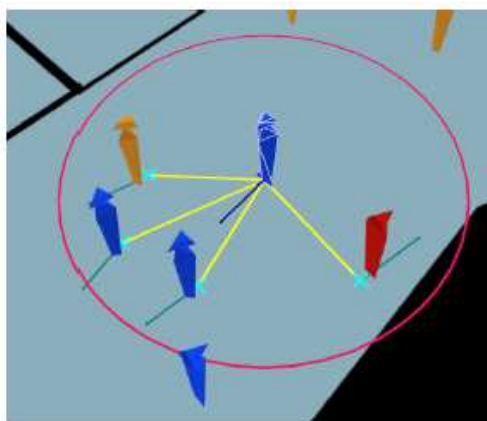


Figura 3.38: un'entità percepisce la presenza e il comportamento solamente dei "Neighbours". Immagine tratta da (MassMotion Help Guide, 2017)

I movimenti delle entità, come già detto in precedenza, sono governati dal Social Force Model. L'algoritmo di MassMotion genera una serie di forze basate sull'obiettivo dell'entità, sulla presenza di entità "Neighbours" e il posizionamento degli ostacoli (Figura 3.39).

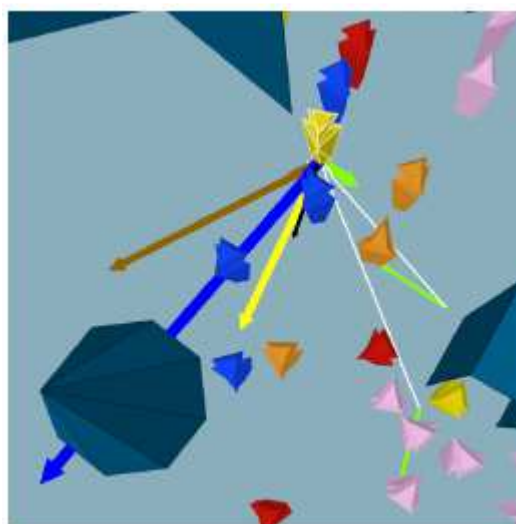


Figura 3.39: forze create dall'algoritmo di MassMotion seguendo la legge del SFM. Immagine tratta da (MassMotion Help Guide, 2017)

3.3.2 Interfaccia MassMotion

La Figura 3.40 mostra l'interfaccia utente del software MassMotion una volta lanciato. Come nel caso di Viswalk, MassMotion permette di eseguire la costruzione, la simulazione e l'analisi finale all'interno della stessa applicazione. Essendo un software nato per la simulazione pedonale, è assente la componente multi-modale che è presente in

Vissim/Viswalk. Tutto quello che si trova all'interno dell'interfaccia utente è dunque finalizzato alla modellazione e alla simulazione dei pedoni.

In alto, oltre al classico menu per gestire i salvataggi e le impostazioni base del software, è presente una lista di comandi definita “Ribbon bar”. La “Ribbon bar” è composta dalle voci: *Project*, che contiene elementi per l'impostazione del modello e l'importazione/esportazione di elementi; *Scene e Activities*, per creare e costruire il modello e le basi della simulazione; *Analysis*, contiene elementi necessari per l'effettiva simulazione del modello creato.

Sempre in alto, sulla destra è presente il “Layout Cluster” che è utile per gestire l'aspetto dell'interfaccia utente.

Sulla parte sinistra della schermata compare il “List Viewer” che è la finestra attraverso cui è possibile interagire con gli oggetti presenti nel modello, elencati per nome o per tipo. È presente, inoltre, una modalità filtro che permette di visualizzare solo singole categorie di oggetti.

La Sezione centrale è chiamata “Scene View” ed è quella in cui viene rappresentato il modello 3D in costruzione. È possibile navigare all'interno della schermata tramite il mouse. Una volta selezionati, gli oggetti si possono traslare, ruotare e cambiare di dimensione grazie ai comandi presenti nella parte destra della schermata. Sebbene il modello venga costruito in 3D è messa a disposizione dell'utente anche la visuale 2D (laterale, frontale e dall'alto).

Nella parte bassa della schermata la “Status Bar” fornisce informazioni riguardo alla selezione corrente e durante la simulazione viene sostituita dal “Time Panel” attraverso il quale si può interagire con lo scorrere del tempo.

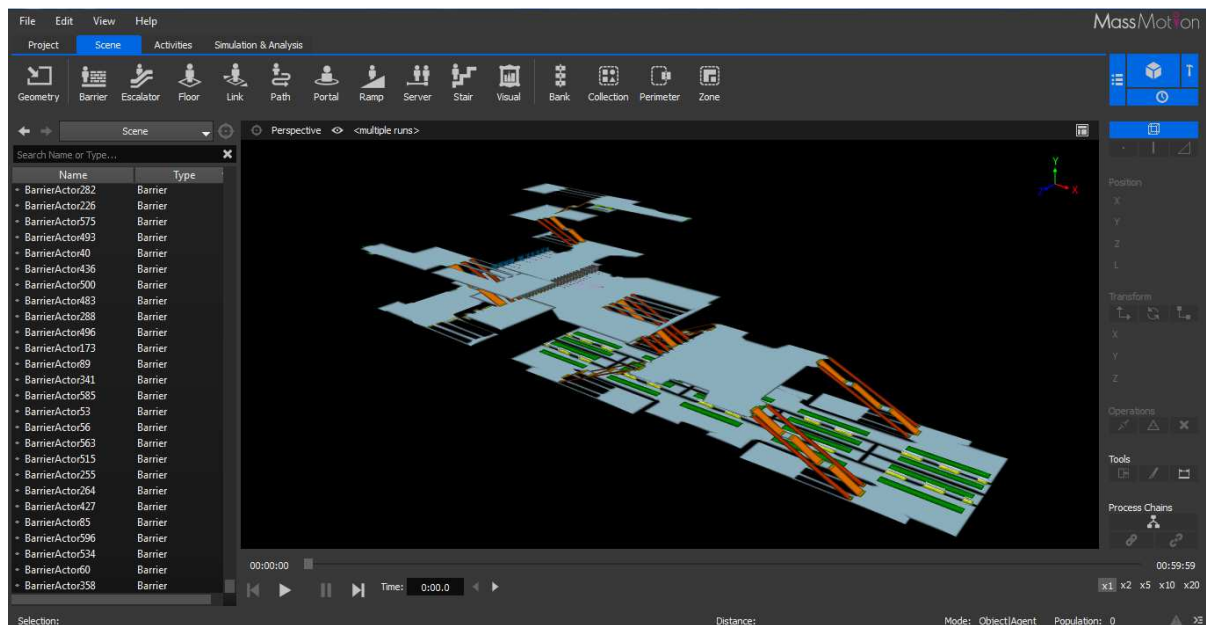


Figura 3.40: interfaccia utente del software MassMotion Oasis.

3.3.3 Costruzione modello pedonale MassMotion

A differenza di Legion SpaceWorks e PTV Viswalk, in MassMotion la costruzione del modello viene realizzata interamente in 3D. Per questo motivo è necessario importare un file CAD differente da quello utilizzato per i due software precedenti. Sebbene la costruzione del modello 3D su AutoCAD richieda un elevato tempo di preparazione, questa peculiarità permette a MassMotion di essere compatibile con gli innovativi metodi di rappresentazione digitale di caratteristiche fisiche e funzionali di un oggetto di progettazione (BIM e Revit).

Dunque prima di importare le geometrie dell'ambiente di simulazione su MassMotion, si deve procedere ad un'attenta costruzione del modello 3D su AutoCAD. Tutte le aree e gli ostacoli devono essere "estrusi", devono cioè avere uno spessore a seconda delle necessità e delle scelte del progettista. A differenza di Viswalk, dove i livelli vengono impostati sul software stesso, nel caso di MassMotion la distinzione dei livelli/piani deve essere definita a priori nel modello CAD. Fatto ciò, è possibile importare le geometrie sull'interfaccia del software.

Cliccando sulla voce "Import Reference Geometry" nel menu a tendina "File" si apre una finestra di dialogo (Figura 3.41) dalla quale è possibile scegliere il file AutoCAD (in formato "dwg") da importare. Una volta importati, gli elementi del modello 3D presentano una sigla "Ref_numero", in quanto non gli è ancora stata assegnata una funzione. Selezionando i diversi elementi visualizzati nella "Scene View", cliccandoci sopra col tasto destro del mouse e scegliendo la voce "Use to Generate" si procede con la distinzione delle aree calpestabili dai pedoni ("Floors") e degli ostacoli ("Barriers").

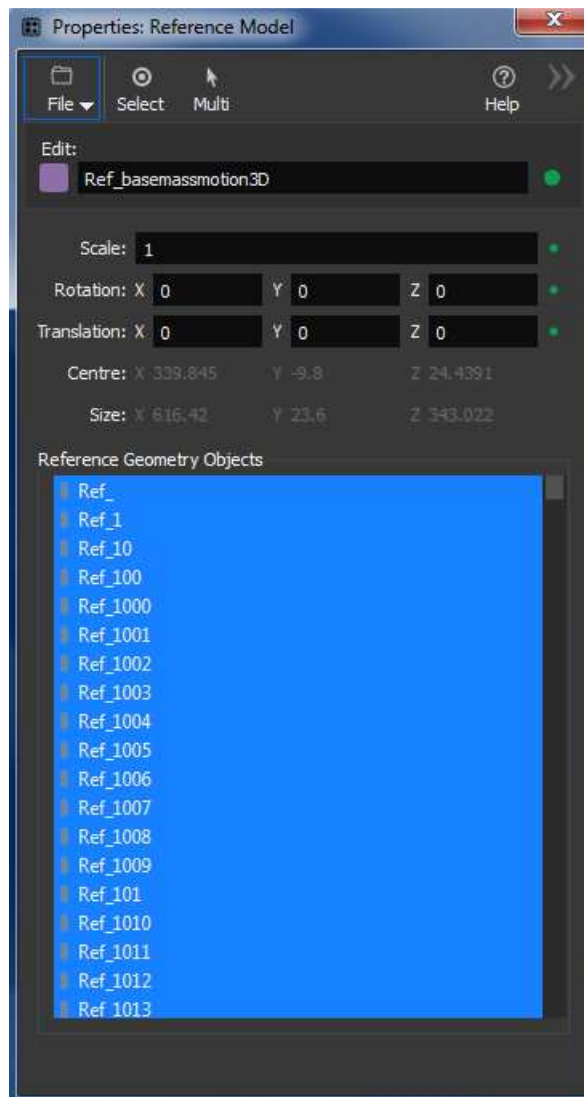


Figura 3.41: tutti gli elementi facenti parte del file CAD importato si presentano con una sigla di riferimento.

3.3.3.1 Scale fisse e scale mobili in MassMotion

In MassMotion è consigliata la costruzione degli elementi scala/rampa una volta importate le aree sul software, in quanto la loro realizzazione su AutoCAD 3D è più complicata e laboriosa. Nel menu “Scene” si trovano tutti gli elementi necessari per completare la costruzione del modello. Cliccando sulle voci “Escalator” e “Stair” vengono inseriti nella “Scene View” rispettivamente le rampe di scale mobili e di scale fisse. Una volta inserito l’elemento scala all’interno del modello è possibile variare la sua posizione e le sue dimensioni nello spazio 3D grazie ai comandi “Transform” presenti alla destra della “Scene View”. In Figura 3.42 sono raffigurate due rampe di scale mobili, ognuna con un senso di marcia (indicato dalla freccia verde) e una rampa di scale fisse (ovviamente bi-direzionale).

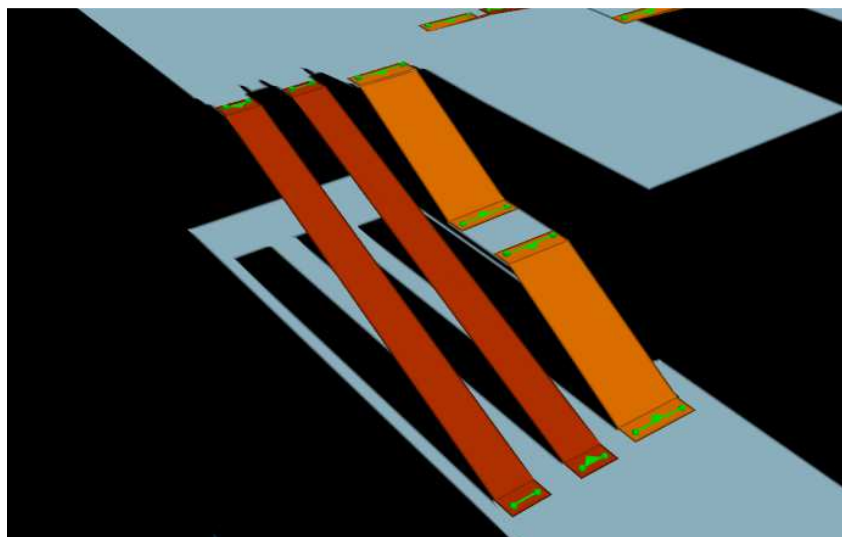


Figura 3.42: in rosso scale mobili, in arancione scale fisse su MassMotion. La banda presente all'estremità degli elementi diventa verde se posizionati coerentemente con i piani (in azzurro).

Effettuando un doppio click col tasto sinistro del mouse sugli elementi “Elevator” e “Stair” si apre una finestra di dialogo che permette la gestione delle funzioni specifiche delle scale e del comportamento dei pedoni su di esse. Come mostra la Figura 3.43 si possono definire i parametri geometrici generali e il tipo di comportamento delle entità. Molto importante ai fini della simulazione risulta il menu “Actions”, attraverso il quale è possibile governare i pedoni in base alle loro caratteristiche tramite procedimenti logici “if/then/else” o in funzione di determinati eventi.

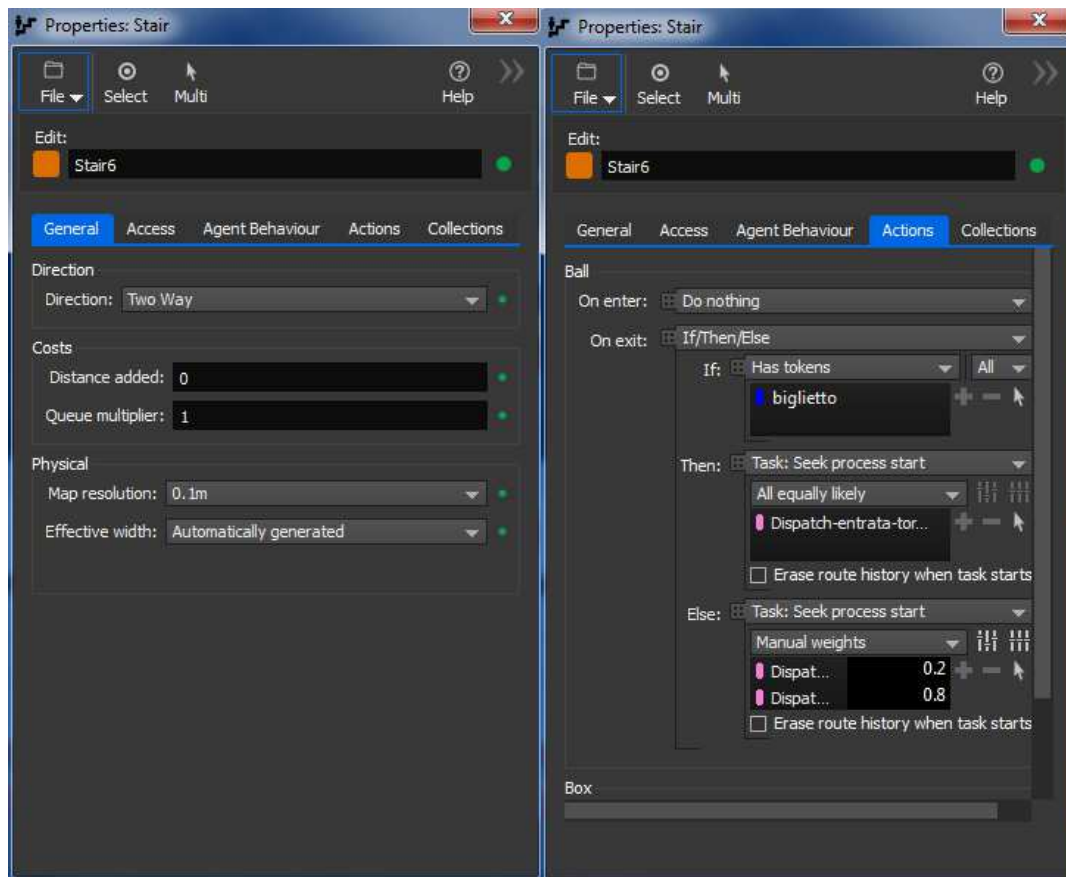


Figura 3.43: finestra di dialogo per le proprietà di un elemento “Stair” in MassMotion.

3.3.3.2 Elementi per la costruzione del modello MassMotion

Oltre agli elementi “Escalator” e “Stair”, nel menu “Scene” esistono altri strumenti fondamentali per effettuare una simulazione accurata. Fra i più importanti ed utilizzati ci sono: Barrier, Link, Portal e Server.

- *Barrier*: strumento utilizzato per definire tutti gli elementi interni al modello che rappresentano un ostacolo per il pedone durante la simulazione (ad esempio tornelli, biglietterie, pareti, ecc.).
- *Link*: strumenti che tornano utili quando si ha la necessità di congiungere due “Floor” appartenenti allo stesso livello. Vengono utilizzati per la rappresentazione di strettoie o porte presenti lungo l’itinerario delle entità (Figura 3.44).

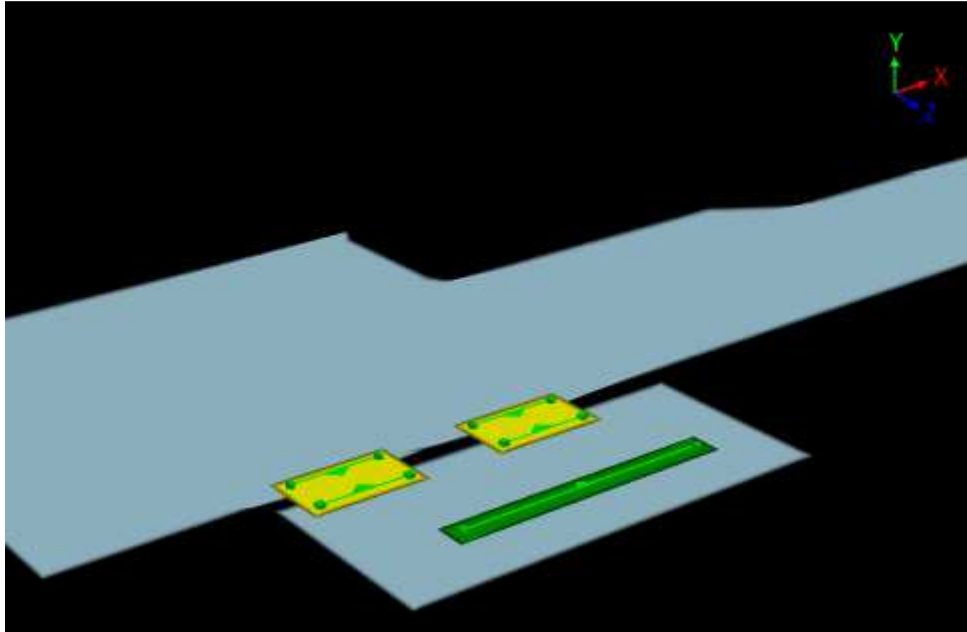


Figura 3.44: raffigurazione di due “Link” in giallo, in verde lo strumento “Portal”

- *Portal*: sono strumenti necessari ai fini della simulazione. Rappresentano infatti il punto di accesso e di uscita delle entità dal modello, inoltre possono essere utilizzati anche per simulare zone d’attesa.
- *Server*: sono gli strumenti utilizzati per simulare le code. Come mostrato in Figura 3.45, possono essere raggruppati sotto dei “Dispatch node” creando così dei gruppi di code e rendendo la costruzione del modello meno complessa. Il loro utilizzo risulta fondamentale per la simulazione dei tornelli e delle biglietterie.

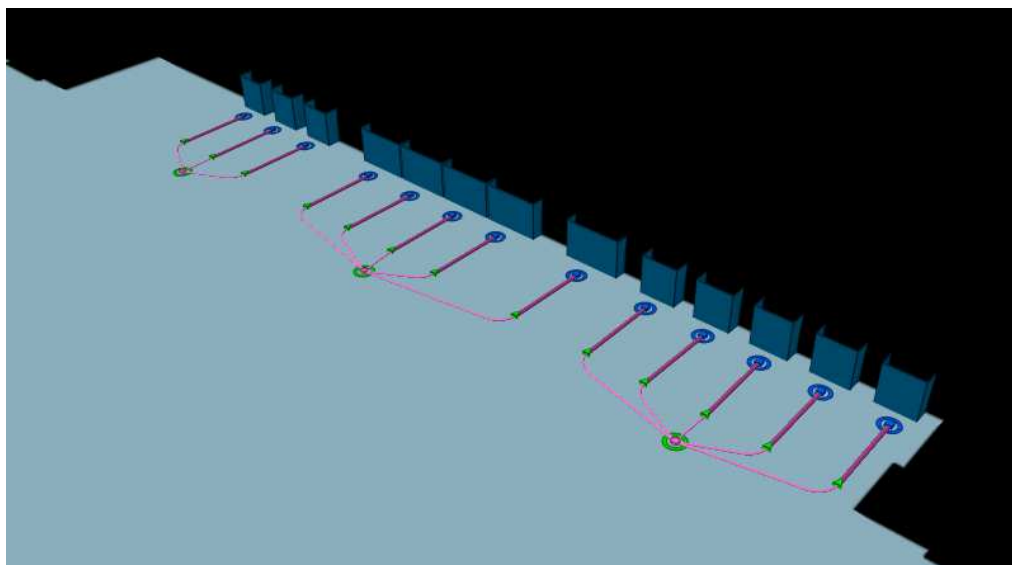


Figura 3.45: strumenti “Server” utilizzati per la simulazione delle code per le biglietterie

Il menu “Activities” racchiude tutto il necessario per costruire i pedoni in quanto entità fisiche e per gestire il loro comportamento all’interno del modello.

In primo luogo, cliccando sulla voce “Profile” si può intervenire sulle dimensioni fisiche delle entità, di default sono impostate quelle descritte da Fruin (Figura 3.46).

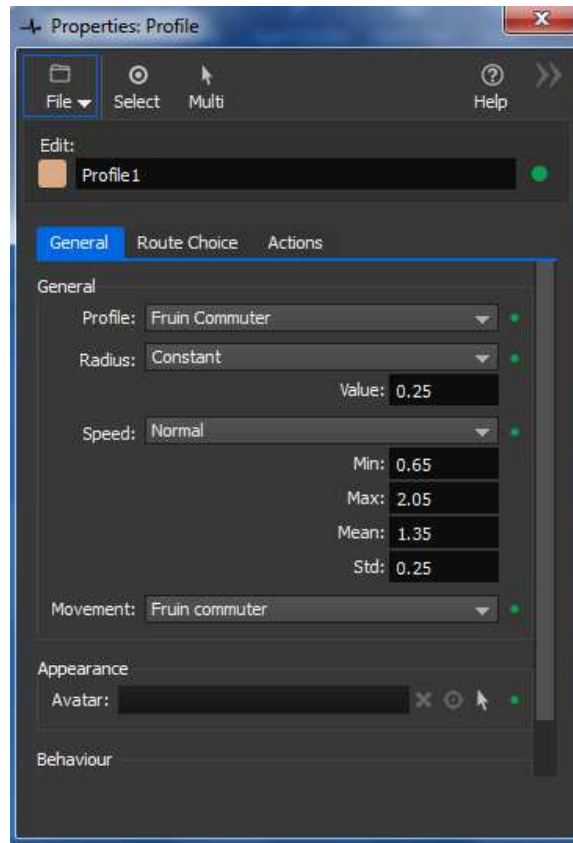


Figura 3.46: profilo delle entità facenti parte del modello, è possibile creare più profili per una simulazione più estesa.

La voce “Journey” permette di creare quelle che saranno le coppie O/D costituite da due “Portal”, uno per l’ingresso nel modello e l’altro per l’uscita. Cliccando sul menu a tendina “Demand” si può scegliere il modo in cui le entità entrano nel modello attraverso il portale. Nel caso della Figura 3.47 è stata inserita una tabella (Table) che indica col passare del tempo quanti pedoni vengono inseriti nella simulazione.

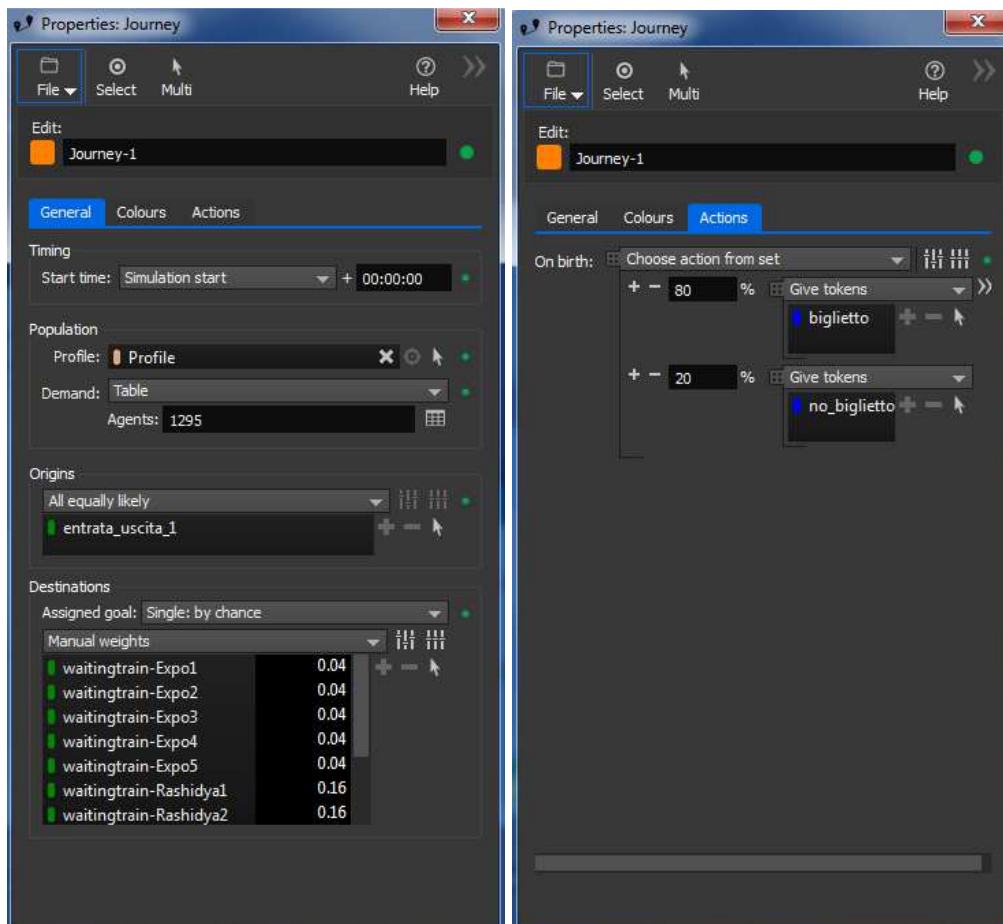


Figura 3.47: esempio finestra dialogo “Journey”. È possibile definire l’origine e una o più destinazioni, inserendo un peso manuale nel caso in cui non fosse gradita una distribuzione uniforme.

In Figura 3.47 viene introdotto il concetto di “Token”. Questa applicazione è certamente un punto di forza del software MassMotion.

I “Tokens” possono essere visti in maniera semplicistica come semplici “gettoni” che vengono inseriti o estratti dalle tasche dei pedoni. Il fatto di possedere un “Token” o meno spinge le entità a compiere azioni differenti. Se ad esempio il pedone possiede il “Token biglietto” non si presenterà davanti ai server delle biglietterie. Come mostra la Figura 3.45, l’80% dei pedoni facenti parte del “Journey” nascerà con il “Token biglietto”, il restante 20% con il “Token no_biglietto”. Questa distinzione può essere definita sia all’interno delle impostazioni del Journey ma anche all’interno delle impostazioni del portale di origine. Ogni singolo strumento presentato fino ad ora (scale, portali, link, server, ecc.), nel momento esatto in cui le entità transitano su di esso, permette al progettista di consegnare o ritirare i “Tokens”.

Sebbene possa sembrare uno strumento semplice e di secondaria importanza, il “Token” influisce sensibilmente sulla costruzione del modello, rendendola immediata e intuitiva. La modellazione del “sistema biglietterie” viene dunque regolata da un semplice procedimento logico if/then/else posizionato all’uscita delle scale che portano sul piano delle biglietterie; diversamente, in Legion e Viswalk, per ottenere lo stesso risultato, si deve fare uso di più

complicati procedimenti come il “Direction Modifier” (paragrafo 3.1.3.2.5) e i “Partial Routes” (3.2.1.4.2).

3.3.3.3 Simulazione trasporto pubblico

Come per il software Legion SpaceWorks, all’interno di MassMotion non è possibile fare uso della multimodalità veicoli-pedoni vista su PTV Viswalk. Per simulare l’entrata e l’uscita dei pedoni tramite il trasporto pubblico è possibile utilizzare due metodi, entrambi presenti nel menu “Activities”. Il primo metodo sfrutta la funzione “Vehicle”, il secondo la funzione “Open Gate”.

Grazie alla funzione “Vehicle” è possibile simulare l’arrivo di un mezzo di trasporto fittizio. Si definiscono gli orari di arrivo e i link che hanno la funzione di rappresentare le porte del veicolo (Figura 3.48). Inoltre viene data la possibilità di definire il numero di entità che entrano (Alighting) ed escono (Boarding) dalla simulazione ogni volta che il veicolo fittizio sopraggiunge alla fermata di riferimento.

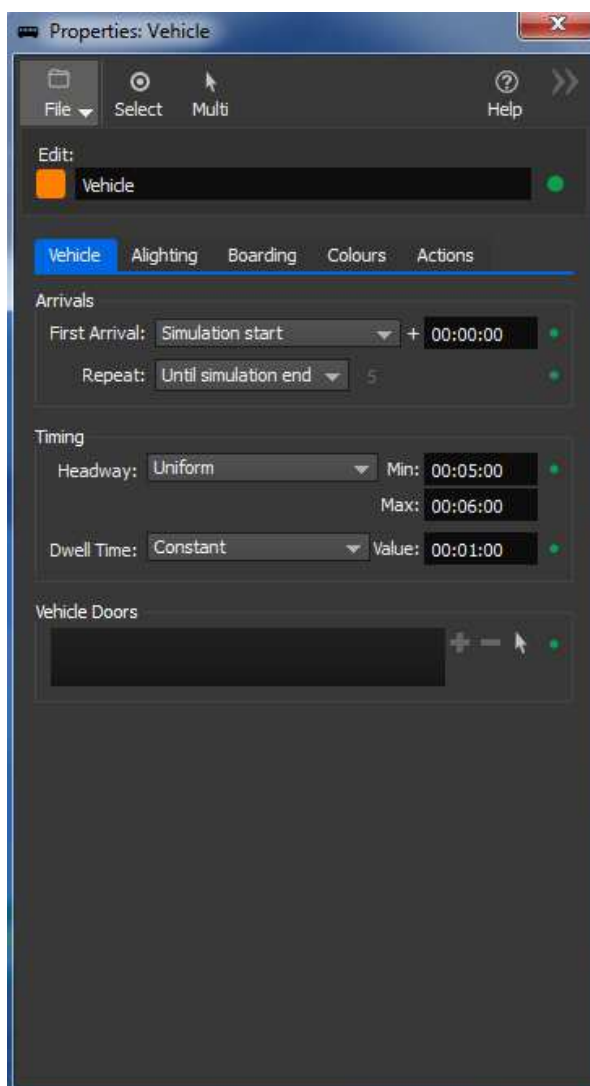


Figura 3.48: finestra di dialogo per impostare le proprietà del veicolo fittizio che permette ai pedoni di entrare (Alighting) ed uscire (Boarding) dal modello.

Il metodo alternativo è rappresentato dalla funzione “Open Gate” (Figura 3.49). Questo approccio consiste nel creare dei cicli temporali secondo i quali i link diventano attraversabili o meno, paragonandoli a tutti gli effetti a dei cancelli (Figura 3.50). Una volta fatto ciò, si crea un portale destinato all’attesa dei pedoni sulla banchina, andando a sincronizzare l’attesa dei pedoni con l’evento “Open Gate” di riferimento. In questo modo i pedoni si dirigeranno verso i link solamente quando questi ultimi saranno “aperti” e lasceranno la simulazione attraverso i portali che rappresentano i vagoni.

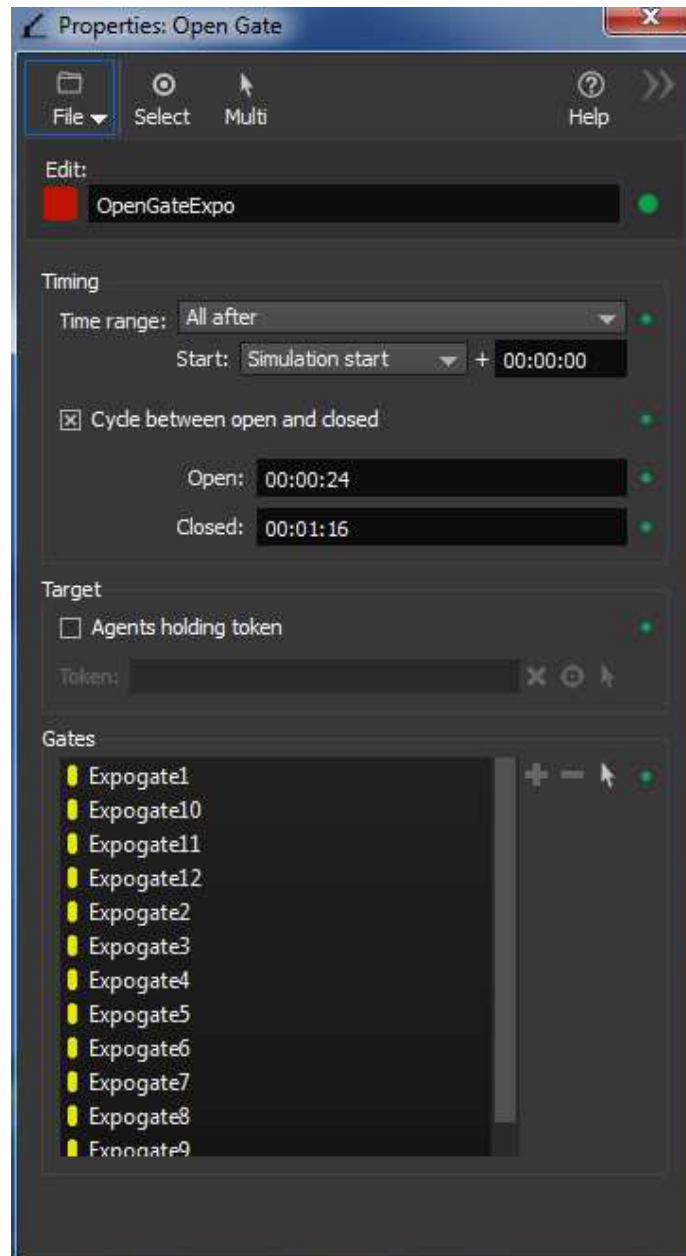


Figura 3.49: impostazioni di un evento “Open Gate” per una banchina metropolitana in MassMotion.

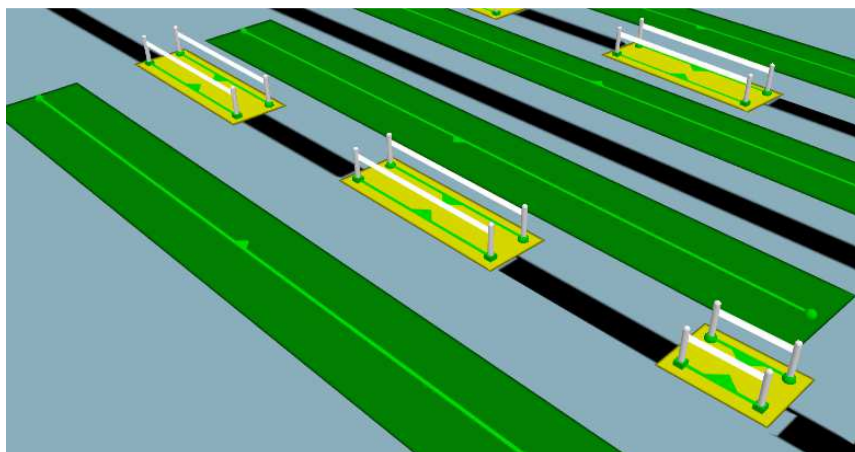


Figura 3.50: i link diventano dei cancelli che impediscono il passaggio ai pedoni. Vengono aperti solamente durante gli intervalli di tempo definiti dall'evento "Open Gate".

Per quanto riguarda la simulazione dei passeggeri che sopraggiungono alla stazione tramite il trasporto pubblico, si conferirà al portale rappresentante il vagone una matrice di origine entità-tempo, che sia sincronizzata con il ciclo "Open Gate" dei link di riferimento.

3.3.4 Avvio simulazione e dati output MassMotion

Una volta costruito il modello, nel menu "Simulation & Analysis" si trovano le funzioni fondamentali per far partire la simulazione e per estrapolare i dati di interesse. Per lanciare la simulazione è necessario cliccare su "Run Simulation" e dopo una breve verifica effettuata dal software è possibile visualizzare le entità che si spostano all'interno dello "Scene View". Tramite il "Time Panel" si interagisce con i tempi della simulazione, osservando il comportamento dei pedoni e prendendo nota delle eventuali correzioni da effettuare (Figura 3.51).

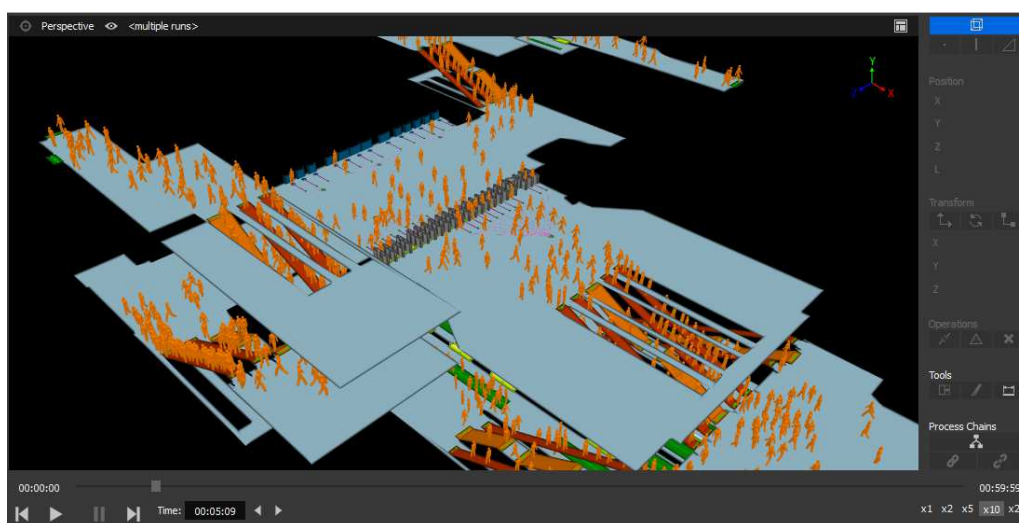


Figura 3.51: simulazione pedonale su MassMotion. Attraverso il "Time Panel" vengono analizzati gli spostamenti dei pedoni.

Una volta portata a termine la simulazione, MassMotion crea un file denominato “Simulation Run”. Su questo file il software stesso è in grado di elaborare i dati registrati durante la simulazione per creare gli output richiesti dal progettista: mappe, grafici e tabelle.

Questi output si generano cliccando su una delle tre voci presenti nel menu “Simulation & Analysis”: Graphs, Maps e Tables. Vengono messe a disposizione diverse configurazioni di mappe/ grafici e diversi tipi di tabelle (Figura 3.552). Le mappe che più interessano ai progettisti sono la “Average Non-Zero Density” e la “Time Occupied”.

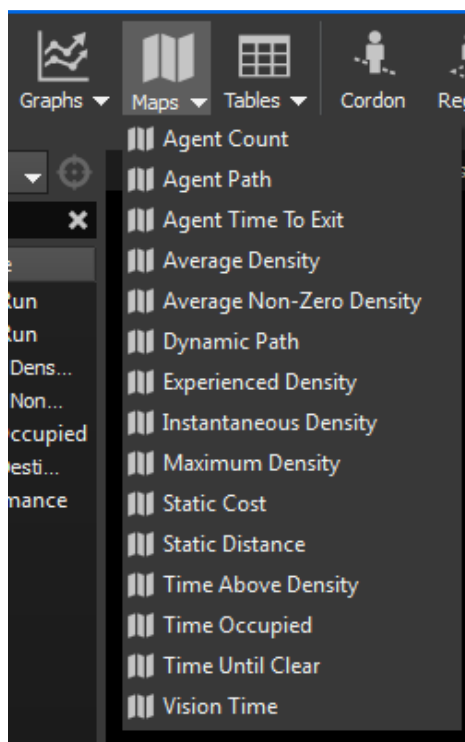


Figura 3.52: mappe realizzabili su MassMotion. Si realizzano dati output anche sotto forma di grafico o tabelle cliccando le due voci “Graphs” e “Tables”.

Cliccando sulla voce “Average Non-Zero Density” viene aperta una finestra di dialogo (Figura 3.53) all’interno della quale si inseriscono la “Simulation Run” di riferimento e i range dei LoS desiderati. Quelli che si trovano preimpostati sono quelli definiti da Fruin. Una volta che inseriti i range, si scelgono le aree soggette a tale analisi (floors, stairs, ecc.); in questo modo è possibile creare mappe LoS idonee per le diverse attività: spostamento in aree libere, spostamento su scala e spostamento in coda.

Conclusa la fase di impostazione, cliccando sul tasto “Evaluate” il programma analizzerà il modello sulla base della “Simulation Run” di riferimento. Il medesimo procedimento viene effettuato per la “Time Occupied Map”.

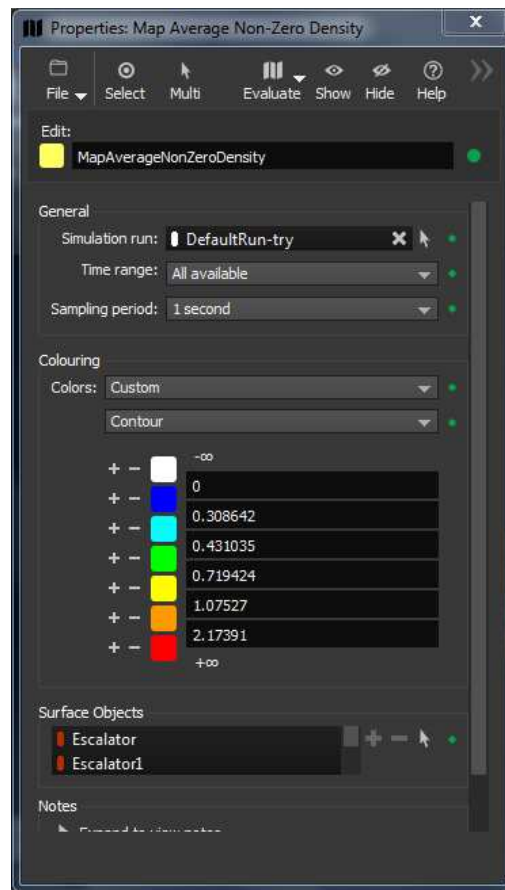


Figura 3.53: finestra di dialogo per la “Average Non-Zero Density Map” in MassMotion.

Infine, cliccando sulla voce “Tables”, sono messe a disposizione del progettista tabelle relative alle performance medie della popolazione pedonale che prende parte alla simulazione (velocità media, densità media, ecc.). Inoltre è possibile estrarre valori relativi ai tempi di percorrenza di ogni entità all’interno del modello.

3.4 Confronto software sulla base di un’esperienza “First hand-on”

I tre software descritti sono nati con l’obiettivo comune di simulare il comportamento pedonale all’interno di un ambiente definito. Tuttavia l’approccio all’interfaccia e l’esperienza di modellazione vengono vissute in maniera del tutto differente a seconda del programma che si sta utilizzando. Come è prevedibile si riscontrano pregi e difetti per ognuno dei tre software che possono variare anche in base alle preferenze e all’esperienza del progettista.

Il pacchetto software Legion SpaceWorks si presenta come il più frammentato dei tre, essendo composto da tre applicazioni differenti (Model Builder, Simulator e Analyser). Non essendo disponibile la modellazione 3D, inizialmente la costruzione del modello è macchinosa. Una volta però compreso il funzionamento di alcuni “Object” fondamentali (in particolar modo “Stair”, “Level Entrance” e “Level Exit”), l’esperienza di lavoro sul software

diventa più immediata e piacevole.

La suddivisione del pacchetto in tre applicazioni porta certamente dei vantaggi. Ad esempio durante l'utilizzo del Model Builder l'interfaccia si presenta "pulita" e l'utente è cosciente del fatto che al suo interno troverà solamente il necessario per la costruzione del modello. Un discorso analogo si può fare per il Simulator e l'Analyser. Tuttavia la necessità di creare file "ORA" e "RES" per passare da un'applicazione all'altra può diventare un iter lento e macchinoso, considerando che, una volta avviata la simulazione, non è concesso intervenire su di essa fino alla conclusione. Quindi, nel caso si ritenga opportuno aggiustare il modello alla luce di ciò che è stato osservato durante la simulazione, si dovrà creare un nuovo file "ORA" e far partire una nuova simulazione da capo.

La simulazione avviene in 2D e, come nel caso della costruzione del modello, questo particolare non riscontra grande successo. Essendo presente solo la vista dall'alto, è difficile riuscire ad impostare un'unica schermata che permetta di osservare tutti i pedoni presenti nell'ambiente. Tuttavia la bidimensionalità comporta anche una notevole leggerezza (e quindi velocità) di calcolo per la CPU del computer che si sta utilizzando.

Il pacchetto software PTV Vissim/Viswalk è certamente il più completo in quanto è l'unico che permette l'analisi multimodale veicoli-pedoni. Volendosi soffermare solamente sulla simulazione pedonale la modellazione risulta meno intuitiva rispetto a quella di Legion e MassMotion.

L'importazione delle geometrie non viene gestita nel migliore dei modi. Sebbene siano presenti due diverse modalità ("immagini di sfondo" e "CAD per aree pedonali"), entrambe comportano delle perdite di tempo e/o di precisione.

La visuale 3D rappresenta un aiuto fondamentale a livello grafico. Infatti la costruzione del modello avviene sull'editor 2D con la visualizzazione dei diversi livelli sovrapposti, l'editor raffigurante la tridimensionalità aggiunge una prospettiva di riferimento indispensabile.

L'utilizzo dei "partial route" per la simulazione di tornelli e biglietterie è un procedimento che nella sua immediatezza rischia di diventare controproducente; quando il numero dei punti di servizio inizia a diventare consistente, il moltiplicarsi dei "partial route" rende la simulazione estremamente pesante, costringendo il progettista a raggiungere dei compromessi (biunivocità biglietteria-tornelli, tutti i pedoni che acquistano il biglietto presso la "biglietteria X" utilizzano solo il "tornello Y").

La progettazione della salita e della discesa dai mezzi pubblici è piacevole. Viene sfruttata al meglio la multimodalità di Vissim-Viswalk, con pochi passi procedurali viene simulato l'arrivo e la partenza dei pedoni tramite il trasporto pubblico.

Il pacchetto software MassMotion è fra i tre quello che più stupisce per facilità di apprendimento e di utilizzo, ideale quindi per chi si appresta ad eseguire una simulazione pedonale per la prima volta. La costruzione del modello è per certi versi simile a quella di Viswalk con la differenza che l'ambiente di lavoro è tridimensionale. Grazie alla presenza dei "Tokens" la progettazione della simulazione procede sempre in modo lineare; l'impressione è quella di poter sempre trovare una strada veloce, comoda ed efficace per modellare ciò che si desidera come lo si desidera.

La leggerezza con la quale MassMotion si presenta è dovuta però anche alla minore offerta di

funzionalità rispetto ai software concorrenti. MassMotion è consigliato come “Entry Level”; nel caso il progettista fosse esperto nel settore della simulazione pedonale, i tre software si equivalgono per quanto riguarda l’esperienza d’uso e nella scelta avranno un ruolo fondamentale le preferenze soggettive.

Al di là di queste impressioni soggettive, è ovviamente importante valutare comparativamente i tre pacchetti sulla base delle loro prestazioni oggettive. Per far questo, nel successivo paragrafo si passerà all’analisi di un caso studio concreto e dei relativi output dei tre software.

4. Applicazione dei software su un caso studio

In questo capitolo si procederà con l'effettiva comparazione dei tre software: Legion/SpaceWorks, PTV/Viswalk e Oasys/MassMotion. In studio di tesi si è provveduto a realizzare tre modelli il più possibile simili fra loro, utilizzando i software a disposizione. La scelta del caso studio è ricaduta sulla stazione metropolitana "Dubai Investment Park Station". Tale stazione è ancora in fase realizzativa e rappresenterà un'infrastruttura di fulcro per l'evento "Expo 2020" che si terrà a Dubai, Emirati Arabi Uniti. I dati relativi alla previsione della domanda pedonale e alle geometrie della stazione sono stati messi a disposizione dallo studio di ingegneria "Systematica SRL" di Milano.

4.1 "Dubai Investment Park Station"

La "Dubai Investment Park Station" è la stazione metropolitana più rappresentativa fra quelle facenti parte della linea Expo-Rashidiya per "Expo 2020". Infatti, in base a studi di domanda basati su previsioni relative all'anno 2030, è quella che presenterà il picco pedonale giornaliero più consistente.

Al fine di testare i software nella maniera più lineare possibile, è stata fatta la scelta di modellare solamente le geometrie centrali della stazione stessa, escludendo dalla simulazione l'eventuale uso di ascensori e di vie di fuga secondarie. Dunque la progettazione è stata condotta prendendo in considerazione il movimento dei pedoni all'interno delle aree e dei piani principali della struttura.

In base alle previsioni, nel 2030, durante l'orario di punta pomeridiano (18-19 PM), un totale di 12084 persone transiterà per la stazione (in entrata e in uscita) (Tabella 4.1). Nello specifico, 5180 costituisce il numero di persone che entreranno alla stazione con l'intento di prendere la metro, 6904 invece sono i passeggeri che arriveranno alla stazione attraverso la linea metropolitana Expo-Rashidiya.

Mentre la distribuzione per i due processi di arrivo (Alighting) è da considerarsi equilibrata (3484 pedoni per la direzione Expo e 3420 pedoni per la direzione Rashidiya), quella per i due processi di salita (Boarding) è caratterizzata da un rapporto approssimato di 1 a 4 (993 pedoni per la direzione Expo e 4187 pedoni per la direzione Rashidiya).

Tabella 4.1: suddivisione domanda pedonale per le due linee metropolitane aventi come capolinea Expo e Rashidiya nell'ora di punta pomeridiana.

Capolinea-Expo				Capolinea Rashidiya			
Anno	Orario di punta	Boarding	Alighting	Anno	Orario di punta	Boarding	Alighting
2030	PM (18-19)	993	3484	2030	PM (18-19)	4187	3420

4.1.1 Definizione architettonica “Dubai Investment Park Station”

Dal punto di vista architettonico, la “Dubai Investment Park Station” è costituita da quattro livelli principali: *Ground Level*, livello al piano campagna che permette l’ingresso e l’uscita dei pedoni alla/dalla stazione (Figura 4.1); *Concourse Level*, livello importante ai fini della progettazione in quanto ospita le biglietterie e i tornelli destinati ad essere utilizzati dai pedoni (Figura 4.2); *Intermediate Level*, funge da piano intermedio, smista i pedoni verso le due banchine in direzione Expo e Rashidiya (Figura 4.3); *Platform Level*, costituito dalle banchine per le fermate delle due linee metro Expo e Rashidiya (Figura 4.4).

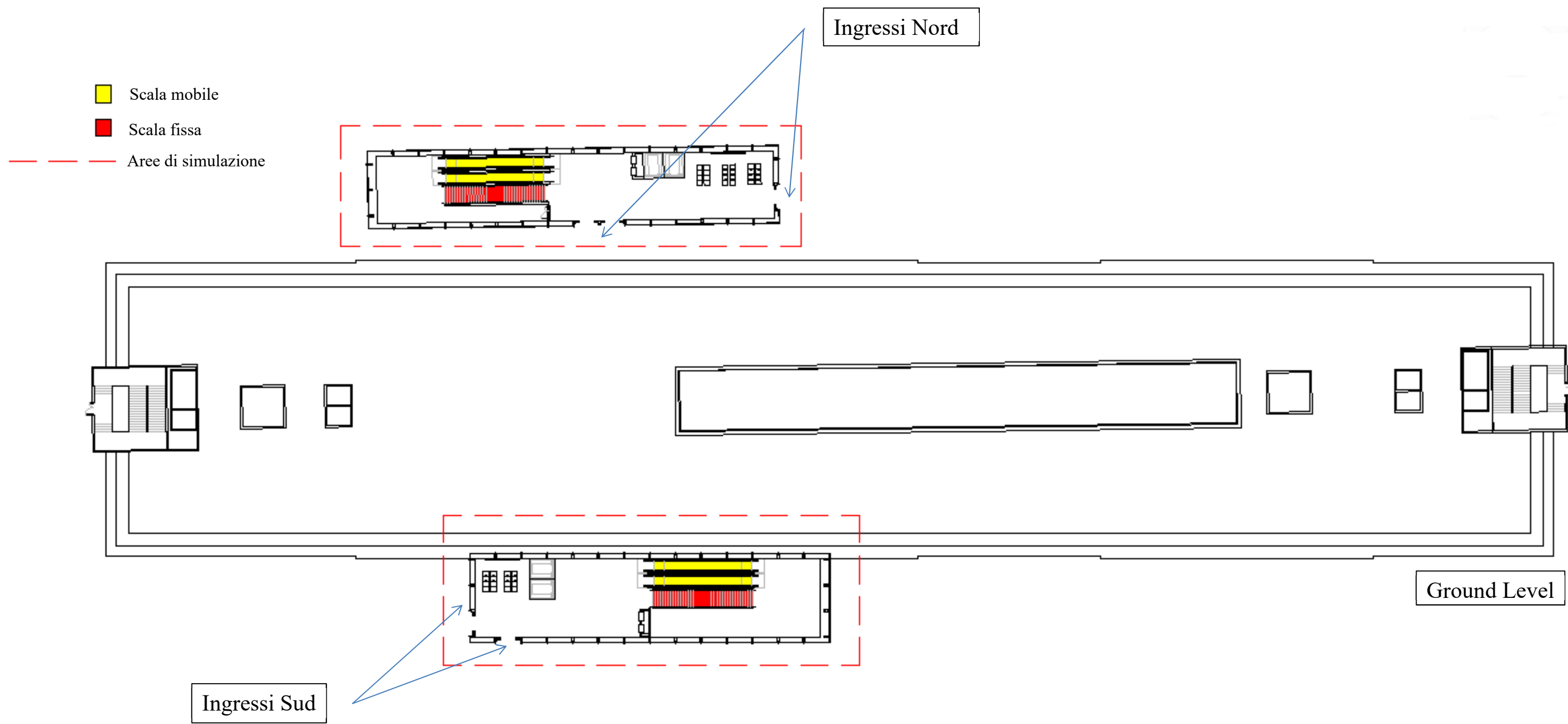


Figura 4. 1: geometrie CAD del Ground Level della Dubai Investment Park Station.

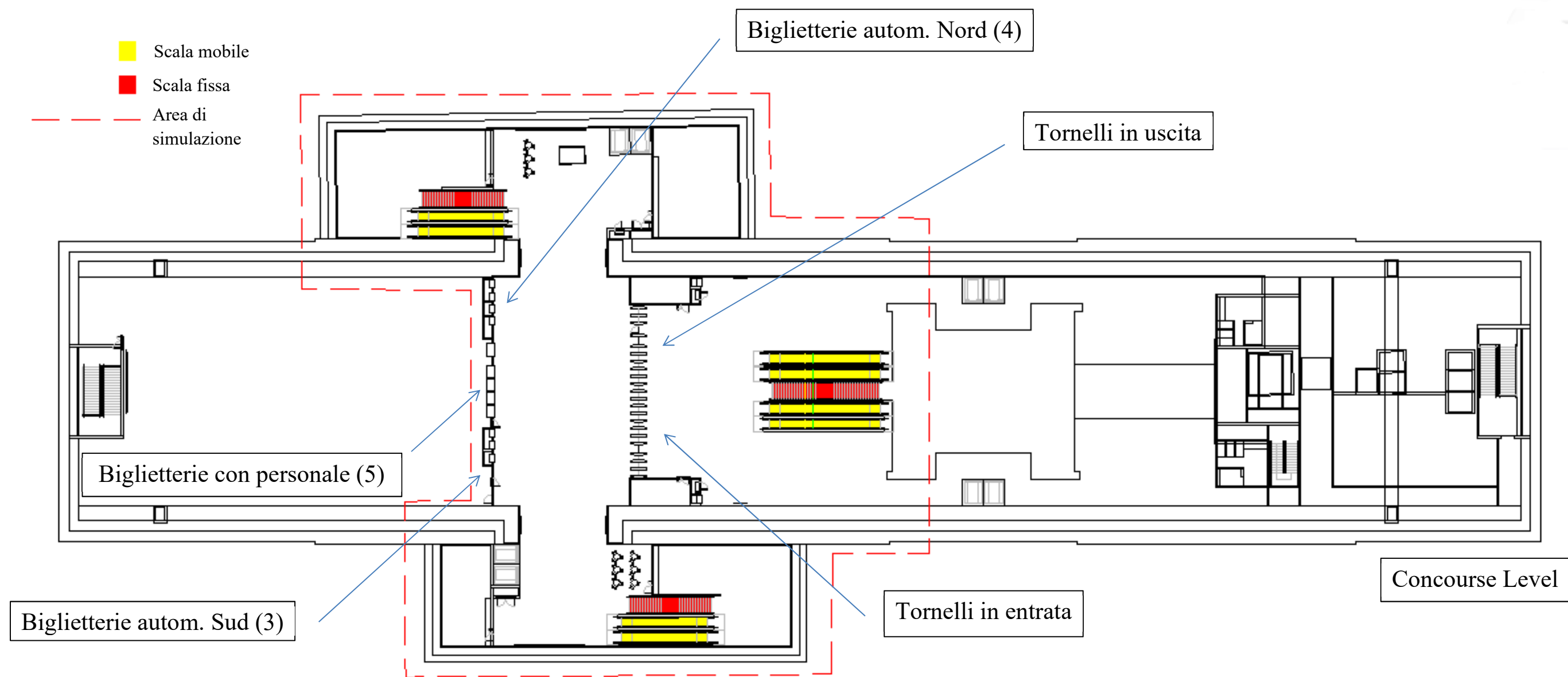


Figura 4. 2: geometrie CAD del Concourse Level della Dubai Investment Park Station.

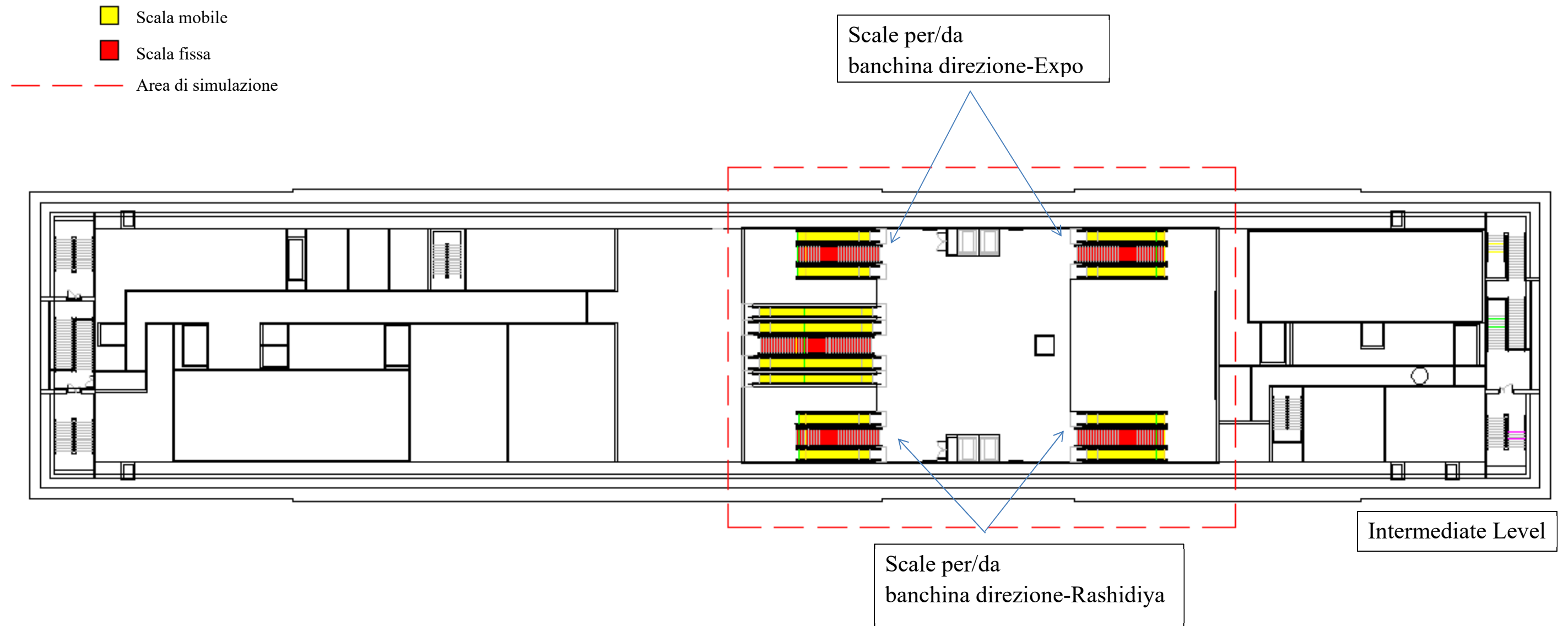


Figura 4. 3: geometrie CAD del Intermediate Level della Dubai Investment Park Station.

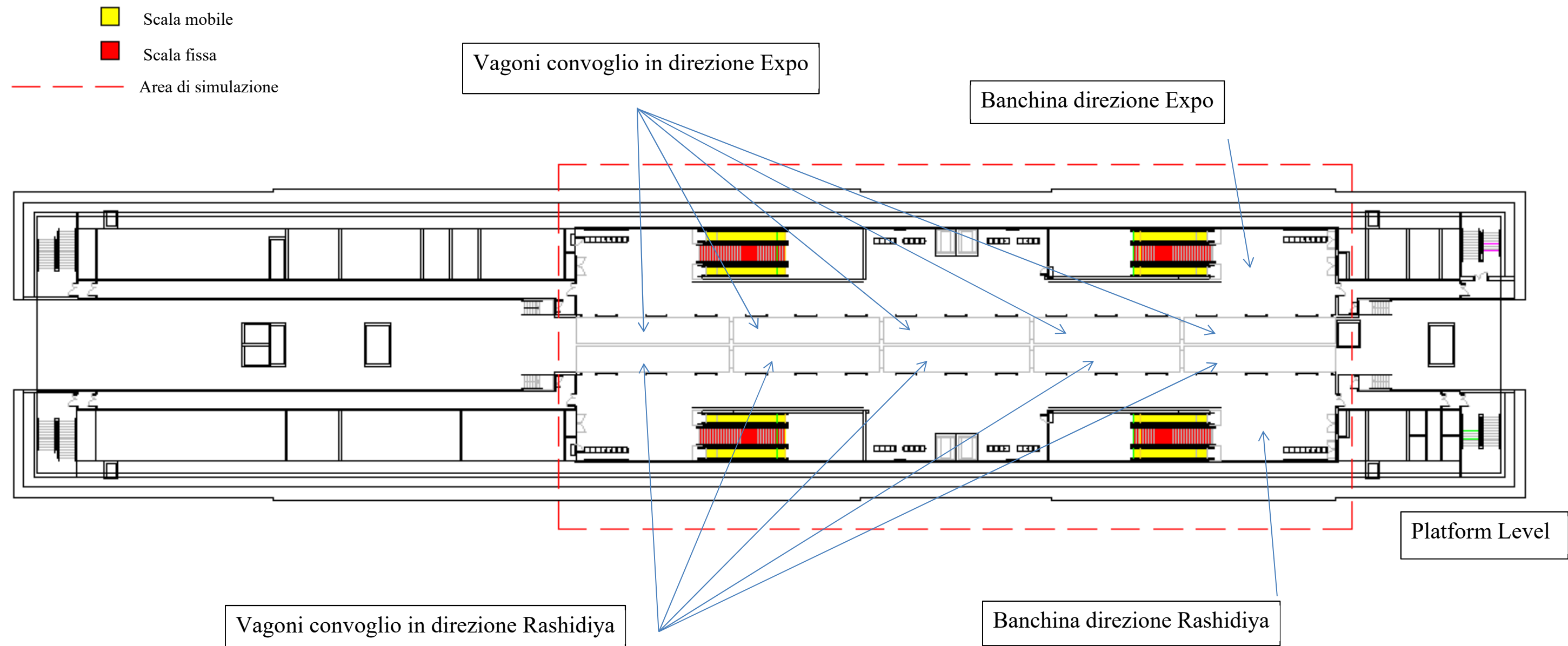


Figura 4. 4: geometrie CAD del Platform Level della Dubai Investment Park Station.

I pedoni sono stati distinti in due macro-classi in funzione del loro obiettivo finale: Alighting (6904 entità) e Boarding (5180 entità).

- *Alighting*: è la macro-classe pedonale che ha come scopo quello di uscire dalla stazione attraverso il Ground Level. Sono, in sostanza, quei pedoni che arrivano sulla banchina tramite il mezzo di trasporto (metropolitana) e risalgono in superficie. La programmazione della loro simulazione è senza dubbio più semplice, in quanto l'unico step intermedio che si trovano ad affrontare è rappresentato dai "tornelli in uscita".
- *Boarding*: è la macro-classe pedonale che ha come scopo quello di salire sulla metropolitana al Platform Level. I pedoni si presentano agli ingressi situati sul Ground Level con l'intenzione di raggiungere le banchine. La loro simulazione è più complicata in quanto si deve prevedere una percentuale di entità sprovviste di biglietto; dunque si deve modellare la sincronizzazione del "sistema biglietterie" con il "sistema tornelli in entrata".

4.2 Creazione di un modello base per la comparazione

Al fine di portare a termine una comparazione coerente e soddisfacente dei software Legion, MassMotion e Viswalk, è stato necessario scendere a compromessi in fase di programmazione e di definizione del modello.

I tre software sopracitati sono strumenti che, avendo come fine ultimo quello di fornire lo stesso tipo di risultati; presentano aspetti estremamente simili fra loro come le heat-map LoS e le Space-Utilization maps (definite nei paragrafi 3.1.3.4.1, 3.2.1.4.4 e 3.3.4). Tuttavia, durante la fase di studio preliminare, sono state riscontrate alcune differenze, sia per quanto riguarda l'esperienza d'uso in sé sia per quanto riguarda le funzionalità messe a disposizione dagli sviluppatori. Per fare in modo che tali differenze non creassero troppa disomogeneità nel confronto, è stato ideato un semplice modello base di riferimento, che non prevedesse l'utilizzo di funzionalità avanzate specifiche dei singoli software.

In primo luogo sono state utilizzate le entità di default fornite da ogni singolo programma. Nel caso di Legion la scelta è ricaduta sull'Entity Type "UK commuters", mentre per Viswalk e MassMotion i valori della "body ellipse" preimpostati sono quelli definiti da Fruin. Risulta necessario ricordare, però, come i valori relativi all'Entity Type di Legion siano soggetti a copyright e quindi non consultabili da parte dell'utilizzatore (paragrafo 3.1.2). Bisognerà tenere conto di questo fattore una volta che si valuteranno i risultati forniti dalle heat-maps LoS.

Il modello viene in seguito descritto partendo dal Ground Level e scendendo fino al Platform Level. Per quanto riguarda il comportamento su scala dei pedoni, su suggerimento di operatori del settore, sono state fissate percentuali differenti per il moto in discesa e per il moto in salita; nel primo caso le scale fisse saranno preferite a quelle mobili dal 30% dei pedoni, nel secondo caso tale valore è stato ridotto al 15%. Inoltre è stata preimpostata una predisposizione da parte del pedone a mantenere la destra durante la transizione sulle scale fisse.

Al Ground Level sono presenti quattro ingressi differenti: due al lato Nord e due al lato Sud della stazione. Ognuno dei quattro ingressi genera lo stesso numero di pedoni appartenenti alla macro-classe Boarding; quindi nel corso dell'ora di simulazione, ogni portale genera 1295 entità (un quarto delle 5180 totali). Una volta inseriti all'interno dell'ambiente di simulazione, i pedoni si dirigono verso due rampe di scale successive che permettono il raggiungimento prima di un pianerottolo intermedio e successivamente del Concourse Level. Ogni rampa di scale è composta da due elementi “scale mobili” (uno per direzione di marcia) e un elemento “scala fissa” (percorribile in entrambe le direzioni), sia al lato Nord sia al lato Sud.

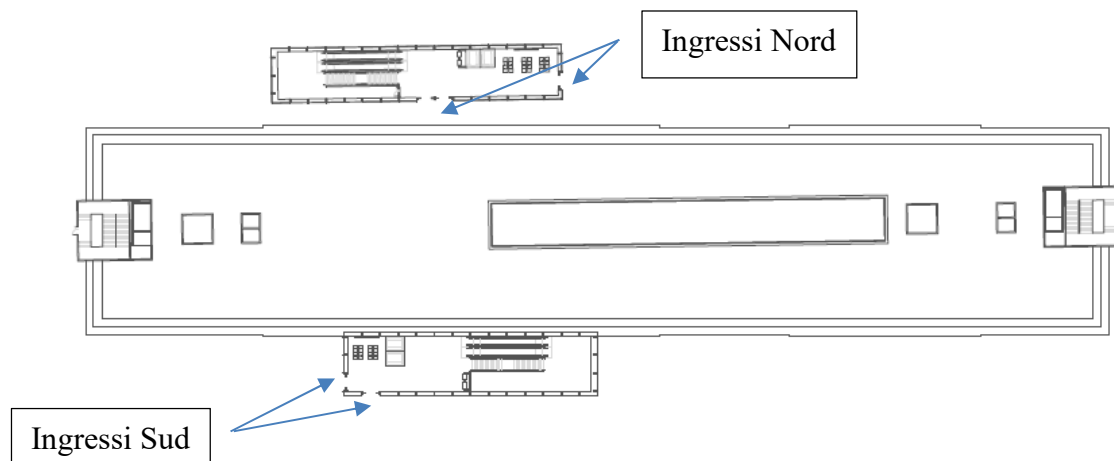


Figura 4. 1: Gound Level della Dubai Investment Park Satation.

Una volta raggiunto il Concourse Level, il 20% dei pedoni si dispone in fila alle biglietterie in quanto sprovvisto del ticket. Acquistato il biglietto si riunisce al restante 80% della popolazione che prosegue il proprio percorso attraverso il “sistema tornelli in entrata”. Le biglietterie sono in totale 12: 4 biglietterie automatiche a Nord, 5 biglietterie con personale al centro del Concourse Level e ancora 3 biglietterie automatiche a Sud. Per le biglietterie automatiche viene fissato un tempo di operazione attorno ai 15-20 secondi per persona, per quelle con personale il tempo di operazione sale a 25-30 secondi a persona (si presuppone che chi sceglie una biglietteria con personale sia meno pratico della linea metropolitana e necessiti di più tempo per prendere una decisione sul suo itinerario). Come mostrato in Figura 4.6, il 50% dei pedoni Alighting sprovvisti di biglietto si reca al gruppo di biglietterie con personale, un 25% al gruppo di biglietterie automatiche Nord e il restante 25% al gruppo di biglietterie automatiche a Sud. All'interno di ognuno dei tre gruppi il metodo di scelta è caratterizzato dal criterio “coda meno lunga”.

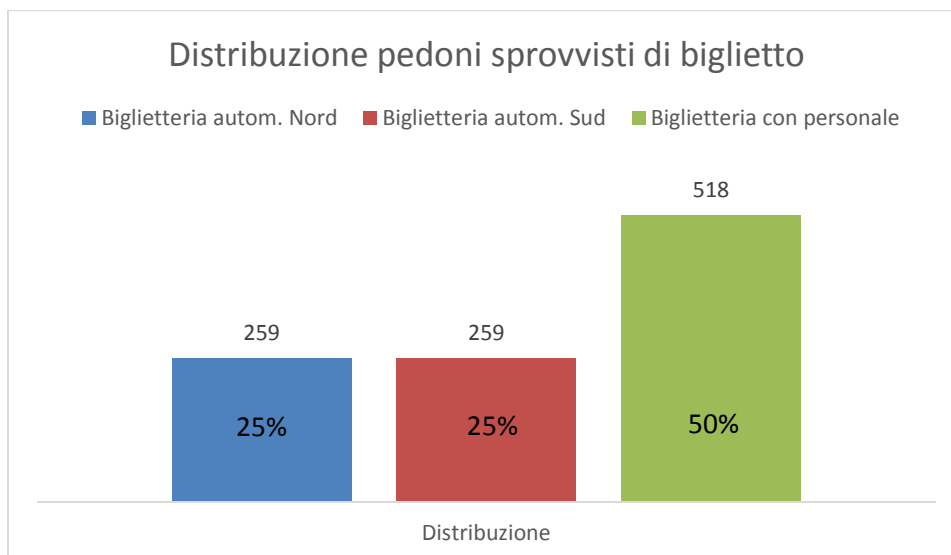


Figura 4. 2: distribuzione dei pedoni sprovvisti del biglietto (1036 entità, il 20% dei 5180 pedoni Alighting) alle biglietterie presenti nel modello.

Il “sistema tornelli in entrata”, che regola l’accesso alle banchine ai pedoni provvisti di biglietto, è costituito da 9 tornelli, ognuno con un tempo operativo di 1 - 1.5 secondi a pedone.

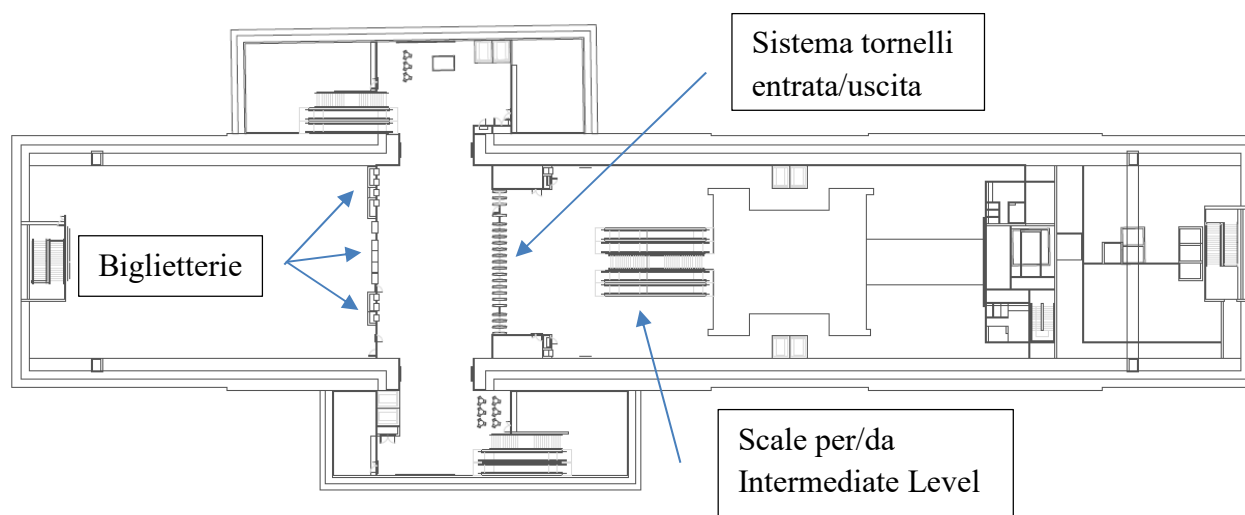


Figura 4. 3: Concourse Level della Dubai Investment Park Satation.

Superato il “sistema di tornelli in entrata”, i pedoni si apprestano a raggiungere l’Intermediate Level grazie all’utilizzo di due scale mobili (entrambe impostate in direzione discendente, sono presenti altre due scale mobili per la direzione ascendente) e una rampa bi-direzionale di scale fisse. L’Intermediate Level ha come unico scopo quello di smistare ed indirizzare i pedoni verso le due banchine. Come detto in precedenza, il processo di Boarding è

caratterizzato da un rapporto prossimo a 1 a 4. Per rispettare tale rapporto il 20% delle entità si dirige alla banchina in direzione-Expo (a Nord), il restante 80% viene condotto alla banchina in direzione-Rashidiya (a Sud). Nella simulazione creata non è prevista una differenziazione fra turisti e passeggeri abitudinari. Se si volesse procedere con una raffinazione del modello, si potrebbe inserire una percentuale di turisti generalmente attratti dal capolinea Expo e tendenzialmente sprovvisti di biglietto. Così facendo si potrebbe creare una parziale relazione fra la percentuale di pedoni che si recano alle biglietterie (al Concourse Level) e quella di smistamento per le banchine di destinazione (all'Intermediate Level).

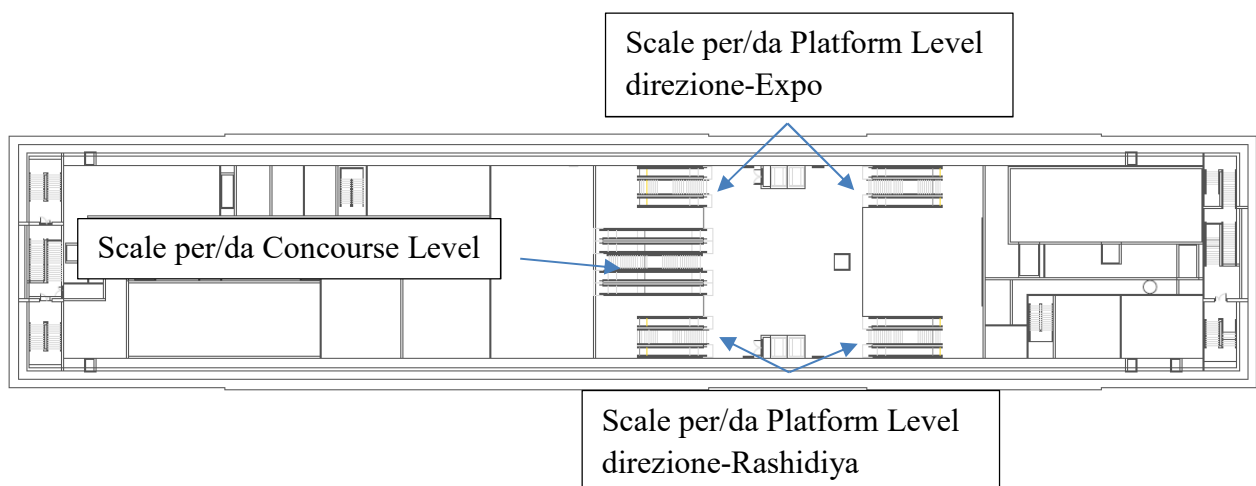


Figura 4. 4: Intermediate Level della Dubai Investment Park Station.

Il collegamento fra l'Intermediate Level e il Platform Level avviene tramite 4 rampe di scale (2 per banchina), ognuna di esse costituita da due scale mobili (una per senso di marcia) e una scala fissa bi-direzionale. Raggiunto il Platform Level i pedoni attenderanno l'arrivo della metropolitana sulle rispettive banchine ed usciranno dal modello una volta raggiunte le aree fittizie rappresentanti i vagoni (5 vagoni per ogni banchina).

La direzione pedonale ascendente, propria della macro-classe Alighting, compie il percorso inverso. Sul Concourse Level i pedoni incontrano solamente il "sistema tornelli in uscita" composto da 11 tornelli. Ovviamente non dovranno interagire con il "sistema biglietterie", in quanto il loro obiettivo finale è quello di evacuare dalla stazione presso uno delle quattro uscite collocate sul Ground Level.

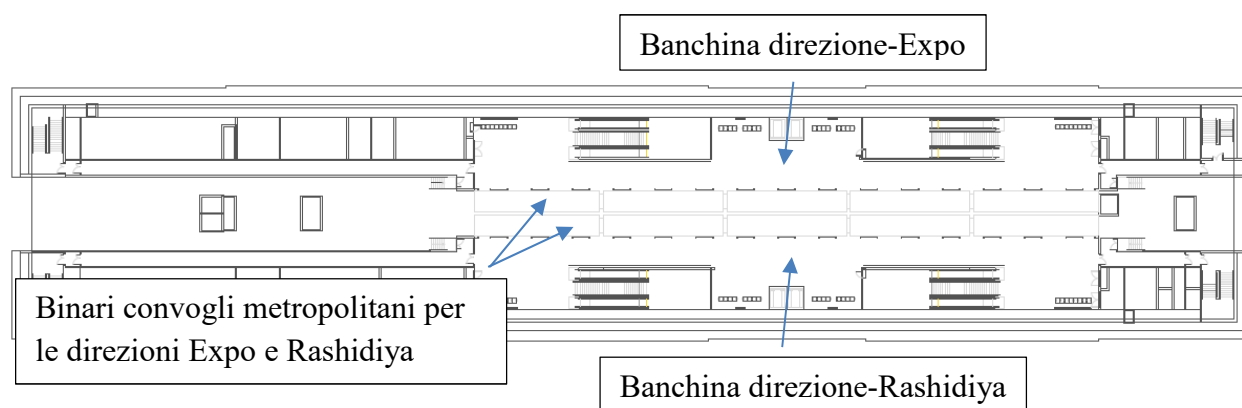


Figura 4. 5: Platform Level della Dubai Investment Park Station.

Infine è necessario specificare come è stata impostata la simulazione del trasporto pubblico. Per entrambe le direzioni (Expo e Rashidiya) è stata assunta una cadenza di 100 secondi fra la partenza di un convoglio e l'arrivo del successivo. Le porte del convoglio, una volta raggiunta la banchina, restano aperte per la durata di 20 secondi, permettendo ai pedoni di salire sul mezzo. Inoltre è stato inserito uno sfasamento di 30 secondi sull'arrivo dei convogli alle due banchine.

4.2.1 Risultati applicazione modello base

Costruito sui tre software di riferimento il modello base precedentemente descritto, si è provveduto al lancio della simulazione al fine di ottenere risultati comparabili fra loro. I dati output di riferimento sono stati individuati nelle mappe "LoS – Densità Media" e "Tempo di occupazione".

Per quanto riguarda le mappe "LoS - Densità Media" i range di valori fanno riferimento al modello macroscopico di Fruin (Figura 4.5 e 4.6), descritto nel paragrafo 2.1.1.1. Infatti tali valori si trovano di default in tutti e tre i software; i valori HCM riportati nel paragrafo 2.1.1.2 sono preimpostati solamente sui software Legion e Viswalk, nel caso di MassMotion si deve procedere con l'inserimento manuale.

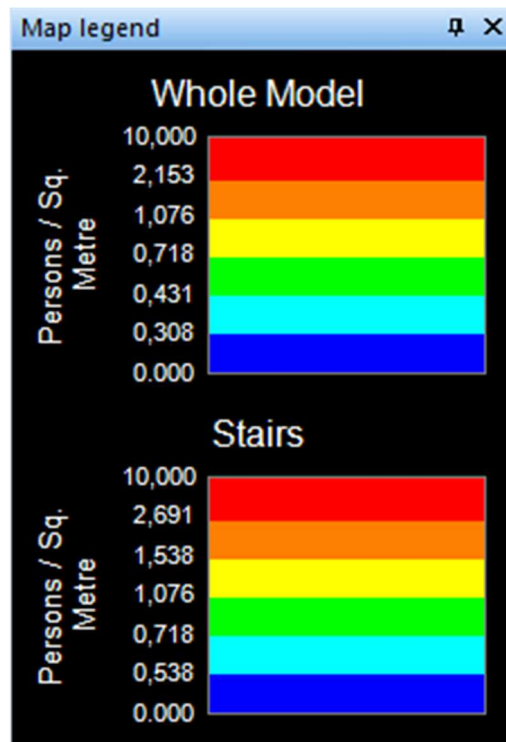


Figura 4. 6: valori dei Livelli di Servizio Fruin per il moto libero piano e su scala. Il colore blu rappresenta il LoS A, l'azzurro il LoS B, il verde il LoS C, il giallo il LoS D, l'arancione il LoS E ed infine il rosso il LoS F.

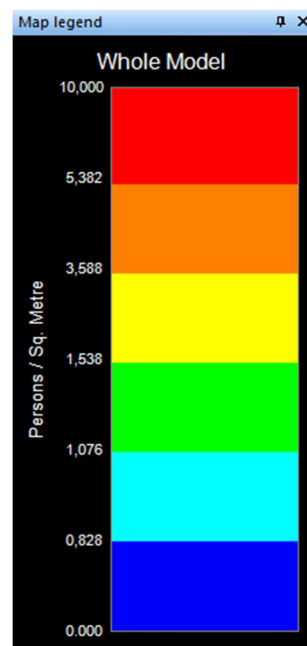


Figura 4. 7: valori dei Livelli di Servizio Fruin per il comportamento in coda. Il colore blu rappresenta il LoS A, l'azzurro il LoS B, il verde il LoS C, il giallo il LoS D, l'arancione il LoS E ed infine il rosso il LoS F.

Le mappe relative al “Tempo di occupazione” (Figura 4.7) sono più facilmente interpretabili rispetto a quelle LoS. Esse indicano per quanto tempo ogni singolo punto appartenente all’ambiente viene occupato nel corso della simulazione. Vengono definiti degli intervalli di tempo (in minuti) e più a lungo la porzione di pavimento viene “calpestata”, più il suo colore a fine simulazione tende al colore rosso. Viceversa le zone poco occupate dai pedoni sono caratterizzate da colori quali il verde o il blu.

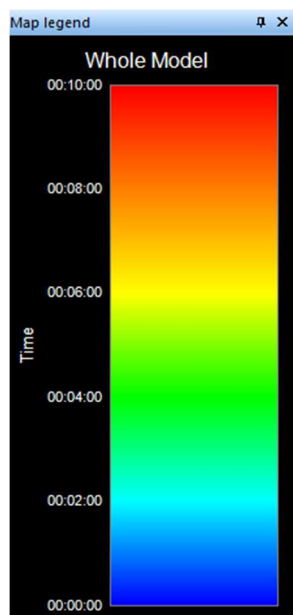


Figura 4. 8: intervalli di tempo di riferimento per la creazione della mappa “Tempo di occupazione”.

Mentre le mappe LoS sono fondamentali per la definizione del livello di comfort dei pedoni, le mappe “Tempo di occupazione” sono di particolare interesse dal punto di vista logistico ed economico. In base alle informazioni da esse desumibili, infatti, si individuano zone del modello caratterizzate da un elevato utilizzo e altre zone caratterizzate da scarso utilizzo. Queste differenza fra aree pedonali può essere sfruttata qualora nascesse l’esigenza di riorganizzare l’assetto dei servizi presenti all’interno della struttura (ad esempio per la simulazione di una stazione che funge da nodo intermodale o di un centro commerciale); il fine ultimo è rappresentato dal non occupare in alcun modo le zone di passaggio maggiormente “gradite” ai pedoni. Ulteriormente, sfociando in un discorso prettamente economico-monetario, l’apprendimento dei luoghi maggiormente frequentati all’interno di una struttura (stazione trasporto pubblico, centro commerciale, stadio, ecc.) cattura l’interesse degli addetti alla pubblicità e dei gestori di piccoli servizi commerciali.

4.2.1.1 “LoS - Densità Media” Legion SpaceWorks

Di seguito sono riportate le mappe “LoS – Densità Media” ottenute tramite la simulazione del modello base creato su Legion SpaceWorks. Le Figure 4.8 - 4.11 fanno riferimento rispettivamente ai livelli Ground, Concourse, Intermediate e Platform. Le heat-maps raffigurate sono relative alle condizioni di moto libero su piano (walkway). Legion permette l'estrazione e la raffigurazione simultanea di mappe LoS per quanto riguarda il moto libero su piano (walkway) e il moto su scala. Alla luce di ciò, bisogna interpretare tali mappe osservando esclusivamente le zone del modello dove si presuppone che i pedoni siano liberi di camminare in spazi aperti o di spostarsi su una rampa di scale, senza essere influenzati dalla prossimità di code o tornelli.

La Figura 4.12 fa riferimento al livello Concourse. In questo caso, il metro di misura non è più il moto libero su piano e nemmeno quello su scala, ma il moto in coda. Infatti, come è facile notare dall' heat-map in figura, una larga parte dello spazio calpestabile viene raffigurato di colore blu. Livelli di comfort peggiori (color verde-giallo-arancione) si concentrano nei pressi dei tornelli (Concourse Level), cioè dove i pedoni affrontano le code nel corso del loro itinerario. Per quanto riguarda la “zona biglietterie”, la percentuale di pedoni (20%) che vi si reca è troppo bassa per riscontrare livelli di densità non confortevoli.

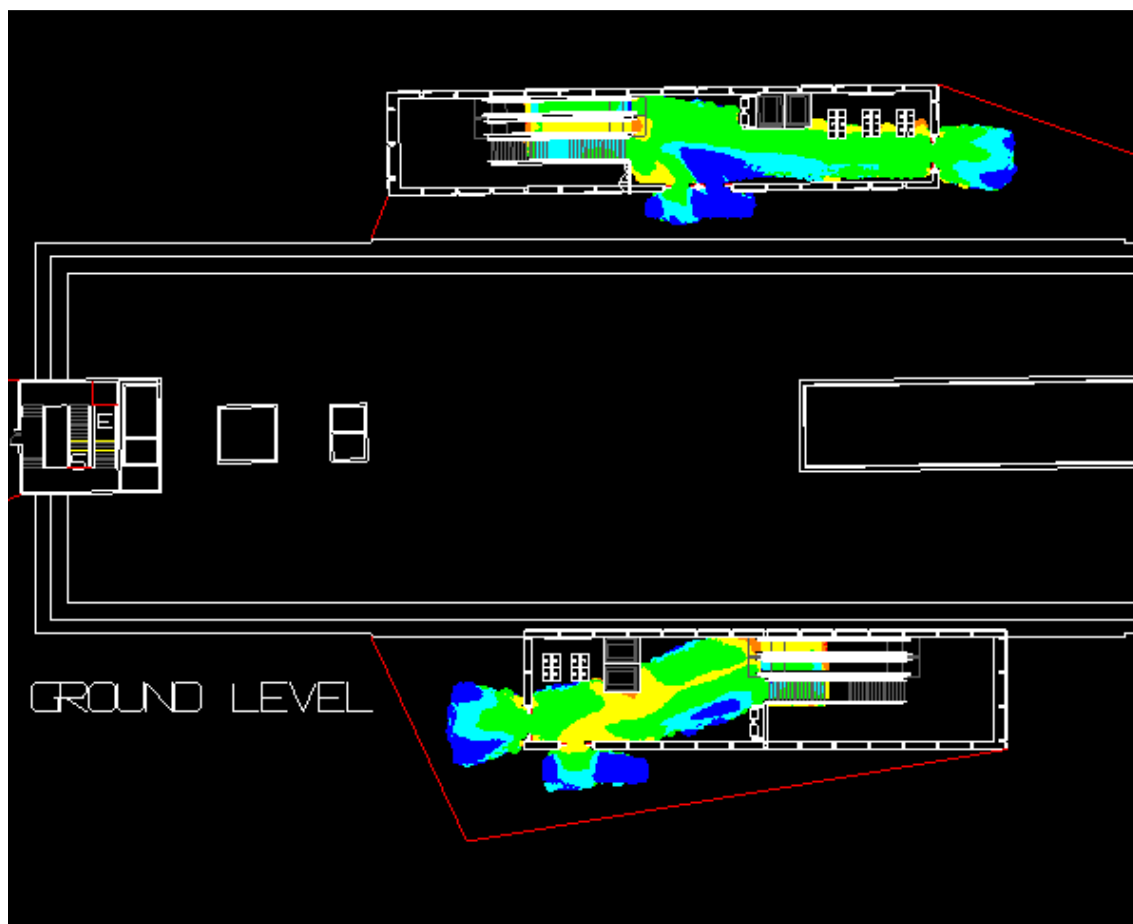


Figura 4. 9: “LOS – Densità media” Legion per il moto libero su piano e su scala al Ground Level.

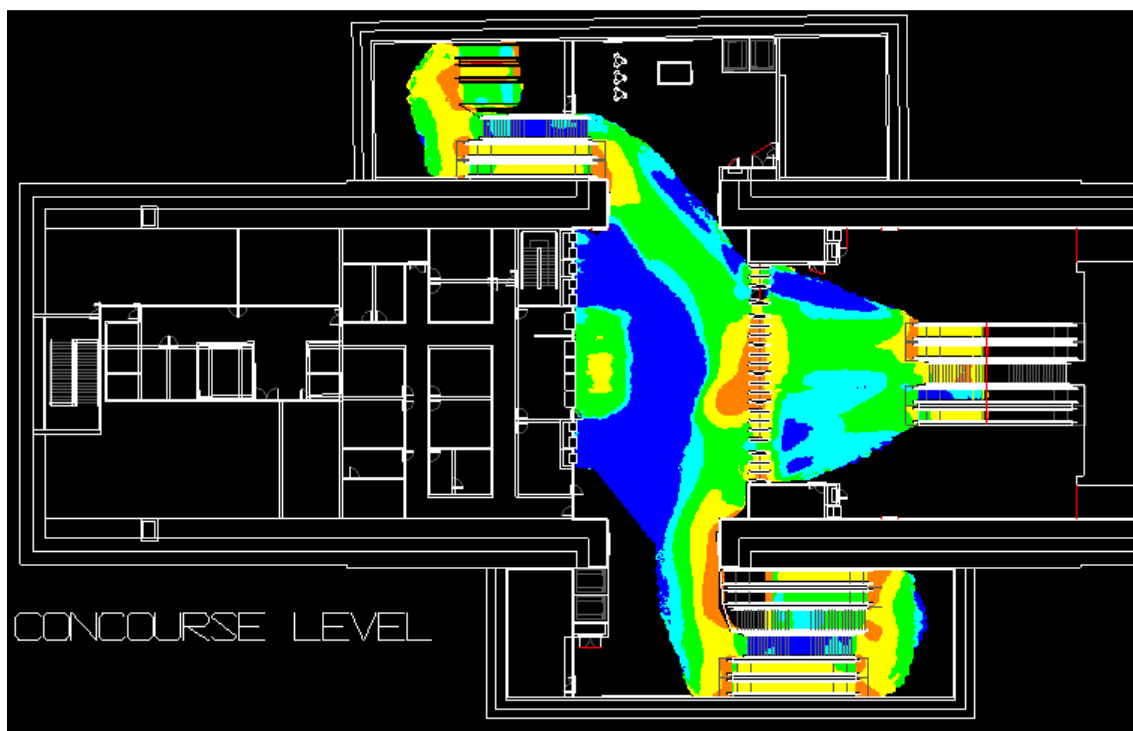


Figura 4. 10: “LOS – Densità media” Legion per il moto libero su piano e su scala al Concourse Level.

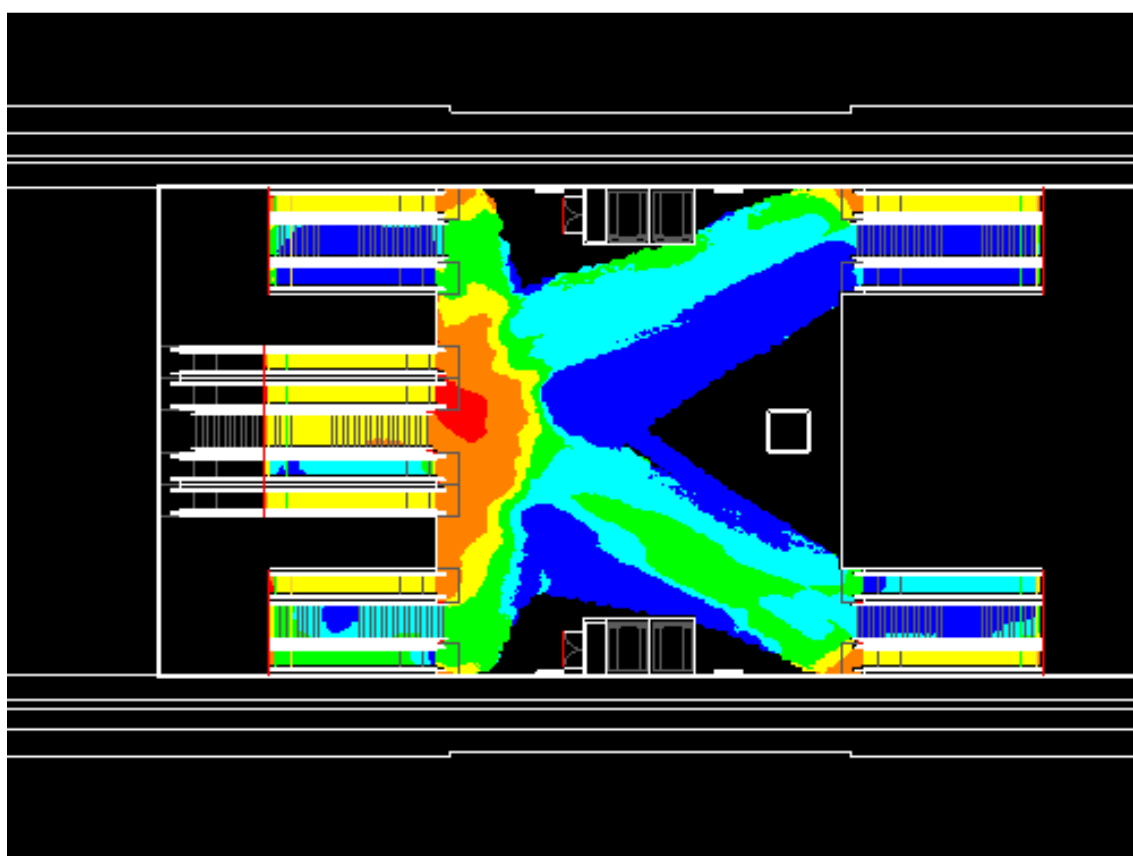


Figura 4. 11: “LOS – Densità media” Legion per il moto libero su piano e su scala al Intermediate Level.

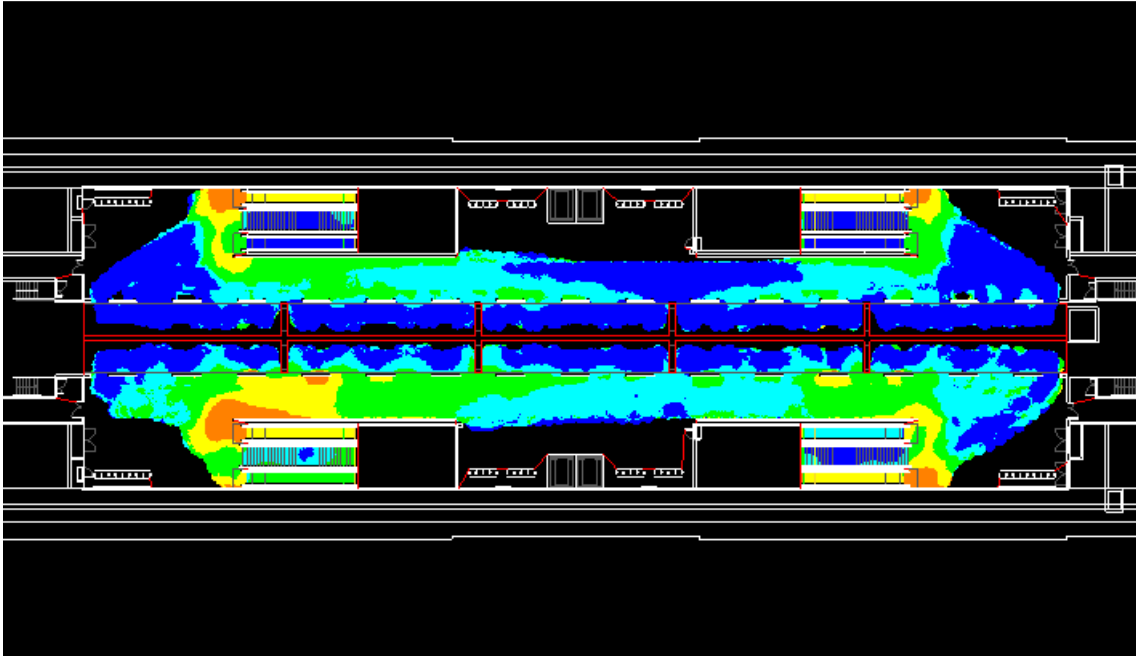


Figura 4. 12: “LOS – Densità media” Legion per il moto libero su piano e su scala al Platform Level.

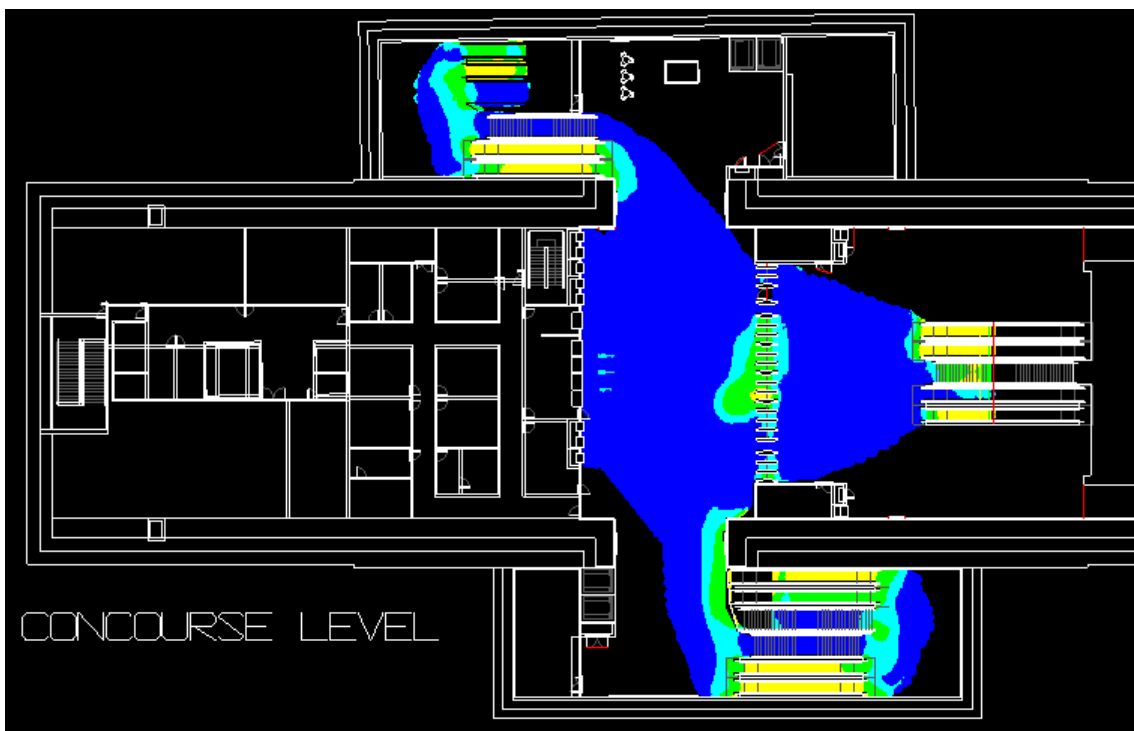


Figura 4. 13: “LOS – Densità media” Legion per il moto in coda al Concourse Level.

4.2.1.2 “LoS - Densità Media” PTV Viswalk

Le Figure 4.13 - 4.16 mostrano i risultati relativi ai “LoS – Densità media” ottenuti tramite l'utilizzo del software PTV Viwalk. Come anche Legion, Viswalk permette la simulazione simultanea di heat-maps relative al moto su piano e al moto su scala. La figura 4.17 mostra i valori LoS di accodamento per quanto riguarda il Concourse Level.

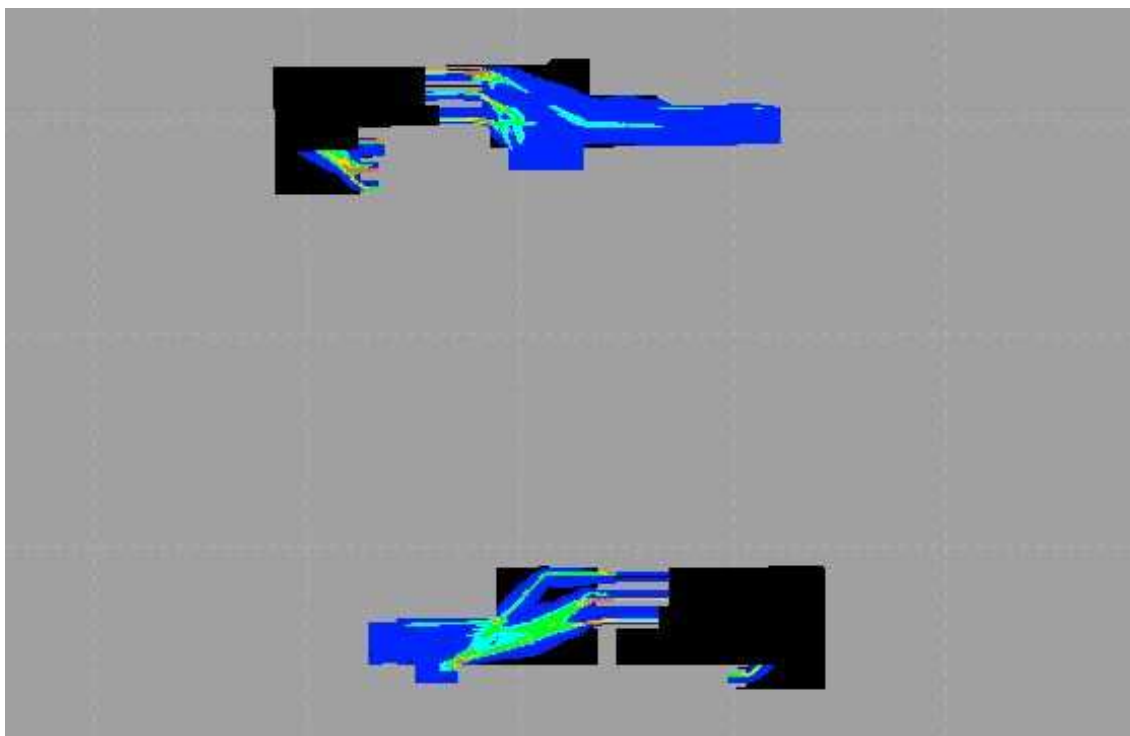


Figura 4. 14: “LOS – Densità media” Viswalk per il moto libero su piano e su scala al Ground Level.

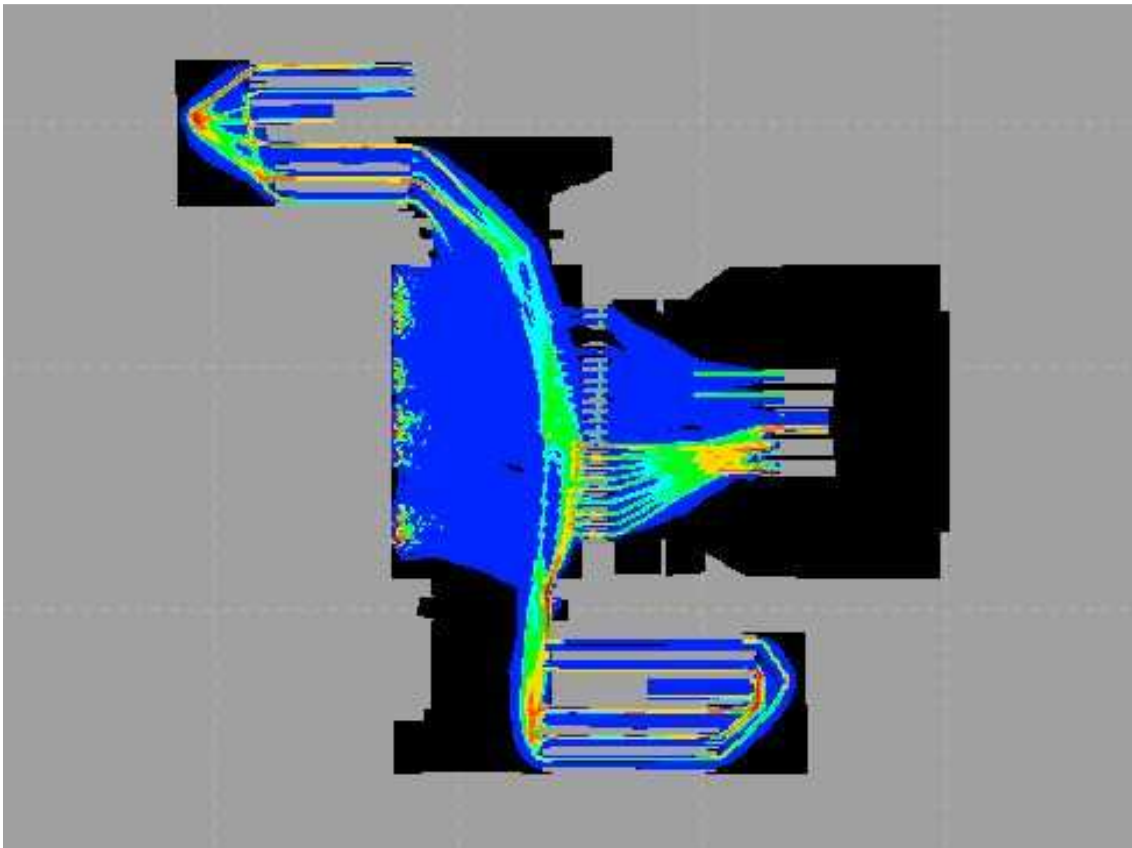


Figura 4. 15: “LOS – Densità media” Viswalk per il moto libero su piano e su scala al Concourse Level.

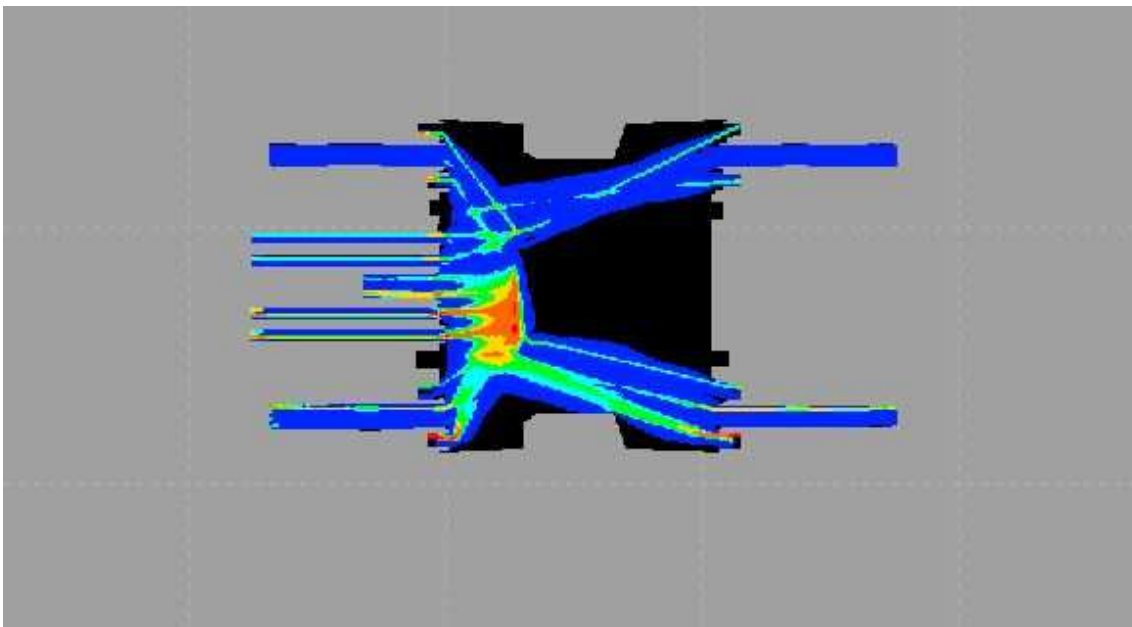


Figura 4. 16: “LOS – Densità media” Viswalk per il moto libero su piano e su scala all’Intermediate Level.

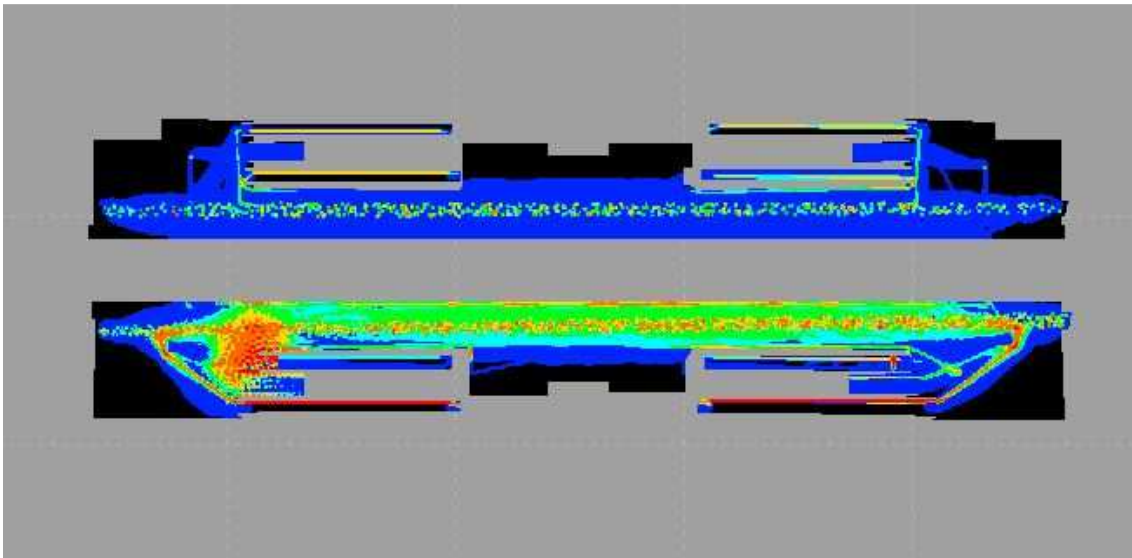


Figura 4. 17: “LOS – Densità media” Viswalk per il moto libero su piano e su scala al Platform Level.

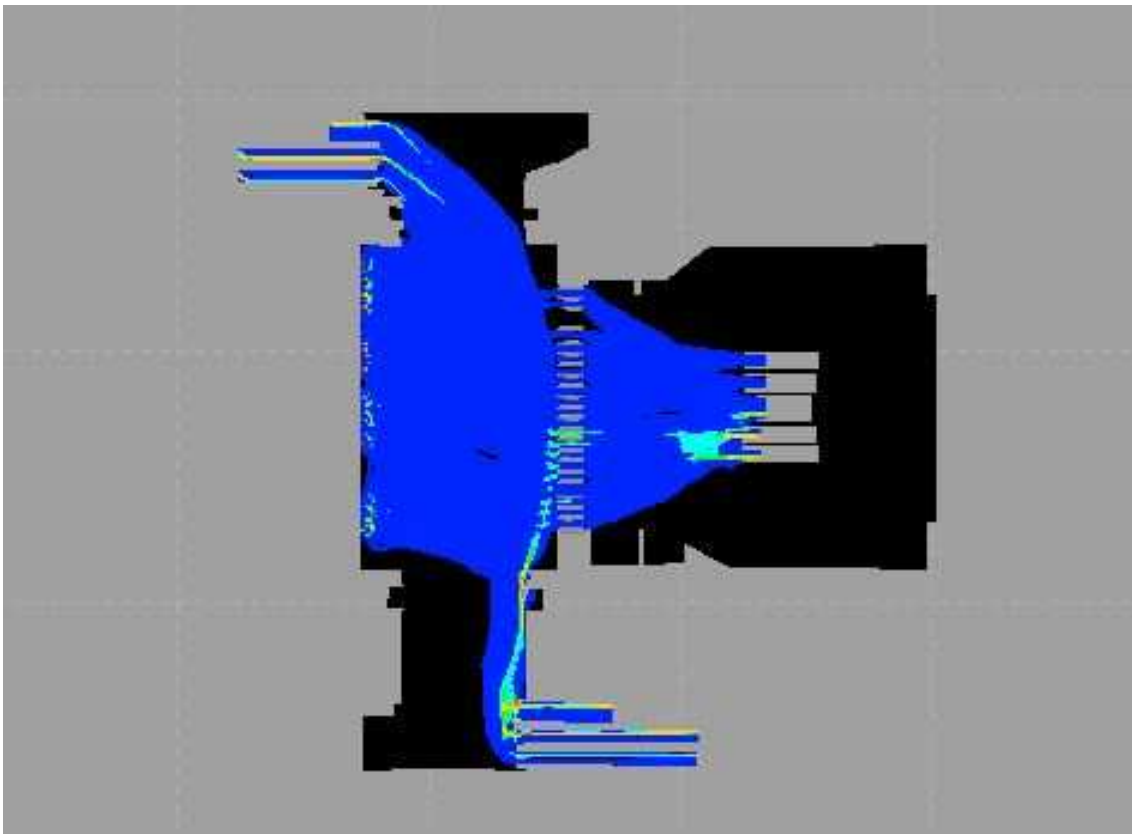


Figura 4. 18: “LOS – Densità media” Viswalk per il moto in coda al Concourse Level.

È d’obbligo segnalare come durante l’utilizzo del software siano stati riscontrati consistenti problemi riguardanti il comportamento dei pedoni, specialmente nella prossimità degli elementi scala. Di questi problemi si dovrà tenere conto nel corso della comparazione delle mappe estrapolate dai tre differenti software. Ad esempio, in Figura 4.16, nella parte sinistra

della banchina Sud (direzione Rashidiya), si è verificata una congestione dovuta ad un comportamento da rivedere di alcuni pedoni. Infatti, seguendo attentamente la simulazione, sono stati osservati alcuni pedoni compiere movimenti al limite dei dettami espressi dal Social Force Model nel paragrafo 2.1.2.3. Queste entità, facenti parte della macro-classe Boarding, urtano la balaustra delle scale mobili durante il loro spostamento verso la loro banchina di destinazione. Questo comportamento non è frequente, tuttavia può capitare che tali entità vengano spinte dalla massa pedonale all'interno della scala mobile in direzione ascendente e, non riuscendo più a tornare indietro, fungano da “tappo” per le entità Alighting che sopraggiungono (Figura 4.18 e 4.19).



Figura 4. 19: tre pedoni appartenenti alla macro-classe Boarding che, una volta catturati dalla scala mobile, ostruiscono il passaggio ai pedoni che seguono.



Figura 4. 20: congestione ai piedi di una scala mobile dovuta ad un comportamento pedonale da rivedere in Viswalk.

4.2.1.3 “LoS - Densità Media” Oasys MassMotion

Differentemente da Legion e Viswalk, MassMotion non permette la raffigurazione simultanea dei LoS per il moto su piano e su scala. È necessario dunque effettuare tre diverse mappature per i tre tipi di moto: su piano (Walkway), su scala (Stairway) e in coda (Platform).

Le Figure 4.20 - 4.23 riportano i risultati ottenuti con il range LoS di Fruin indicativo per il moto su piano (Walkway). Le Figure 4.24 - 4.27 riportano la densità media relativa ai LoS su scala (Stairway). Infine la Figura 4.28 fa riferimento alle condizioni di comfort nelle zone di coda (Platform).

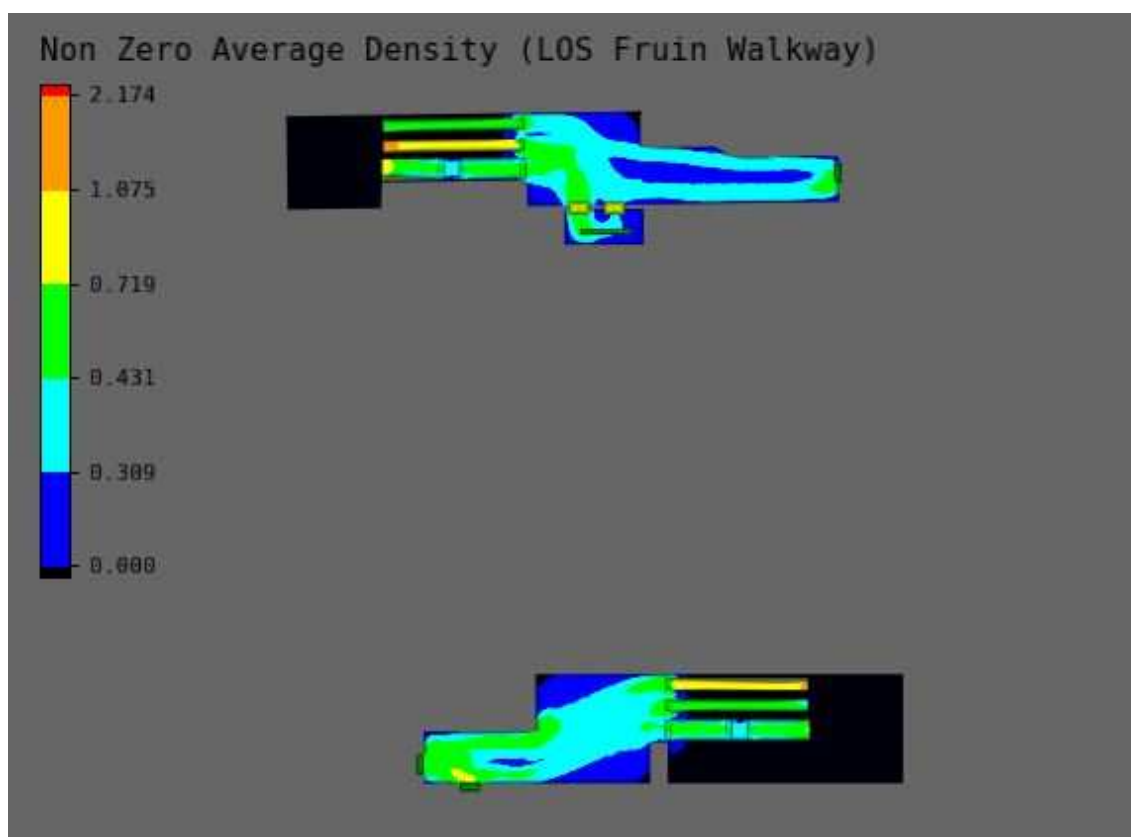


Figura 4. 21: “LOS – Densità media” MassMotion per il moto libero su piano al Ground Level.

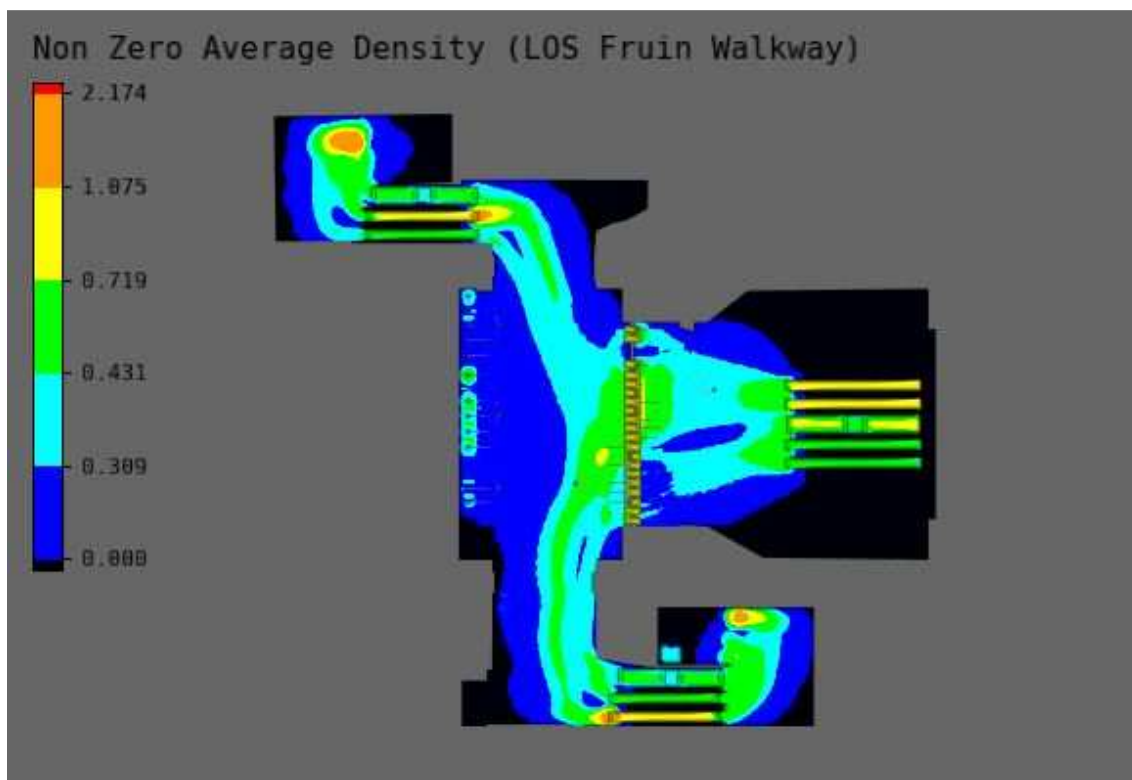


Figura 4. 22: “LOS – Densità media” MassMotion per il moto libero su piano al Concourse Level.

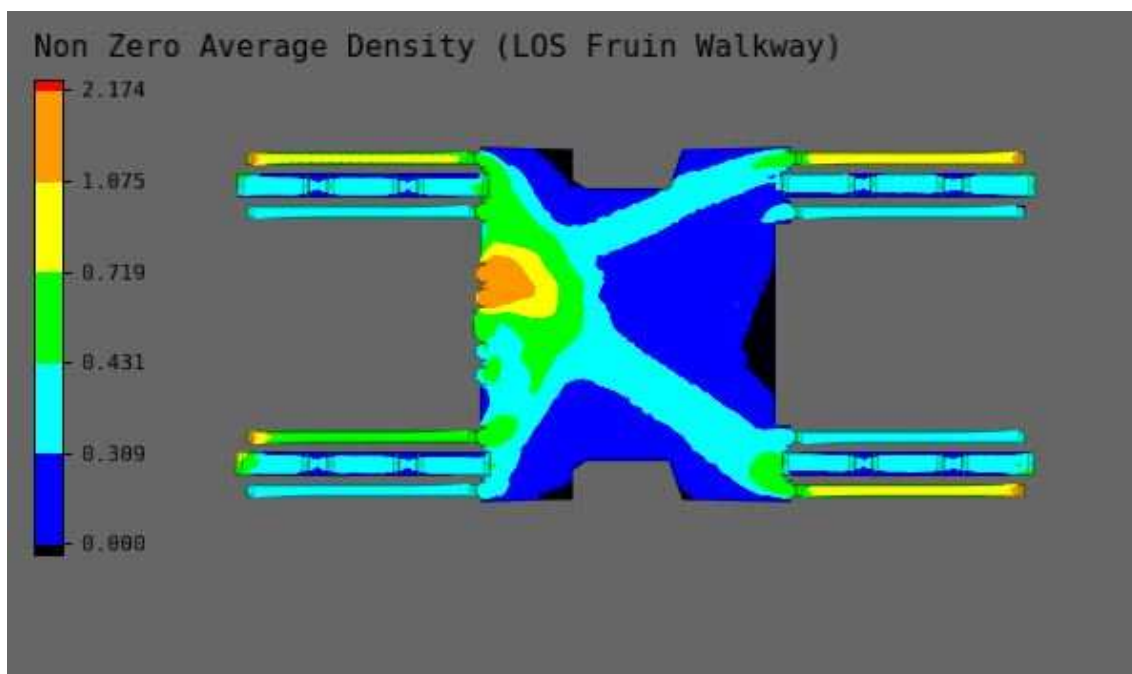


Figura 4. 23: “LOS – Densità media” MassMotion per il moto libero su piano all’Intermediate Ground Level.

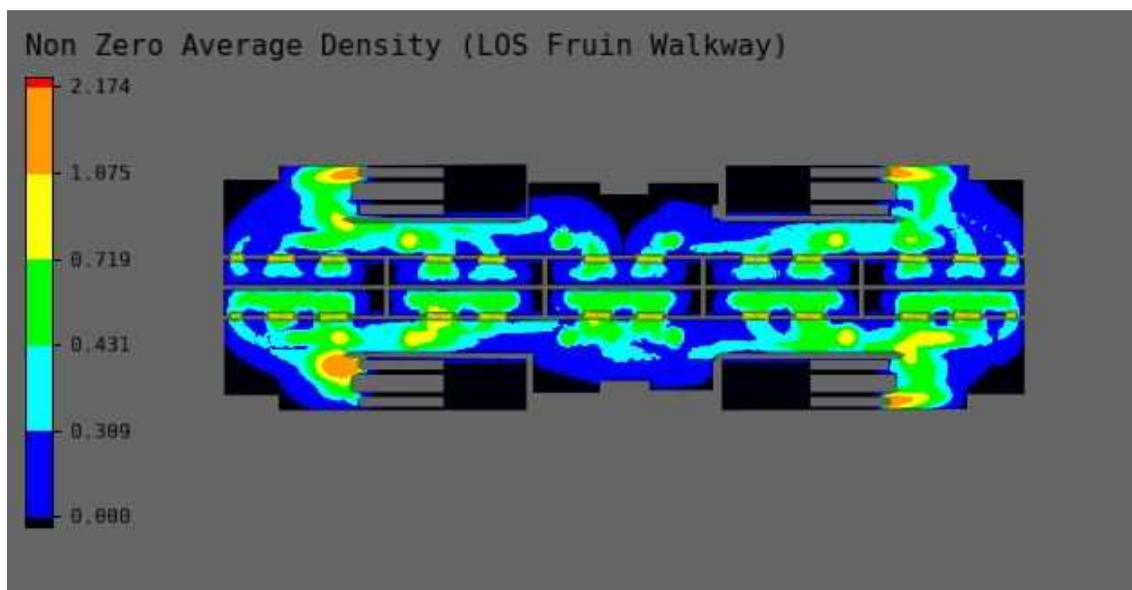


Figura 4. 24: “LOS – Densità media” MassMotion per il moto libero su piano al Platform Level.

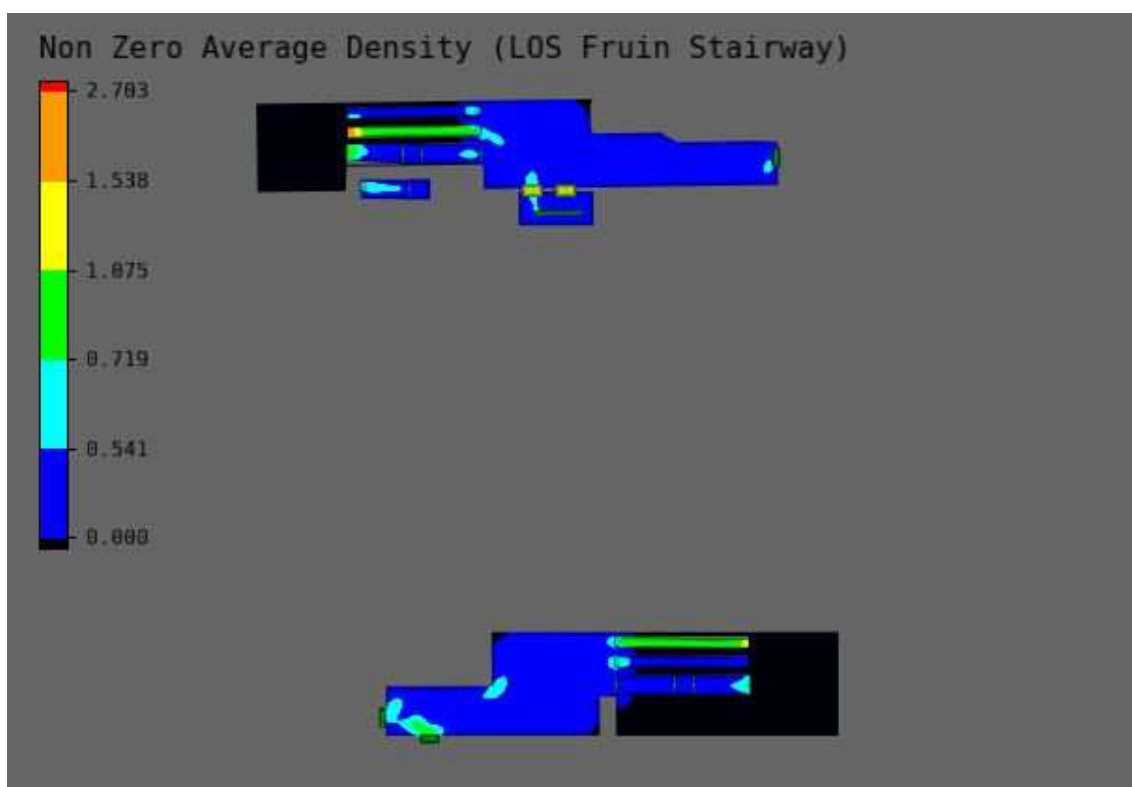


Figura 4. 25: “LOS – Densità media” MassMotion per il moto su scala al Ground Level.

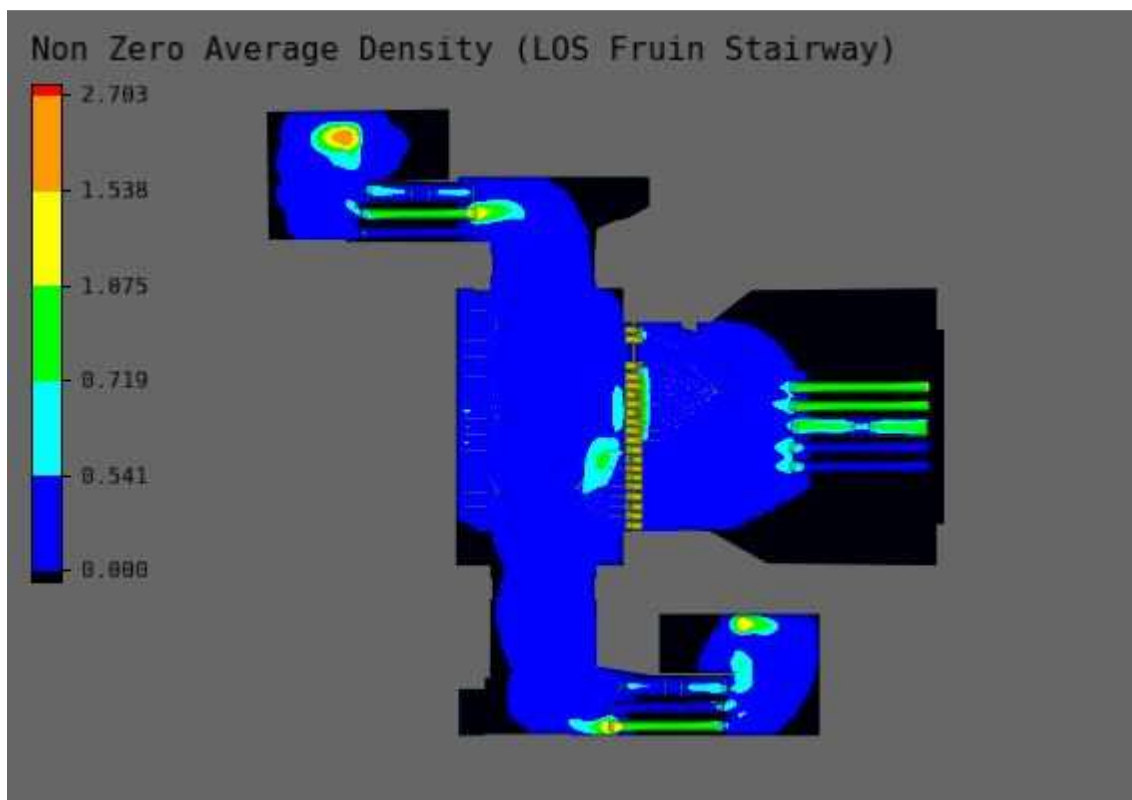


Figura 4. 26: “LOS – Densità media” MassMotion per il moto su scala al Concourse Level.

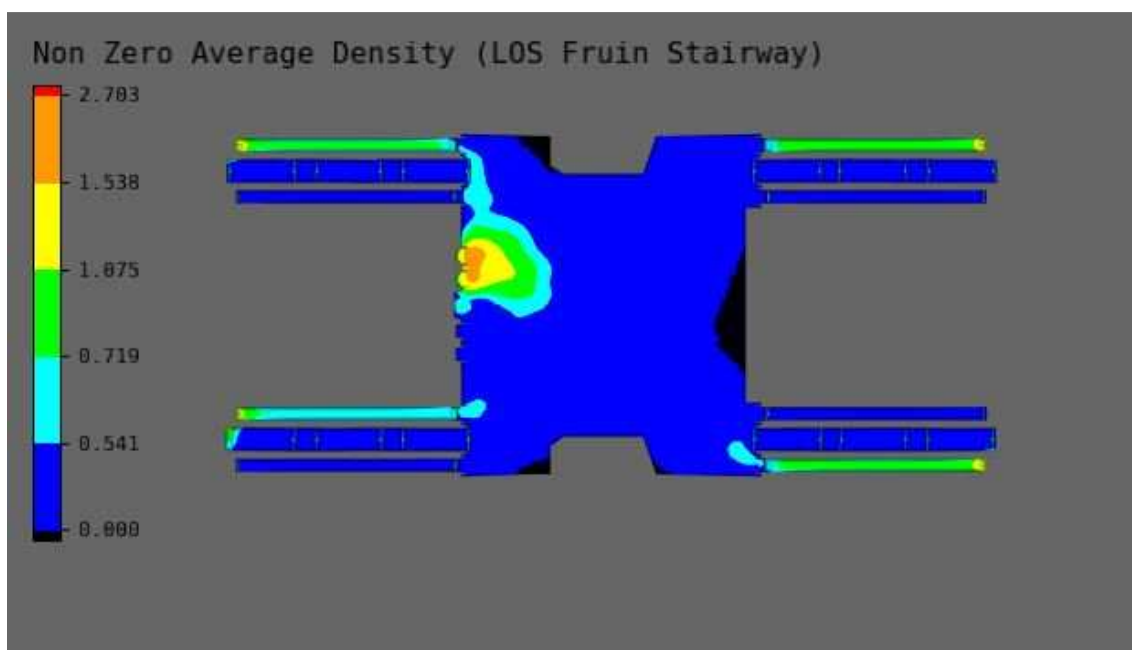


Figura 4. 27: “LOS – Densità media” MassMotion per il moto su scala all’Intermediate Level.

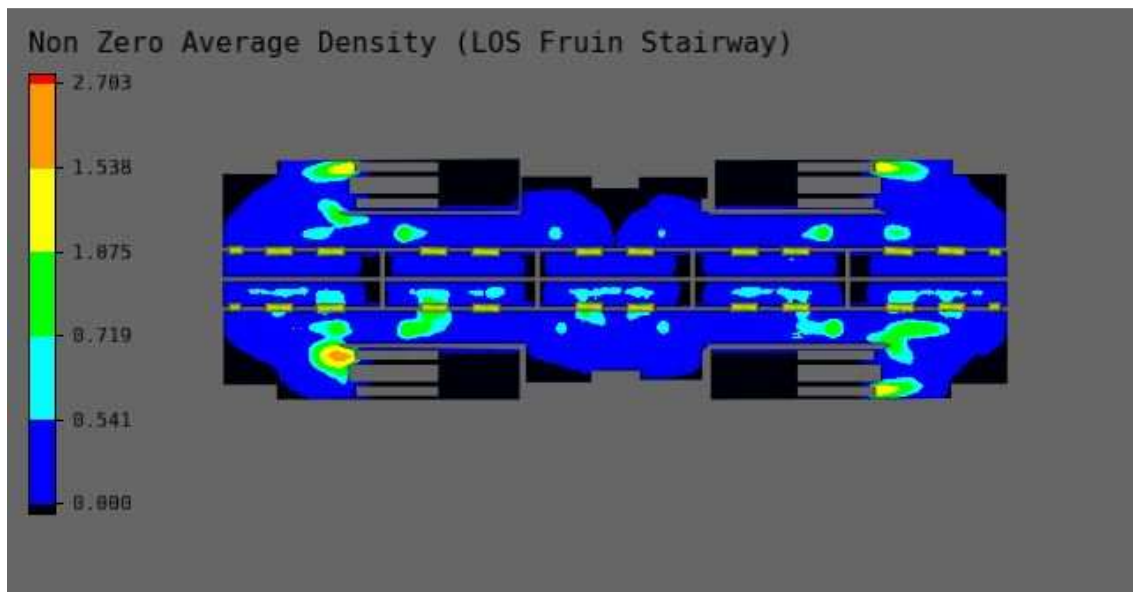


Figura 4. 28: “LOS – Densità media” MassMotion per il moto su scala al Platform Level.

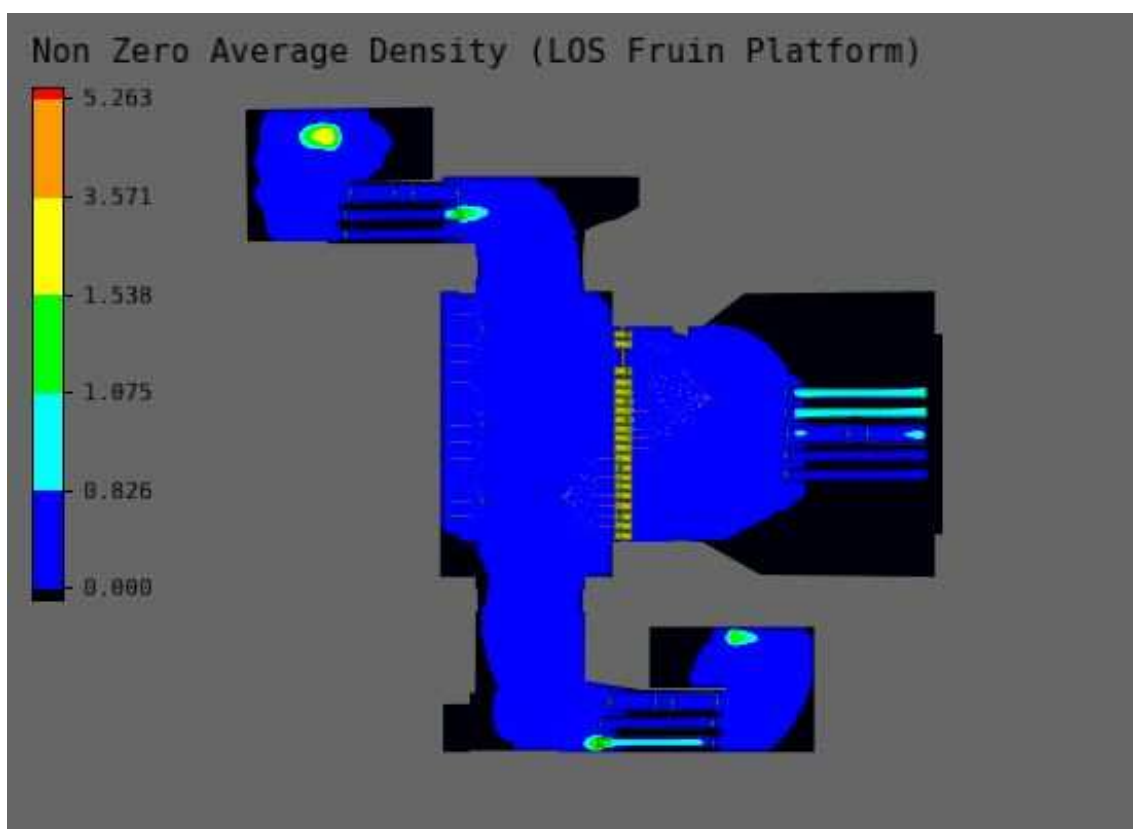


Figura 4. 29: “LOS – Densità media” MassMotion per moto in coda al Concourse Level.

4.2.1.4 Confronto mappe “LoS – Densità Media”

Per quanto riguarda le mappe “LoS – Densità Media”, i risultati dei tre software devono essere interpretati tenendo conto di alcuni fattori che hanno influito durante la simulazione. Certamente, i livelli del modello base che si mostrano più rappresentativi per un confronto sono: Concourse Level, Intermediate Level e Platform Level.

Il Concourse Level è generalmente caratterizzato dal raggiungimento del LoS D (colore giallo) e del LoS E (colore arancione) in zone specifiche del modello. Infatti nell’area di influenza dei tornelli (Figure 4.34 – 4.36) e presso gli imbocchi delle scale (Figure 4.37 – 4.38) sono sempre stati registrati livelli di densità pedonale superiori alla media. Per quanto riguarda la zona nelle vicinanze dei tornelli, MassMotion (Figura 4.36) indica livelli di densità minori in quanto è riscontrabile solamente una piccola area soggetta a LoS D. Viceversa, sia Legion (Figura 4.34) che Viswalk (Figura 4.35) evidenziano un “discomfort” più elevato: in questi casi il livello raggiunto è quello di LoS D.

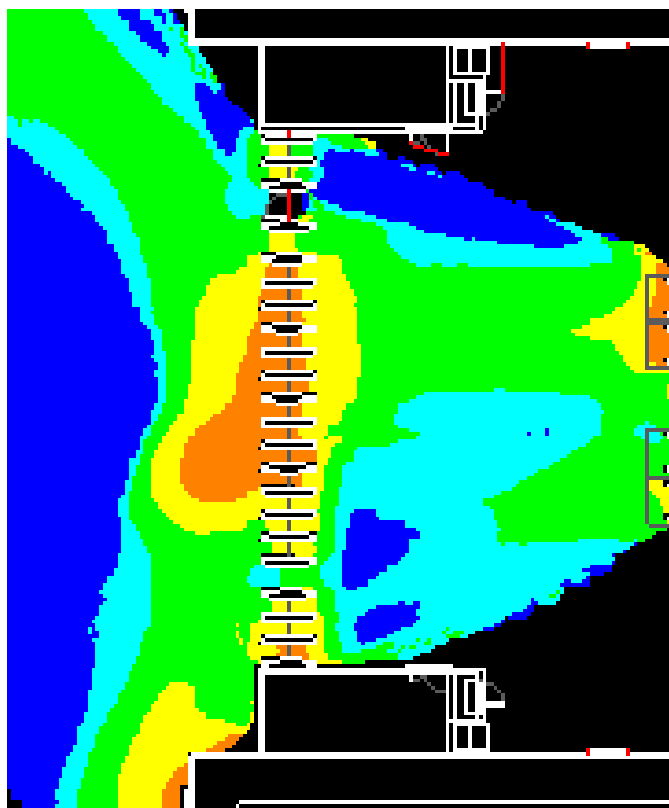


Figura 4. 30: mappa LoS Fruin per il Concourse Level in Legion SpaceWorks. Dettaglio tornelli.

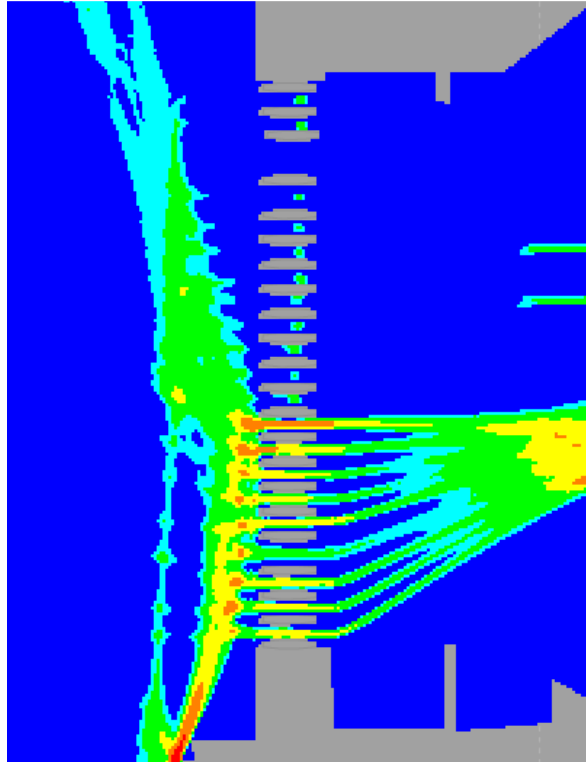


Figura 4. 31: mappa LoS Fruin per il Concourse Level in PTV Viswalk. Dettaglio tornelli.

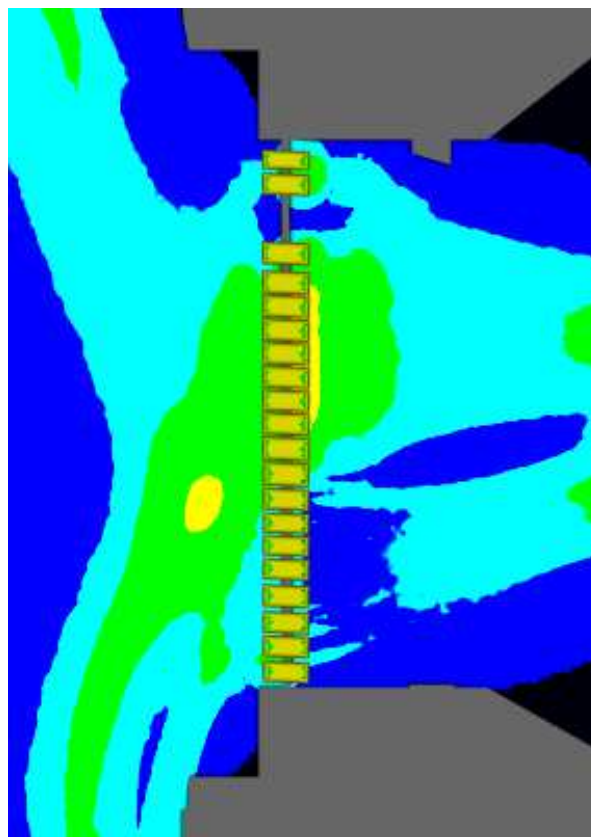


Figura 4. 32: mappa LoS Fruin per il Concourse Level in Oasys MassMotion. Dettaglio tornelli.

I dati output relativi al comportamento pedonale nei pressi degli elementi scala sono quelli che più si distanziano da software a software. In MassMotion (Figura 4.39) i pedoni sembrano sfruttare meglio lo spazio a disposizione, mantenendo un approccio alla scala largo. Quindi la heat-map di MassMotion riporta generalmente un livello di densità minore rispetto agli altri due software (raramente viene raggiunto il LoS D). In Viswalk (Figura 4.38) e Legion (Figura 4.37) questo comportamento di “allargamento” è meno accentuato e le entità si ritrovano più costipate in prossimità delle pareti del modello.

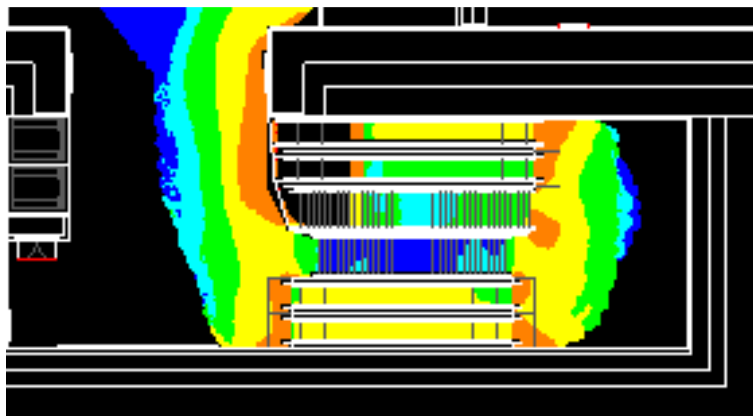


Figura 4. 33: mappa LoS Fruin per il Concourse Level in Legion SpaceWorks. Dettaglio comportamento in uscita/entrata su scala.

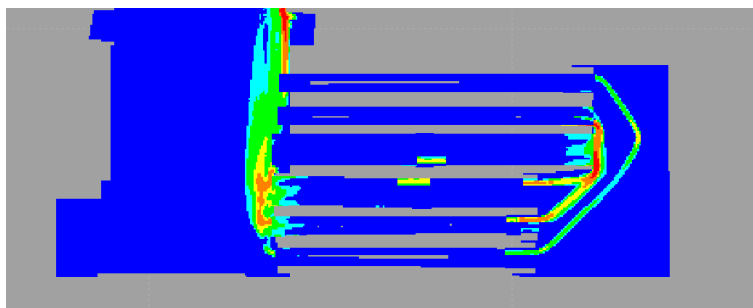


Figura 4. 34: mappa LoS Fruin per il Concourse Level in PTV Viswalk. Dettaglio comportamento in uscita/entrata su scala.

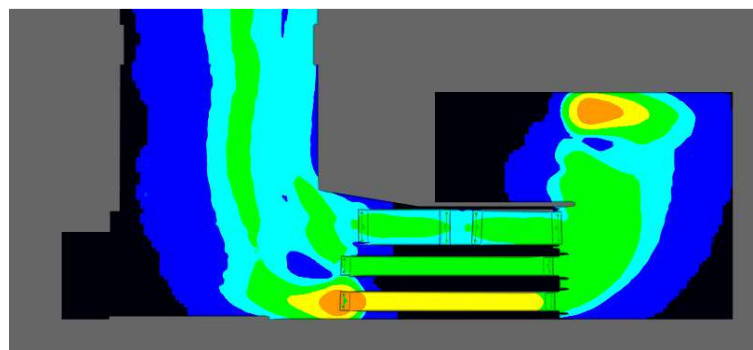


Figura 4. 35: mappa LoS Fruin per il Concourse Level in Oasys MassMotion. Dettaglio comportamento in uscita/entrata su scala.

Tuttavia si deve specificare che, mentre in Legion i pedoni compiono percorsi più stretti dimostrandosi agili nel districarsi in zone di alta densità, in Viswalk questo tipo di approccio diventa controproducente e, il più delle volte, causa congestioni. Per questo motivo nella costruzione del modello Viswalk si è deciso di fare uso di alcuni artifici in grado di regolare l’afflusso dei pedoni durante l’approccio alle rampe di scale. Dunque, come suggerito dal supporto tecnico TPS/PTV Italia, sono state inserite alcune “aree fittizie” relativamente distanti dall’imbocco della rampa di scale ed è stato imposto ad una macro-classe di pedoni (Alighting o Boarding) di transitare su tale area prima di iniziare il proprio moto su scala. Questa modifica è visibile in modo particolare nella heat-map del pianerottolo a Nord del Concourse Level (Figura 4.40) dove viene registrato un valore di densità estremamente elevato. Infatti, l’affollamento dell’area fittizia posizionata al centro del pianerottolo fa sì che venga raggiunto un livello di densità “LoS F”.

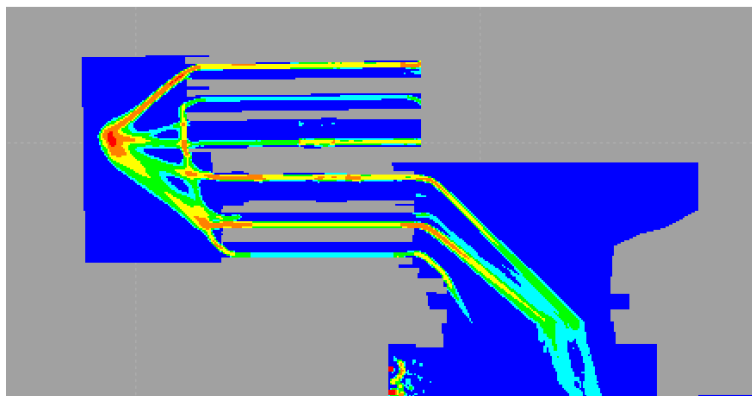


Figura 4. 36: mappa LoS Fruin per il Concourse Level in PTV Viswalk. Dettaglio comportamento in uscita/entrata su scala modificato dall’inserimento di area fittizia.

Questa soluzione progettuale riduce il rischio congestione presente in Viswalk. Tuttavia non viene migliorato il comportamento dei pedoni su scala, che necessita sicuramente di uno sviluppo più accurato. Ciò lo si evince anche dalla qualità dei dati output: in Legion (Figura 4.14) e in MassMotion (Figura 4.26) le heat-maps relative al moto su scala si presentano uniformi e con livelli LoS ben definiti; in Viswalk la distribuzione dei pedoni su scala si mostra poco interpretabile.

La heat-map di Viswalk raffigura un basso livello di densità nella zona “tornelli in uscita” (Figura 4.35) come conseguenza dei problemi di congestione riscontrati nel corso della simulazione e riportati alla fine del paragrafo 4.4.2. I pedoni delle macro-classe Alighting, infatti, una volta creatasi la congestione al Platform Level, non riescono a portare a termine il loro percorso. Ciò conduce ad una drastica caduta del numero di entità che attraversano i tornelli in uscita al Concourse Level.

Infine, per quanto riguarda il comportamento dei pedoni in coda alle biglietterie, i risultati dei tre software si equivalgono. Infatti nelle Figure 4.41 – 4.43 è evidente come in Legion, Viswalk e MassMotion non si scenda mai al di sotto del LoS A.



Figura 4. 37: mappa LoS Fruin per il Concourse Level in Legion SpaceWorks. Dettaglio comportamento in coda alle biglietterie.

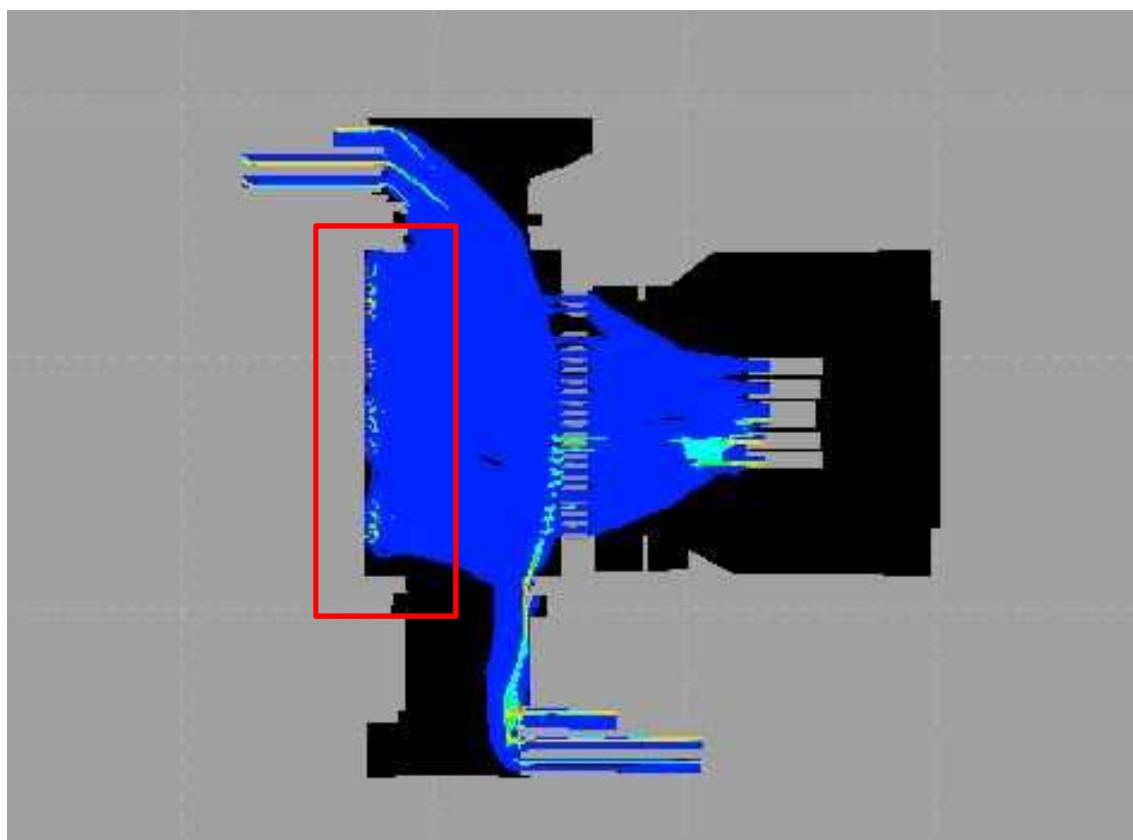


Figura 4. 38: mappa LoS Fruin per il Concourse Level in PTV Viswalk. Dettaglio comportamento in coda alle biglietterie.

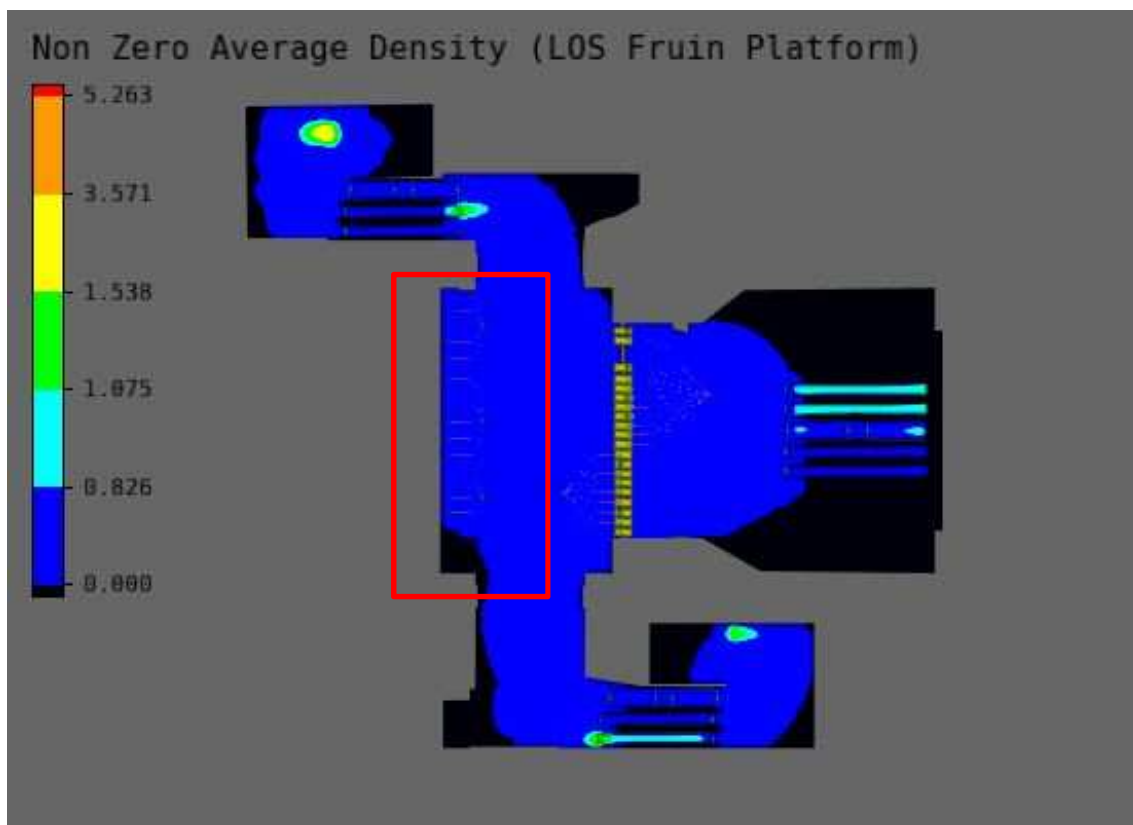


Figura 4. 39: mappa LoS Fruin per il Concourse Level in Oasys MassMotion. Dettaglio comportamento in coda alle biglietterie.

Anche nel caso dell'Intermediate Level è possibile fare considerazioni simili a quelle riportate per il Concourse Level. La heat-map di Viswalk (Figura 4.45) è notevolmente “viziata” dalla costruzione di un’area fittizia che permetta ai pedoni di mantenere un approccio ordinato alla rampa di scale. Le Figure 4.44 e 4.46 mostrano rispettivamente i risultati ottenuti su Legion e MassMotion; in questo caso, specialmente nella zona prossima all’imbocco della rampa di scale in direzione Concourse Level, MassMotion presenta un livello di densità pedonale minore rispetto a Legion. Tale differenza può essere dovuta alla differenza della “body ellipse” utilizzata dai due algoritmi per ottenere le mappe. Tuttavia, se si osservano le mappe in Figura 4.44 e 4.46 senza dare importanza al grado numerico di densità (LoS), si nota come entrambi i software applichino una distinzione piuttosto simile fra aree ad alta densità e aree a bassa densità.

Inoltre, la Figura 4.45 mette nuovamente in evidenza l’esigenza da parte di Viswalk di rinnovare il comportamento su scala delle entità e di migliorare l’output visivo delle mappe, permettendo così una interpretazione dei risultati decisamente più agevole. Nell’Intermediate Level, Legion (Figura 4.44) e MassMotion (Figura 4.46) riportano risultati analoghi anche per quanto riguarda la densità pedonale riscontrata sugli elementi-scala. Difatti, su entrambi i software sono stati registrati livelli di densità più intensi (LoS C e LoS D) sulle scale mobili destinate al moto ascendente delle entità. Questo fatto è dovuto al modo differente secondo il

quale le macro-classi “Boarding” (moto discendente per recarsi al Platform Level) e “Alighting” (moto ascendente per recarsi al Ground Level) vengono inserite nel modello. Mentre la prima macro-classe entra nella simulazione in maniera costante e quindi si distribuisce sugli elementi-scala più diffusamente, la seconda entra nella simulazione ad intermittenza, regolata cioè dall’arrivo intervallato dei convogli metropolitani. Questo fa sì che si vengano a creare dei plotoni di persone che si trovano ad occupare, nello stesso istante, le scale mobili in direzione ascendente, creando così situazioni di densità più gravose.

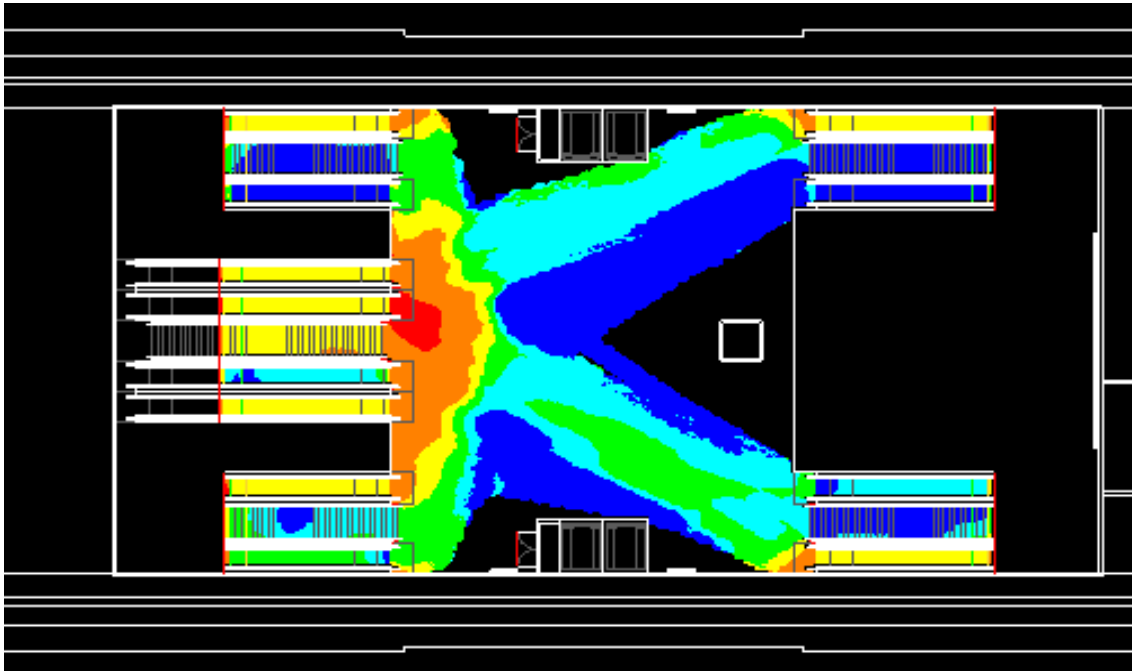


Figura 4. 40: mappa LoS Fruin per l’Intermediate Level in Legion SpaceWorks.

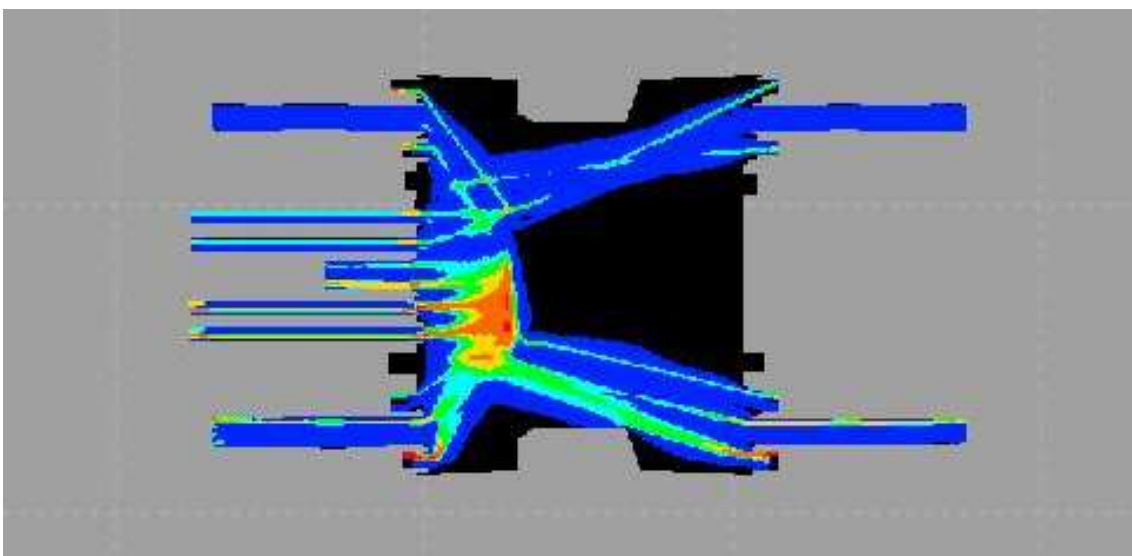


Figura 4. 41: mappa LoS Fruin per l’Intermediate Level in PTV Viswalk.

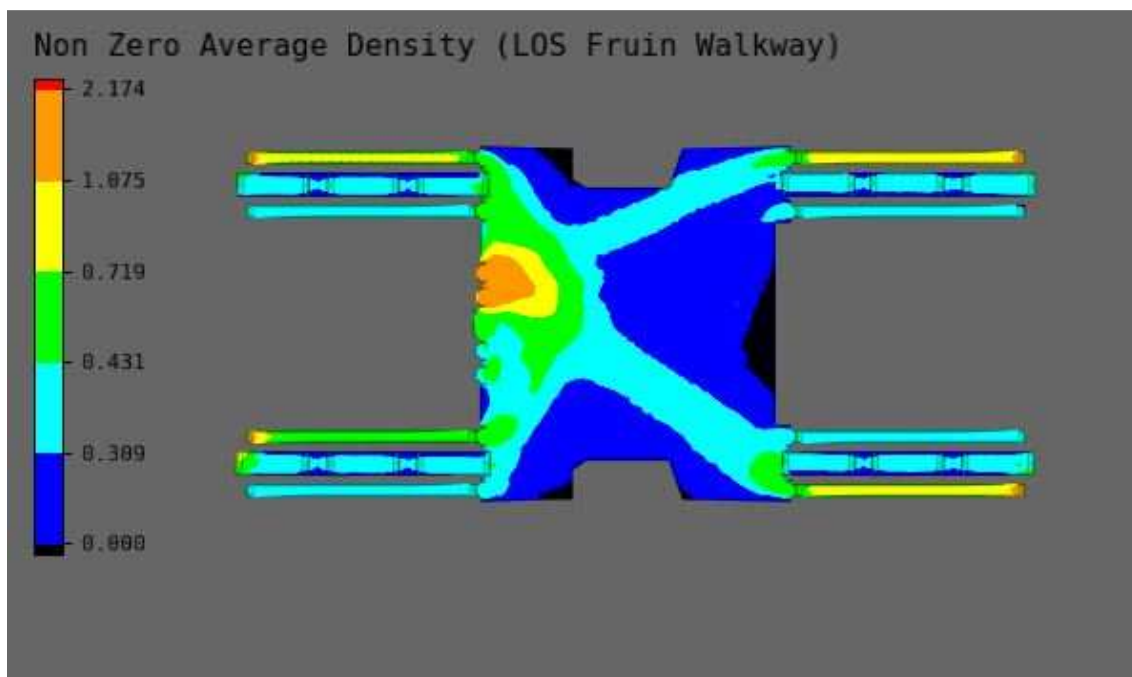


Figura 4. 42: mappa LoS Fruin per l'Intermediate Level in Oasys MassMotion.

Infine, dalle heat-maps “LoS – Densità Media” del Platform Level si evince come i tre software gestiscano e organizzino le attività di attesa dei pedoni.

In primo luogo è utile ricordare le differenze fra banchina Nord (direzione capolinea Expo) e banchina Sud (direzione capolinea Rashidiya) inserite durante la costruzione del modello base (paragrafo 4.2). Mentre la macro-classe dei pedoni Alighting è stata suddivisa in maniera relativamente equa fra le due banchine (3484 pedoni per la direzione Expo e 3420 pedoni per la direzione Rashidiya, come riportato nel paragrafo 4.1), la macro-classe Boarding presenta un rapporto 1 a 4 a favore della banchina Rashidiya. A rigore di logica, dunque, la banchina Sud dovrebbe presentare valori di densità maggiori. In Figura 4.47 sono riportati i dati output di Legion. La differenza di densità fra le due banchine è riscontrata in quanto sulla banchina Sud prevale il LoS C (colore verde) e nei punti prossimi alle scale viene raggiunto il LoS D. La banchina Nord si assesta invece su valori di LoS A (colore blu) e Los B (colore azzurro).

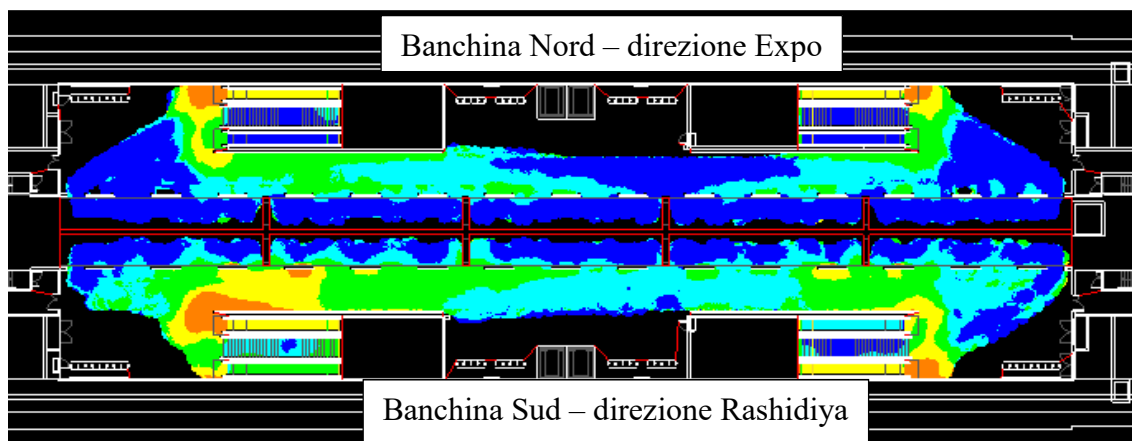


Figura 4. 43: mappa LoS Fruin per l’Intermediate Level in Legion SpaceWorks.

Nel caso del Platform Level, Viswalk (Figura 4.48) è il software che presenta un “comportamento di attesa” più soddisfacente. Sulla banchina Sud il LoS C (colore verde) è distribuito in maniera uniforme lungo tutta la lunghezza della stazione, ciò è sintomo di un buon utilizzo degli spazi da parte dei pedoni in attesa (fatta eccezione per i valori critici LoS raggiunti all’imbocco della rampa di scale sinistra, dovuti ad una congestione avvenuta nei momenti finali dell’ora di simulazione). Anche la banchina Nord presenta una distribuzione di densità pedonale decisamente omogenea.

In Figura 4.49 i risultati estratti da MassMotion evidenziano una disposizione delle entità in attesa estremamente focalizzata nei pressi degli accessi ai vagoni della metro. Sotto questo punto di vista il comportamento dei pedoni in attesa di MassMotion è meno realistico rispetto a quello di Legion e Viswalk. Non risulta, inoltre, una differenza di densità così marcata nei risultati fra la banchina Nord e quella Sud; sebbene, infatti, i pedoni tendano a raggrupparsi di fronte agli accessi dei vagoni, il loro stato di densità non raggiunge livelli elevati. Consultando però la mappa del “Tempo di Occupazione” (Figura 4.64) si nota come la banchina Sud sia soggetta ad un più elevato tasso di occupazione, rispetto alla banchina Nord.

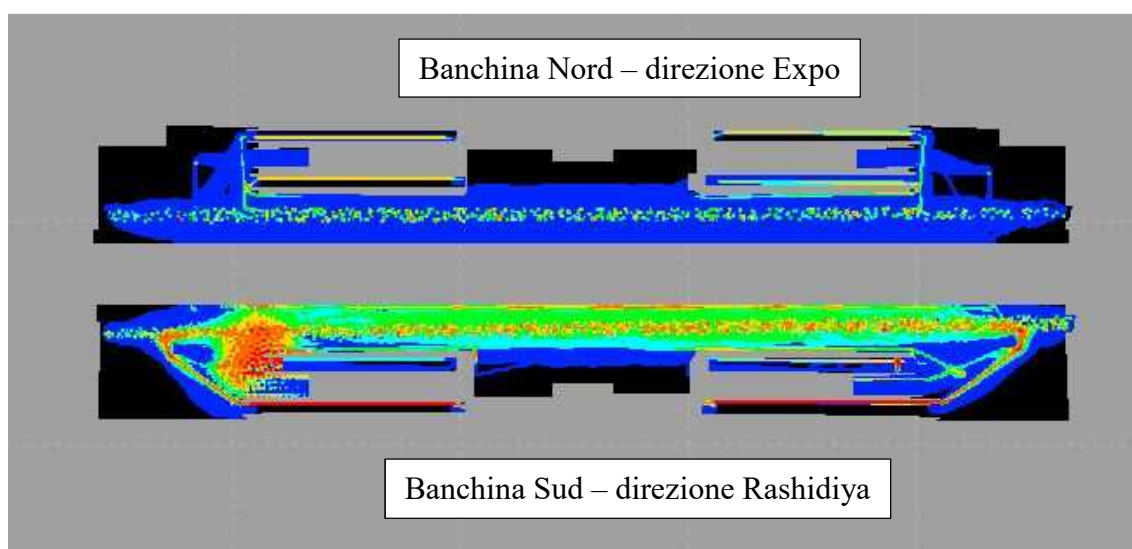


Figura 4. 44: mappa LoS Fruin per l’Intermediate Level in PTV Viswalk.

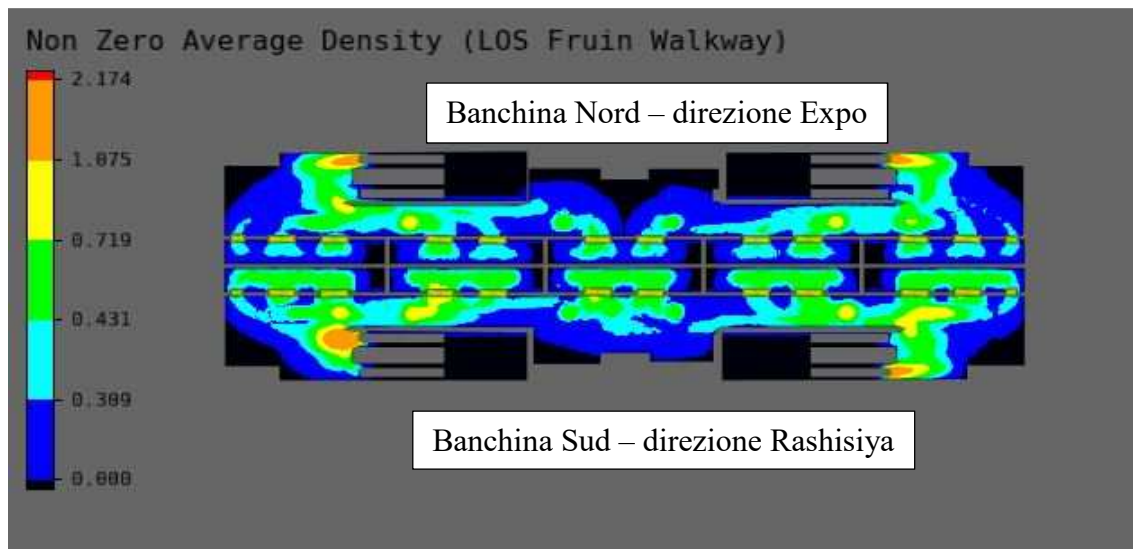


Figura 4. 45: mappa LoS Fruin per l’Intermediate Level in Oasys MassMotion.

4.2.2 Mappe del “Tempo di Occupazione”

Come nel caso precedente dei “LoS - Densità Media”, anche per le mappe del “Tempo di Occupazione” vengono presi in esame i livelli: Concourse Level, Intermediate Level e Platform Level.

Come spiegato precedentemente nel paragrafo 4.2.1, questo tipo di mappa segnala il tasso di occupazione temporale di un punto nel corso dell’ora di simulazione. Questo tipo di risultato è differente da quello della densità media perché evidenzia quelli che si potrebbero definire “sentieri preferenziali” dei pedoni facenti parte della simulazione. Nel caso di Legion SpaceWorks (Figura 4.50) le aree di colore rosso (più di 10 minuti di occupazione nell’arco di un’ora) in prossimità dei tornelli sono decisamente meno estese rispetto a quelle delineate da Viswalk e MassMotion (rispettivamente Figura 4.51 e Figura 4.52). Questo porta a pensare che l’algoritmo di Legion permetta alle entità di districarsi in maniera decisamente più fluida nelle zone ad alta densità. Osservando il comportamento dei pedoni nell’area in prossimità dei tornelli in entrata, i software Viswalk e MassMotion impiegano più tempo a risolvere situazioni di grande afflusso pedonale.

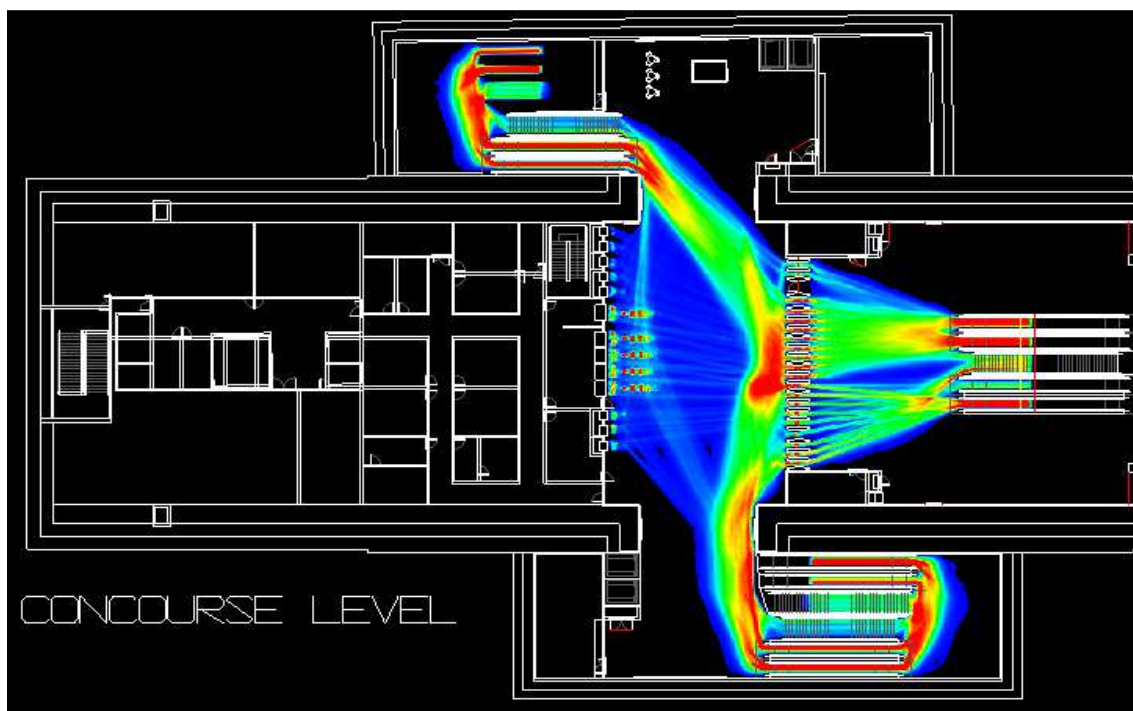


Figura 4. 46: mappa “Tempo di Occupazione” per il Concourse Level in Legion SpaceWorks.

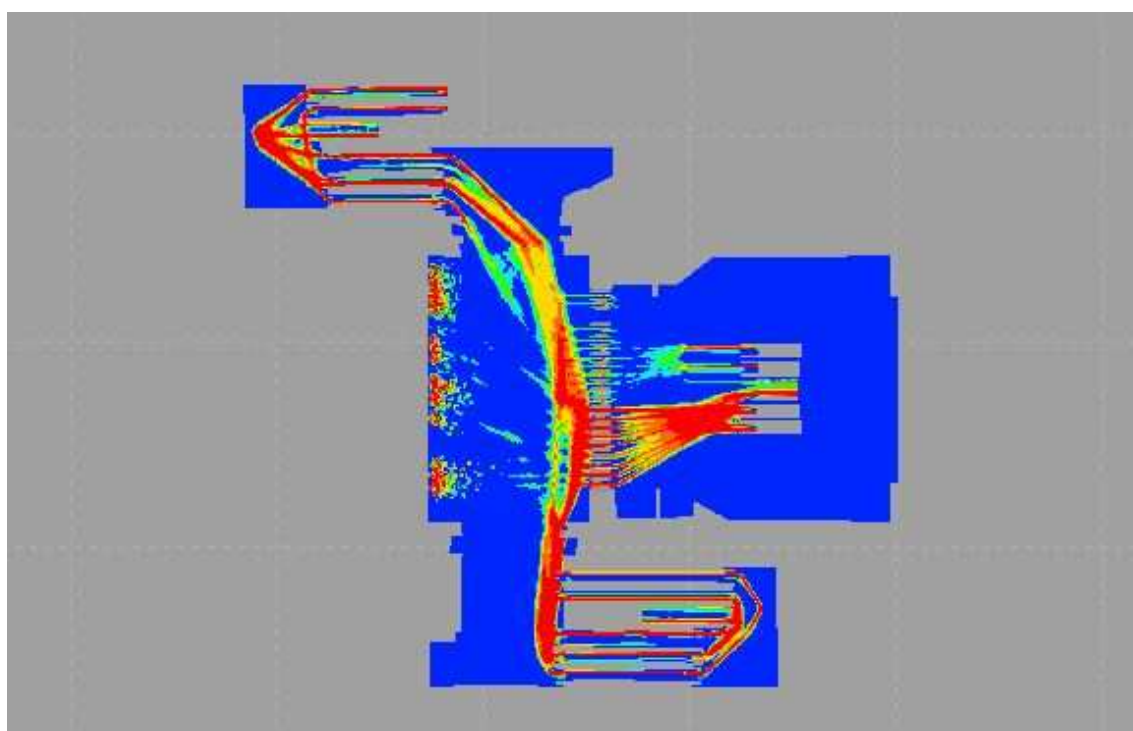


Figura 4. 47: mappa “Tempo di Occupazione” per il Concourse Level in PTV Viswalk.

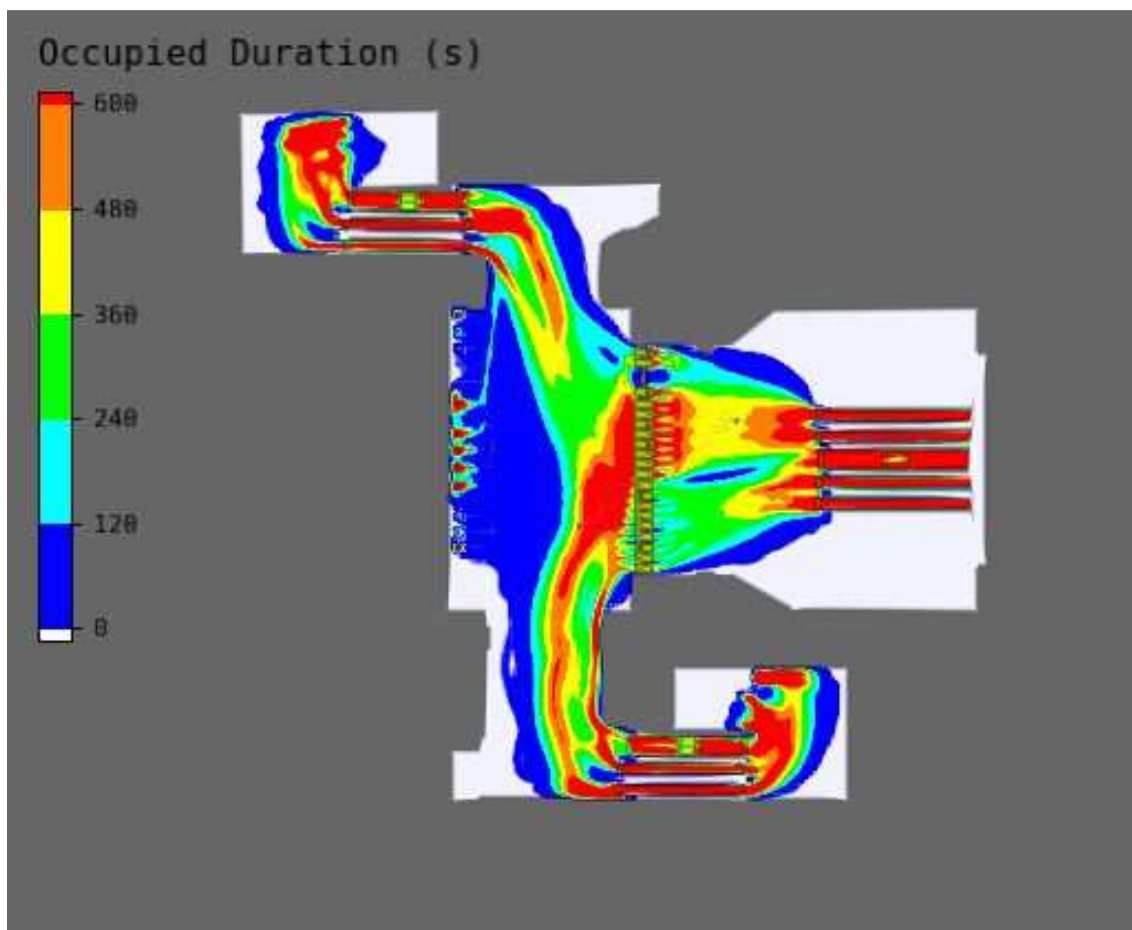


Figura 4. 48: mappa “Tempo di Occupazione” per il Concourse Level in Oasys MassMotion.

Inoltre le Figure 4.53 - 4.55 confermano quanto detto in precedenza nel paragrafo 4.2.1.4. Difatti, in entrata e in uscita dagli elementi scala, le entità in MassMotion tendono a sfruttare maggiormente tutto lo spazio a disposizione. In Legion e Viswalk viene confermato un movimento molto più “spigoloso”, quasi da essere definito innaturale.

Infine, mentre in Legion e MassMotion le mappe sono generate attraverso l'utilizzo di comandi specifici come “Space Utilization” e “Time Occupied”, in Viswalk questo risultato non è impostato di default e deve essere costruito attraverso l'attributo “*Speed - duration exceeding threshold*”.

Grazie a questo attributo, si valuta in ogni punto per quanto tempo viene superata una certa soglia di velocità: se in un punto della mappa non viene superato un determinato livello di velocità nel corso della simulazione, significa che i pedoni impiegheranno più tempo a transitare sul punto stesso e quindi lo occuperanno più a lungo.

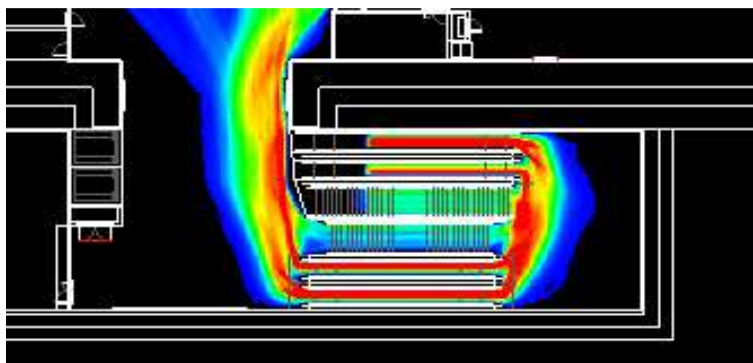


Figura 4. 49: mappa “Tempo di Occupazione” per il Concourse Level in Legion SpaceWorks. Dettaglio comportamento in uscita e in entrata sull’elemento scala.

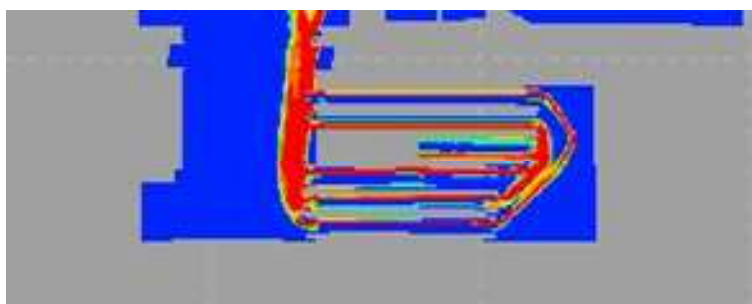


Figura 4. 50: mappa “Tempo di Occupazione” per il Concourse Level in PTV Viswalk. Dettaglio comportamento in uscita e in entrata sull’elemento scala.

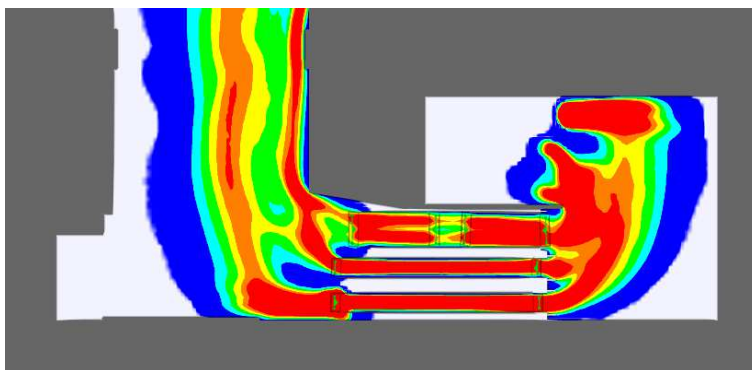


Figura 4. 51: mappa “Tempo di Occupazione” per il Concourse Level in Oasys MassMotion. Dettaglio comportamento in uscita e in entrata sull’elemento scala.

Anche sull’Intermediate Level, osservando le aree delimitate dai rettangoli di colore rosso, viene confermata l’estrema facilità con cui Legion (Figura 4.56) riesce a liberare in tempi brevi le zone destinate a raccogliere un elevato flusso pedonale. In Viswalk (Figura 4.57) e MassMotion (Figura 4.58) questa capacità viene a mancare, i pedoni quindi impiegano più tempo ad attraversare l’area ai piedi della rampa di scale che dall’Intermediate Level porta al

Concourse Level.

In Figura 4.57 è possibile notare nuovamente come l'utilizzo delle “aree fittizie” influisca sensibilmente sui risultati di “Tempo di Occupazione”. Infatti, per la regolazione del flusso pedonale all'imbocco delle scale, è stato imposto alla macro-classe pedonale Alighting il passaggio attraverso un'area spostata verso il centro dell'Intermediate Level. Ciò ha fatto sì che la zona rossa ad alto tasso di occupazione (più di 10 minuti sul totale di un'ora) risulti meno decentrata rispetto a quella presente negli altri due software.

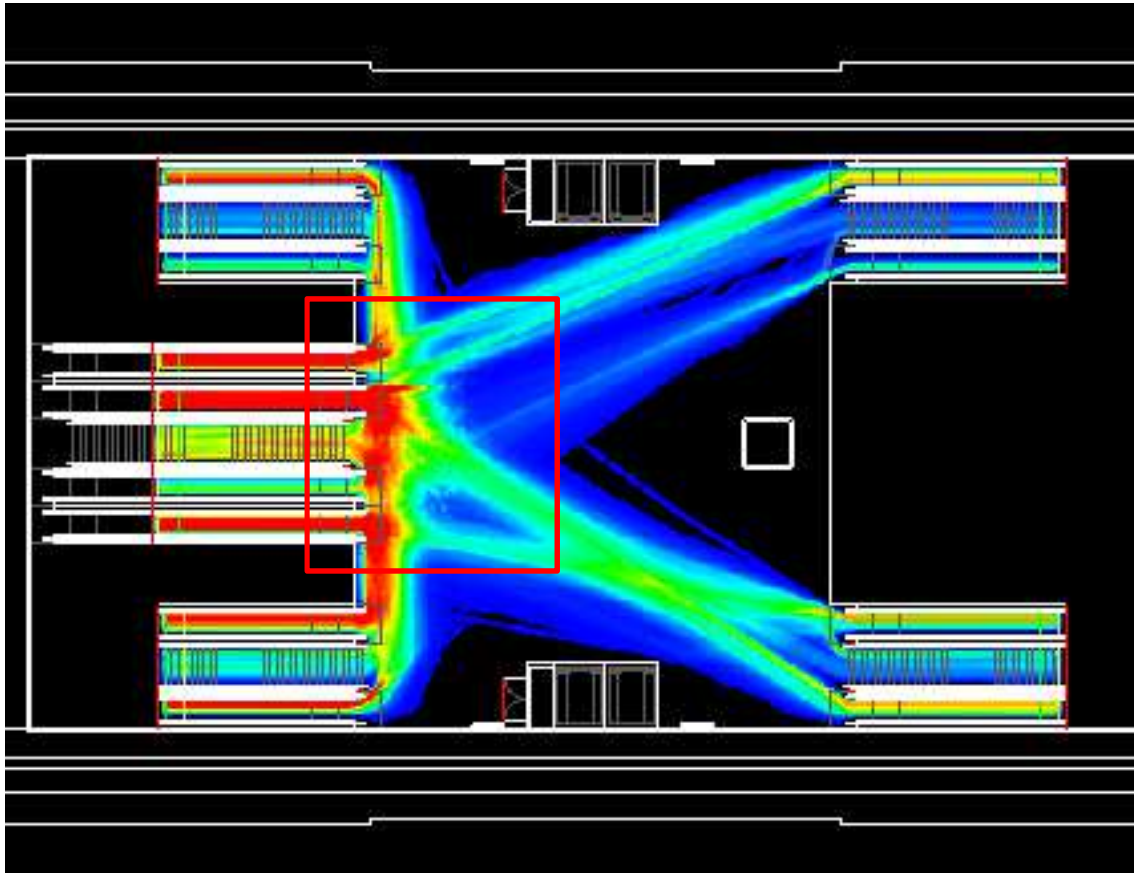


Figura 4. 52: mappa “Tempo di Occupazione” per l’Intermediate Level in Legion SpaceWorks.

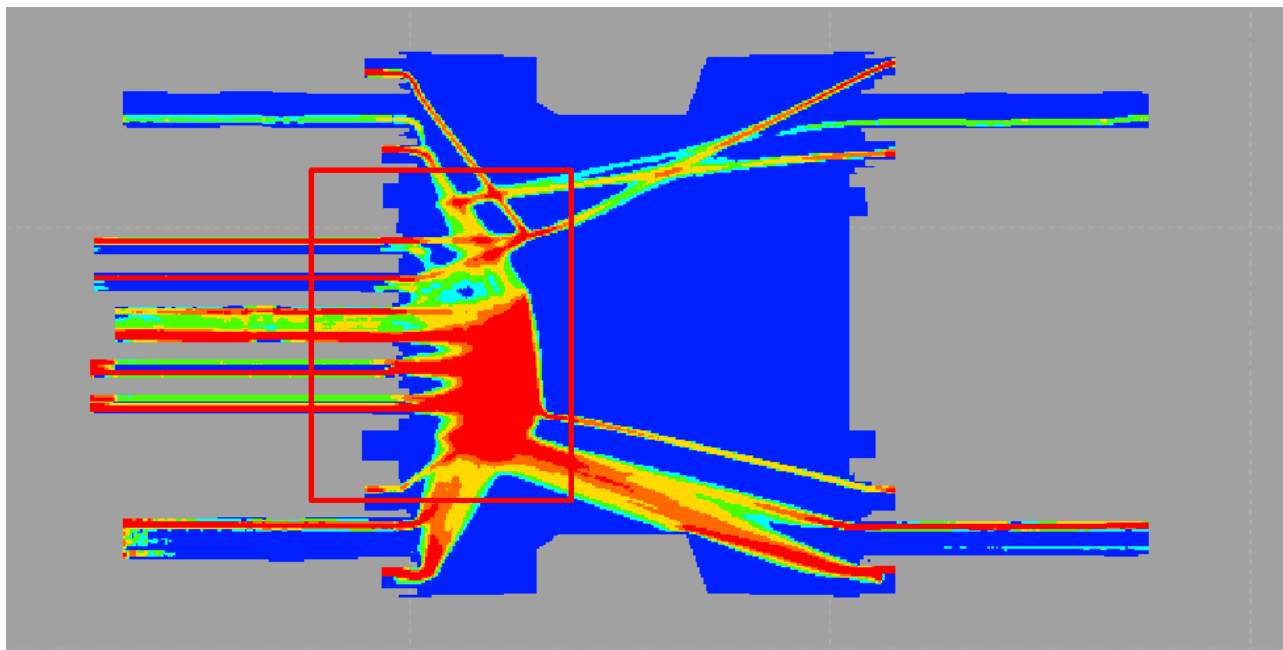


Figura 4. 53: mappa “Tempo di Occupazione” per l’Intermediate Level in PTV Viswalk.

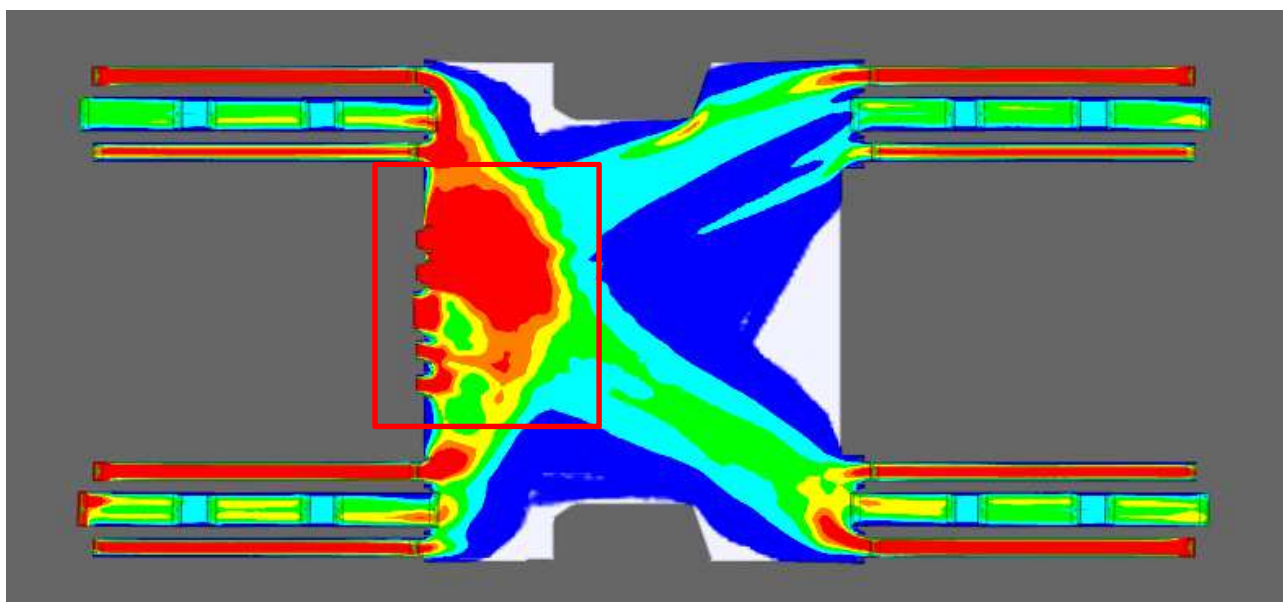


Figura 4. 54: mappa “Tempo di Occupazione” per l’Intermediate Level in Oasys MassMotion.

La geometria dell’Intermediate Level mette in risalto la poca varietà dei percorsi effettuati dalla simulazione di Viswalk (Figura 4.60). Infatti i pedoni che si dirigono e provengono alle/dalle scale situate ad Est, tendono a percorrere quasi unicamente lo stesso percorso, come se fossero disposti in fila. Diversamente Legion (Figura 4.59) e MassMotion (Figura 4.61) riportano una “distribuzione di percorsi” decisamente più varia.

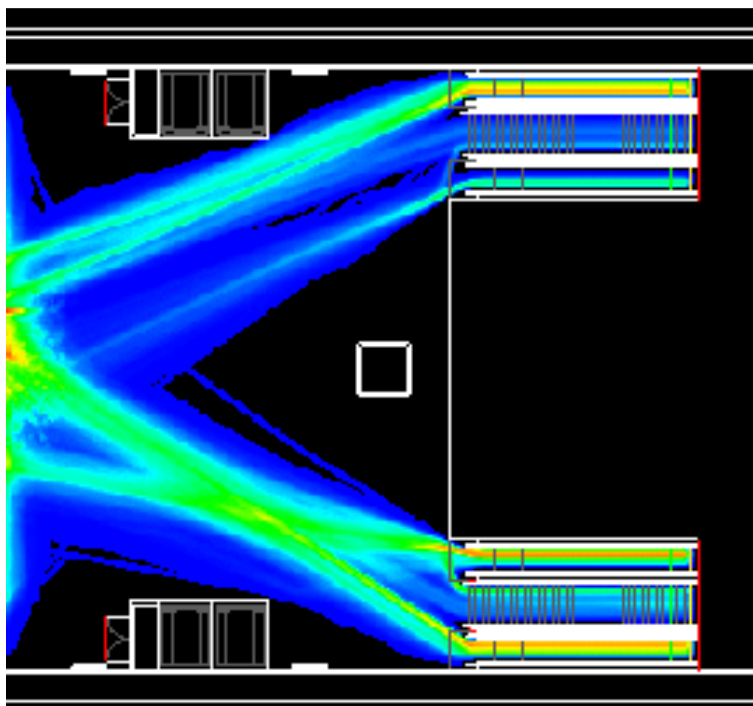


Figura 4. 55: dettaglio dell'Intermediate Level in Legion SpaceWorks. Varietà di itinerari scelti dai pedoni per dirigersi alle rampe di scale ad Est dell'Intermediate Level.

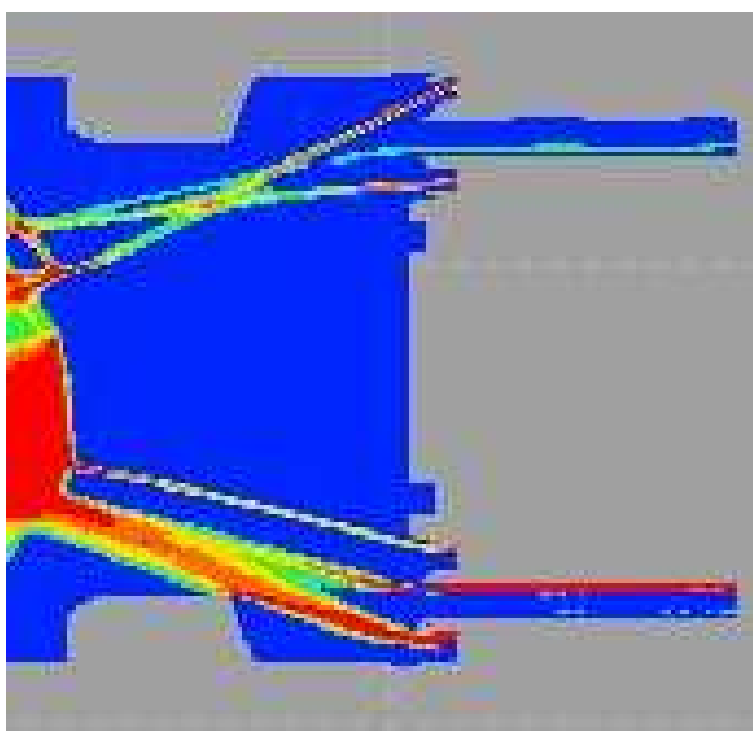


Figura 4. 56: dettaglio dell'Intermediate Level in PTV Viswalk. Varietà di itinerari scelti dai pedoni per dirigersi alle rampe di scale ad Est dell'Intermediate Level.

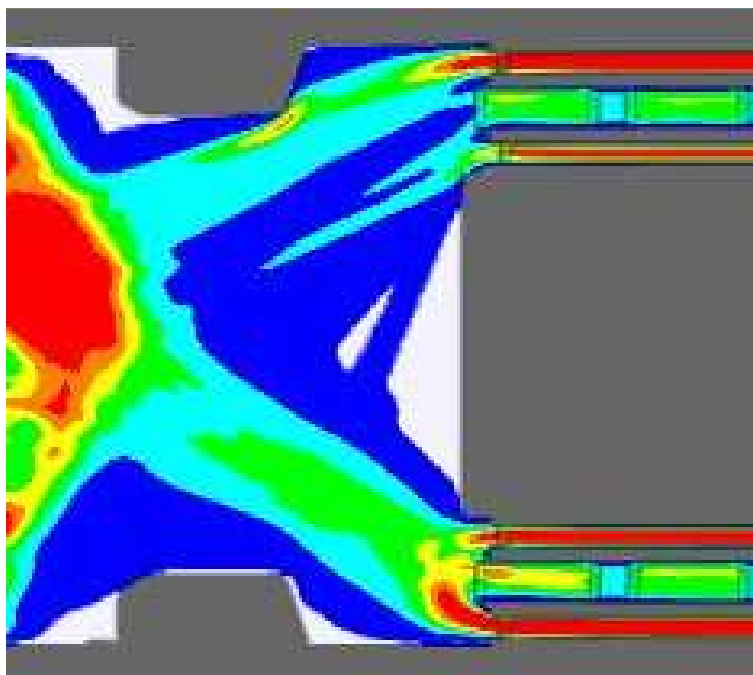


Figura 4. 57: dettaglio dell'Intermediate Level in Oasys MassMotion. Varietà di itinerari scelti dai pedoni per dirigersi alle rampe di scale ad Est dell'Intermediate Level.

Infine il Platform Level conferma in pieno le considerazioni sul comportamento dei pedoni in attesa (paragrafo 4.2.1.3). In questo livello, infatti, le entità restano sul posto in attesa del convoglio metropolitano. Cambia quindi l'oggetto di valutazione delle mappe: si disperdono le indicazioni relative ai "sentieri preferiti" dei pedoni per dare spazio a quelle inerenti alla distribuzione sulla banchina.

Legion (Figura 4.62) presenta una distribuzione abbastanza omogenea che tende però a assottigliarsi nelle aree centrali delle banchine (più lontane dalle scale). Viswalk (Figura 4.63) si dimostra nuovamente il software che meglio gestisce il comportamento di attesa dei pedoni. Purtroppo la banchina Sud (capolinea Rashidiya) in Figura 4.63 riporta dati output nuovamente influenzati dalla congestione pedonale ai piedi della rampa di scale a sinistra. Infine MassMotion (Figura 4.64) conferma una distribuzione pedonale in attesa decisamente concentrata nelle vicinanze delle porte del convoglio.

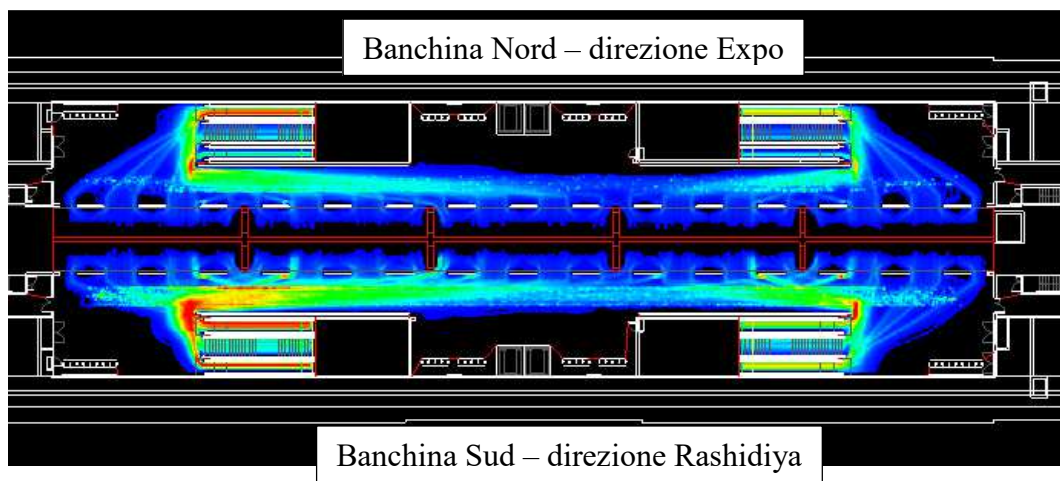


Figura 4. 58: mappa “Tempo di Occupazione” per il Platform Level in Legion SpaceWorks

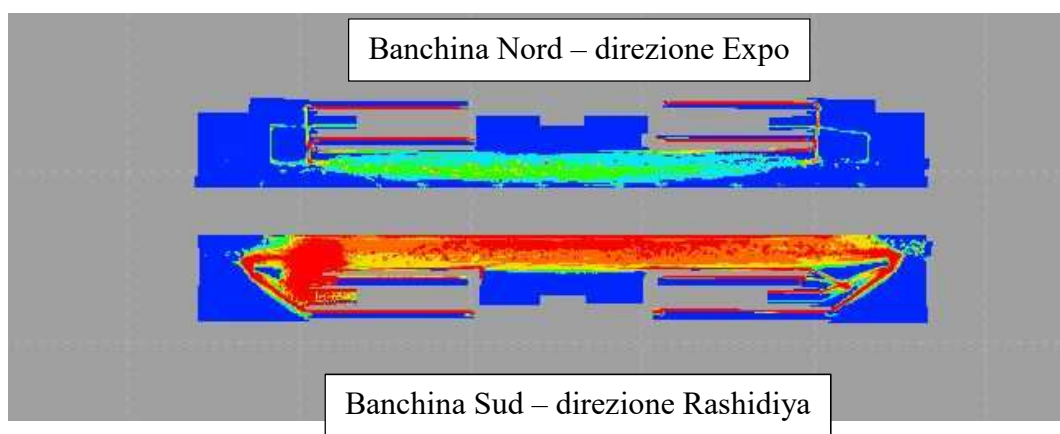


Figura 4. 59: mappa “Tempo di Occupazione” per il Platform Level in PTV Viswalk.

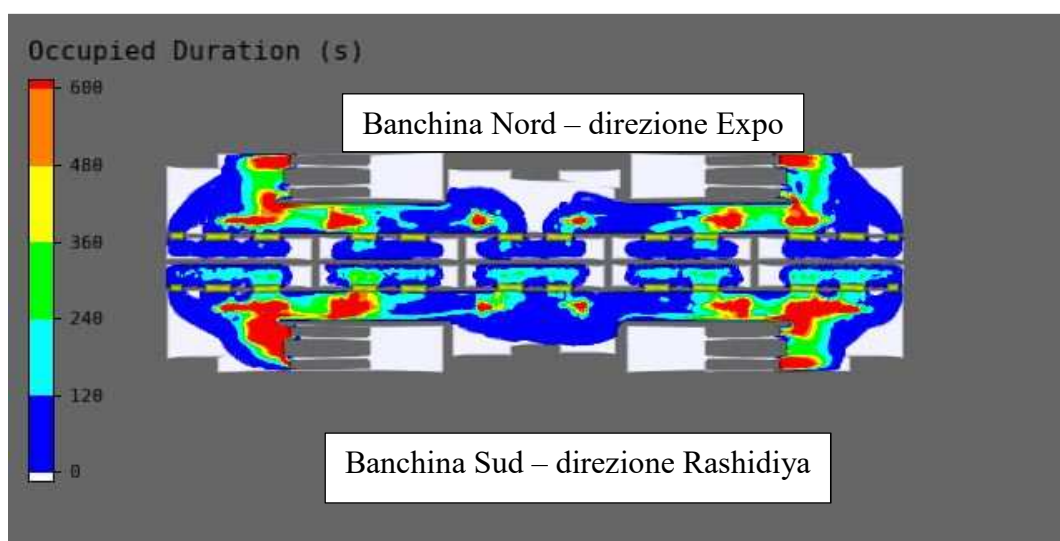


Figura 4. 60: mappa “Tempo di Occupazione” per il Platform Level in Oasys MassMotion.

4.2.3 “Stress Test” Biglietterie

Al fine di valutare la risposta dei tre software in casi di simulazione estremi, si è deciso di effettuare uno “stress test” per la capacità delle biglietterie. Come riportato nel paragrafo 4.2 al Concourse Level sono state inserite 12 biglietterie: 4 biglietterie automatiche a Nord, 5 biglietterie con personale al centro e ancora 3 biglietterie automatiche a Sud.

Dunque, per effettuare il seguente test sono stati apportati dei semplici cambiamenti al modello base applicato ai tre software. Nello specifico è stato variato il numero di pedoni non in possesso del biglietto, cioè è stata cambiata la percentuale di pedoni indirizzati alle biglietterie (originariamente, nel modello base, questa percentuale era stata fissata al 20%).

Sono state effettuate due differenti simulazioni: 40% dei pedoni sprovvisti di biglietto e 80% dei pedoni sprovvisti del biglietto. Ovviamente solo i pedoni appartenenti alla macro-classe Boarding sono soggetti a questa variazione di simulazione.

Le Figure 4.65 - 4.70 mostrano i risultati di “LoS – Densità Media” per il moto in coda e in “Tempo di Occupazione” con il 40% delle entità Boarding dirette alle biglietterie. Legion e MassMotion riportano mappe molto simili nelle zone destinate ad accogliere le code delle biglietterie. Per quanto riguarda i valori di densità Fruin (Figura 4.65 e Figura 4.69), in entrambi i casi, è mantenuto un alto livello di soddisfazione (LoS A, colore blu).

Viswalk (Figura 4.67 e Figura 4.68) riporta seri problemi per quanto riguarda la disposizione in coda e lo scorrimento di quest’ultima. Sebbene nella Figura 4.64 i livelli LoS di densità raffigurati non sembrano critici, dalla figura 4.68 si evince come il sistema code abbia fatto collassare interamente il funzionamento del Concourse Level. Gli elementi coda, pur essendo stati progettati con lo stesso tempo di attesa degli altri due software, non sono stati in grado di smaltire in maniera efficace i pedoni che nell’attesa hanno iniziato ad occupare zone del livello non progettate per l’attesa alla biglietteria (ad esempio la porzione di mappa a Nord di fronte alla rampa di scale o addirittura aldilà del “sistema tornelli in entrata”, affianco alle scale che portano all’Intermediate Level, evidenziate in Figura 4.64 e 4.65).

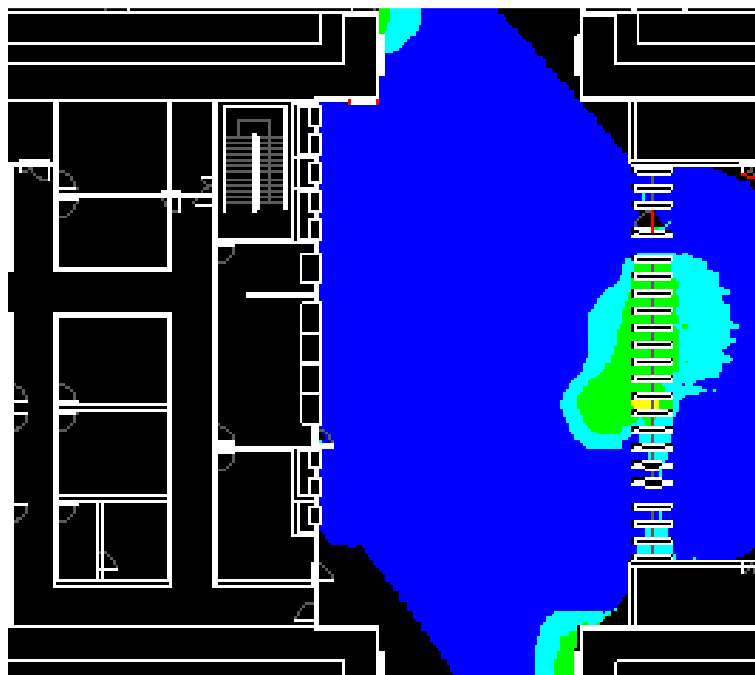


Figura 4. 61: mappa “LoS -Densità Media” moto in coda (40%) in Legion SpaceWorks.

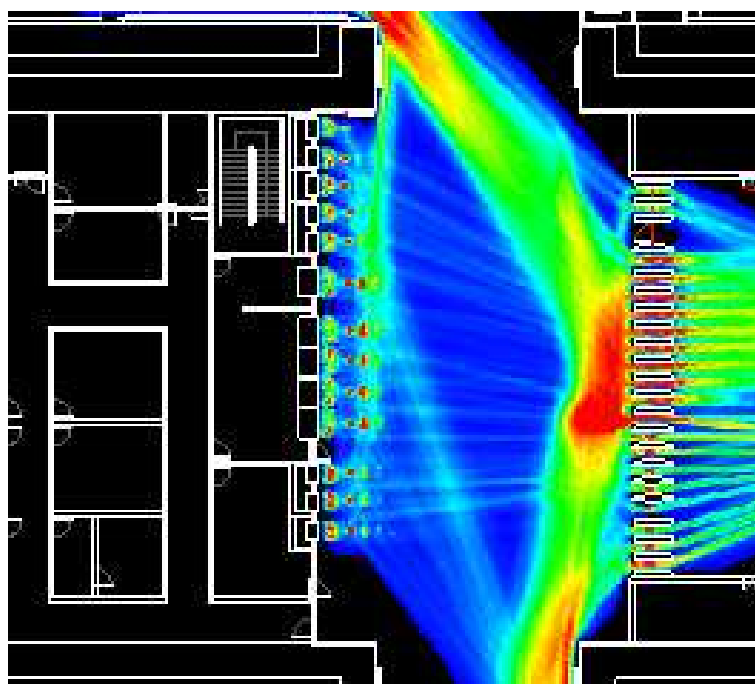


Figura 4. 62: mappa “Tempo di Occupazione” (pedoni in coda 40%) in Legion SpaceWorks.

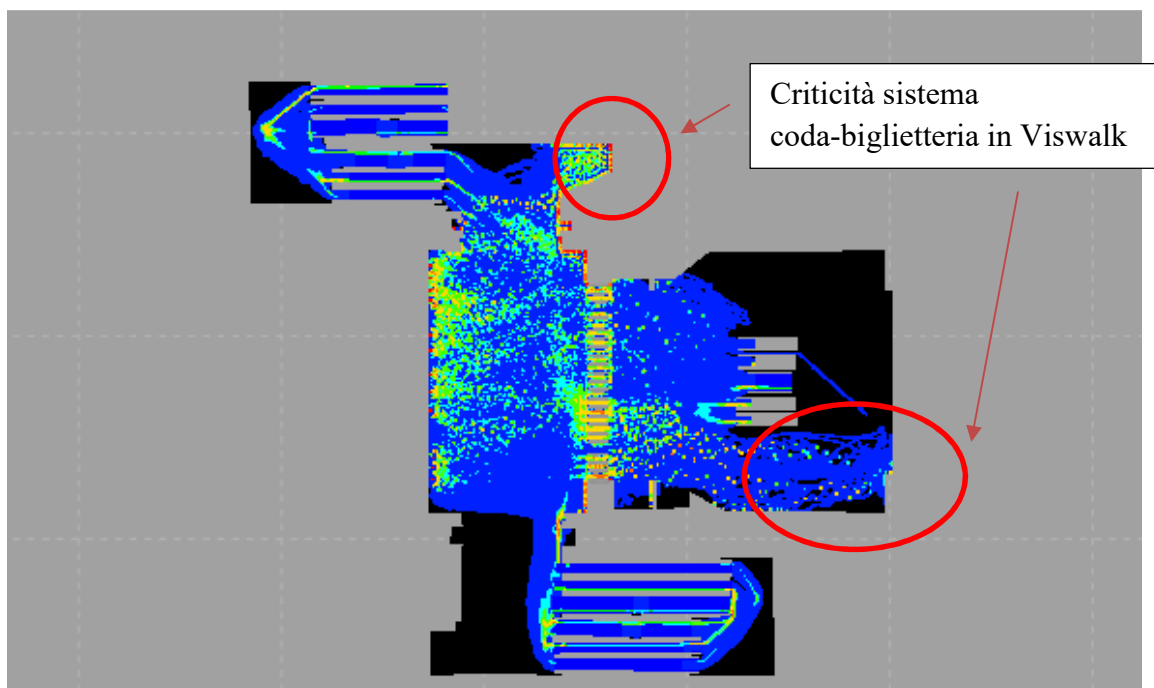


Figura 4. 63: mappa “LoS -Densità Media” moto in coda (40%) in PTV Viswalk.

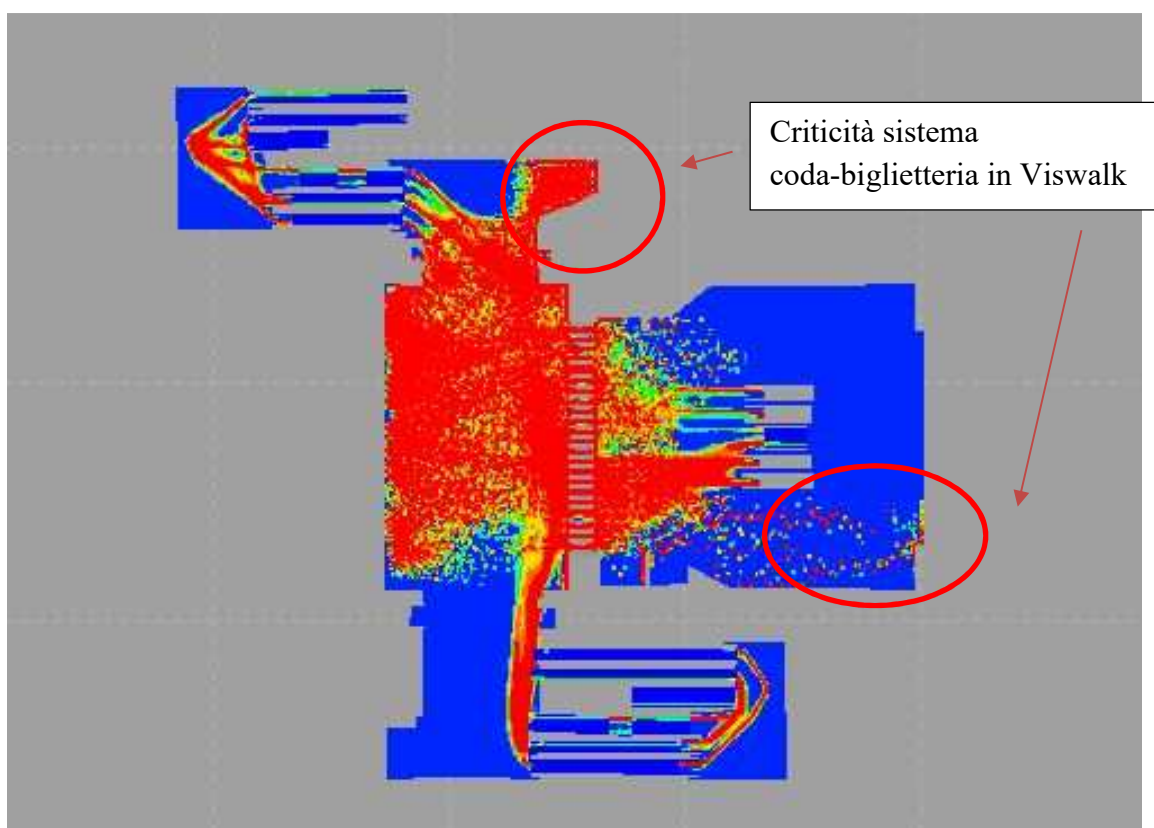


Figura 4. 64: mappa “Tempo di Occupazione” (pedoni in coda 40%) in PTV Viswalk.

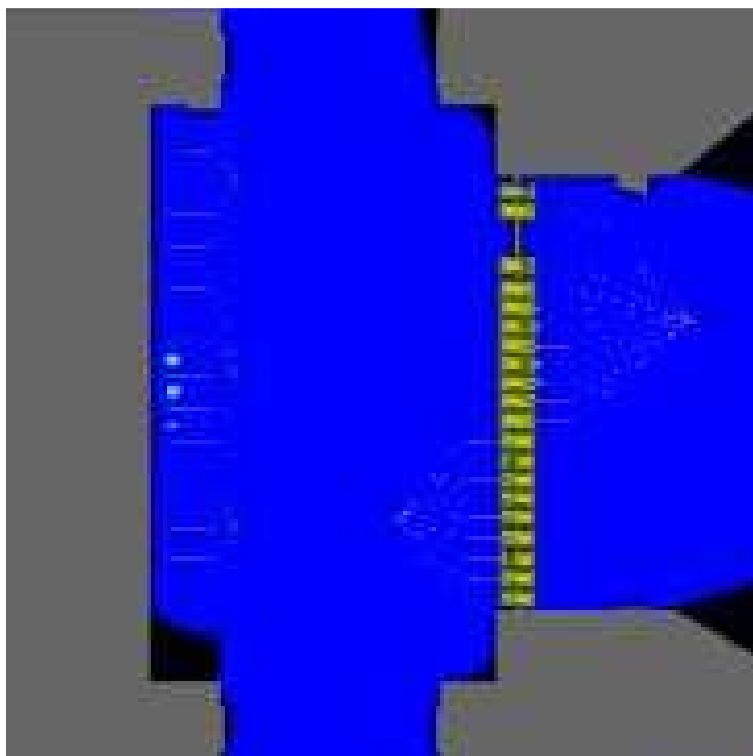


Figura 4. 65: mappa “LoS -Densità Media” moto in coda (40%) in Oasys MassMotion.

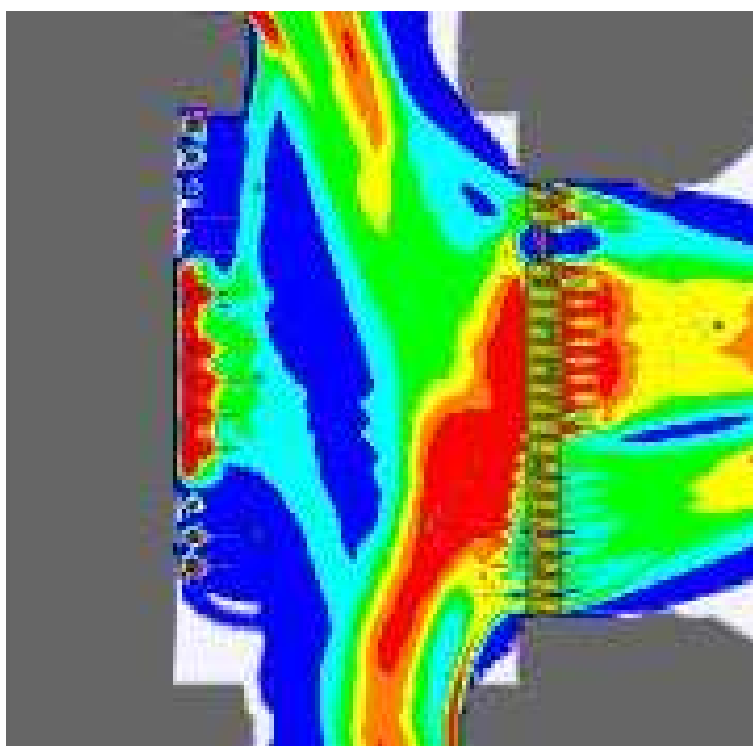


Figura 4. 66: mappa “Tempo di Occupazione” (pedoni in coda 40%) in Oasys MassMotion.

Le Figure 4.71 - 4.74 mostrano i risultati di “LoS – Densità Media” per il moto in coda e di “Tempo di Occupazione” con l’80% delle entità Boarding dirette alle biglietterie. Mancano purtroppo le immagini relative a Viswalk, in quanto i problemi affrontati nella precedente simulazione si sono, in questo caso, dimostrati “fatali”. Infatti, a causa del grande afflusso di pedoni, la vicinanza fra il “sistema biglietterie” e il “sistema tornelli” (in ingresso e in uscita) ha generato una congestione e non è stato possibile portare a termine la simulazione.

Interessante notare la differenza nella disposizione in coda fra i software Legion e MassMotion. In Legion è evidente la presenza di un grande afflusso di pedoni presso le biglietterie, sia in termini di densità (Figura 4.71) sia in termini di disposizione (in Figura 4.72 sono evidenti le impronte descritte dai pedoni in coda). Viceversa MassMotion, in questo caso, presenta un comportamento differente. Confrontando la Figura 4.73 con la Figura 4.69, non sembrano esserci differenze per quanto riguarda il LoS densità col il caso precedente (40% dei pedoni che si recano alla biglietteria). Osservando la mappa “Tempo di Occupazione” (Figura 4.74), si nota come le aree più a lungo occupate siano quelle a ridosso delle biglietterie mentre la zona centrale del Concourse Level sembra essere meno frequentata. Questo lascia presupporre un comportamento in coda piuttosto schiacciato (vista il numero elevato di entità programmate ad andare in biglietteria).

Interessante soffermarsi su come i risultati forniti da entrambi i software riportino informazioni concordanti e/o discordanti attraverso tipi di mappe concettualmente diversi. In Legion, infatti, il livello di densità “LoS C” presente nella zona centrale del Concourse Level (area compresa fra biglietterie e tornelli in Figura 4.71) trova supporto dalla disposizione in coda dei pedoni descritta dalla mappa “Time Occupied” in Figura 4.72. In MassMotion, ragionando analogamente, si dovrebbe riscontrare una complementarità analoga fra i due tipi di mappa. Tuttavia questa ipotesi non trova conferme nella Figura 4.73 poiché non viene registrata una densità elevata nelle aree adiacenti alle biglietterie. Considerando la condizione estrema di simulazione (80% di pedoni che si recano in biglietteria) i risultati di MassMotion sono da definirsi poco verosimili.

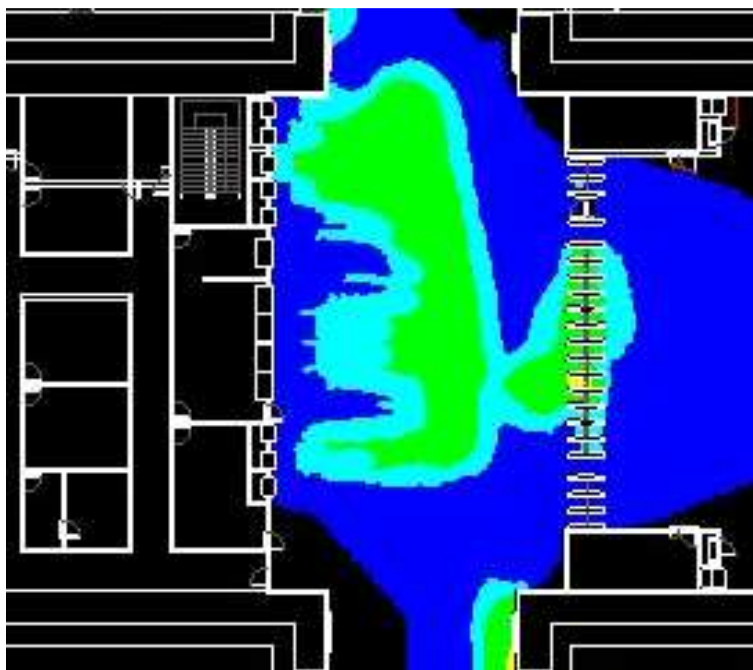


Figura 4. 67: mappa “LoS -Densità Media” moto in coda (80%) in Legion SpaceWorks.

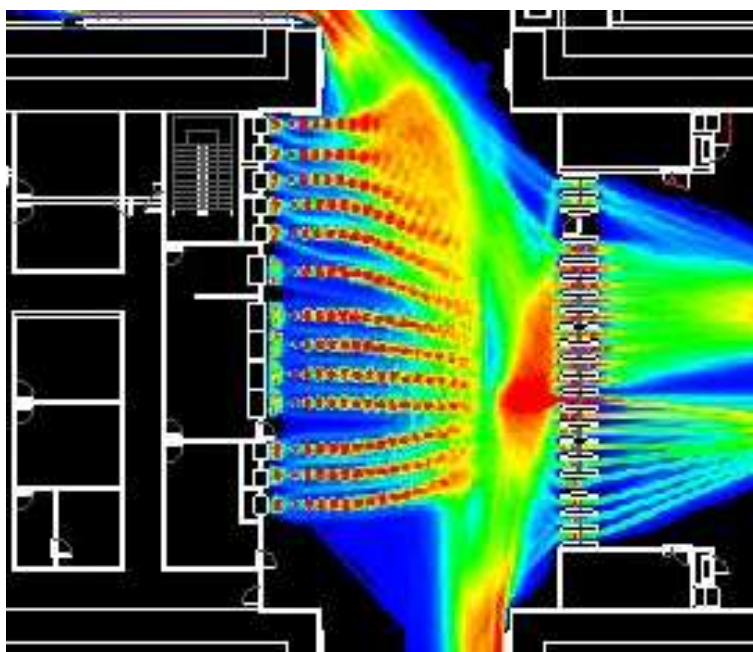


Figura 4. 68: mappa “Tempo di Occupazione” (pedoni in coda 80%) in Legion SpaceWorks.

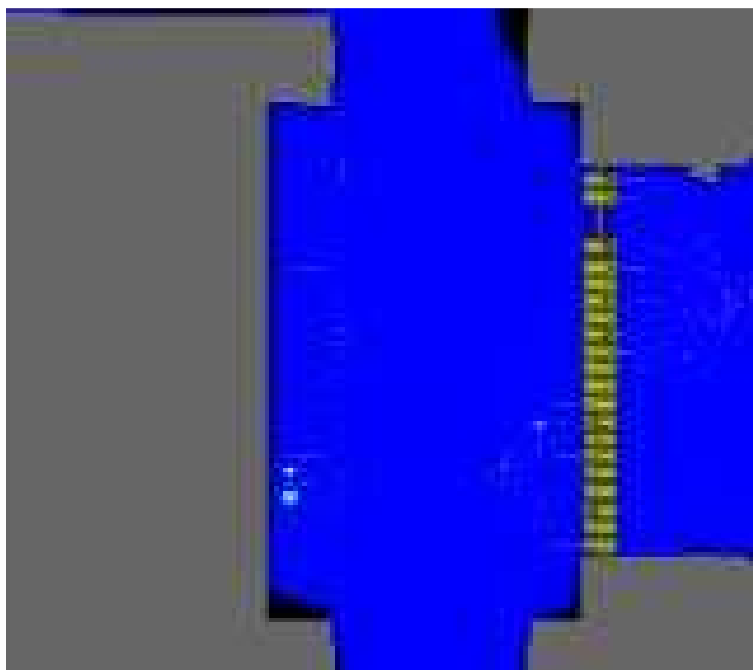


Figura 4. 69: mappa “LoS -Densità Media” moto in coda (80%) in Oasys MassMotion.

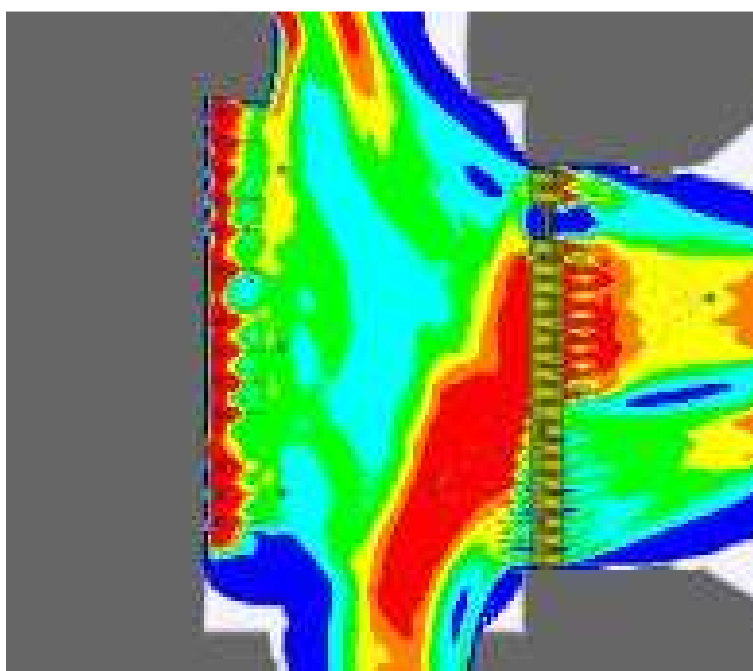


Figura 4. 70: mappa “Tempo di Occupazione” (pedoni in coda 80%) in Oasys MassMotion.

5. Analisi dei tempi di percorrenza: Viswalk e MassMotion

Al fine di effettuare un confronto fra i software non esclusivamente basato sulle osservazioni deducibili da mappe, si è deciso di analizzare i dati relativi al tempo di spostamento dei pedoni all'interno del modello. Purtroppo, per motivi legati all'estensione temporale della licenza di Legion SpaceWorks, è stato possibile condurre tale confronto solamente per i software PTV Viswalk e Oasys MassMotion.

5.1 Piano sperimentale e definizione degli scenari

Partendo dal modello base descritto nel paragrafo 4.2.1, sono stati variati gradualmente i parametri percentuali relativi all'affluenza alle biglietterie e all'utilizzo delle scale fisse (Tabella 5.1). Così facendo sono stati creati 10 scenari per entrambi i software: 5 scenari con diversa percentuale di pedoni sprovvisti di biglietto (con un 30% fisso di pedoni Boarding che preferiscono le scale fisse in direzione discendente), 5 scenari caratterizzati da una diversa percentuale di pedoni che preferiscono le scale fisse a quelle mobili (in questo frangente si è deciso di portare a 0% la percentuale di pedoni sprovvisti di biglietto).

Tabella 5.1: variazioni percentuali del modello base relative ai pedoni diretti alle biglietterie e alla scelta tra scale mobili o scale fisse.

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5
% pedoni sprovvisti di biglietto	15	20	25	30	35
% in coda agli sportelli	50	50	50	50	50
% alle biglietterie autom. Nord	25	25	25	25	25
% alle biglietterie autom. Sud	25	25	25	25	25
% pedoni su scala fissa	30	30	30	30	30
	Scenario 6	Scenario 7	Scenario 8	Scenario 9	Scenario 10
% pedoni su scala fissa	20	25	30	35	40
% pedoni sprovvisti di biglietto	0	0	0	0	0

Per velocizzare la fase di estrazione dei dati, il tempo di simulazione è stato impostato a 15 minuti e di conseguenza anche il numero di entità è stato ridotto. Per evitare poi eventuali problemi di congestione, si è scelto di inserire nel modello solamente i pedoni facenti parte della macro-classe Boarding e, per mantenere le stesse condizioni di flusso del modello base iniziale simulate nell'arco di un'ora, il numero di pedoni è stato ridotto ad 1/4 del totale. Quindi ognuno dei quattro ingressi presenti al Ground Level genererà 324 entità nel corso del quarto d'ora di simulazione.

Una volta apportate le modifiche necessarie al modello base, sono state lanciate le 10 simulazioni per ognuno dei due software.

Per ottenere le informazioni relative ai tempi di percorrenza nel software MassMotion è stata utilizzata la tabella "Table Agent Trip Time" di Figura 5.1. In essa, sotto la voce "Trip" si

selezionano le aree di partenza e di arrivo degli itinerari che si vogliono studiare. Per velocizzare l'estrazione di dati, MassMotion permette la creazione di “Collezioni”, al cui interno è possibile raggruppare tutti i portali di partenza (4 portali presenti al Ground Level) o di arrivo (5 portali per ognuna delle due direzione presenti al Platform Level), generando così un'unica tabella dati.

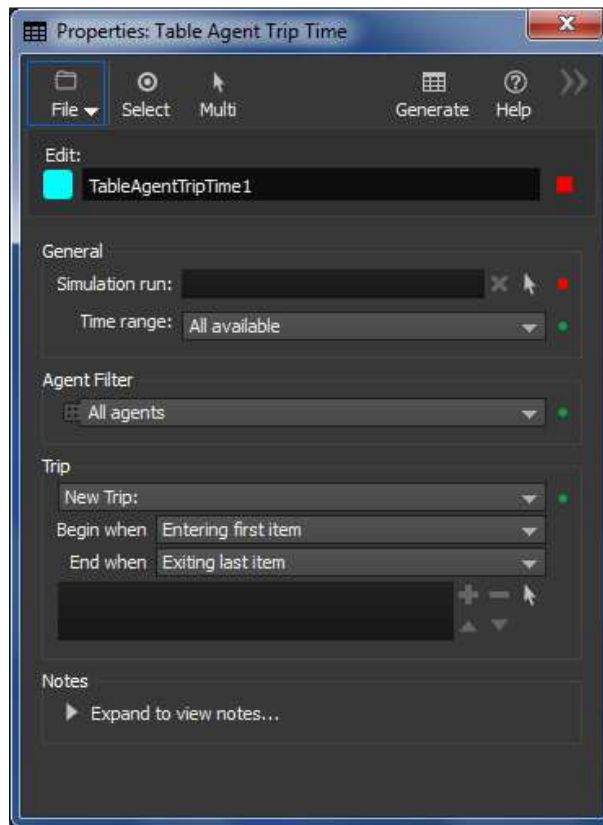


Figura 5. 1: tabella per generare il set dati dei tempi di percorrenza di ogni singola entità in Massmotion.

La tabella fornita da MassMotion è formata da 4 colonne (Tabella 5.2) le cui intestazioni si riferiscono a: ID entità, orario di partenza dal Ground Level, orario di arrivo al Platform Level e tempo effettivo di simulazione.

Tabella 5.2: esempio struttura tabella tempi di percorrenza estratta da MassMotion.

Agents	Start	End	Duration
4002	00:00:01	00:03:31	00:03:30
4001	00:00:01	00:04:12	00:04:11
4003	00:00:02	00:04:08	00:04:06
4006	00:00:04	00:03:25	00:03:21

...

...

...

...

In Viswalk, tramite le funzionalità nel menu “Evaluation” (Figura 5.2) riportate nel paragrafo 3.2.1.4.4, è possibile creare un file .txt con informazioni relative ad ogni singolo pedone. In Tabella 5.3 viene riportata la struttura del foglio .txt, nella quale è possibile notare come Viswalk metta a disposizione dell’utente un set di valori decisamente più ampio.

Tabella 5.3: esempio struttura tabella tempi di percorrenza estratta da Viswalk.

t	PedNo	TravDist	Journey time	TimeDelay	TimeGain	DevSpeed
120.4	6	157.1	115.7	7.2	1	0.78
134.5	21	149.4	116.6	12.6	0.2	0.67
135.3	9	147.8	128.1	10.6	0.3	1.88
138.5	52	152.8	97.4	6.6	0.5	0.73
...	...	...	...	...	...	...

- **t:** tempo impiegato dalla entità per raggiungere la propria area di destinazione (in secondi)
- **PedNo:** ID pedone.
- **TravDist:** distanza coperta dal pedone nel corso del suo spostamento (in metri)
- **Journey Time:** tempo effettivo speso dal pedone dalla partenza fino alla sua destinazione finale (in secondi)
- **TimeDealy:** fattore di ritardo accumulato dal pedone nel compiere il suo spostamento (in secondi)
- **TimeGain:** fattore di guadagno accumulato dal pedone nel compiere il suo spostamento (in secondi)
- **DevSpeed:** differenza fra velocità desiderata e velocità media effettiva per ogni singolo pedone (in km/h)

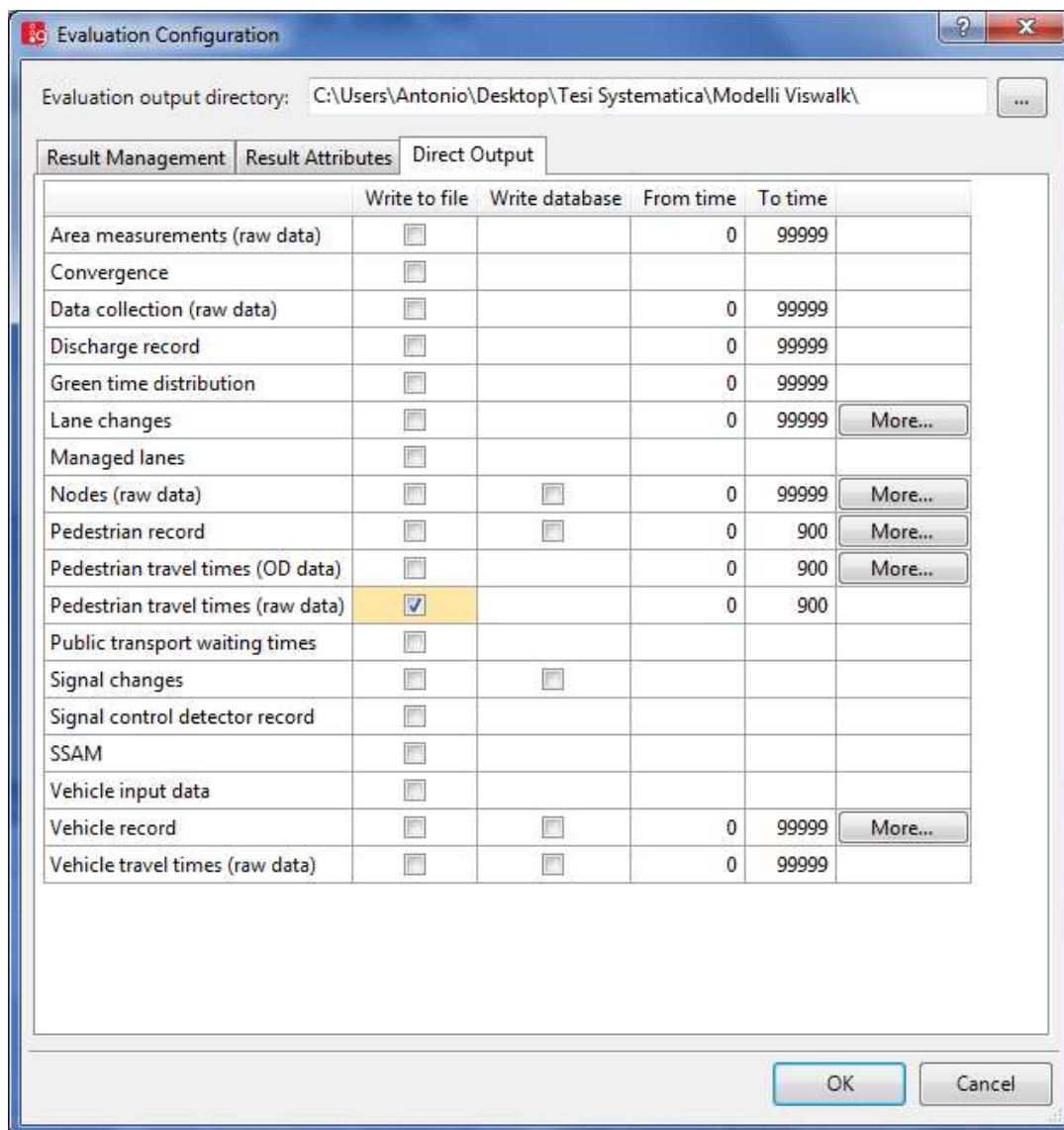


Figura 5. 2: finestra di dialogo per l'estrazione del "Pedestrian travel times raw data" in Viswalk.

5.2 Analisi dei risultati delle simulazioni

L'analisi è iniziata tramite il confronto della distribuzione dei tempi di percorrenza nei due software. A tal fine è stato creato un istogramma in modo tale da poter rappresentare visivamente le differenze nelle distribuzioni riscontrate.

Per la costruzione degli istogrammi sono state definite 27 classi di intervalli di tempo, ognuna di 20 secondi di ampiezza (Tabella 5.4).

Tabella 5.4: definizione classi per il tempo di percorrenza dei pedoni nella simulazione.

Intervallo (s)	Classe	
0	60	1
60	80	2
80	100	3
100	120	4
120	140	5
140	160	6
160	180	7
180	200	8
200	220	9
220	240	10
240	260	11
260	280	12
280	300	13
300	320	14
320	340	15
340	360	16
360	380	17
380	400	18
400	420	19
420	440	20
440	460	21
460	480	22
480	500	23
500	520	24
520	540	25
540	560	26
560	580	27

Una volta costruite le 27 classi, per ognuna di esse è stato possibile misurare la frequenza, cioè il numero di tutti i pedoni il cui tempo di percorrenza (in secondi) rientra negli estremi dell'intervallo relativo alla classe stessa. Infine sono stati ricavati i valori di media aritmetica e dello scarto quadratico medio (s.q.m.) per entrambi i software.

5.2.1 Test t di Student di uguaglianza fra i valori medi di tempo di spostamento

Prima di procedere con un confronto fra le medie dei risultati e degli istogrammi da essi derivati, si è ritenuto necessario effettuare un test di significatività delle medie. Nello specifico è stato realizzato un “test t di Student” sui valori medi dei tempi di percorrenza per ognuno dei 10 scenari introdotti nel paragrafo precedente.

Si procede quindi con un test di significatività statistica e viene inizialmente assunta una

ipotesi definita “nulla”. Secondo questa ipotesi non esiste nessuna differenza tra le due popolazioni riguardo al parametro “tempo di percorrenza” preso in considerazione. Secondo l'ipotesi nulla, dunque, il comportamento delle popolazioni dei due software è il medesimo e la differenza riscontrata fra le medie va attribuita al caso. Per decidere se l'ipotesi nulla sia vera o falsa, è necessario analizzare i dati con un test statistico. Se il test “consiglia” di rifiutare l'ipotesi nulla, allora la differenza osservata fra i due software viene dichiarata statisticamente significativa. Se invece il test “consiglia” di accettare l'ipotesi nulla, allora la differenza è statisticamente non significativa e quindi da attribuire al caso.

Il grado di significatività di solito viene scelto con un livello di probabilità (p) di 0.01 (1%) o di 0.05 (5%). La (p) rappresenta la probabilità che le differenze delle medie osservate siano dovute al caso. Quindi, ad esempio, se l'ipotesi nulla venisse respinta al livello di significatività 5%, ciò significa che si ha il 5% di probabilità di commettere un errore nel respingere l'ipotesi nulla.

Dunque, il “test t di Student” permette di valutare la probabilità che la differenza fra le medie delle due popolazioni sia dovuta al caso o meno.

In Tabella 5.5 vengono riportati i livelli di significatività ottenuti dal confronto delle due popolazioni dei due differenti software utilizzando la funzione di Excel “TEST.T”.

Tabella 5.5: risultati del “test t Student” di significatività effettuato sulle coppie elencate nel paragrafo 5.2.

Scenario	Biglietterie %	TEST.T funzione Excel	p < 0.05 (5%)	p < 0.01 (1%)
1	10	7.67724E-15	ok	ok
2	15	7.35054E-07	ok	ok
3	20	0.002822978	ok	ok
4	25	0.192364337	no	no
5	30	8.63255E-09	ok	ok
	Scale fisse %	TEST.T funzione Excel	p < 0.05 (5%)	p < 0.01 (1%)
6	20	1.465E-41	ok	ok
7	25	5.35939E-28	ok	ok
8	30	2.39641E-25	ok	ok
9	35	2.25109E-29	ok	ok
10	40	3.19711E-21	ok	ok

In tutti gli scenari di simulazione la probabilità che la differenza fra le medie sia dovuta al caso è ampiamente inferiore al rapporto uno su cento. Eccezione fatta per lo Scenario 4, dove il livello di significatività statistica si stabilizza sul 19%; in altre parole esiste il 19% di possibilità che la differenza fra le due medie sia dovuta al caso e non alle peculiarità dei software Viswalk e MassMotion. Per trovare una spiegazione a questo fenomeno, basta osservare gli istogrammi riportati in Figura 5.6. È evidente come, all'incremento di afflusso di pedoni presso le biglietterie, l'istogramma relativo al software Viswalk non riporti più una distribuzione di frequenze normale. Il test t di Student spiegato precedentemente funziona solo se utilizzano distribuzioni normali, quindi nello Scenario 4 il confronto perde di significatività.

5.2.2 Istogrammi delle frequenze e medie dei tempi di percorrenza

In Tabella 5.6 sono riportati i valori di media e scarto quadratico medio relativi ai 10 scenari di studio per i software Viswalk e MassMotion. In Tabella 5.7 invece viene riassunto il numero di pedoni che ha compiuto interamente il proprio tragitto allo scadere del quarto d'ora di simulazione.

È evidente come, in generale, Viswalk riesca a far compiere l'intero tragitto ad un numero maggiore di pedoni. Questo risultato è segno di una più alta velocità media di flusso libero, fatta eccezione per gli Scenari 4 e 5 (rispettivamente 25% e 30% di pedoni sprovvisti di biglietto) dove ad un incremento di afflusso presso le biglietterie è corrisposto un notevole calo di pedoni in grado di raggiungere la propria destinazione nel quarto d'ora.

Tabella 5.6: valori di media e di scarto quadratico medio per i tempi di percorrenza pedonale.

	Media MassMotion (s)	Media Viswalk (s)	Differenza Medie	s.q.m. MassMotion	s.q.m. Viswalk	Differenza s.q.m.
1	197.3	185.5	11.8	36.9	35.2	1.7
2	197.4	189.6	7.8	36.5	38.8	2.3
3	199.8	194.7	5.1	37.5	44.8	7.3
4	201.0	204.3	3.2	37.5	56.3	18.7
5	201.0	216.1	15.0	37.5	70.3	32.7
	Media MassMotion (s)	Media Viswalk (s)	Differenza Medie	s.q.m. MassMotion	s.q.m. Viswalk	Differenza s.q.m.
6	197.9	178.1	19.8	35.1	31.1	4.1
7	197.5	181.4	16.1	36.8	31.0	5.8
8	196.3	180.8	15.5	36.8	31.6	5.2
9	196.3	179.4	16.8	36.5	32.1	4.4
10	194.4	180.2	14.3	36.8	32.9	3.9

Tabella 5.7: numero di pedoni che hanno portato a termine il proprio tragitto nel corso della simulazione su un totale di 1296 pedoni.

Scenario	MassMotion	Viswalk
1	1004	1035
2	1004	1029
3	1004	1020
4	1001	996
5	1001	970
6	1004	1039
7	1001	1039
8	1009	1037
9	1008	1042
10	1008	1044

Osservando la Tabella 5.6, si possono effettuare considerazioni generali sui tempi di percorrenza medi ottenuti dai software. Come facilmente prevedibile, al crescere del numero di pedoni presso il sistema-biglietterie (Scenari 1-5), si riscontra sia per Viswalk sia per MassMotion un generale incremento del tempo di percorrenza medio. Il trend è dunque di crescita in termini di tempo per entrambi i software, tuttavia varia notevolmente l'entità di tale crescita: la discrepanza fra i due valori estremi in MassMotion è di 3 secondi, quella in Viswalk è all'incirca di mezzo minuto. Dunque Viswalk si dimostra certamente più sensibile per quanto riguarda il comportamento in coda alle biglietterie. Come controprova, applicando lo stesso procedimento di giudizio sui dati relativi ai Scenari 6-10, che non comprendono la simulazione delle biglietterie, le differenze fra i valori estremi delle medie rientrano nell'ordine dei 2/3 secondi per entrambi i software.

Per quanto riguarda i valori delle medie ottenuti nei Scenari 6 -10, MassMotion presenta un leggero calo dei tempi di percorrenza qualora la percentuale dei pedoni su scala fissa aumentasse. Sebbene questo risultato possa sembrare poco veritiero, si devono tenere in considerazione due aspetti fondamentali: il moto discendente della macro-classe Boarding che si sta simulando e la disposizione geometrica delle rampe di scale. Infatti, come anche confermato da osservazioni dirette sulla simulazione, la velocità dei pedoni in spostamento discendente sulle cale fisse e sulle scale mobili è decisamente paragonabile; preso atto di questo fattore, il collocamento delle scale fisse acquisisce un ruolo fondamentale. Esse, infatti, sono spesso collocate in posizioni "favorevoli" all'interno delle geometrie della stazione e permettono ai pedoni che vi transitano di compiere un percorso totale più breve in metratura. Lo stesso discorso, invece, non è valido per quanto riguarda Viswalk, le medie riportate in Tabella 5.6 mostrano un oscillamento della media attorno al valore di 180 secondi e non sembra esserci un'influenza così marcata dovuta alla percentuale di scelta scale fisse – scale mobili.

Nelle Figure 5.3 – 5.12 sono riportati gli istogrammi derivati dalla classificazione dei risultati dei tempi di percorrenza per i software Viswalk e MassMotion. Nello specifico, le Figure 5.3 – 5.7 si riferiscono alle simulazioni specifiche per l'affluenza alle biglietterie, le Figure 5.8 – 5.12 a quelle specifiche per la scelta di utilizzo delle scale fisse.

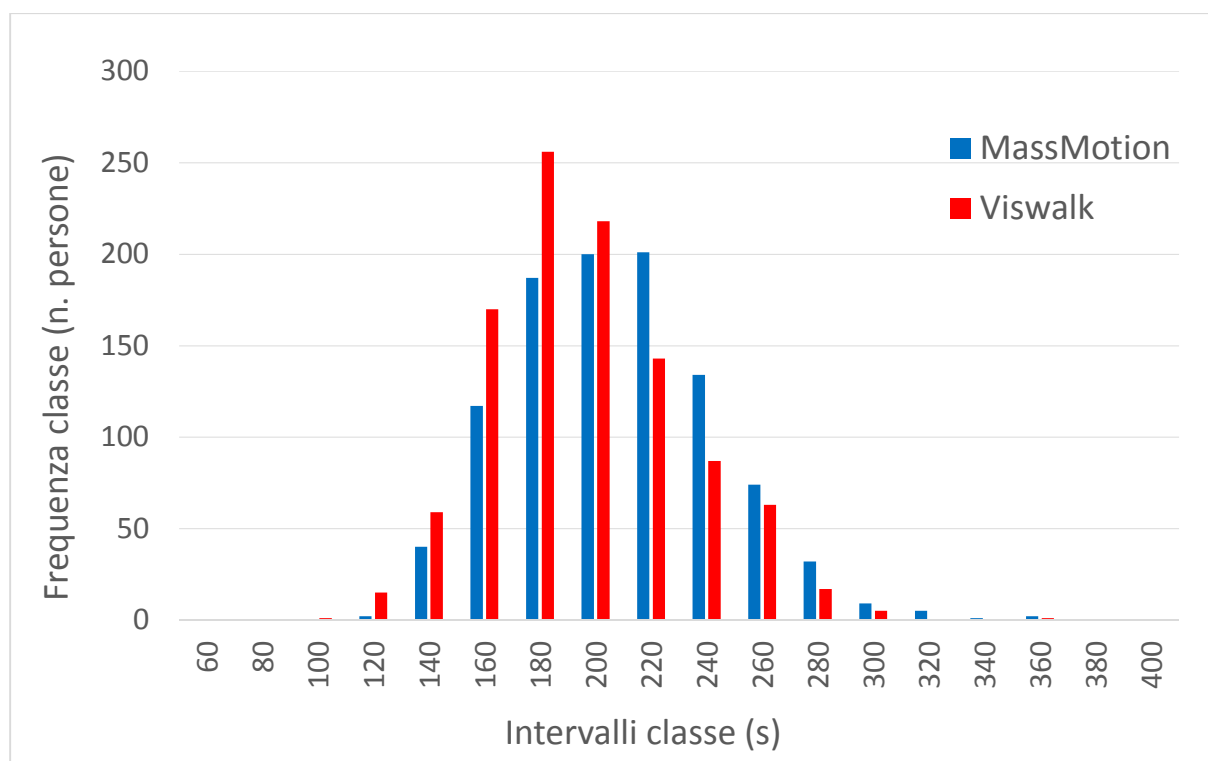


Figura 5. 3: istogrammi relativi allo Scenario 1, il 10% di pedoni è sprovvisto di biglietto.

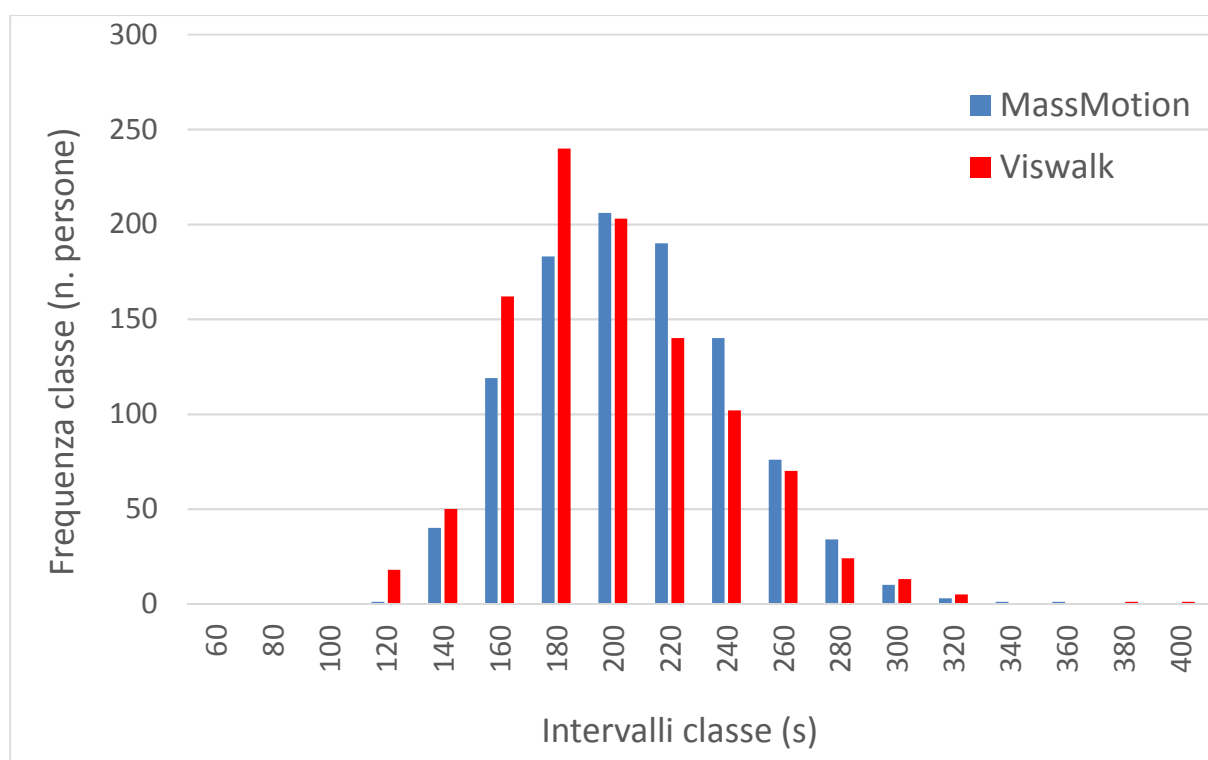


Figura 5. 4: istogrammi relativi allo Scenario 2, il 15% di pedoni è sprovvisto di biglietto.

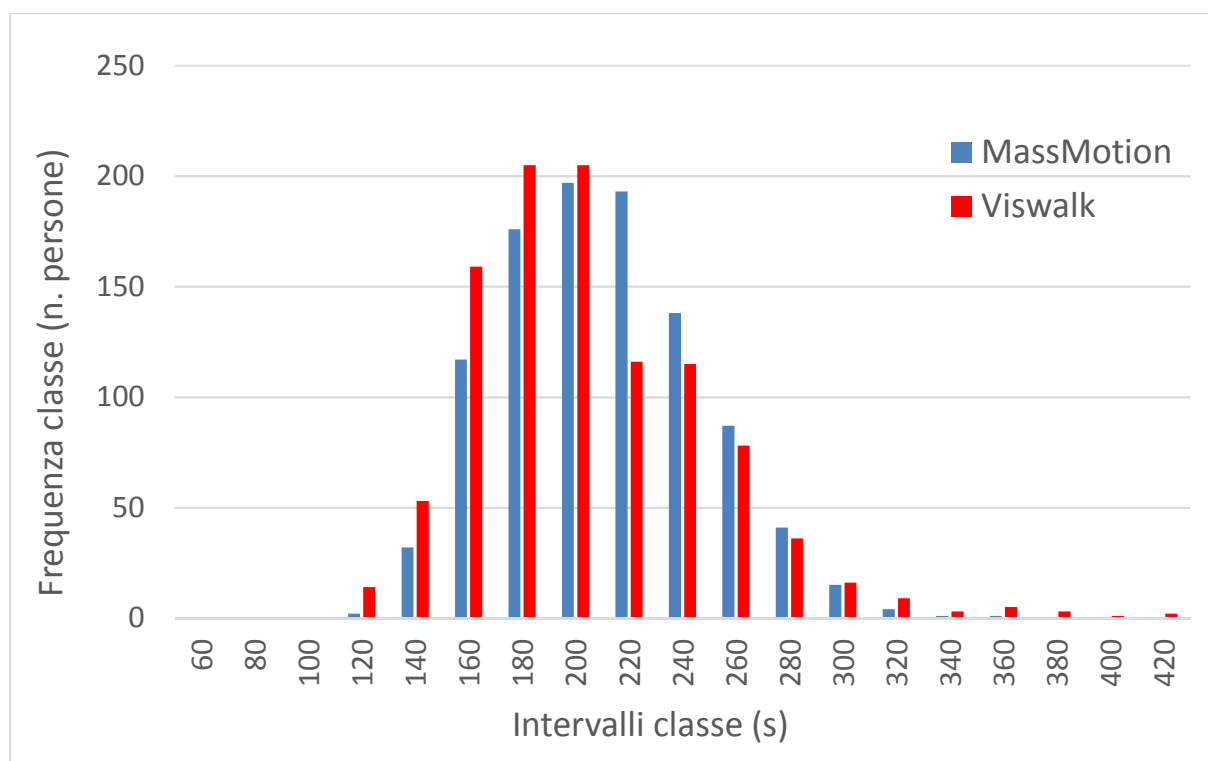


Figura 5. 5: istogrammi relativi allo Scenario 3, il 20% di pedoni è sprovvisto di biglietto.

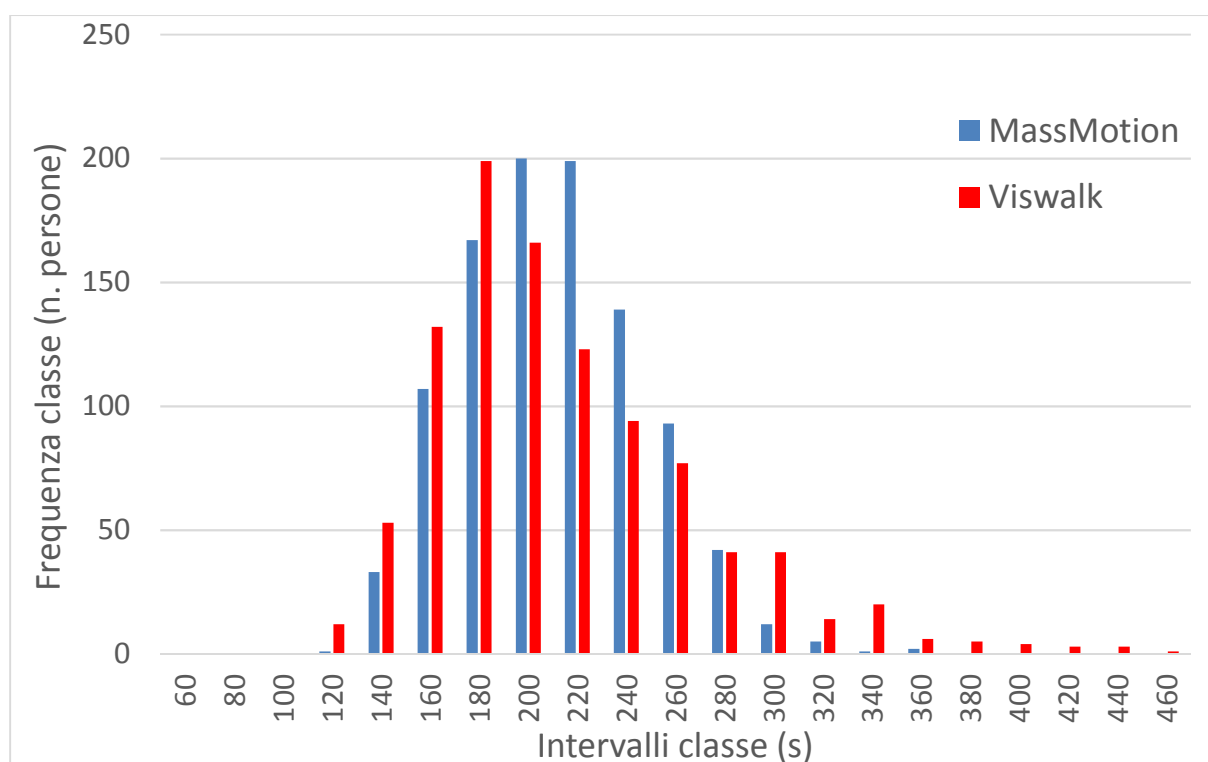


Figura 5. 6: istogrammi relativi allo Scenario 4, il 25% di pedoni è sprovvisto di biglietto.

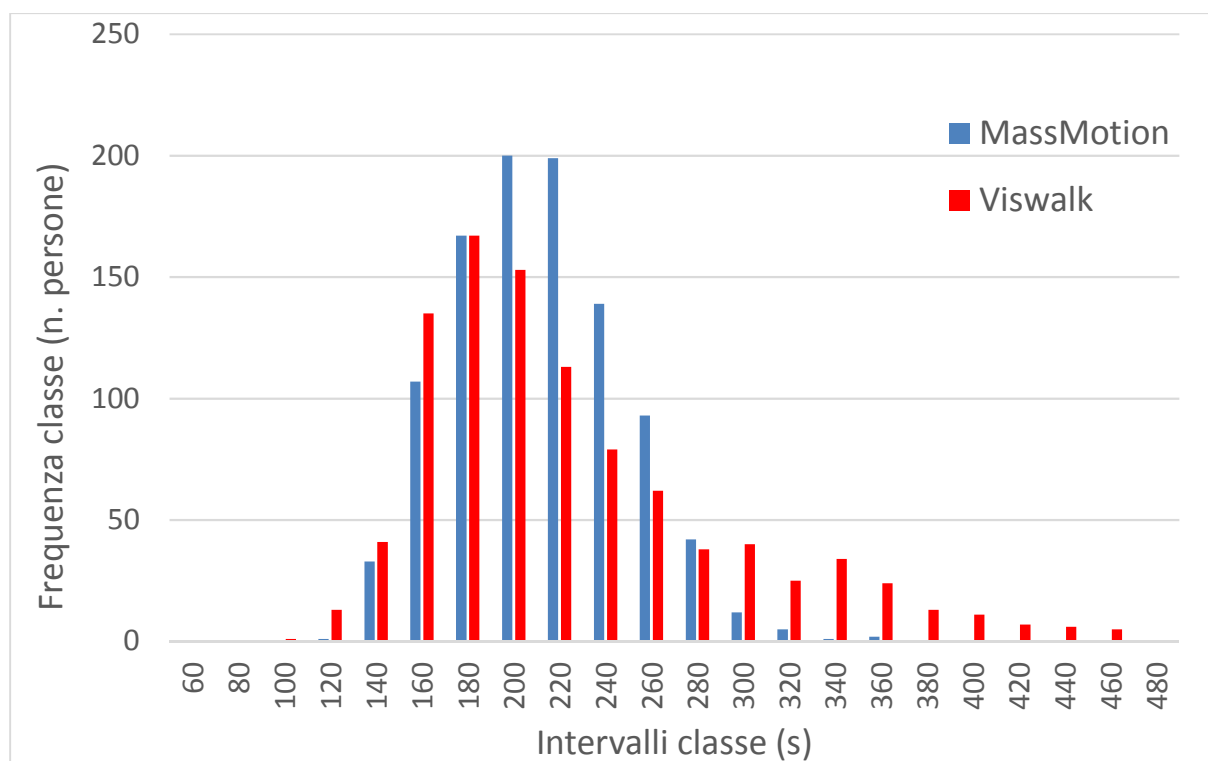


Figura 5. 7: istogrammi relativi allo Scenario 5, il 30% di pedoni è sprovvisto di biglietto.

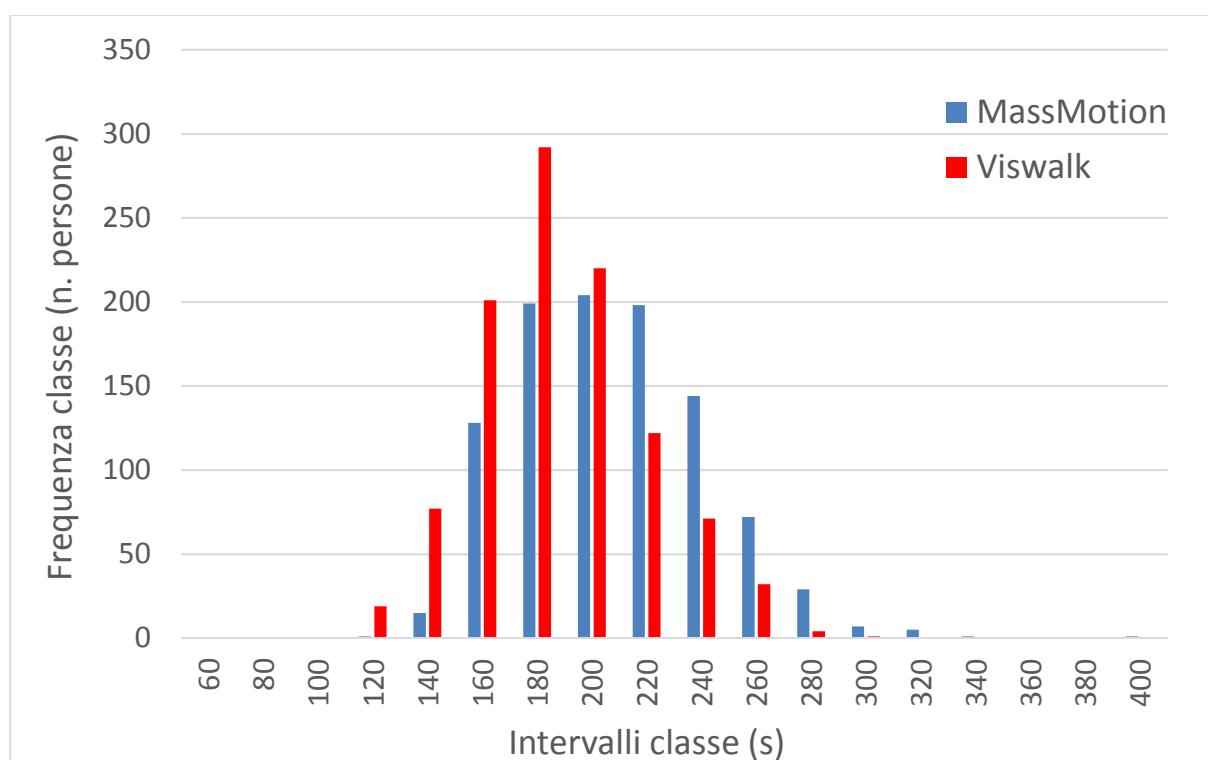


Figura 5. 8: istogrammi relativi allo Scenario 6, il 20% di pedoni sceglie le scale fisse.

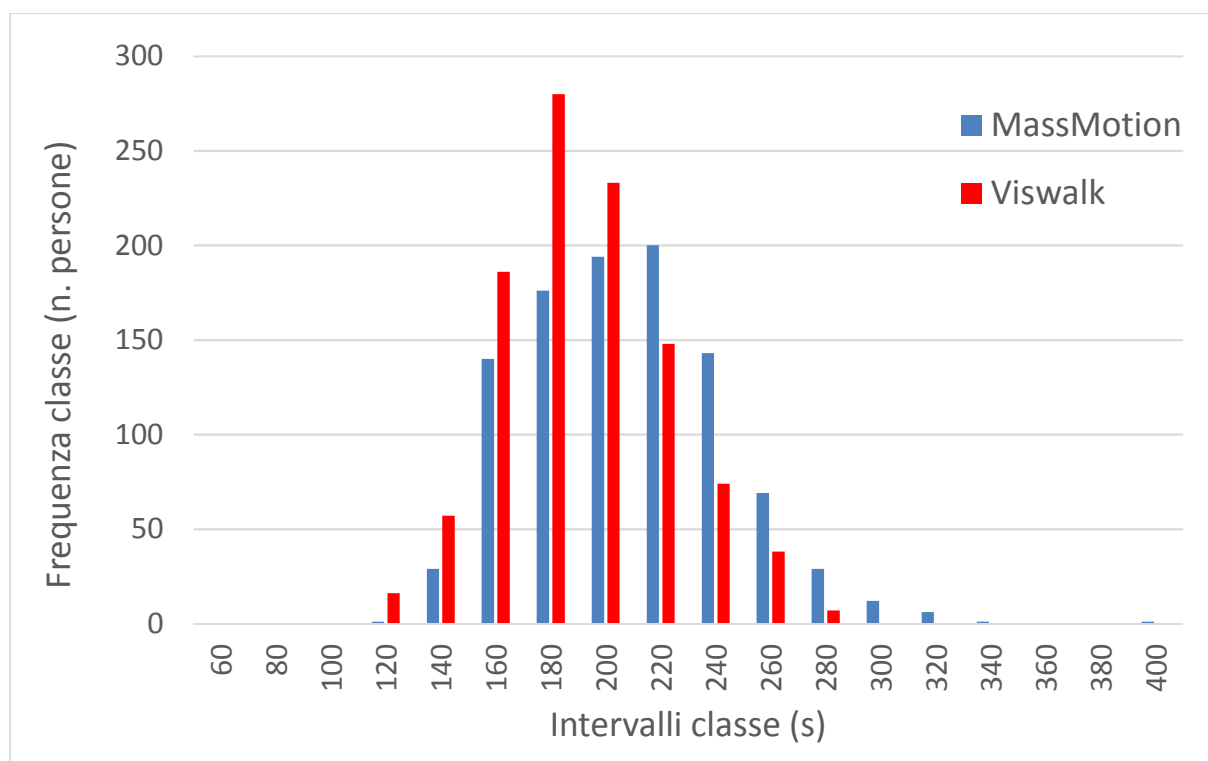


Figura 5. 9: istogrammi relativi allo Scenario 7, il 25% di pedoni sceglie le scale fisse.

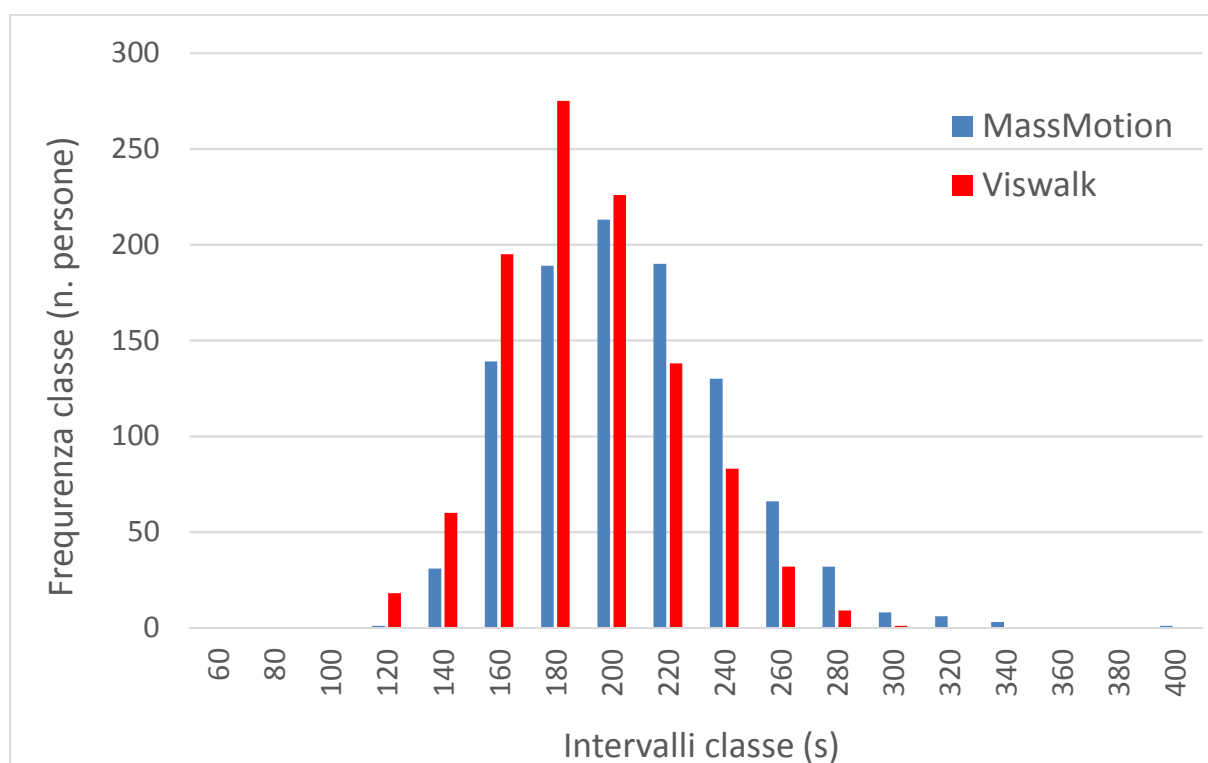


Figura 5. 10: istogrammi relativi allo Scenario 8, il 30% di pedoni sceglie le scale fisse.

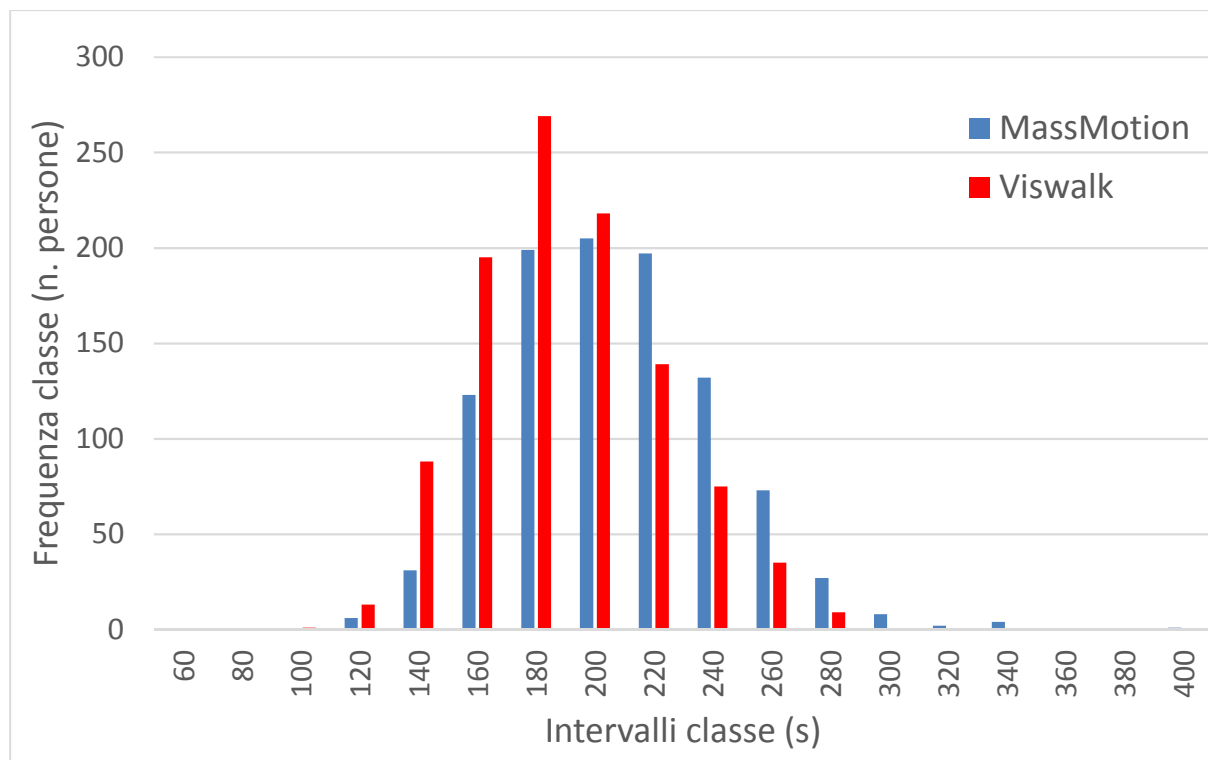


Figura 5. 11: istogrammi relativi allo Scenario 9, il 35% di pedoni sceglie le scale fisse.

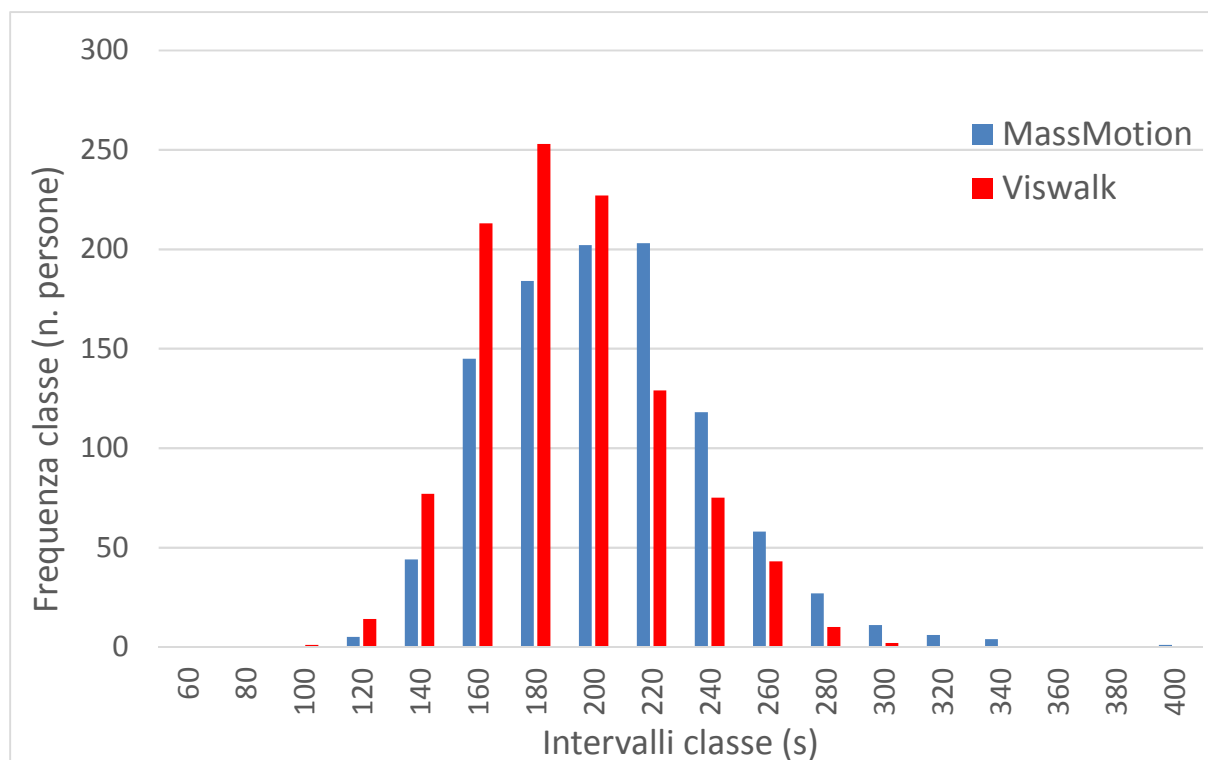


Figura 5. 12: istogrammi relativi allo Scenario 10, il 40% di pedoni sceglie le scale fisse.

Dall'osservazione degli istogrammi sopra riportati è possibile interpretare i valori dello scarto quadratico medio presenti in Tabella 5.6. Dalle Figure 5.3 - 5.7, relative agli Scenari 1-5, si nota come MassMotion (colore blu) tenda a conservare una distribuzione di frequenze di tipo normale per gli intervalli di classe: non sembra risentire in particolar modo dell'aumento di affluenza pedonale alle biglietterie, ipotesi rafforzata dalla costanza del valore dello scarto quadratico medio ($\sigma = 36$ stabile). Viceversa Viswalk (colore rosso) si dimostra nuovamente sofferente all'incremento dei pedoni sprovvisti di biglietto; osservando gli istogrammi in figura 5.3 - 5.7, infatti, si nota una graduale dispersione di dati. In altre parole, arrivati allo Scenario 5 (30% di pedoni simulati alle biglietterie) la coda destra dell'istogramma del software PTV si discosta sensibilmente da quello di MassMotion, riportando una maggiore frequenza per le classi di tempo maggiori (sopra ai 300 secondi). Questa deduzione visiva è supportata dalla crescita del valore di scarto quadratico medio (da $\sigma = 35.16$ per lo Scenario 1 a $\sigma = 70.27$ per lo Scenario 5).

Se si esclude il comportamento in coda alle biglietterie, come accade nelle Figure 5.8 - 5.12 relative agli Scenari 6-10, le distribuzioni delle frequenze nei due software rimangono simili, anche nel caso di aumento di entità che transitano sulle scale fisse. Sia in Viswalk sia in MassMotion il tasso di utilizzo delle scale fisse in direzione discendente non sembra influire sui risultati medi dei tempi di percorrenza né sui valori di scarto quadratico medio in Tabella 5.6, che rimangono costanti nei 5 scenari presi in esame.

La differenza fra i valori dello scarto quadratico medio nei due software è minima (in MassMotion $\sigma \approx 36$ secondi, in Viswalk $\sigma \approx 31$ secondi). Il valore dello scarto quadratico medio più basso in Viswalk viene supportato dall'osservazione degli istogrammi presenti nelle Figure 5.8 - 5.12: difatti la distribuzione delle frequenze di MassMotion, confrontata con quella di Viswalk, presenta una campana leggermente più bassa e "allargata". Questa lieve differenza fra i due software potrebbe essere imputata alla differente distribuzione di velocità assegnata dai software a ciascun pedone.

6. Conclusioni

Alla luce dello studio del funzionamento dei tre software e dei risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate, si riportano alcune osservazioni e considerazioni finali.

Mass Motion è certamente il software con l'interfaccia più chiara e permette una progettazione della simulazione più rapida e a tratti "divertente". L'inserimento delle geometrie del modello è ben studiato se si ha a disposizione un file input tridimensionale; viceversa, in caso di geometrie complicate, la costruzione 3D del modello costituisce a tutti gli effetti una fase preliminare di lavoro che richiede un'ingente quantità di tempo.

Alla luce degli "stress test" effettuati nel paragrafo 4.2.3 è stato rilevato un errore nel procedimento logico if/then/else che governa la simulazione dei pedoni provvisti/sprovvisi di biglietto. Infatti è stato necessario invertire l'ordine dei comandi nel momento in cui la percentuale dei pedoni diretti alle biglietterie ha superato quella dei pedoni in possesso del Token-biglietto. Se non si effettua questa correzione e si lascia invariata l'impostazione logica precedente (cambiano quindi solo i valori percentuali), il software cancella dalla simulazione alcune entità. Infatti accade che alcuni pedoni, non ricevendo istruzioni idonee dall'algoritmo, si fermano e non riescono più a proseguire nel loro itinerario: se ciò avviene ai piedi di una rampa di scale, il sistema raggiunge presto la congestione. Tutto ciò non accade se si attua una semplice riorganizzazione del procedimento logico if/then/else. In sostanza, la percentuale maggiore deve sempre essere comandata dall'istruzione logica "if", quella minore dall'istruzione logica "else". Ovviamente questa riorganizzazione di sintassi comporta una necessaria rivalutazione del comando impartito dal costrutto logico "then".

A differenza di Legion e Viswalk, la simulazione in MassMotion è più controllata. Una volta premuto il tasto "Play" avviene una elaborazione dei dati che, essendo off screen, risulta estremamente rapida. Successivamente è possibile governare il tempo (pausa, stop, fast forward, ecc.) a proprio piacimento, osservando i pedoni e i punti di interesse del modello. Ciò rappresenta un grosso vantaggio, dal punto di vista dell'organizzazione dei tempi di lavoro, poiché permette al progettista di dedicarsi ad altro dopo il lancio della simulazione; terminata la quale, si possono facilmente localizzare eventuali errori e decidere come correggerli, osservando la registrazione passo dopo passo. In Viswalk, invece, la simulazione è piuttosto lenta e bisogna rimanere concentrati sui movimenti delle entità per capire quali pedoni o quali eventualità conducono a congestioni indesiderate. Legion, infine, funziona come Viswalk, con la differenza che per visualizzare nuovamente la simulazione è necessario aprire l'applicazione Legion Analyser.

Possibili migliorie da apportare al software riguardano la modellazione del comportamento di attesa dei pedoni, settore in cui MassMotion si è dimostrato meno efficiente confrontato con Legion e Viswalk. Una sfida stimolante potrebbe essere rappresentata dall'introduzione di una componente inter-modale (veicoli/pedoni) più consistente: questa evoluzione permetterebbe un confronto più completo fra i software, in quanto sia Legion (tramite modulo aggiuntivo a pagamento) sia Viswalk (facendo parte del pacchetto PTV Vissim) forniscono già tale opportunità.

Viswalk ha manifestato un comportamento delle entità su scala e nei restringimenti decisamente migliorabile. A volte, osservando il movimento dei pedoni durante la simulazione, si ha l'impressione che i dettami del Social Force Model non vengano rispettati rigorosamente. Spesso, infatti, le diverse congestioni avvenute durante le simulazioni sono scaturite da urti avvenuti fra le entità e gli ostacoli o dall'interazione con altri pedoni.

Per quanto riguarda l'approccio all'elemento scala, quasi sempre è stato necessario l'utilizzo di aree fittizie per evitare blocchi a valle o a monte delle scale, costringendo i pedoni ad allargare il proprio tragitto (come detto nel paragrafo 4.2.1.4). Tuttavia questa soluzione, consigliata anche dall'ufficio italiano di assistenza tecnica PTV, non risolve definitivamente il problema. Infatti spesso si è verificato il caso di pedoni che, urtando la balaustra di una scala mobile, vengono trascinati al suo interno da chi sopraggiunge (paragrafo 4.2.1.2). Una soluzione a questo problema potrebbe essere l'inserimento di un comando che annulli le destinazioni intermedie, nel caso in cui il pedone venisse "catturato" dalle scale mobili. Questa funzione è già presente in Legion e MassMotion.

A causa della tendenza dei pedoni a compiere tragitti aderenti al muro e all'evidente difficoltà di districarsi in caso di elevata densità, in alcuni frangenti è stato necessario addirittura allargare i restringimenti definiti dalle geometrie del modello, al fine di portare a termine una simulazione soddisfacente.

Manca un comando diretto per la mappa "Tempo di Occupazione", che si ottiene tramite l'attributo "Speed - duration exceeding threshold", funzione inserita recentemente nelle ultime versioni del programma. La definizione delle mappe output è più criptica rispetto agli altri due software. Mentre Legion e MassMotion forniscono un elenco di heat-maps già interamente preimpostate, Viswalk permette al progettista di creare e interagire con un'ampia gamma di risultati. Tuttavia questa libertà di realizzazione comporta una difficoltà nella individuazione dell'attributo da scegliere per ottenere i risultati desiderati. Infatti, al di fuori dei range LoS, mancano indicazioni riguardo le unità di misura prese in considerazione dall'attributo specifico che è stato scelto.

Alla luce delle analisi condotte nel capitolo 5, in Viswalk si segnala una consistente influenza del comportamento in coda sul tempo totale di percorrenza del modello. Viceversa MassMotion non sembra risentire particolarmente di un effettivo aumento di pedoni presso le biglietterie durante la simulazione. Oltre che dai dati riportati nel capitolo 5, questo risultato è evidente anche se si osservano direttamente le simulazioni: MassMotion gestisce le code di pedoni in maniera decisamente più fluida.

Per quanto riguarda, invece, l'influenza della scelta scale fisse – scale mobili, i software si comportano in maniera piuttosto raffrontabile.

Infine, è emerso come Viswalk presenti una dispersione di dati generalmente maggiore. Ciò può essere dovuto ad una maggiore velocità di flusso libero dei pedoni (per la dispersione mostrata nella coda sinistra degli istogrammi), ma anche da eventuali comportamenti di incertezza avvenuti sugli "elementi scala" (per la dispersione mostrata nella coda destra degli istogrammi).

Viswalk è certamente il software più complesso dei tre e l'impressione è quella che il suo utilizzo sia raccomandato principalmente ad utenti che abbiano all'attivo ore di pratica sul software PTV Vissim e quindi abituati al modo di operare di PTV.

Rispetto a Legion e MassMotion, Viswalk propone una migliore disposizione dei pedoni in

attesa del trasporto pubblico. Più in generale, il software primeggia per la gestione dei pedoni in entrata e in uscita dal convoglio metropolitano, confermando una spiccata predisposizione alla simulazione inter-modale.

Legion si è dimostrato il software con più solidità a livello globale. Le prime fasi di apprendimento all'uso del programma risultano lente e poco immediate. Una volta abituati, però, alla logica del funzionamento bi-dimensionale, il software si presenta fluido e la costruzione del modello è piuttosto intuitiva.

Legion ha riportato risultati più verosimili e coerenti, come anche dimostrato dalle prove di fatica effettuate. Nessun problema di simulazione e/o di programmazione è scaturito al momento della variazione delle percentuali per la realizzazione degli “stress test”.

Tuttavia, il copyright al quale sono soggetti algoritmo e classi pedonali rende l'esperienza di lavoro incompleta. Durante l'utilizzo del software si devono accettare le condizioni stabilite da Legion e non vi è alcuna possibilità di interazione con esse. Risulta, quindi, un software a scatola chiusa.

L'esperienza d'uso è rallentata dalla combinazione delle diverse applicazioni a disposizione (Model Builder, Simulator e Analyser) e risulta quindi troppo frammentata. La casa Legion fornisce, previo pagamento, due ulteriori applicazioni: la prima permette la visualizzazione del modello pedonale in 3D (Legion 3D), la seconda consente la simulazione inter-modale veicoli/pedoni (Legion for Aimsun). L'utilizzo di tali applicazioni permetterebbe una comparazione fra i tre software, in particolar modo con Vissim/Viswalk, decisamente più esaustiva. Infatti alcuni dei risultati più soddisfacenti di Legion SpaceWorks sono certamente frutto della sua “leggerezza”, che scaturisce dalla frammentazione delle utilità messe a disposizione dalla casa Legion. Sarebbe interessante poter valutare il software con test più probanti, quali la modellazione 3D e la simulazione inter-modale.

Bibliografia

- Al-Gadhi, S., & Mahmassani, H. (1990). Modelling crowd behavior and movement: application to Makkah pilgrimage. In M. Koshi, *Transportation and Traffic Theory: Proceedings of the Eleventh International Symposium on Transportation and Traffic Theory*. Yokohama.
- Asadi-Shekari, Z., Moeinaddini, M., & Shah, M. (2013). Non-motorised Level of Service: Addressing Challenges in Pedestrian and Bicycle Level of Service. *Transport Review: A Transnational Transdisciplinary Journal* Vol.33, p. 166-194.
- Bandini, S., Mondini, M., & Vizzari, G. (2014). Modelling negative interactions among pedestrians in high density situation. *Transportation Research Part C*, p. 251-270.
- Bierlaire, M., Antonini, G., & Weber, M. (2003). Behavioral dynamics for pedestrians. *10th International Conference on Travel Behavior Research Lucerne*.
- Blue, V., & Adler, J. (2000). Modelling four-directional pedestrian flows. *Transportation Research*.
- Blue, V., & Adler, J. (2001). Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways. *Transportation Research Part B* 35, p. 293-312.
- Bonabeau, E. (2007). Agent-based modelling: methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, p. 7280-7287.
- Burstedde, (2001). Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. *Physica A*(507-525), p. 507-525.
- Burstedde, C., Klauck, K., Schadschneider, A., & Zittartz, J. (2001). Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. *Physica A* 295, p. 507-525.
- Buzna, L. (2004). THE PEDESTRIAN FLOWS - EMPIRICAL ANALYSIS AND SIMULATION MODELS. *Journal of Information, Control and Management Systems*, 2.
- Caramuta, C., Collodel, G., Giacomini, C., Gruden, C., Longo, G., & Piccolotto, P. (2017). Survey of detection techniques, mathematical models and simulation software in pedestrian dynamics. *Transportation Research Procedia, Volume 25*, p. 551-567.
- Chalmet, L., Francis, R., & Saunders, P. (1982). Network models for buildings evacuation. *Management Scienze* 28, p. 86-105.
- Chen, X., Li, H., Miao, J., Jiang, S., & Jiang, X. (2017). A multiagent-based model for pedestrian simulation in subway stations. *Simulation Modelling Practice and Theory* 71, p. 134-148.

- Chen, Y., Chen, N., Wang, Y., Wang, Z., & Feng, G. (2015). Modeling pedestrian behaviors under attracting incidents using cellular automata. *Physica A* 432, p. 287-300.
- Colombo, R., Goatin, P., Maternini, G., & Rosini, M. (2010). Macroscopic Models for Pedestrian Flows. *Big events and transport : the transportation requirements for the management of large scale events*.
- Crisalli, U. (2010). Teoria del deflusso pedonale. Roma, Lazio, Italia.
- Deffuant, G., Neau, D., Amblard, F., & Weisbuch, G. (2000). Mixing beliefs among interacting agents. *Advances in Complex Systems*, p. 87-98.
- Degond, P., & Hua, J. (2013). Self-Organized Hydrodynamics with congestion and path formation in crowds. *Journal of Computational Physics*.
- Dijkstra, J., Jessurun, J., & Timmermans, H. (2001). A Multi-Agent Cellular Automata Model of Pedestrian Movement. In M. Schreckenberg, & S. Sharma, *Pedestrian and Evacuation Dynamics* (p. 173-181). Berlin: Springer-Verlag.
- Dijkstra, J., Timmermans, H., & Jessurun, A. (2000). A Multi-Agent Cellular Automata System for Visualising Simulated Pedestrian Activity. *Theoretical and Practical Issues on Cellular Automata, Proceedings of the Fourth International Conference on Cellular Automata for Research and Industry*. Karlsruhe.
- Duvies, D., Daamen, W., & Hoogendoorn, S. (2013). State-of-the-art crowd motion simulation models. *Transportation Research Part C*, p. 193-209.
- Erkan, I., & Hastemoglu, H. (2016). Analyzing Level of Service Through Anthropometric Scale and Its Contribution to Transportation Engineering. *International Journal of Civil Engineering Vol. 14*, p. 585-593.
- Fruin, J. J. (1971). *Planning and design*. New York.
- Gilbert, N. (2007). *Agent-Based Models*. Tratto da Sage Publications: London: <https://uk.sagepub.com/en-gb/eur/home>
- Gipps, P. G., & Marksjo, B. (1985). A micro-simulation model for pedestrian flows. *Mathematics and Computers in Simulation*(95-105).
- Hankin, B., & Wright, R. (1958, Giugno 2). Passenger flow in subways. *Operational Research Quarterly*, p. 81-88.
- HCM 2010 : Highway Capacity Manual. (2010). *Transportation Research Board*.
- Heidemann, D. (1997). Queueing at unsignalized intersections. *Transport Research B Vol. 31*, p. 239-263.

- Helbing, D., Farkas, I. J., Molnàr, P., & Vicsek, T. (2002). Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. In *Pedestrian and Evacuation Dynamics* (p. 21-58). Schreckenberg, M. and Sharma, S. D.
- Helbing, D. (1992). Model for pedestrian behavior. p. 93-98.
- Helbing, D. (1998). *A Fluid Dynamic Model for the Movement of Pedestrians*. Tratto da <https://arxiv.org/pdf/cond-mat/9805213.pdf>
- Helbing, D., & Molnàr, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Phys.Rev. E*.
- Helbing, D., Farkas, I. J., Molnàr, P., & Vicsek, T. (2002). Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situation. In S. a. Sharma, *Pedestrian and Evacuation Dynamics* (p. 21-58).
- Helbing, D., Molnàr, P., Farkas, I. J., & Bolay, K. (2001). Self-organizing pedestrian movement. *Environment and Planning B: Planning and Design*, p. 361-383.
- Henderson, L. (1974). On the Fluid Mechanics of Human Crowd Motion. *Transportation Research*, 8(509-511).
- Hoogendoorn, S., Femke van Wageningen -Kessels, Daamen, W., Duives, D., & Sarvi, M. (2015). Continuum Theory for Pedestrian Traffic Flow: Local Route Choice Modelling and its Implications. *Transportation Research Procedia* 7, p. 381-397.
- Hughes, R. (2002). A continuum theory for the flow of pedestrians. *Transportation Research Part B* 36, p. 507-535.
- Izquierdo, S., & Izquierdo, L. (2007). The impact of quality uncertainty without asymmetric information on market efficiency. *Journal of Business Reasearch* 60, p. 858-867.
- Jiang, Y. (2013). Macroscopic Modeling of Pedestrian Flow Considering The Herd Behavior. *Applied Mechanics and Materials Vols 444-445*, p. 906-911.
- Johansson, A., Helbing, D., & Shukla, P. (2008). *Specification of a Microscopic Pedestrian Model by Evolutionary Adjustment to Video Tracking Data*. Tratto da arXiv:0810.4587v1.
- Johansson, F. (2013). Microscopic Modeling and Simulation of Pedestrian Traffic. *Tesi*. Norrköping, Svezia: Department of Science and Technology Linköping University.
- Kim, I., Galiza, R., & Ferreira, L. (2013). Modeling pedestrian queueing using micro-simulation. *Transportation Reasearch Part A*, p. 232-240.
- Lam, W., Lee, J., & Cheung, C. (2002). A study of the bi-directional pedestrian flow characteristics at Honk Kong signalized crosswalk facilities. *Transportation* 29, p. 169-192.
- Le Bon, G. (1895). *La Pshychologie des Foules*. Alcan.

- Lee, S., & Hughes, R. (2005). Exploring Trampling and Crushing in a Crowd. *Journal of Transportation Engineering*, p. 575-582.
- Legion SpaceWorks™ R6.4 User Guide. (2016).
- Li, D., & Han, B. (2011). Modelling queue service system in pedestrian simulation. *Advanced Materials Research Vol.187*, p. 1-6.
- Lovas, G. G. (1994). MODELING AND SIMULATION OF PEDESTRIAN TRAFFIC FLOW. *Transportation Research B Vol. 28B*, p. 429-443.
- MassMotion Help Guide. (2017). London.
- Melograni, P., & Villa, G. (1996). *Psicologia delle folle*. Milano: Longanesi.
- Musse, S., Babski, C., Capin, T., & Thalmann, D. (1998). *Crowd Modelling in Collaborative Virtual Environments*. Tratto da ACM VRST: <https://vrst.acm.org/vrst2017/index.html>
- Navin, P., & Wheeler, R. (1969). Pedestrian flow characteristics. *Traffic Engineering*, p. 31-36.
- Okazaki, S., & Matsushita, S. (1993). A study of simulation model for pedestrian movement with evacuation and queueing. *International Conference on Engineering for Crowd Safety*, (p. 271-280).
- Older, S. (1968). Movement of pedestrians on footways in shopping streets. *Traffic Engineering and Control 10*, p. 160-163.
- O'Sullivan, D., & Haklay, M. (2000). Agent based models and individualism: Is the world agent-based? *Environment and Planning A*, p. 1409-1425.
- Predtechenskii, V., & Milinskii, A. (1978). *Planning for foot traffic flow in buildings*. New Delhi: Amerind.
- PTV Vissim 9 - User Manual. (2016).
- Rahman, K., Ghani, N. A., Kamil, A. A., Mustafa, A., & Chowdhury, M. (2013). *Modelling Pedestrian Travel Time and the Design of Facilities: A Queuing Approach*. Tratto da PLOS|one.
- Rosenfeld, A., & Kraus, S. (2009). Modeling agents through bounded rationality theories. *IJCAI 2009, Proceedings of the 21st International Joint Conference on Artificial Intelligence*, (p. 264-271). Pasadena.
- Schadschneider, A. (2001). Cellular Automation Approach to Pedestrian Dynamics - Theory. In M. Schreckenberg, & S. Sharma, *Pedestrian and Evacuation Dynamics* (p. 75-86). Berlin: Springer.
- Schelling, T. (1971). DYNAMIC MODELS OF SEGREGATION. *Journal of Mathematical Sociology Vol. 1*, p. 143-186.

- Schwandt, H., Huth, F., & Barwolff, F. (2013). *A macroscopic model for intersecting pedestrian streams with tactical and strategical redirection*. Tratto da AIP Conference Proceedings.
- Shiwakoti, N., Sarvi, M., & Rose, G. (2008). Modelling pedestrian behaviour under emergency conditions – State-of-the-art and future directions. *31st Australasian Transport Research Forum*.
- Still, G. K. (2000). *Crowd Dynamics*. Warwick.
- Teknomo, K. (2002). *Microscopic Pedestrian Flow Characteristics: Development of an Image Processing Data Collection and Simulation Model* PhD. dissertation. Japan.
- Teknomo, K., Takeyama, Y., & Inamura, H. (2001). Microscopic pedestrian simulation model to evaluate "Lanelike Segregation" of pedestrian crossing. *Proceedings of Infrastructure Planning Conference*, 24.
- Treouille, A., Cooper, S., & Popovic, Z. (2006). Continuum crowds. *ACM Transportation Graphics* 25, p. 1160-1168.
- Vandaele, N., Woensel, T. V., & Verbruggen, A. (2000). A queueing based traffic flow model. *Transportation Research-D: Transport and environment*, p. 121-135.
- Wang, J., Zhang, L., Shi, Q., Yang, P., & Hu, X. (2015). Modeling and simulating for congestion pedestrian evacuation with panic. *Physica A* 428, p. 396-409.
- Wang, W. L., Lo, S., Liu, S. B., & Kuang, H. (2014). Microscopic modeling of pedestrian movement behavior: Interacting with visual attractors in the environment. *Transportation Research Part C*, p. 21-33.
- Xiong, M., Tang, S., & Zhao, D. (2013). A Hybrid Model for Simulating Crowd Evacuation. *New Generation Computing*, p. 211-235.