
ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA
Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale
Tesi di Laurea in Laboratorio di Simulazione per la Logistica LS

Implementazione di un modello simulativo per l'evacuazione di edifici in caso di emergenza

Candidato:
Samuele Domeniconi

Relatore:
Chiar.mo Prof. Mauro Gamberi

Anno Accademico 2008/2009 – Sessione III

SOMMARIO

Introduzione	5
1 Aspetti socio-comportamentali degli individui in caso di emergenza..	6
1.1 Le caratteristiche degli occupanti	8
1.2 Risposta agli indizi	14
1.3 Evacuazione di una folla di individui	15
1.4 Fattori che regolano l'efficacia dell'evacuazione.....	18
1.5 Comportamenti e reazioni umane nelle situazioni d'emergenza....	19
1.6 Il panico di massa	23
1.6.1 La teoria dell'intrappolamento	24
1.6.2 Il modello dell'attaccamento sociale.....	25
1.7 Conclusioni	25
2 Modelli per la simulazione.....	26
2.1 Metodologie di modellazione	27
2.1.1 Natura del modello	28
2.1.2 Rappresentazione dell'ambiente di riferimento	29
2.1.3 Prospettiva della popolazione.....	31
2.1.4 Prospettiva del comportamento degli individui	31
2.2 Wayfinding	32
2.3 Algoritmo di wayfinding	34
2.3.1 Rappresentazione spaziale.....	34
2.3.2 Mappe cognitive	35
2.3.3 Attuazione del percorso e raffinamento	40
3 Il modello realizzato.....	42
3.1 AutoMod.....	42
3.2 Modello teorico realizzato	45
3.2.1 Analisi delle informazioni spaziali dell'edificio	45
3.2.2 Analisi delle informazioni raccolte	46

3.2.3	Gestione dei gruppi	48
3.2.4	Simulazione	48
3.3	Modello simulativo implementato.....	50
3.3.1	Struttura.....	51
3.3.2	Layout del sistema.....	51
3.3.3	Load.....	53
3.3.4	Load Attribute	54
3.3.5	Variabili.....	55
3.3.6	Processi.....	60
3.3.7	Comportamento dei passeggeri.....	103
3.3.8	Input del modello	104
3.3.9	Output del modello.....	105
4	Applicazioni del modello simulativo.....	106
4.1	Dipartimento di meccanica del DIEM.....	107
4.2	Ingegneria sita in via Terracini.....	110
5	Le simulazioni realizzate	114
5.1	Numero delle porte significative	114
5.2	Affollamento.....	118
5.3	Route Preference Criteria	121
5.4	Uscite disponibili	125
5.4.1	Scenario 1: Evacuazione precauzionale del DIEM con tutte le uscite a disposizione.....	125
5.4.2	Scenario 2: Evacuazione del DIEM con le uscite della zona Nord indisponibili.....	129
5.4.3	Scenario 3: Evacuazione del DIEM con le uscite della zona Ovest indisponibili.....	132
5.4.4	Scenario 4: Evacuazione del DIEM con le uscite della zona Est indisponibili.....	135

5.4.5	Scenario 5: Evacuazione precauzionale dell'edificio di Ingegneria in via Terracini con tutte le uscite a disposizione	140
5.4.6	Scenario 6: Evacuazione dell'edificio di Ingegneria in via Terracini con le uscite della zona Nord indisponibili	144
5.4.7	Scenario 7: Evacuazione dell'edificio di Ingegneria in via Terracini con le uscite della zona Sud-Est indisponibili.....	146
5.4.8	Scenario 8: Evacuazione dell'edificio di Ingegneria in via Terracini con le uscite della zona Ovest indisponibili.....	149
5.5	Analisi dei risultati.....	153
	Conclusioni	156
	Bibliografia	157
	Ringraziamenti	159

INTRODUZIONE

Nella presente tesi si tratteranno i principali aspetti riguardanti l'evacuazione di edifici in caso di emergenza, ponendo particolare enfasi all'analisi del caso in cui tale emergenza sia costituita da un incendio.

In particolare ci si soffermerà inizialmente su uno degli aspetti più rilevanti relativi al suddetto tema: il comportamento che gli individui tengono in situazioni di emergenza.

Si analizzeranno quindi in primo luogo gli aspetti socio-comportamentali degli individui, per poi passare ad una analisi approfondita degli algoritmi predittivi di evacuazione.

Quindi si implementerà un modello simulativo specifico, così da poter simulare il comportamento di individui in circostanze di pericolo al fine di prevedere quali percorsi sarebbero scelti durante l'evacuazione e di stimare i tempi necessari all'evacuazione di un edificio.

Si procederà a questo punto alla realizzazione di due casi pratici di utilizzo del modello simulativo implementato, ovvero per la Facoltà di Ingegneria situata in Via Terracini e per il Dipartimento di Meccanica del DIEM posto dinanzi alla facoltà.

Infine si analizzeranno i risultati ottenuti, ponendo enfasi sia ai dati specifici ottenuti sia alle conclusioni generali che possono esserne tratte.

1 ASPETTI SOCIO-COMPORTAMENTALI DEGLI INDIVIDUI IN CASO DI EMERGENZA

Lo studio del comportamento umano in caso di incendio, come in casi di una generica emergenza, presenta delle difficoltà non facilmente superabili, poiché molte delle situazioni di cui sarebbe importante conoscere i dati non possono essere simulate in laboratorio. Inoltre può essere considerata relativa l'attendibilità dei dati tratti a seguito di esercitazioni nelle quali manca l'effetto sorpresa o ansia, lo stress e la possibilità di panico che possono manifestarsi in situazioni reali. Soprattutto la complessità del comportamento umano rende difficile la previsione dei dati che sarebbero utili ai fini della sicurezza antincendio.

A queste difficoltà va aggiunto che, come dicono Luca Pierantoni e Gabriele Prati nel loro saggio "il comportamento umano negli incendi", per anni gli ingegneri che si sono occupati di sicurezza si sono basati sul semplice presupposto che quando si attiva un allarme sonoro, le persone iniziano ad evacuare immediatamente. Si credeva che la rapidità con cui le persone riuscivano ad uscire da un edificio dipendesse principalmente dalle abilità fisiche individuali, dalla locazione dell'uscita di sicurezza e dall'azione di propagazione dell'evento, naturale o non, che aveva portato alla situazione d'emergenza.

Tuttavia il lavoro degli scienziati ha mostrato che sono ben diversi i comportamenti osservati nelle persone durante le situazioni di pericolo e di emergenza. In realtà, la ricerca ha mostrato che gli individui dopo un allarme occupano una parte del tempo in attività non rivolte all'evacuazione e che questo intervallo può costituire fino a due terzi del tempo che si impiega per uscire dall'edificio. La naturale inclinazione delle persone sarebbe quella di voler "definire" la situazione prima di "rispondere" di fronte ad un allarme sonoro che di per sé è uno stimolo intrinsecamente ambiguo. Per tale motivo, le persone aspettano altri indicatori ambientali come ad esempio, l'odore del

fumo, le urla di una persona ferita, un collega che gli dice di uscire o cercano informazioni su cosa sta accadendo. Le persone tendono a pensare che la probabilità che l'allarme corrisponda ad un evento reale e che questo possa rappresentare un pericolo per loro sia estremamente bassa.

L'espressione inglese "milling" (girovagare come un mulino) indica proprio l'interazione sociale nelle prime fasi di allarme: gli individui verificano e cercano una conferma con le altre persone della gravità del messaggio o dell'avvertimento che hanno ricevuto; solo quando la rete sociale conferma la validità dell'avviso, iniziano ad eseguire azioni protettive. Alle persone, che tendono all'inerzia, non piace interrompere un'attività per rispondere ad un allarme.

Usando una pluralità di metodi di ricerca, come osservazione diretta dell'evacuazione tramite telecamere nascoste o interviste a sopravvissuti di incendi, Proulx (2003), uno dei più autorevoli in materia, ha mostrato che in media ci vogliono tre minuti prima che le persone inizino a lasciare l'appartamento in un edificio residenziale. Anche se a prima vista sembra modesto, sappiamo, ad esempio, che il fuoco si evolve molto rapidamente e in un incendio reale tre minuti potrebbero essere una questione di vita o di morte. Lo studio su come gli occupanti di un edificio reagiscono ad un incendio o ad un danno strutturale esiste da 30 anni ma è stato sollecitato da eventi drammatici recenti. Secondo gli studi del NIST, National Institute Of Standards And Technology, che ha ricostruito il comportamento di evacuazione delle 15'000 persone nelle Twin Towers l'11 settembre 2001, è stato stimato che il 70% delle persone nel World Trade Center che sopravvissero a quel disastro, prima di fuggire, parlò fra loro sul da farsi e su cosa stesse succedendo. Proulx ha analizzato i resoconti di 324 persone sulla loro evacuazione dai grattacieli, l'83% ha giudicato la situazione molto grave nei primi minuti dopo lo schianto; tuttavia anche dopo aver visto le fiamme, il fumo e le carte che volavano, solo il 55% dei superstiti è evacuato immediatamente, il 13% si è fermato per recuperare i propri beni personali e il

20% ha messo in sicurezza i suoi dati personali e poi ha girato per il piano prima di evacuare, l'8% aveva inizialmente deciso di restare ma dopo ha cambiato idea.

E' quindi evidente come sia fondamentale la comprensione più accurata possibile del comportamento degli individui in caso di emergenza se si vuole realizzare una analisi prestazionale completa dell'evacuazione di un edificio.

Va quindi precisato che, per quanto riguarda l'analisi del comportamento umano, le considerazioni possono essere di tipo qualitativo o quantitativo.

A questo riguardo può essere utile riassumere il rapporto tra argomento e tipo di analisi, che evidenzia ulteriormente i motivi che rendono difficile la valutazione del comportamento umano.

Tema	Analisi
Caratteristiche degli occupanti	Qualitativa
Risposta umana agli indizi	Analisi generale qualitativa, valutazione quantitativa dei tempi attraverso l'esame dei casi studio.
Processo decisionale	Analisi generale qualitativa, valutazione quantitativa dei tempi attraverso l'esame di casi di studio.
Movimento	Analisi generale e valutazione quantitativa

Tabella 1.1

1.1 Le caratteristiche degli occupanti

Le caratteristiche delle persone presenti nell'edificio, che per conformità con i testi normativi e tecnici reperibili è possibile definire "occupanti", costituiscono un aspetto fondamentale nella previsione della risposta in caso di incendio. Purtroppo questo argomento deve essere trattato attraverso

valutazioni di tipo qualitativo, e la conseguente difficoltà di renderne omogeneo l'esito con il processo di valutazione numerica porta in alcuni casi a trascurarne la rilevanza.

Nella valutazione delle caratteristiche degli occupanti si devono analizzare le caratteristiche chiave dei gruppi specifici.

Per esempio la familiarità con le procedure di emergenza, la capacità e la velocità di reazione possono essere elementi determinanti. Questo tipo di valutazione è basato sulla conoscenza del processo di ricezione, di interpretazione e di validazione degli indizi.



Figura 1.1 - Processo di decisione e di movimento legati all'esodo

In generale il processo di decisione e di movimento legati all'esodo può essere schematizzato come mostrato in Figura 1.1.

Gli indizi che possono essere presi in considerazione da una persona coinvolta in qualche modo da un incendio all'interno di un edificio possono essere:

- ✓ allarmi forniti dai sistemi di rilevazione ed allarme,
- ✓ percezione diretta dei prodotti della combustione,
- ✓ comunicazione da parte di altre persone,
- ✓ interruzione dei servizi (energia elettrica, comunicazione o simili).

Tutti questi segnali non danno inizio necessariamente all'esodo, ma devono essere valutati in relazione alle caratteristiche dei gruppi di persone identificati ai fini della risposta per l'evacuazione.

Per quanto riguarda il processo di decisione, la valutazione deve prendere in considerazione quali azioni le persone possono adottare dopo aver ricevuto ed interpretato gli indizi provenienti dall'ambiente circostante.

Tali azioni possono ricadere tra le seguenti:

- ✓ cercare ulteriori informazioni;
- ✓ cercare altre persone;
- ✓ cercare di avvisare altre persone;
- ✓ tentare l'estinzione dell'incendio;
- ✓ iniziare l'esodo;
- ✓ proseguire la propria attività.

La documentazione di eventi avvenuti nel passato dimostra che queste azioni possono ritardare l'inizio del movimento verso un luogo sicuro e l'esame di questi dati deve essere particolarmente attento, poiché i tempi di esodo registrati nella realtà devono essere valutati alla luce delle specifiche caratteristiche delle persone presenti.

Un ulteriore elemento da valutare è quello relativo alle persone che si trovano sole in un ambiente. La presenza di altre persone ha un effetto di inibizione sull'avvio dell'esodo quando tutti gli indizi sono incerti, anche se aumenta la possibilità di essere avvertiti da un allarme. Al contrario, una persona sola risponderà più velocemente a indizi certi. La familiarità con l'edificio gioca un ruolo importante nella strategia di sicurezza. Chi conosce bene l'ambiente in

cui si trova, di solito conosce bene le vie di esodo e può localizzare quella più vicina, soprattutto se ha preso parte ad esercitazioni di emergenza e se esse sono state svolte con la frequenza appropriata.

Al contrario, è più probabile che per allontanarsi dall'edificio, i passeggeri utilizzino il percorso utilizzato per l'ingresso. A questo riguardo deve essere analizzata la segnaletica di sicurezza, affinché le persone possano farne un uso corretto. E' esperienza quotidiana di tutti trovarsi davanti a un gran numero di cartelli di sicurezza, anche se i percorsi utilizzati per l'esodo sono quasi sempre quelli più familiari, e questo implica una maggiore difficoltà di percorso in caso di emergenza. E' possibile ritenere che le vie di esodo alternative siano utilizzate solo dopo che sia stata verificata l'impraticabilità di quelle già note.

Il tempo di premovimento sarà influenzato dal tipo di attività che le persone stanno svolgendo all'interno dell'edificio, che possono comportare dei tempi di reazione necessariamente molto differenti; altri aspetti che vanno valutati nell'analisi delle caratteristiche di comportamento riguardano aspetti come il genere, l'età, le capacità fisiche e sensoriali, la familiarità con l'ambiente, le esperienze di emergenze e di incendio, il ruolo sociale e l'impegno verso la propria attività. L'importanza delle caratteristiche è relativa alla particolare valutazione che deve essere svolta e tali aspetti possono essere riferiti al solo gruppo che risulta essere più critico ai fini della valutazione.

Nella tabella seguente si schematizzano alcune tra le principali caratteristiche degli occupanti che hanno rilevanza ai fini dell'esodo in caso di emergenza.

Caratteristiche delle persone	Descrizione
Numero delle persone e densità	La densità di persone e, quindi, il numero massimo ammesso in ogni ambiente sono spesso indicati dalle norme. La densità influenza la velocità di esodo.
Da soli o con gli altri	L'essere soli o con altre persone inibisce l'avvio di azioni particolari quando gli indizi sono incerti, ma garantisce migliore comunicazione.
Affiliazione sociale	Insieme al punto precedente questo aspetto può essere rilevante nella determinazione del tempo di premovimento, poiché alcuni gruppi potrebbero cercare di ricomporsi prima di iniziare il movimento.
Familiarità con l'ambiente	La conoscenza delle vie di esodo e dei sistemi di allarme garantisce procedure di esodo più rapide, soprattutto in presenza di svolgimenti regolari delle esercitazioni di emergenza.
Ruolo e responsabilità	Il ruolo sociale può essere rilevante nell'emergenza, soprattutto se associato ad autorità ed addestramento.

Ubicazione	Oltre ad essere rilevante il tempo di movimento, l'ubicazione può influenzare la comprensione dell'allarme ed anche la sua ricezione.
Impegno	Le persone si trovano in un determinato ambiente per un motivo. L'esistenza delle ragioni per cui sono presenti può proseguire anche dopo la ricezione dei primi indizi sull'esistenza di condizioni anomale, e questo può rendere le persone riluttanti a rispondere alle esigenze dell'emergenza.
Punto focale	Molti edifici hanno un ambiente verso cui le persone guardano o convergono. Questo tipo di attenzione si manterrà anche in caso di allarme e potrà essere utilizzato durante l'emergenza per fornire indicazioni sull'esodo o sul comportamento.
Condizioni delle persone	Durante l'esodo le condizioni delle persone possono cambiare in relazione alla concentrazione o alla dose accumulata di specie tossiche con le quali sono venute in contatto.

Genere	Una delle caratteristiche che distingue gli uomini dalle donne riguarda la maggiore attitudine degli uomini a cercare di combattere gli incendi mentre le donne sono più pronte a fuggire ed avvertire gli altri presenti.
Età	La variazione delle capacità mostrate nel comportamento in emergenza delle persone in relazione all'età sono state suddivise nelle tre categorie delle capacità, del processo decisionale e delle azioni. Di esse, la diminuzione delle prestazioni fisiche dovrebbe influenzare soprattutto la resistenza ad agenti tossici o irritanti.

Tabella 1.2 - Schematizzazione della risposta umana in relazione alle caratteristiche più significative delle persone coinvolte in una situazione di emergenza

1.2 Risposta agli indizi

Il processo di risposta agli indizi è composto essenzialmente da tre fasi:

1. ricezione (sentire fisicamente);
2. riconoscimento (riconoscere come tale l'indizio);
3. interpretazione (dare all'indizio il suo significato).

La valutazione di tale comportamento può essere svolta solo dopo che siano state identificate le caratteristiche del gruppo di persone esposte al rischio. Per indizi, ai fini della sicurezza antincendio, si intendono i prodotti della combustione, i segnali di allarme, le comunicazioni da parte di altre persone.

I prodotti della combustione sono presenti, di solito, nell'ambiente interessato dall'incendio, ma possono essere percepiti anche in altre aree. Il contatto con i

prodotti della combustione può avviare anche il processo di allarme nei riguardi di altre persone presenti.

Per quanto riguarda i segnali generati da un sistema automatico di allarme si deve considerare il fatto che possono essere interpretati in modo diverso. La loro rilevanza ai fini della decisione delle azioni da adottare, quindi, deve essere valutata specificamente. Anche l'efficacia dell'avvertimento diretto da parte di altre persone deve essere valutato allo stesso modo.

In generale si deve ricordare che quanto è stato registrato dopo incendi reali mostra che le persone non iniziano l'esodo immediatamente dopo la ricezione dei primi indizi. Necessariamente trascorrerà un tempo per l'elaborazione del messaggio ricevuto. Tale tempo è definito nella letteratura tecnica come tempo di validazione dell'indizio.

La ricezione dei segnali di allarme dipenderà dalle capacità percettive dell'individuo e dalle caratteristiche di percepibilità del segnale.

E' stato sottolineato che la realizzazione di sistemi di allarme di solito presuppone che i sistemi stessi mettano i presenti nella condizione di avviare l'esodo di emergenza con un minimo ritardo. Quasi senza eccezione, però, i dati sperimentali contraddicono questa presunzione e suggeriscono l'idea che un allarme da solo non avvii l'esodo ma dia un inizio alla ricerca di ulteriori indizi, e cioè alla fase di conferma dell'indizio.

1.3 Evacuazione di una folla di individui

L'evacuazione di emergenza da un edificio è un processo complesso, che ha avvio quando le persone divengono cosce dell'esistenza di una situazione di emergenza e mettono in atto una serie di processi mentali e di azioni, prima e durante l'adozione di azioni che li portano verso luoghi sicuri.

Come detto in precedenza, gli indizi iniziali possono essere quelli legati alla percezione diretta del pericolo, come per esempio di un incendio, oppure

possono risultare ad esempio dall'attivazione di segnali di allarme o di comunicazioni da parte di altre persone.

Una volta ricevuti questi indizi, la persona inizierà un processo di validazione che proseguirà anche durante la fuga. Prima dell'inizio dell'esodo la persona dovrà prendere decisioni, su cosa fare, se raccogliere degli oggetti, se chiamare altre persone, aiutandole eventualmente a portarsi in salvo.

Una volta che la persona si è portata in un luogo sicuro, e cioè un luogo nel quale è certamente al riparo da qualunque effetto di incendio, sarà trascorso un certo intervallo di tempo dall'inizio del pericolo, questo tempo nella letteratura tecnica internazionale è definito Required Safety Egress Time, RSET; esso dovrà essere necessariamente inferiore a quello massimo consentito per garantire le condizioni di sopravvivenza, questo secondo tempo è conosciuto come Available Safety Egress Time, ASET.

Il rapporto tra questi due tempi, come sarà approfondito nel Capitolo 5, costituisce il fattore di sicurezza che l'edificio garantisce in caso di emergenza. Per la valutazione del tempo richiesto, RSET, è necessario conoscere fundamentalmente le caratteristiche di reazione delle persone, mentre per la definizione di tempo massimo disponibile, ASET, dovranno essere valutate le caratteristiche ambientali e dei materiali.

Fino a poco tempo fa una folla in fuga da uno spazio chiuso a causa di un incendio era considerata come un liquido in uscita da un contenitore, che sfrutta ugualmente tutte le aperture per evadere; quindi maggiore è il numero delle uscite e più velocemente il "contenitore" è vuotato.

Questo modello "idraulico", tuttavia, non rende conto della realtà: oltre all'ingegneria bisogna includere conoscenze che derivano dallo studio dei comportamenti umani in psicologia e nelle scienze sociali; la folla non è un fluido ma è composta da persone che pensano, interagiscono, prendono decisioni, hanno preferenze di movimento, cadono e ostacolano altri.

Le persone possono avere comportamenti gregari o individualistici nella ricerca di un'uscita. Pensiamo ad una situazione familiare, come l'uscita da

una sala cinematografica o da un teatro, attraverso le uscite di emergenza: anche in una situazione di normalità, quindi senza la presenza di eventi critici, il deflusso risulta notevolmente influenzato dalle differenze nei comportamenti individuali e dalle modalità di interazione tra le persone. Immaginiamo ora la stessa situazione, durante un'evacuazione di emergenza con lo stress emotivo, l'ansia e la preoccupazione per la sopravvivenza personale.

In queste circostanze, le persone si muovono o tentano di muoversi più velocemente del normale, iniziano a spingersi e l'interazione diventa solo fisica, in tal modo il passaggio per il collo di bottiglia diventa scoordinato e alle uscite si formano strutture ad arco.

Per tale ragione si può verificare l'effetto paradossale chiamato "faster is slower" in cui più le persone si dirigono velocemente verso l'uscita, più procedono lentamente perché si accalcano, si spingono, a volte perfino si calpestano. In aggiunta, la fuga può essere maggiormente rallentata dalle persone che cadono o che si feriscono e che diventano a tutti gli effetti nuovi ostacoli; in alcuni casi l'interazione fisica può addirittura causare una pressione pericolosa capace di sfondare barriere o muri.

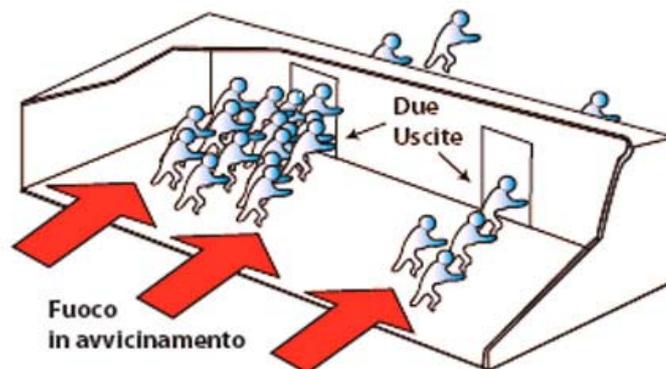


Figura 1.2 -Comportamenti gregari

Infine va considerata anche l'evenienza, come mostrato in Figura 1.2, nell'evacuazione da una stanza con due uscite e un fronte di fuoco in avvicinamento che si verifichi una tendenza a comportamenti gregari e a fare

presenza di una leadership che impartisca direttive è fondamentale per la sopravvivenza degli attori;

4. fattori comportamentali; corrispondono alle diverse condotte tenute dalle persone in emergenza: le loro risposte iniziali, le loro decisioni, le interazioni sociali, le relazioni fra i membri del gruppo.

Come si nota dalla Figura 1.3, i quattro fattori interagiscono tra loro regolando l'efficacia di un'evacuazione: i fattori configurazionali e ambientali sono tra loro interconnessi ed entrambi influenzano sia le procedure che i comportamenti umani. Anche i fattori procedurali e quelli comportamentali sono tra loro in interazione: una procedura può guidare l'esecuzione di una sequenza di azioni, ma anche alcuni comportamenti di un individuo potrebbero dare indicazioni sulle procedure da selezionare ed eventualmente da modificare. La collocazione centrale dei fattori comportamentali rispecchia la loro importanza e rilevanza: anche in condizioni ottimali, quali un congruo numero di uscite di emergenze, ben evidenziate, senza problemi di visibilità, un comportamento erraneo di un individuo o di un piccolo gruppo può rendere vano anche le migliori progettazioni architettoniche.

1.5 Comportamenti e reazioni umane nelle situazioni d'emergenza

Poiché una situazione di emergenza non riguarda mai un singolo individuo bensì un numero cospicuo di persone, sono stati svolti diversi studi per capire come queste si comportino per sopravvivere ad una minaccia.

Testimonianze di superstiti, “case study” e ricerche su campo in simulazioni hanno evidenziato la forte eterogeneità delle risposte individuali. Secondo Leach (2004) nelle situazioni di pericolo, la risposta degli individui può essere classificata in tre grandi gruppi:

1. Il primo gruppo, che comprende il 10-15% di persone coinvolte in disastri, rimane relativamente calmo. Queste persone sono capaci di organizzare i pensieri rapidamente, mantenere intatta la consapevolezza delle situazioni e le capacità di giudizio e ragionamento, sono capaci di valutare la situazione, fare un piano di azione e metterlo in pratica.
2. Il secondo gruppo, composto da circa il 75% di persone, comprende coloro che rispondono in maniera sconcertata e confusa, mostrando un ragionamento compromesso e un rallentamento del pensiero. Il loro comportamento è guidato da processi quasi automatici.
3. Il terzo e ultimo gruppo, 10-15%, tende a mostrare un alto grado di comportamenti controproducenti che aumentano il rischio di morte, come quello del pianto incontrollato, di confusione globale, urla e ansia paralizzante.

È in queste due ultime categorie di comportamenti che troviamo il maggior numero di vittime. È da notare che i tratti di personalità di ciascuno sono scarsamente predittive delle risposte in tali condizioni: persone solitamente molto decise e razionali potrebbero comportarsi in questi scenari anomali in modo confuso e disorganizzato.

Più in specifico, è emerso che le reazioni e i comportamenti nelle situazioni di pericolo possono essere le più disparate. Ne possiamo identificare nove che includono stati emotivi, cognitivi e fisiologici:

- ✓ comportamenti ansiosi: le persone sono in preda all'ansia, urlano, piangono e diventano incapaci anche di azioni semplici come aprire una porta;
- ✓ comportamenti di fuga disorganizzata: le persone tendono a correre, fuggendo in qualsiasi direzione, anche se non è quella giusta;
- ✓ comportamenti di coesione sociale: le persone si riuniscono fra loro e si "sentono un gruppo", "sulla stessa barca";

- ✓ attaccamento ai beni familiari: le persone prima di evacuare cercano di recuperare gli oggetti personali che hanno un valore economico ed affettivo;
- ✓ comportamenti altruistici: le persone tendono ad aiutare altre persone in difficoltà, esponendosi loro stessi ad un pericolo vitale;
- ✓ comportamenti di “congelamento”: alcune persone rimangono cognitivamente paralizzate e incapaci a muoversi;
- ✓ comportamenti di panico: si tratta di comportamenti distruttivi, irrazionali e asociali quali il lottare con altre persone;
- ✓ disorientamento situazionale: le persone percepiscono uno stato di incredulità e di astrazione della situazione;
- ✓ disorientamento fisiologico: nella situazione di scarsa visibilità , per esempio causata dal fumo scaturito dall’incendio, le persone faticano a trovare le vie d’uscita e si intossicano con i gas ispirati.

Utilizzando un modello a stadi, Dyregrov, Solomon e Bassoe (2000) hanno descritto ciò che loro chiamano un “sistema di mobilitazione delle risorse mentali” per assicurare la sopravvivenza nelle situazioni di pericolo. Parallelamente all’attivazione fisiologica la mente cerca rapidamente le informazioni immagazzinate per prendere delle decisioni sulle azioni da svolgere. Questo processo, come mostrato in Figura 3, può essere suddiviso in sei fasi specifiche, ognuna con una proprie peculiarità.

Nella prima fase, si comprende di esser in pericolo e si è spaventati dalla situazione. Poi ci si rende conto di essere vulnerabili; si può essere sopraffatti dal panico e sentirsi estremamente deboli.

Nella fase terza, si capisce che per riuscire a sopravvivere bisogna agire; si passa da un focus interno di vulnerabilità a uno esterno di pericolo.

Nella fase successiva, il pericolo è visto come un problema da risolvere, tenendo conto delle proprie abilità per fronteggiarlo; consapevolmente o istintivamente si elabora un piano di azione pronto per essere attuato; si diventa più calmi e controllati.

Nella quinta fase è il momento dell'azione, in cui si mette in atto ciò che consapevolmente o istintivamente è stato progettato; la mente è chiara e focalizzata sul compito e, in tal modo, esprime fiducia e controllo.

Infine, una volta scampati al pericolo, si torna con la mente alla situazione tragica cui si è sopravvissuti; le persone che rimangono per lungo tempo in questa fase potrebbero avere problemi successivi di equilibrio psicologico, i cosiddetti "pensieri intrusivi" e lo sviluppo del Disturbo Acuto da Stress e il Disturbo da Stress Post-Traumatico.

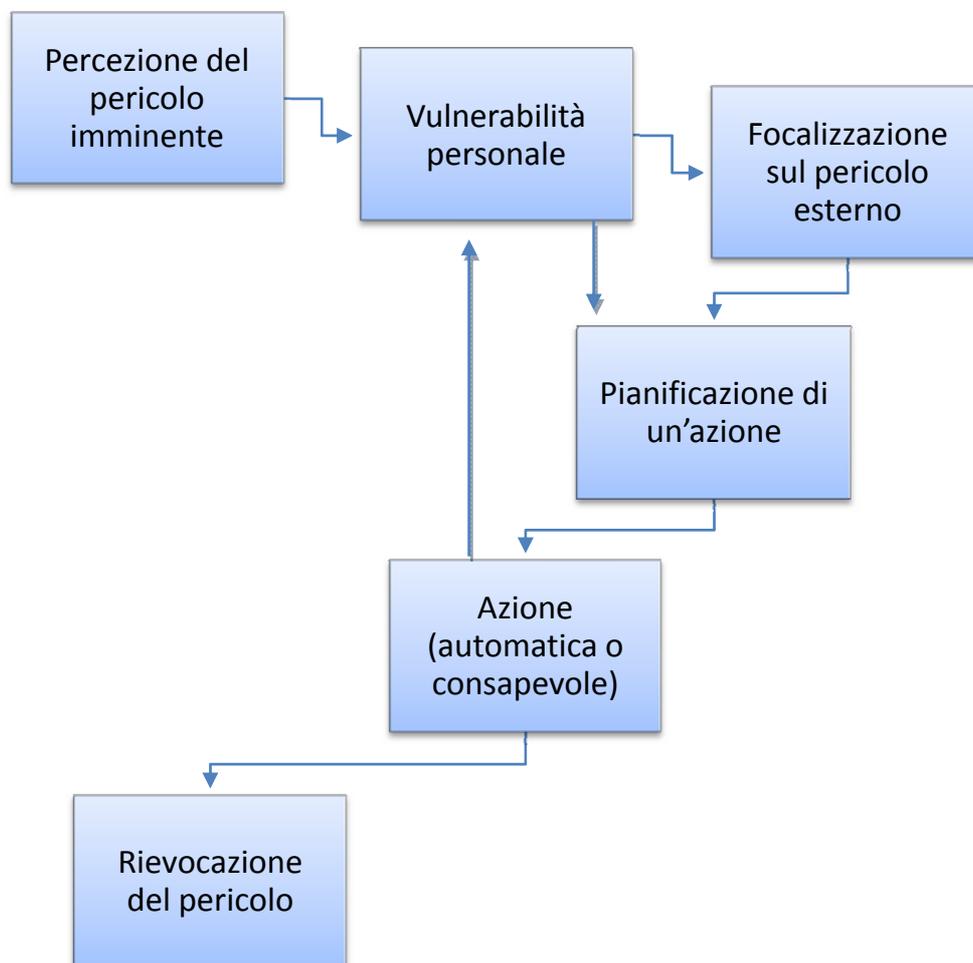


Figura 1.4 - Sistema di mobilitazione delle risorse mentali

È da tenere presente che, durante una situazione di emergenza, le persone possono rimanere bloccate in una di queste fasi specifiche, oppure continuare a slittare avanti e indietro ripetutamente fra due o più di esse.

1.6 Il panico di massa

L'utilizzo del termine "panico" ha subito diverse modificazioni nel corso degli anni: se all'inizio del secolo scorso si pensava che le persone in situazioni di emergenza perdessero la loro umanità e si trasformassero in animali in preda alla paura, negli anni cinquanta Quarantelli ha proposto la concettualizzazione di panico come un comportamento asociale: le persone non si trasformano in animali, bensì cercano di soddisfare i propri bisogni, non prestando interesse a quelli delle altre persone.

Attualmente il concetto di panico di massa è definito come comportamento collettivo in cui le capacità di giudizio e ragionamento sono deteriorate, in cui vi sono emozioni forti di paura e in cui vi è un comportamento, solitamente la fuga, che può risultare in azioni autodistruttive.

Gli ultimi studi dei fattori psicosociali sul comportamento di evacuazione ha mostrato che le manifestazioni di panico, intese come azioni irrazionali e distruttive e non come ansia od agitazione, sono rare.

Secondo Mileti e Peek, dell'università del Colorado, affinché si produca il fenomeno di panico è necessario che si verifichino tutte queste condizioni:

1. le persone devono trovarsi in uno spazio confinato, come una sala cinematografica;
2. devono avere la convinzione che se non fuggono in un tempo breve, moriranno;
3. questo spazio confinato deve essere dotato di una o più vie di fuga (per esempio in un sottomarino intrappolato sul fondo di un oceano, le persone possono provare angoscia e paura ma non panico);
4. deve essere chiaro il fatto che non ci sia abbastanza tempo per tutti di scappare.

In conclusione, le persone non sono "isolate" ma intraprendono azioni auto-protettive o altruistiche inserite in un contesto socio-ambientale che incoraggia o scoraggia una determinata sequenza comportamentale.

Poiché la combinazione di queste condizioni è rara il panico di massa lo è altrettanto e quando avviene coinvolge solo una piccola minoranza, non è contagioso ed è di breve durata.

Tuttavia nei casi in cui si verificano condizioni di “panico i massa”, le azioni della folla possono assumere diversi significati, valenze e modalità di espressione, a seconda del contesto sociale nel quale hanno luogo, dimostrando come la minaccia di un danno fisico possa essere collocata in secondo piano rispetto a quella di rottura dei legami sociali con persone significative.

1.6.1 La teoria dell'intrappolamento

La teoria dell'intrappolamento si sforza di spiegare la fuga prendendo in considerazione il verificarsi di due fattori scatenanti:

1. che le persone avvertano un pericolo imminente;
2. che le persone credano che le vie di fuga siano limitate o che si stiano rapidamente chiudendo.

Non è necessario che le credenze siano esatte, ma è sufficiente che questa sia la percezione, intrappolamento percepito, per scatenare reazioni volte a garantire la propria sopravvivenza anche a scapito degli altri, con i noti fenomeni del calpestamento, della violenza o del “collo di bottiglia” alle uscite.

Le persone si muovono con una velocità considerevolmente maggiore rispetto al solito e le interazioni divengono estremamente “fisiche”, con il verificarsi del fenomeno del pushing, spingere, attraverso il quale il passaggio diviene difficoltoso e sordinato.

1.6.2 Il modello dell'attaccamento sociale

Il modello dell'attaccamento sociale parte dal presupposto che il fatto che il rischio di perdere la propria integrità fisica sia valutato come meno grave o di secondo ordine se paragonato a quello della rottura dei legami affettivi ed affiliativi.

Sembra infatti che spesso, in situazioni di estremo pericolo, si manifestino risposte di unione in cui la ricerca della vicinanza di persone familiari emerge dallo sfondo e diventa urgente, acquisendo priorità rispetto alla fuga e quindi all'autoconservazione rallentando i tempi di evacuazione.

1.7 Conclusioni

In conclusione, le persone reagiscono di fronte ad un pericolo come il fuoco in modo diverso ma ci sono caratteristiche personali e condizioni socio-ambientali che incoraggiano o scoraggiano determinate sequenze comportamentali.

La conoscenza del "fattore umano" in queste circostanze può aiutare a migliorare l'azione di soccorso dei vigili di fuoco e garantire la sicurezza di tutti.

Inoltre questa conoscenza risulta fondamentale se si vogliono realizzare modelli simulativi che possano aiutare nella stesura delle procedure di emergenza maggiormente efficienti possibili ma anche aiutare sin dalla progettazione degli edifici. Ne è una conferma l'attenzione che, in misura sempre crescente negli ultimi anni, lo studio del comportamento umano negli incendi ha ricevuto da parte di professionisti e studiosi.

2 MODELLI PER LA SIMULAZIONE

Lo sviluppo di tecnologie a supporto della realizzazione di modelli di evacuazione ha origine negli anni settanta, quando apparve per la prima volta in letteratura un modello di evacuazione di un aereo, GPSS nel 1970.

Mentre l'applicazione di questi modelli al settore aeronautico non ebbe il successo sperato e rimase ferma per circa 20 anni, l'industria edilizia iniziò a breve a manifestare un certo interesse nei confronti della realizzazione di modelli per l'evacuazione. Questo interesse è stato in parte trainato dal desiderio di ingegneri e architetti di implementare nuovi criteri di progettazione. Poiché i loro progetti sfidavano i tradizionali limiti di dimensioni e utilizzo dello spazio circostante si rivelò necessario operare delle modifiche anche sulla regolamentazione tradizionale relativa agli edifici. Sempre più spesso, ingegneri e funzionari si ritrovarono a faccia a faccia con il problema di dimostrare che i nuovi concetti in materia di costruzioni fossero comunque sicuri e che gli occupanti sarebbero stati in grado di evacuare correttamente e in sicurezza nel caso in cui si fossero verificate delle emergenze. In questo modo la ricerca orientata alla quantificazione e alla modellazione del movimento del comportamento umano ha subito una forte spinta negli ultimi trent'anni.

In questo capitolo si realizzerà inizialmente una panoramica sulle metodologie di modellizzazione attualmente presenti ed implementate da parte degli studiosi.

Nella seconda parte del capitolo si procederà alla descrizione dell'algoritmo al quale ci si è ispirati per realizzare il modello simulativo che si è poi implementato con AutoMod.

2.1 Metodologie di modellazione

I modelli impiegati per simulare l'evacuazione possono essere raggruppati essenzialmente in due categorie: quelli che tengono in considerazione solo il movimento dei passeggeri e quelli che considerano contemporaneamente i movimenti dei passeggeri e i loro comportamenti.

Alla prima categoria appartengono quei modelli che si basano principalmente sulla capacità della struttura e dei suoi componenti di facilitare lo spostamento degli utenti. Questo tipo di modello, con riferimento anche al determinismo ambientale, è spesso indicato con il nome di "ball-bearing"; gli individui cioè sono trattati come oggetti non pensanti che rispondono in maniera automatica agli stimoli esterni. In questo modello, si assume che le persone inizino immediatamente ad evacuare un determinato ambiente al sopraggiungere del pericolo lasciando incompiuta qualunque attività stessero svolgendo. Inoltre la direzione e la velocità di uscita è definita da considerazioni soltanto di natura fisica (densità della popolazione, capacità dell'uscita). Un esempio può essere costituito da un caso specifico in cui la popolazione di un certo ambiente dimentica la propria individualità e si comporta in maniera "aggregativa" scegliendo in massa la via di fuga.

Alla seconda categoria appartengono, invece, quei modelli che prendono in considerazione non solo caratteristiche fisiche ma trattano l'individuo come un agente attivo, in grado di reagire a stimoli esterni e ai pericoli in maniera individuale e personale, reagendo ad esempio al sopraggiungere di un incendio dopo un personale tempo di reazione, o scegliendo una determinata uscita di sicurezza. Un esempio di questo tipo di modello è EXODUS.

Il modello che abbiamo realizzato attraverso l'ausilio del software AutoMod, come sarà illustrato in seguito, appartiene alla seconda categoria. Il modello, infatti, considera che ogni gruppo di passeggeri abbia un particolare comportamento in reazione agli stimoli, estrinsecato attraverso una serie di parametri caratteristici che lo portano a muoversi ad una certa velocità a

scegliere l'uscita ritenuta opportuna e a farlo indipendentemente dalle scelte dagli altri gruppi.

Attualmente è disponibile un'ampia varietà di differenti metodologie di modellizzazione per poter rappresentare queste differenti categorie di modelli di evacuazione.

Questi modelli sono classificati in differenti categorie in base alle metodologie di base usate per rappresentarli:

- ✓ natura del modello;
- ✓ rappresentazione dell'ambiente di riferimento;
- ✓ prospettiva della popolazione;
- ✓ prospettiva del comportamento degli individui.

Ciascuno di questi aspetti sarà brevemente discusso nel seguito del paragrafo.

2.1.1 Natura del modello

In termini generali, i modelli che simulano le evacuazioni affrontano questo problema in tre differenti modi:

- ✓ ottimizzazione;
- ✓ simulazione;
- ✓ valutazione del rischio.

I principi di fondo di ciascuno di questi approcci influenza le caratteristiche di ciascun modello.

Numerosi modelli assumono che gli occupanti evacuino nella maniera più efficiente possibile l'edificio, ignorando le attività secondarie e quelle non strettamente legate all'evacuazione.

Le vie di fuga scelte durante l'evacuazione sono considerate ottimali, così come le caratteristiche del flusso di persone e le uscite. A questi aspetti tendono i modelli che tengono conto di un gran numero di persone e che trattano gli occupanti come un insieme omogeneo, quindi senza dare peso al comportamento specifico del singolo. Questo genere di modello è detto di Ottimizzazione.

In alternativa, i progettisti potrebbero tentare di rappresentare il comportamento e il movimento delle persone oggetto di studio, non solo per raggiungere specifici risultati, ma anche per rappresentare realisticamente i percorsi e le decisioni prese durante una evacuazione. Questi modelli sono detti di Simulazione. L'artificialità del comportamento impiegata da questi modelli varia notevolmente, come l'esattezza dei risultati ottenuti. Questi modelli potrebbero essere usati per prevedere e/o ricostruire scenari di evacuazione reali. Possono anche essere usati per determinare i layout di configurazione che facilitano una rapida evacuazione o per determinare le procedure di evacuazione ottimali.

I modelli di valutazione del rischio tentano di identificare i rischi connessi con l'evacuazione, che possono derivare dalla presenza di fuoco o di un incidente, e di quantificarne il rischio.

2.1.2 Rappresentazione dell'ambiente di riferimento

Il metodo che un modello utilizza nel rappresentare l'ambiente di riferimento nel quale si esplica la evacuazione è una importante caratteristica del modello, un aspetto chiave in grado di determinare il livello di dettaglio che il modello è in grado di assicurare. Due metodi sono usualmente utilizzati per rappresentare tale ambiente oggetto di analisi:

- ✓ fine networks;
- ✓ coarse networks;

ovvero reti a granularità più o meno fine. In ciascun caso, lo spazio è suddiviso in sotto regioni, e ciascuna sotto regione è connessa con quelle confinanti. I due metodi si differenziano per una differente risoluzione.

Impiegando l'approccio basato sul fine network, lo spazio è suddiviso in una serie di nodi o piccoli tasselli. Ogni nodo o tassello rappresenta una porzione di spazio che può essere occupato da una persona. Le dimensioni di ogni nodo o tassello è solitamente fissato sulla dimensione media di una persona. La connettività tra nodi e tasselli è data dagli archi, che le persone simulate

attraversano muovendosi in questo modo tra nodi e tasselli. Quindi, con i modelli fine network, le persone si spostano da un punto ad un altro all'interno di zone specifiche. La posizione di ciascuna persona risulta così essere nota. Un modello può anche comporsi di migliaia di nodi ed essere suddiviso in un certo numero di aree anch'esse composte da moltissimi nodi. In questo modo è possibile rappresentare accuratamente la geometria di riferimento e gli ostacoli interni e localizzare ciascun individuo al suo interno in qualsiasi momento durante la simulazione dell'evacuazione. Un sistema basato su delle coordinate costituisce una estrema manifestazione del paradigma basato sul fine network.

All'interno del sistema la dimensione di un nodo si riduce fino a diventare molto piccola e le persone possono in questo modo occupare una serie di nodi. Nell'approccio basato sul coarse network lo spazio è suddiviso in compartimenti o grandi regioni di spazio. La connettività tra elementi è garantita dalla presenza di archi. Le persone possono muoversi attraverso i compartimenti attraverso gli archi di collegamento. La localizzazione delle persone all'interno dei compartimenti non è esattamente identificabile, tuttavia può essere approssimata attraverso l'implementazione di opportuni algoritmi. Questo metodo presenta delle difficoltà quando comprende movimenti e spostamenti locali come il sorpasso, la risoluzione di conflitti locali e la possibilità di evitare gli ostacoli. Questo accade perché l'esatta collocazione di un individuo non è rappresentata e quindi non possono essere fatti calcoli dettagliati sugli spostamenti individuali e sulle interazioni tra gli individui stessi. Questa limitazione dovrebbe essere tenuta presente quando si esaminano i modelli comportamentali.

Il beneficio principale di questo approccio è che riduce la quantità di elaborazione al computer, l'utilizzo della memoria, ed infine il tempo di simulazione richiesto; approssimazione tuttavia non necessaria per i problemi confinati in piccoli domini, data la presenza di calcolatori dotati di grandi capacità computazionali.

2.1.3 Prospettiva della popolazione

Un'altra importante caratteristica dei modelli di evacuazione consiste nel metodo che è utilizzato per rappresentare il comportamento delle persone coinvolte nei processi di evacuazione. Questo aspetto legato ai modelli di evacuazione è identificato come “prospettiva della popolazione”. I modelli di evacuazione sono classificati come “Individuali” o “Globali” secondo il punto di vista della popolazione.

I modelli che hanno una prospettiva individuale rappresentano singolarmente ogni membro della popolazione e tracciano il percorso da essi effettuato all'interno dell'ambiente oggetto di simulazione. A ciascun membro della popolazione sono assegnati attributi individuali come età, sesso, indicatori di movimento. Anche se questo tipo di modello pone una forte enfasi sull'individuo non impedisce la formazione di gruppi o piccole coalizioni.

I modelli che hanno una prospettiva Globale non riconoscono il singolo individuo ma delineano la popolazione come un insieme omogeneo, senza differenze individuali. Questi modelli descrivono i dettagli dell'evacuazione non sulla base di una singola specifica evacuazione, ma concentrandosi sulla totalità di persone che devono evacuare.

2.1.4 Prospettiva del comportamento degli individui

Per rappresentare il processo decisionale scelto dagli occupanti, il modello deve incorporare un opportuno metodo per determinare il comportamento degli occupanti. Usando le attuali tecniche di modellizzazione è possibile individuare cinque approcci comuni per la rappresentazione del comportamento degli occupanti nei modelli di simulazione:

- ✓ functional analogy behavior;
- ✓ implicit behavior;
- ✓ rule based behavior;
- ✓ artificial intelligence based behavior;
- ✓ non behavioral component.

2.2 Wayfinding

Uno dei principali studiosi del comportamento umano riferito alle situazioni di emergenza, in particolare agli incendi, è il matematico inglese Ed Galea, direttore del gruppo ingegneristico sulla “fire safety” all’università di Greenwich. Galea ha ripreso il concetto di “wayfinding”, e lo ha implementato in un software simulativo di propagazione dell’evento ed evacuazione.

In “Human Behaviour in Fire” (Conference Proceedings, 2009) si tratta analiticamente il tema dell’evacuazione introducendo un concetto molto importante, che può aiutare a comprendere meglio questo tema. Il concetto adottato è appunto “wayfinding”, che descrive il processo che permette a uomini o animali di orientarsi nello spazio fisico, per spostarsi da un luogo ad un altro.

Qui il termine descrive il processo in cui gli individui, trovandosi in un ambiente chiuso durante una situazione d’emergenza, tentano di trovare un percorso che li porta a una relativa sicurezza, di solito al di fuori dal suddetto ambiente.

Tale processo richiede che gli individui abbiano una mappa mentale o cognitiva dello spazio di riferimento. Si definisce mappatura cognitiva la procedura attraverso la quale l’individuo acquisisce, negozia, ricorda e decodifica informazioni spaziali; questo permette di individuare i principali punti di riferimento di tale spazio come porte, uscite esterne, stanze, scale, scale mobili, sculture, ascensori o simili. La conoscenza del percorso si sviluppa poi attraverso l’associazione di questi punti di riferimento tramite una mappa mentale dello spazio studiato. La conoscenza della configurazione spaziale è raggiunta quando la mappa è completa e le persone riescono ad individuare un sentiero che permette loro di spostarsi dal punto in cui si trovano verso la zona di sicurezza, pur attraversando zone prima sconosciute.

Golledge, studiando il processo di wayfinding in ambito urbanistico, ha ideato una serie di mappe ipotetiche e, distribuendo test a diversi soggetti, ha chiesto loro di individuare un itinerario dal punto A al punto B.

I risultati dei test hanno portato alla definizione di diversi criteri con i quali gli individui sottoposti alla prova hanno individuato il loro percorso.

I criteri più usati sono:

- ✓ minor distanza;
- ✓ minor tempo;
- ✓ minor numero di giri;
- ✓ percorso esteticamente migliore;
- ✓ primo percorso notato;
- ✓ percorso formato da più curve o da più giri;
- ✓ percorso differente rispetto al primo individuato.

Le distanze e i tempi rappresentano dunque i criteri più importanti attraverso i quali gli individui implementano tale processo.

Il lavoro di Golledge pone le basi per l'implementazione di algoritmi di wayfinding nei software di evacuazione, anche se in questo ambito alcuni criteri non risultano essere appropriati, come quello del percorso esteticamente migliore, ed altri sono in contrapposizione tra loro.

Galea ha quindi deciso di usare alcuni tra questi criteri nella costituzione di questi algoritmi: la distanza totale, il tempo totale, il numero di giri totali, la lunghezza del primo tratto, gli angoli di giro e il numero totale di punti decisionali. Egli ha chiamato la collezione di questi criteri "Building Wayfinding Criteria", BWC.

2.3 Algoritmo di wayfinding

L'implementazione dell'algoritmo di ricerca del percorso realizzato dal professor Galea e dal suo gruppo col software "buildingEXODUS" prevede un processo a tre stadi:

1. il primo step rappresenta la codifica delle informazioni spaziali dell'edificio in un grafico;
2. il secondo step consiste nell'applicazione degli algoritmi di ricerca nel grafico per trovare possibili percorsi verso la destinazione e assegnare ai percorsi un costo basato sulle preferenze personali come "tempo minimo" o "distanza minore"; sono poi selezionati i percorsi che offrono il costo minore o un costo superiore al costo minore di non oltre il 10% e cioè quei percorsi che maggiormente rispondono alle preferenze delle persone;
3. il terzo step è l'attuazione e il raffinamento del percorso; in questo step, seguendo il concetto di Downs & Stea, le persone si muovono lungo i percorsi scelti e riesaminano il percorso ad intervalli regolari e possono decidere di utilizzare percorsi alternativi se valutano che un percorso alternativo è più favorevole, per esempio se il percorso iniziale è molto congestionato o bloccato dal fuoco.

Procediamo ora alla descrizione estesa degli step che compongono l'algoritmo.

2.3.1 Rappresentazione spaziale

La rappresentazione spaziale dell'edificio è ottenuta tramite la realizzazione di un grafo matematico di cui le connessioni sono rappresentative dell'edificio.

Gli elementi chiave dell'edificio sono le stanze, i corridoi, le uscite interne e le uscite esterne.

Ognuno di questi elementi è considerato un nodo nel grafo. Questi nodi sono collegati tramite archi che rappresentano le connessioni tra gli elementi dell'edificio.

2.3.2 Mappe cognitive

La seconda fase dell'algoritmo consiste nell'applicazione nei grafici di algoritmi di ricerca dei possibili percorsi per giungere alle destinazioni e nell'assegnazione di un costo ad ogni percorso basato su personali preferenze definite dai criteri prima esposti.

Il grafo di connettività è convertito in un grafo ad albero per consentire una ricerca più veloce dei percorsi sostenibili. I nodi d'uscita formano i nodi radice dell'albero. I nodi sono aggiunti nel seguente ordine:

1. nodi uscita;
2. nodi stanza;
3. uscite interne.

Questo ordine è seguito dalle persone che tenderanno a muoversi dalla stanza attuale ad una uscita interna, ad un'altra stanza e così via finché non si troveranno nella stanza finale dalla quale possono uscire dall'edificio.

L'albero finale, prodotto utilizzando questo metodo, è un esempio di grafo aciclico: una proprietà fondamentale di questo tipo di grafo è che ogni specifico percorso non può coinvolgere cicli, perciò una stanza non può essere visitata più di una volta nello stesso percorso.

Per edifici grandi e complessi l'albero prodotto utilizzando questo metodo può essere piuttosto esteso richiedendo lunghi tempi computazionali per cercare l'albero dei percorsi. Per risolvere questo problema possono essere utilizzati metodi euristici in modo da ridurre la dimensione dell'albero al costo di eliminare alcuni possibili percorsi. Ad ogni modo, l'euristica può essere predisposta per eliminare i percorsi ad elevato costo. Ogni persona potrà avere accesso solo ad un sottoinsieme dell'albero basato sulla sua familiarità con l'edificio. Per esempio a una persona che ha familiarità solo con una uscita dell'edificio può essere consentito di cercare solo tra i percorsi dell'albero che sono connessi con quell'uscita.

Ad ogni percorso dell'albero è associata una funzione di costo; la funzione di costo è determinata prendendo una somma pesata per i criteri di preferenza normalizzata RPC, "Route Preference Criteria", associati ad ogni persona.

Prima che possa essere determinata la funzione di costo, devono essere determinati i criteri di preferenza dei percorsi, per esempio la lunghezza del percorso, il tempo del viaggio o il numero di svolte.

Gli RPC sono determinati utilizzando dati appropriati per ogni percorso.

Nel lavoro presentato, i criteri di preferenza dei percorsi sono determinati utilizzando valori esatti associati ad ogni percorso, tuttavia nella vita reale gli individui non possono essere in grado di determinare questi valori con certezza per cui deve essere introdotta una variabilità nella stima di questi parametri. Per esempio il sottogruppo 1 della popolazione avrà perfetta conoscenza dell'edificio e quindi sarà in grado di determinare i parametri precisamente, il sottogruppo 2 potrebbe essere meno familiare con l'edificio e quindi un certo quantitativo di "nebulosità" sarà introdotta nella determinazione dei parametri, mentre il sottogruppo 3 sarà non familiare con l'edificio e quindi un livello maggiore di variabilità sarà introdotta nella sua stima dei parametri.

Vengono suggeriti alcuni criteri di preferenza dei percorsi, "Route Preference Criteria", utilizzabili in questa fase dell'analisi :

1. DISTANZA – RPC_1 :

rappresenta la lunghezza totale del percorso ed è la somma delle lunghezze di tutti i collegamenti tra i nodi di un percorso.

2. TEMPO – RPC_2 :

il tempo necessario per percorrere il percorso è la somma del tempo utilizzato per coprire l'intera distanza del percorso e del tempo utilizzato nelle congestioni ad ogni nodo di uscita interno lungo il tragitto. Siccome la congestione in ogni uscita interna non è conosciuta all'inizio della simulazione, è utilizzato un livello arbitrario di congestione; utilizzando parametri come la velocità delle persone, la

larghezza delle porte, la dimensione della coda costanti per tutte le persone e tutti i percorsi.

$$\text{Tempo Stimato} = \text{RPC}_2 = \frac{D}{S} + \frac{N * Q}{\text{UFR} * W}$$

Dove:

D = lunghezza del percorso [m]

S = velocità delle persone [m/s]

N = numero di porte lungo il percorso

Q = dimensione della coda ad ogni porta [persone]

UFR = tasso di scorrimento alle porte [persone/(m/s)]

W = larghezza della porta [m]

3. ANGOLO MEDIO – RPC_3 :

l'angolo medio del percorso è definito come la media degli angoli compiuti ad ogni intersezione del percorso. Questo angolo è sempre l'angolo interno dell'intersezione. L'angolo è compreso tra 0 e 180, considerando 0 quando si torna indietro e 180 quando si procede dritto. Maggiore è l'angolo, più il percorso è dritto e quindi maggiormente è preferibile.

4. SVOLTE – RPC_4 :

ad ogni intersezione del percorso, calcolato l'angolo di intersezione, il numero di svolte è incrementato di uno per ogni intersezione con un angolo minore di 175°. Una intersezione con angolo tra 175° e 180° è quasi dritta e quindi non è da considerare una curva. Percorsi con più svolte sono considerati peggiori di percorsi con meno curve come mostrato da Sadalla & Magel. Quindi più curve ha un percorso e meno preferibile è.

5. LUNGHEZZA DEL PRIMO TRATTO – RPC_5 :

la lunghezza del primo tratto di ogni percorso, più lungo è il primo tratto del percorso e più preferibile è il percorso.

6. PUNTI DI DECISIONE – RPC_6 :

un nodo-stanza è considerato un punto di decisione se c'è più di una uscita interna in quella stanza, una uscita interna è considerata un punto di decisione se ci sono più di due uscite interne connesse ad essa. La somma dei punti di decisione lungo il percorso è il numero totale di punti di decisione del percorso. Più punti di decisione ci sono lungo il percorso e meno è preferibile il percorso.

Si procede poi alla normalizzazione di tutti gli RPC.

Si identifica quindi per ogni criterio k il valore massimo di RPC_k , detto $MAX\ RPC_k$, e si divide ogni RPC_k per il $MAX\ RPC_k$.

Questo processo è ripetuto per tutti i RPC ad eccezione di RPC_3 e RPC_5 , cioè i criteri “lunghezza del primo tratto” e “angolo medio”; infatti RPC_3 e RPC_5 , diversamente dagli altri criteri che sono ordinati inversamente alla preferenza, sono direttamente relazionati alla preferibilità del percorso, quindi maggiore è l'angolo medio del percorso o più è lungo il primo tratto, e più è preferibile il percorso. Questi RPC sono normalizzati identificando il valore massimo di RPC_k , sottraendo il massimo ad ogni RPC_k e dividendo la differenza per il massimo. Per RPC_3 , il massimo è assunto essere 180° così da usare l'angolo maggiore possibile.

Dopo avere determinato i valori normalizzati per i criteri di preferenza dei percorsi, e cioè $\overline{RPC_k^i}$, il costo associato ad ogni percorso i per la persona j , con pesi per le preferenze dei percorsi $W_{k,j}$ per ogni criterio di preferenza k , è calcolato come:

$$\begin{aligned} Cost_{i,j} = & W_{1,j} * \overline{RPC_{1,j}} + W_{2,j} * \overline{RPC_{2,j}} + W_{3,j} * \overline{RPC_{3,j}} + \dots \dots \\ & + W_{6,j} * \overline{RPC_{6,j}} \end{aligned}$$

Dove $W_{1,j}$ rappresenta il peso personale associato all' $RPC_{k,j}$ dalla persona j .

La somma di tutti i pesi per la persona j deve risultare 100.

Il metodo appena descritto può essere schematizzato come segue:

1. Ricerca di $MAX RPC_i = MAX \{RPC_{i,j}\}$ fra quelli verso le uscite j
2. Normalizzazione RPC_k , da realizzare in maniera differente secondo il tipo di RPC che si considera:

- a. Per RPC proporzionali alla preferenza

$$\overline{RPC_{i,j}} = RPC_{i,j} / MAX RPC_i$$

- b. Per RPC inversamente proporzionali alla preferenza, come “lunghezza del primo tratto” e “angolo medio”:

$$\overline{RPC_k} = 1 - RPC_j / MAX RPC_{i,j}$$

$$\overline{RPC_k} = (MAX RPC_{i,j} - RPC_j) / MAX RPC_{i,j}$$

3. Calcolo del costo del percorso dalla stanza i all'uscita j , dati i criteri di preferenza $W_{k,j}$, definito come:

$$Cost_{i,j} = W^1 * \overline{RPC_{i,j}^1} + W^2 * \overline{RPC_{i,j}^2} + \\ + W^3 * \overline{RPC_{i,j}^3} + W^4 * \overline{RPC_{i,j}^4}$$

4. Scelta del percorso: il percorso con in costo minore fornisce il miglior abbinamento tra le preferenze personali di ricerca del percorso di ogni persona.

In questo modo si determina una funzione costo per ogni percorso basata sulla preferenze individuale di ogni persona. Il percorso con in costo minore fornisce il miglior abbinamento con le preferenze personali di ricerca del percorso di ogni occupante.

2.3.3 Attuazione del percorso e raffinamento

Il terzo step del processo coinvolge le persone che si muovono lungo il percorso selezionato. Possiamo avere due diversi approcci in questo momento:

1. ricerca del percorso non sequenziale, “Non Sequential Wayfinding” NSW;
2. ricerca del percorso sequenziale, “Sequential Wayfinding”, SW.

Nel modello NSW, di ricerca non sequenziale, tutte le persone prendono una decisione sul percorso dalla loro posizione iniziale e mantengono il percorso scelto durante tutta la simulazione. Utilizzando questo approccio non ci sono raffinamenti del percorso di uscita.

Nel modello SW, con ricerca sequenziale del percorso, le persone sono in grado di modificare il loro percorso basandosi sulla congestione o sulle condizioni del fuoco che incontrano durante il loro percorso verso l'uscita. Qui vengono incluse solamente le modifiche al percorso selezionato basandosi sulla congestione. La congestione impatta il criterio RPC_2 di preferenza del percorso cioè la stima del tempo richiesto per viaggiare lungo il percorso richiesto.

Ci sono due approcci che possono essere utilizzati per tenere in considerazione questo fatto:

1. Local – Prescribed, LP;

usando questo approccio l'equazione usata per stimare RPC_2 è utilizzata ad ogni porta lungo il percorso, ad eccezione della porta nella quale la persona è in quel momento, per stimare il tempo perso. Si assume quindi che la persona abbia accesso a tutte le informazioni sulla stanza in cui è; perciò conosce la dimensione della folla ad ogni uscita interna, la dimensione di ogni porta e il tasso di flusso per ogni porta. Per tutte le altre porte lungo il percorso si considerano i valori di default considerati in precedenza. Questa informazione è utilizzata per rivalutare le opzioni di percorso dalla posizione corrente.

2. Local – Local, LL;

questo approccio è simile al precedente in tutto tranne che per l'uso dei valori di default per stimare il tempo richiesto per passare attraverso tutte le altre porte, per i quali le persone assumono che tutte le altre porte lungo i vari percorsi avranno condizioni simili alle porte nella stanza in cui si trovano

Vengono infine implementate le decisioni prese usando un modello a nodi grossolani che passa le informazioni sul percorso degli individui in nodi affinati con il software simulativo buildingEXODUS.

3 IL MODELLO REALIZZATO

Il presente capitolo inizierà con una breve descrizione di AutoMod, il package simulativo che si è scelto di utilizzare per realizzare il modello simulativo, questa parte del capitolo si concluderà motivando la scelta di utilizzare questo software in un contesto differente da quello per cui è stato pensato inizialmente pur mantenendo la garanzia di ottenere risultati confrontabili con quelli ottenibili attraverso simulazioni eseguite con software specifici.

Nella seconda parte del capitolo sarà presentato il modello teorico per la simulazione della evacuazione che si è deciso di implementare.

Il capitolo sarà infine concluso dalla descrizione del modello simulativo implementato.

3.1 AutoMod

AutoMod è un package di simulazione prodotto da Brooks Software, una divisione della Brooks Automation e offerto da Simula8 Corporation per i clienti con specifiche esigenze specialistiche, costituendo una alleanza strategica nel settore dei software per la simulazione.

Il software di simulazione AutoMod consente di simulare accuratamente impianti industriali di qualsiasi livello di complessità e dettaglio, con operazioni sia manuali sia automatiche. AutoMod consente di aumentare l'efficacia e l'efficienza dei progetti di impianti e sistemi complessi grazie alle sue caratteristiche:

- ✓ animazione e “realtà virtuale”3-D;
- ✓ modellazione interattiva;
- ✓ interfaccia verso fogli di calcolo;
- ✓ sistemi di movimentazione predefiniti.

AutoMod genera animazioni in realtà virtuale che rendono i modelli di simulazione semplici da spiegare, aspetto estremamente importante per la presentazione di soluzioni, idee e alternative.

La comunicazione tra direzione, produzione e progettazione migliora notevolmente grazie all'osservazione di un modello 3D, che può essere fatta da qualsiasi punto dello spazio e in qualsiasi scala, mentre il modello è in funzione. I modelli di AutoMod sono in ambiente CAD-3D e questo facilita l'importazione e l'esportazione del layout fisico dei sistemi di produzione e di movimentazione, è dotato di una potente interfaccia grafica, che rende accuratamente la distanza, la dimensione e lo spazio in 3D.

Molti sistemi di produzione richiedono un'ingente movimentazione di materiali. AutoMod può essere usato per simulare, con ineguagliabile livello di accuratezza, i sistemi di movimentazione ed i flussi nelle loro operazioni sia manuali sia continue. Infatti, la maggior parte dei costruttori di sistemi di movimentazione in tutto il mondo oggi usa AutoMod per dimostrare la corretta progettazione dei loro sistemi. I sistemi di movimentazione sono semplici da modellare grazie alle potenti funzionalità di cui dispone.

Alcuni tra i principali sistemi di movimentazione in tutto il mondo sono stati modellati utilizzando AutoMod, come per esempio il terminal cargo dell'Aeroporto di Malpensa e del porto di Singapore, l'assemblaggio delle Jeep Daimler, le linee di produzione dei motori Fiat-GM.

AutoMod fornisce all'utente dei modelli predefiniti dei sistemi di movimentazione, sviluppati basandosi sull'esperienza nella automazione industriale.

La maggior parte della logica di questi sistemi viene generata automaticamente. I sistemi di movimentazione presenti sono:

- ✓ Path Movers (Veicoli);
- ✓ Power & Free (Automotori);
- ✓ Kinematics (Cinematismi);
- ✓ Train Conveyor (Treni);
- ✓ AS/RS (Trasloelevatori);
- ✓ Bridge Crane (Carri ponte);
- ✓ Tanks & Pipes (Cisterne e condotte, fluidi).

I sistemi di movimentazione di AutoMod uniscono la potenza di un CAD con la semplicità di un'interfaccia utente grafica. E' possibile disegnare i conveyors e definirne le caratteristiche: velocità, accelerazione e decelerazione, tipo di accumulo, stopping e moving space, passo, fotocellule, motori. AutoMod connette automaticamente tra loro le sezioni di conveyors o i percorsi dei veicoli, snellendo così la modellazione. AutoMod riproduce automaticamente molti dei dettagli dei sistemi di movimentazione, aumentando l'accuratezza e la velocità di sviluppo dei modelli. È un software assai flessibile e quindi adatto alla simulazione di ogni dettaglio, automazioni di ogni genere, processi continui, sistemi di distribuzione, flussi documentali, celle di lavoro, layout completi.

Alla luce di tutte le caratteristiche sopra esposte si è voluto provare ad utilizzare AutoMod in un ambito del tutto particolare: quello relativo all'evacuazione di un edificio in caso di emergenza.

Il software ha tutte le caratteristiche che lo rendono idoneo a simulare lo spostamento di un certo numero di persone lungo un percorso. Inoltre alcune caratteristiche legate ad attributi, processi e modo di operare di AutoMod, hanno permesso di adattare le funzionalità presenti, legate principalmente al settore logistico - produttivo, rendendole idonee a garantire la progettazione di un modello in grado di rappresentare correttamente l'evacuazione di un edificio.

Per queste ragioni si ritiene che la scelta di utilizzare il software AutoMod anche in un contesto differente da quello per cui è stato pensato inizialmente garantisca l'ottenimento di risultati molto vicini, se non del tutto simili, a quelli ottenibili attraverso simulazioni eseguite con software specifici e realizzate su larga scala.

3.2 Modello teorico realizzato

Il modello teorico alla base di quello simulativo realizzato tramite AutoMod si ispira, come detto precedentemente, all'algorithmo di Wayfinding del professor Galea.

Alla base del modello realizzato si pone un algoritmo di ricerca che prevede un processo a tre stadi:

1. il primo step rappresenta la raccolta delle informazioni spaziali dell'edificio;
2. il secondo step consiste nell'elaborazione delle informazioni raccolte, allo scopo di trovare i possibili percorsi verso la destinazione, assegnare ai percorsi un costo basato sulle preferenze come "tempo minimo" o "distanza minore";
3. il terzo step consiste nella eventuale suddivisione delle persone presenti in ogni stanza in sottogruppi e nell'assegnazione ad ognuno di essi del percorso che offre il costo minore o un costo superiore al costo minore di non oltre una certa soglia.

A questo punto è possibile eseguire la simulazione, ottenendo tutta una serie di informazioni relative, per esempio, ai tempi di evacuazione e alle distanze percorse.

3.2.1 Raccolta delle informazioni spaziali dell'edificio

In questa fase si considerano tutti i possibili percorsi che collegano le stanze alle uscite. AutoMod, in maniera automatica, fornirà per ogni coppia stanza-uscita il percorso più conveniente in termini di distanza e tempo di percorrenza in condizioni ottimali di traffico nel sistema, si disporrà quindi in totale di un numero di percorsi $N = i * j$ se nel modello sono presenti i stanze e j uscite.

Ad ogni percorso ottenuto si associa una lunghezza, si conteggia il numero di punti di decisione presenti, si misura la lunghezza del primo tratto del percorso e si stima il tempo di percorrenza.

3.2.2 Elaborazione delle informazioni raccolte

I vari percorsi ottenuti al punto precedente sono valutati attraverso il metodo degli RPC, “Route Preference Criteria”. Fra tutti i possibili RPC utilizzabili si è scelto, perché ritenuti maggiormente significativi e più facilmente gestibili tramite AutoMod, di utilizzare i seguenti quattro criteri:

1. DISTANZA – RPC_1 :

rappresenta la lunghezza totale del percorso ed è la somma delle lunghezze di tutti i collegamenti tra i nodi di un percorso.

2. TEMPO – RPC_2 :

il tempo necessario per percorrere il percorso; rappresenta la somma del tempo utilizzato per coprire l'intera distanza del percorso con il tempo speso nelle congestioni ad ogni nodo interno lungo il tragitto; analogamente a quanto indicato da Galea, il tempo è stimato con l'equazione seguente:

$$Tempo\ Stimato = RPC_2 = \frac{D}{S} + \frac{N * Q}{UFR * W}$$

Dove:

D = lunghezza del percorso [m]

S = velocità delle persone [m/s]

N = numero di porte lungo il percorso

Q = dimensione della coda ad ogni porta [persone]

UFR = tasso di scorrimento alle porte [persone/(m/s)]

W = larghezza della porta [m]

3. LUNGHEZZA DEL PRIMO TRATTO – RPC_3 :

la lunghezza del primo tratto di ogni percorso.

4. PUNTI DI DECISIONE – RPC_4 :

un nodo-stanza è considerato un punto di decisione se c'è più di una uscita interna in quella stanza, una uscita interna è considerata un punto di decisione se ci sono più di due uscite interne connesse ad essa. La somma dei punti di decisione lungo il percorso è il numero totale di

punti di decisione del percorso. Più punti di decisione ci sono lungo il percorso e meno è preferibile il percorso.

Per quanto concerne il peso da associare ad ogni criterio di preferenza, si utilizza una visione globale della popolazione e non della singola persona, per cui all'inizio di ogni simulazione è possibile decidere il peso W^1, W^2, W^3, W^4 da associare ad ognuno dei quattro criteri di preferenza per i percorsi. Questa ipotesi non è da considerare limitante alla generalizzazione dei risultati ottenibili, in quanto sono sempre più numerosi gli studi scientifici, di cui alcuni citati nei capitoli precedenti, che ci indicano come modellare il comportamento di persone che evacuano un edificio, specialmente se si deve simulare un numero elevato di occupanti.

A questo punto è possibile associare ad ogni percorso dalla generica stanza i alla generica uscita j un costo tramite il metodo seguente:

1. Ricerca di $MAX RPC_i = MAX \{RPC_{i,j}\}$ fra quelli verso le uscite j
2. Normalizzazione RPC_k , da realizzare in maniera differente secondo il tipo di RPC che si considera:

- a. Per RPC proporzionali alla preferenza (RPC_1, RPC_2 e RPC_4):

$$\overline{RPC_{i,j}} = RPC_{i,j} / MAX RPC_i$$

- b. Per RPC inversamente proporzionali alla preferenza (RPC_3):

$$\overline{RPC_k} = 1 - RPC_j / MAX RPC_{i,j}$$

$$\overline{RPC_k} = (MAX RPC_{i,j} - RPC_j) / MAX RPC_{i,j}$$

3. Calcolo del costo del percorso dalla stanza i all'uscita j , dati i criteri di preferenza W^k , definito come:

$$Cost_{i,j} = W^1 * \overline{RPC_{i,j}^1} + W^2 * \overline{RPC_{i,j}^2} + \\ + W^3 * \overline{RPC_{i,j}^3} + W^4 * \overline{RPC_{i,j}^4}$$

A questo punto è stato associato ad ogni percorso un costo $Cost_{i,j}$ e si può procedere allo step successivo.

3.2.3 Gestione dei gruppi

Ad ogni simulazione è possibile scegliere un “range di accettabilità dei percorsi”. Questo indicherà con quale precisione si desidera che le persone nella simulazione scelgano il percorso che risulta il meno costoso in funzione dei pesi associati ad ogni RPC per la simulazione.

La scelta di questo parametro guiderà la suddivisione degli occupanti di ogni stanza in sottogruppi di persone diretti verso uscite diverse. Questo parametro infatti indica con quale precisione le persone sono in grado di scegliere il percorso ottimale: se il range di accettabilità è per esempio del 10%, saranno considerate accettabili solo le uscite con un costo compreso fra il minimo e il minimo maggiorato del 10%.

Nel caso in cui siano presenti n percorsi il cui costo sia accettabile, la popolazione della stanza si suddividerà in n gruppi che si dirigeranno ognuno verso una uscita e le cui dimensioni saranno proporzionali alla appetibilità dell'uscita stessa.

3.2.4 Simulazione

Questa fase risulta essenziale ai fini del valore del modello.

Durante la simulazione tutti i gruppi escono dalla stanza in cui si trovano inizialmente e seguono il percorso che li porta all'uscita desiderata.

Durante il tragitto ogni gruppo si muoverà con una velocità dipendente dalla sua numerosità (più numeroso sarà il gruppo e minore sarà la velocità che esso potrà mantenere), dovrà attendere ad ogni porta interna un tempo dipendente della numerosità del gruppo e della larghezza della porta attraversata, non potrà superare eventuali gruppi più lenti che si troverà davanti.

John L. Bryan, nel trattato “Behavioral Response to Fire and Smoke” dice che una comune porta larga 910 millimetri sarà in grado di consentire un flusso di 1 persona al secondo e che il suo Flow Rate varierà in maniera proporzionale alla larghezza della porta.

Quindi, per ogni porta larga L millimetri incontrata, un gruppo di N persone dovrà attendere un tempo $WAIT$ pari a:

$$WAIT = \frac{N * 910}{L} [sec]$$

Lo stesso autore stima anche la velocità che un gruppo di persone può tenere evacuando un edificio; questa può essere valutata in funzione della densità dell'edificio in cui ci si trova:

Affollamento	Densità [persone/m ²]	Velocità [m/s]
Minimo	< 0,05	0,538
Moderato	0,10	1,075
Ottimo	0,20	2,151
Crush	0,30	3,226

Tabella 3.1 - Relazione tra affollamento e velocità media di evacuazione

Creando una retta interpolante per questi dati ed in seguito una regressione logaritmica si può ricavare la seguente equazione, che approssima la velocità vel che un gruppo può tenere durante l'evacuazione d di un edificio.

$$vel = 1,7639 * 0,5891^{D_i}$$

Si può notare che, per snellire l'algoritmo e semplificarne l'utilizzo, per calcolare la velocità massima di evacuazione si utilizza D_i , la densità iniziale della stanza i da cui il gruppo parte per l'evacuazione. Si è ipotizzato quindi che questa velocità fosse la massima possibile per il gruppo durante tutta la simulazione. Tale stima risulta essere peggiorativa rispetto le prestazioni effettivamente possibili del gruppo e quindi garantisce un margine di sicurezza, sovrastimando leggermente i tempi richiesti per l'evacuazione.

3.3 Modello simulativo implementato

Il modello realizzato si basa su un sistema di tipo *Path Mover*.

L'evacuazione di ogni tipo di edificio può essere simulata tramite questo modello, infatti è stato realizzato un insieme di processi estremamente flessibile che permette, realizzando ex novo per ogni edificio il solo sistema *Path Mover*, di adattare il modello a qualsiasi situazione.

Ogni edificio può essere facilmente rappresentato in quanto AutoMod consente l'importazione di file AutoCAD di tipo “.dxf” e cioè dei disegni di interscambio di AutoCAD. Questa possibilità è estremamente importante, in quanto per ogni edificio al giorno d'oggi si dispone delle piante in formato AutoCAD; importare la pianta dell'edificio di cui si vuole simulare l'evacuazione consentirà di realizzare un sistema *Path Mover* estremamente realistico e quindi di ottenere risultati finali altrettanto verosimili.

Basandosi sulla pianta dell'edificio vengono realizzati tutti i percorsi, a due sensi di marcia, sui quali i gruppi di persone, rappresentati da veicoli che trasportano dei *Load*, sono liberi di muoversi per raggiungere l'uscita desiderata a partire dalla stanza in cui si trovano all'inizio della simulazione.

Nel sistema sono inoltre presenti *Control Point* che, secondo i casi, rappresentano:

- ✓ porte interne;
- ✓ uscite;
- ✓ incroci e punti di decisione;
- ✓ baricentri delle stanze.

Il movimento dei veicoli da un *Control Point* all'altro, e quindi delle persone da un punto all'altro dell'edificio, è molto flessibile e facilmente gestibile dall'esterno, questo rende AutoMod ed in particolare il sistema *Path Mover* estremamente adatto per la gestione degli stessi tramite il modello teorico precedentemente enunciato.

3.3.1 Struttura

Come detto, il modello è stato pensato ricercando la massima flessibilità possibile, per farlo si è pensato di realizzarlo come virtualmente suddiviso in due blocchi:

1. una parte permanente, da mantenere invariata per ogni evacuazione che si vuole simulare;
2. una parte flessibile, da modificare secondo ogni edificio di cui si vuole simulare l'evacuazione .

Nella prima parte sono inclusi tutti i processi, i *Load*, le code, e le variabili; si tratta del cuore del modello stesso. Sono infatti questi elementi che consentono l'adattabilità ad ogni tipo di edificio, tramite essi avviene l'analisi di ogni edificio che ci si trova davanti e la gestione di tutte le informazioni necessarie per l'evacuazione.

La seconda parte comprende solo i sottosistemi di tipo *Static* e *Path Mover*, nel primo si possono infatti caricare le piante AutoCAD dell'edificio desiderato e il secondo va poi realizzato di volta in volta, secondo il procedimento sotto riportato, basandosi sulla pianta dell'edificio.

3.3.2 Layout del sistema

Come spiegato precedentemente, perché il modello funzioni correttamente e possa simulare l'evacuazione di qualsiasi possibile layout è necessario seguire un semplice procedimento.

In primo luogo è necessario disporre delle planimetrie dell'edificio del quale si vogliono simulare le evacuazioni, si dovrà quindi caricare nel sottosistema di tipo *static* la planimetria in formato “.*dxf*” tramite il comando *read*.

I percorsi che le persone nella simulazione potranno percorrere per evacuare l'edificio dipendono dalla realizzazione del sistema “percorsi” di tipo *Path Mover* che si implementa.

Tutte le persone saranno, secondo i criteri già indicati in precedenza e spiegati dettagliatamente in seguito, unite in gruppi che lasceranno l'edificio.

I vari gruppi realizzeranno l'evacuazione muovendosi su carrelli AGV nei percorsi presenti nel sistema *Path Mover*. Perché il programma possa funzionare correttamente, la realizzazione dei percorsi dovrà seguire alcune semplici regole.

Le stanze, indicate con dei *Control Point*, dovranno essere numerate in maniera progressiva da 1 ad N [1 ... N], quindi si dovrà fare lo stesso per tutte le porte interne [1 ... M] ed infine per le porte di uscita verso l'esterno [1 ... L], tale numerazione dovrà essere la medesima utilizzata poi nei file di input.

Fatto ciò, sfruttando il layout precedentemente caricato, si potranno realizzare tutti i percorsi a partire dal baricentro di ogni stanza fino alle porte, ai corridoi e alle uscite esterne. Tutti i percorsi dovranno essere bidirezionali, quelli che raggiungono le uscite saranno prolungati al di fuori dell'edificio in modo da poter collocare all'esterno i punti di accumulo delle persone evacuate. Inoltre da almeno una delle uscite dovrà partire un segmento sul quale sarà collocato il "garage" dal quale partiranno gli AGV prima dell'inizio della simulazione e nel quale resteranno gli eventuali carrelli in eccesso.

A questo punto si procederà con la collocazione di tutti i *Control Point*:

- *room_[n]*; collocato nel baricentro della stanza "n", da qui inizieranno la simulazione tutte le persone che si troveranno nella stanza "n" ad inizio simulazione;
- *exit_[l]*; collocato in corrispondenza della porta di uscita "l" verso l'esterno;
- *ext_[l]*; collocato all'esterno dell'uscita "l" e nel quale si accumuleranno le persone che evacuano l'edificio tramite l'uscita "l";
- *door_[m]*; da collocare in corrispondenza di tutte le porte interne all'edificio, questi CP risulteranno fondamentali all'atto della scelta della via di fuga ottimale;
- *cross_[i]*; da collocare in corrispondenza di ogni incrocio fra più percorsi, sebbene la numerazione non risulterà rilevante, il numero di questi CP che si incontrerebbero lungo la via di fuga costituirà un parametro di scelta della via di fuga;

- *garage*; da collocare all'esterno dell'edificio, da esso entreranno gli AGV nella fase preventiva alla simulazione ed in esso resteranno tutti gli AGV non necessari alla simulazione.

Infine si dovrà collocare una *Park List* in ogni *Control Point* di tipo *exit_[l]*, in tale lista dovrà essere presente solo il punto di accumulo *ext_[l]* relativo all'uscita stessa, in modo da poter mantenere in essi gli AGV che hanno sfruttato l'uscita "l" per evacuare l'edificio.

3.3.3 Load

Un *Load* di tipo "L_dummy" gestisce il sistema eseguendo il processo "main"; tramite il quale vengono eseguite nel giusto ordine tutte le fasi della simulazione, altri *Load*, di tipo "L_gruppo" vengono generati ed utilizzati per simulare il comportamento dei gruppi. Essi verranno caricati dai veicoli e si movimentano lungo i percorsi fino all'uscita desiderata.

Infine *Load* di tipo "L_sirena" simuleranno sirene lampeggianti in prossimità di ogni uscita disponibile.

3.3.4 Load Attribute

Nome	Tipo	Dim	Descrizione Contenuto
VLA_mia_stanza	Integer	1	Stanza del gruppo prima che inizi l'evacuazione
VLA_mia_uscita	Integer	1	Uscita verso cui il gruppo deve dirigersi
VLA_id_gruppo	Integer	1	Numero identificativo del gruppo
VLA_mia_velocita	Real	1	Velocità di movimento del gruppo durante la simulazione
VLA_CP	Location	2	Ultimo <i>Control Point</i> inserito (1) e prossimo <i>Control Point</i> da inserire (2) nella lista "V_L_CP" dei <i>Control Point</i>
VLA_T_tempo	Real	3	Istanti di inizio (1) e fine (2) evacuazione e durata del viaggio (3) per il gruppo
i, j, k	Integer	1	Contatori utilizzati per eseguire i cicli nei processi
q	Real	1	Contatore, di tipo real, da usare anche per memorizzazioni temporanee di variabili non intere

Tabella 3.2- Load Attribute

Nella tabella precedente sono mostrati i *Load Attribute* utilizzati nel modello; questi sono appunto gli attributi dei load. Per ognuno è mostrato il tipo di variabile di cui si tratta, la dimensione e una breve descrizione dell'utilizzo che ne viene fatto dell'attributo nel modello.

3.3.5 Variabili

Nella tabella seguente sono elencate tutte le variabili utilizzate dal modello, vengono evidenziate, anche per esse, le principali caratteristiche: il tipo di variabile, la dimensione e una breve descrizione dell'utilizzo che ne viene fatto nel sistema.

Variabile	Tipo	Dim	Descrizione Contenuto
V_affollamento	Real	1	Affollamento percentuale dell'edificio rispetto al massimo ammissibile
V_area_totale	Integer	1	Superficie totale dell'edificio
V_autostat	Integer	1	Indicatore di funzionamento o meno in modalità AutoStat: se è inizializzata a 0 modalità standard, se a 1 funzionamento con AutoStat
V_autostat_RPC	Integer	1	Indicatore di funzionamento o meno in modalità AutoStat per quanto riguarda gli RPC
V_autostat_RPC1	Integer	1	Se V_autostat_RPC=1, qui viene inizializzato da AutoStat il peso di RPC_1
V_autostat_RPC2	Integer	1	Se V_autostat_RPC=1, qui viene inizializzato da AutoStat il peso di RPC_2
V_autostat_RPC3	Integer	1	Se V_autostat_RPC=1, qui viene inizializzato da AutoStat il peso di RPC_3
V_autostat_RPC4	Integer	1	Se V_autostat_RPC=1, qui viene inizializzato da AutoStat il peso di RPC_4
V_caratt_porte	Real	300, 2	Per ogni porta interna i vengono memorizzati larghezza ($j=1$) e UFR ($j=2$)

V_caratt_uscite	Real	100, 3	Per ogni uscita i vengono memorizzati larghezza ($j=1$), UFR ($j=2$) e disponibilità o meno nella simulazione ($j=3$)
V_costo_percorso	Real	200, 100, 2	Per $k=1$, costo del percorso per andare dalla stanza i all'uscita j ; per $k=2$, percentuale assegnata
V_densita_max	Real	200	Massima densità ammissibile per la stanza i
V_dimensio_ gruppo	Integer	200, 100	N° di persone nel gruppo che va dalla stanza i all'uscita j
V_distanze	Real	200, 100, 2	Distanza tra la stanza i e l'uscita j ; se $k=1$ è la distanza in metri, se $k=2$ è la distanza normalizzata
V_gruppi	Integer	1	N° di gruppi che sono presenti e devono evacuare l'edificio
V_input_layout	FilePTR	1	Puntatore al file di input "input_layout.txt"
V_input_porte	FilePTR	1	Puntatore al file di input "input_porte.csv"
V_input_stanze	FilePTR	1	Puntatore al file di input "input_stanze.csv"
V_input_uscite	FilePTR	1	Puntatore al file di input "input_uscite.csv"
V_L_CP	Location List	200, 100	Lista dei CP incontrati per andare dalla stanza i alla uscita j
V_lung_primo_ tratto	Real	200, 100, 2	Lunghezza del primo tratto tra la stanza i e l'uscita j ; se $k=1$ è in metri, se $k=2$ è normalizzata
V_max_gruppi	Integer	1	N° massimo di gruppi ammissibili nella simulazione, quindi il numero di AGV utilizzabili
V_max_stanze	Integer	1	N° massimo di stanze ammissibili nella simulazione

V_max_uscite	Integer	1	N° massimo di uscite ammissibili nella simulazione
V_n_decision_points	Real	200, 100, 2	N° punti di decisione lungo il percorso dalla stanza i all'uscita j ; se $k=1$ è numero puro, se $k=2$ è normalizzato
V_numero_incroci	Integer	1	N° incroci intesi come punti decisionali, nel layout
V_numero_persone	Integer	1	N° di persone che prenderanno parte alla simulazione
V_numero_porte	Integer	1	N° porte interne nel layout
V_numero_stanze	Integer	1	N° delle stanze nella quale possono essere le persone
V_numero_uscite	Integer	1	N° uscite disponibili nel layout
V_output_distanze	FilePTR	1	Puntatore al file di output "output_distanze.csv"
V_output_gruppi	FilePTR	1	Puntatore al file di output "output_gruppi.csv"
V_output_messaggi	FilePTR	1	Puntatore al file di output "output_messaggi.txt"
V_output_tempi	FilePTR	1	Puntatore al file di output "output_tempi.csv"
V_parcheggiati	Integer	1	N° di AGV che non servono e quindi vengono bloccati
V_porte_percorso	Integer	200, 100	Porte da attraversare lungo il percorso dalla stanza i all'uscita j
V_porte_significative	Integer	1	N° di porte che rallentano un gruppo durante l'evacuazione
V_primo_arrivato	Integer	200	Per ogni stanza i , se 0 non è ancora arrivato nessun gruppo nella stanza i , se 1 è già arrivato il primo gruppo nella stanza i
V_range_percorsi	Integer	1	Range di accettabilità dei percorsi sub ottimi, compresa tra 0 e 100
V_stanze	Integer	200, 2	Area della stanza i in m^2 ($j=1$) e occupanti iniziali della stanza ($j=2$)

V_stringa_inutile	String	1	Supporto per leggere dai file di input le intestazioni inutili ai fini del modello
V_suddividi_costo	Real	200, 3	Variabile di supporto per calcolare il costo dei percorsi
V_suddividi_persone	Integer	200, 3	Variabile di supporto per suddividere le persone delle stanze in sottogruppi diretti alle uscite
V_T_evacuazione	Real	200, 100	Tempo impiegato dal gruppo i a raggiungere l'uscita j
V_T_evacuazione_stat	Real	5	Tempi statisticamente significativi: tempo minimo (1), massimo (2), medio (3), varianza (4) e deviazione standard (5)
V_tempo_fuga	Real	200, 100, 2	Tempo per andare dalla stanza i all'uscita j ; se $k=1$ è in secondi, se $k=2$ è normalizzato
V_usciti	Integer	1	N° di gruppi che hanno evacuato l'edificio correttamente
V_W_RPC	Real	4	Peso dei Route Preference Criteria: distanza = V_W_RPC(1); tempo stimato = V_W_RPC(2); lung. primo tratto = V_W_RPC(3); n° di punti di decisione = V_W_RPC(4);

Tabella 3.3 - Variabili

Si vuole infine sottolineare che attualmente il modello è predisposto per effettuare simulazioni inerenti edifici con i seguenti limiti alle massime dimensioni del layout:

- ✓ 200 stanze massime;
- ✓ 300 porte interne massime;
- ✓ 100 uscite interne massime.

Questa scelta non risulta in alcun modo un limite del modello, infatti si tratta semplicemente di un compromesso per mantenere prestazioni elevate in termini di velocità di simulazione e contemporaneamente di potere modellare edifici di dimensioni moderatamente elevate, come per esempio la Facoltà di Ingegneria situata in Via Terracini. Nulla impedisce però di aumentare queste dimensioni massime se si vuole lavorare su edifici di dimensioni e complessità maggiore o viceversa di ridurre tali limiti in modo da aumentare la velocità di simulazione nel caso si lavori su edifici più piccoli.

3.3.6 Processi

I processi utilizzati nella rappresentazione del sistema sono undici:

- ✓ P_RPC;
- ✓ P_gruppo_entra;
- ✓ P_gruppo_esce;
- ✓ P_invia_gruppi;
- ✓ P_leggi_input;
- ✓ P_main;
- ✓ P_parcheggia;
- ✓ P_percorsi;
- ✓ P_prepara_stanze;
- ✓ P_sirena(100);
- ✓ P_statistiche.

Il grafico in Figura 3.1 può aiutare nella comprensione della struttura dei processi e delle relazioni principali tra loro esistenti. In esso vengono inoltre evidenziate le cinque fasi principali in cui è suddiviso il modello simulativo:

1. lettura input relativi all'edificio di cui si vuole simulare l'evacuazione;
2. analisi dello scenario riferito al particolare edificio;
3. preparazione di tutti i dati che saranno necessari allo svolgimento dell'evacuazione e invio dei gruppi all'interno dell'edificio;
4. simulazione dell'evacuazione;
5. analisi statistica dei dati relativi la simulazione e realizzazione dei file di output.

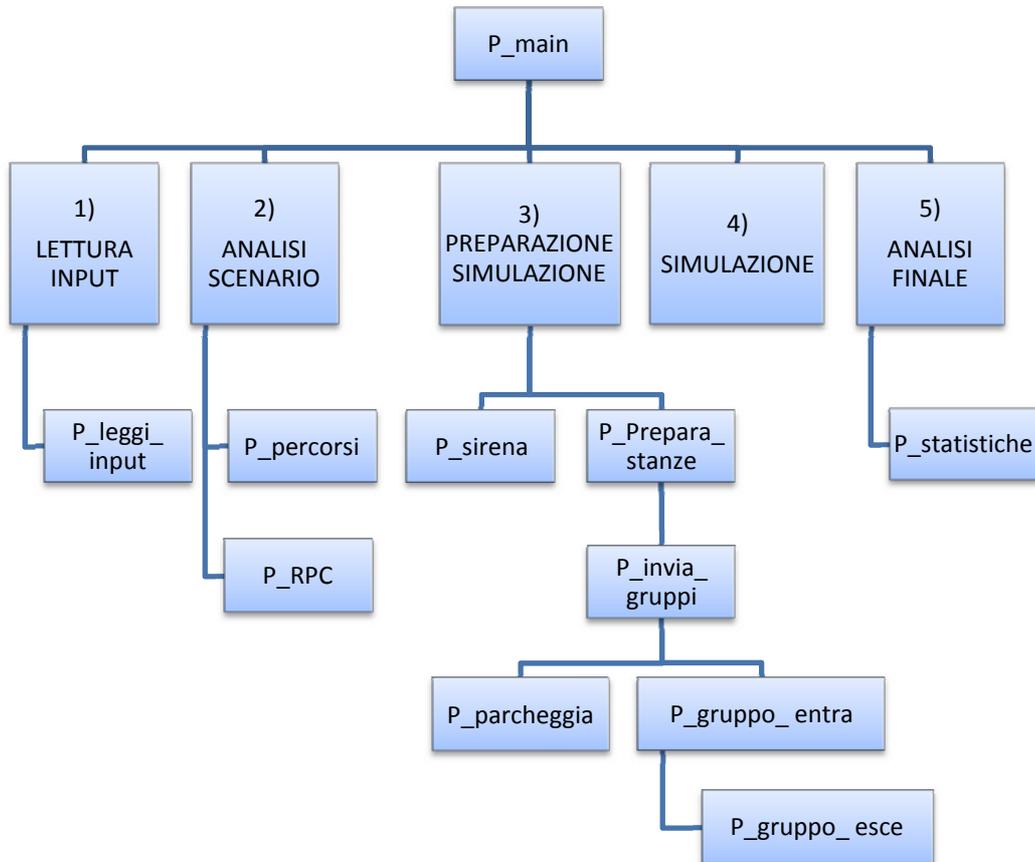


Figura 3.1- Relazioni tra i processi

Come si può notare la struttura del modello segue una semplice ed intuitiva struttura logica.

Inizialmente avviene una fase di preparazione del layout e quindi dell'edificio in generale di cui si vuole simulare l'evacuazione; successivamente viene analizzato lo scenario particolare che si vuole analizzare.

A questo punto si può procedere alla simulazione della evacuazione vera e propria, che per avvenire prevede una iniziale suddivisione degli occupanti in gruppi e quindi la fuga dall'edificio.

Infine, liberato l'edificio, possono essere calcolate le statistiche relative ai risultati dello scenario simulato.

⇒ P_main

Questo processo è eseguito da un solo *load*, di tipo L_dummy, che gestisce tutta la simulazione, facendo eseguire nel giusto ordine tutti i processi e generando di volta in volta altri *load* L_dummy per eseguire le specifiche operazioni necessarie.

Il codice del processo è il seguente:

```
begin
/* preparazione del file esterno su cui scrivere */
open "arc/output_messaggi.txt" for writing save result as V_output_messaggi
open "arc/output_gruppi.csv" for writing save result as V_output_gruppi
open "arc/output_stat_distanze.csv" for appending save result
    as V_output_distanze
open "arc/output_stat_tempi.csv" for appending save result as V_output_tempi

/*
1)ESECUZIONE IN BACKGROUND della lettura file esterni
*/

/* lettura file esterni e memorizzazione variabili */
clone 1 load to P_leggi_input
print " " to message
print " _____ "
    to message
print " " to message
print "===> 1) LETTURA DEI FILE ESTERNI <=== " to message
print " _____ "
    to message
print " " to message
print " " to message
print " " to V_output_messaggi
print " _____ "
    to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
print "===> 1) LETTURA DEI FILE ESTERNI <=== " to V_output_messaggi
print " _____ "
    to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
wait to be ordered on OL_background
/* quando proseguo sono stati memorizzati tutti i dati */
```

```

/*
2)ESECUZIONE IN BACKGROUND delle analisi dello scenario preventive alla
simulazione
*/
print " " to message
print " _____ "
    to message
print " " to message
print "===> 2) ANALISI DELLO SCENARIO DA SIMULARE <===" to message
print " _____ "
    to message
print " " to message
print " " to message
print " " to V_output_messaggi
print " _____ "
    to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
print "===> 2) ANALISI DELLO SCENARIO DA SIMULARE <==="
    to V_output_messaggi
print " _____ "
    to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
/* scrittura dei CP che compongono ogni percorso possibile */
clone 1 load to P_percorsi
print " " to message
print "===> 2A) Realizzazione dei percorsi considerati nella simulazione
    <===" to message
print " " to message
print " " to V_output_messaggi
print "===> 2A) Realizzazione dei percorsi considerati nella simulazione
    <===" to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
wait to be ordered on OL_background
/* quando proseguo sono stati scritti su "V_lista_CP" i CP che compongono i
vari percorsi */
/* CALCOLO RPC */
clone 1 load to P_RPC
print " " to message
print "===> 2B) Calcolo degli RPC - Route Preference Criteria <===" to
message
print " " to message
print " " to V_output_messaggi

```

```

print "===> 2B) Calcolo degli RPC - Route Preference Criteria <==="
    to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
wait to be ordered on OL_background
/* quando proseguo sono stati calcolati i vari RPC di tutti i percorsi
ammissibili */

/*
3)FASE PREVENTIVA alla simulazione
*/

print " " to message
print " _____ "
    to message
print " " to message
print "===> 3) FASE PREVENTIVA ALLA SIMULAZIONE <===" to message
print " _____ "
    to message
print " " to message
print " " to message
print " " to V_output_messaggi
print " _____ "
    to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
print "===> 3) FASE PREVENTIVA ALLA SIMULAZIONE <===" to V_output_messaggi
print " _____ "
    to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
/* calcolo del numero di gruppi che saranno presenti nella simulazione */
clone 1 load to P_prepara_stanze
/* attivazione delle sirene */
set j to 1
while j < V_numero_uscite do
begin
    create 1 load L_sirena to P_sirena(j)
    inc j by 1
end

/* attesa del posizionamento nelle stanze di tutti i gruppi prima di fare
partire l'evacuazione */
wait to be ordered on OL_background

/*
4)FASE DI SIMULAZIONE

```

```

*/

print " " to message
print " _____ "
to message
print " " to message
print "===> 4) SIMULAZIONE <===" to message
print " _____ "
to message
print " " to message
print " " to message
print " " to V_output_messaggi
print " _____ "
to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
print "===> 4) SIMULAZIONE <===" to V_output_messaggi
print " _____ "
to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
/* l'ultimo load è pronto posso far partire l'evacuazione */
print " " to message
print "Tutti i gruppi sono pronti nella stanza da cui inizieranno la
simulazione," to message
print "fra 5 minuti inizio simulazione dell'evacuazione" to message
print " " to message
print " " to V_output_messaggi
print "Tutti i gruppi sono pronti nella stanza da cui inizieranno la
simulazione," to V_output_messaggi
print "fra 5 minuti inizio simulazione dell'evacuazione"
to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
wait for 5 min
order all loads from OL_allarme to continue
print "***** INIZIO SIMULAZIONE DELL'EVACUAZIONE *****" to message
print " " to message
print "***** INIZIO SIMULAZIONE DELL'EVACUAZIONE *****" to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
/* attesa dell'evacuazione di tutti i load */
wait to be ordered on OL_background
print " " to message
print "***** SIMULAZIONE DELL'EVACUAZIONE TERMINATA *****" to message
print " " to message
print " " to V_output_messaggi

```

```

print "***** SIMULAZIONE DELL'EVACUAZIONE TERMINATA *****"
    to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi

/*
5)fase di analisi della simulazione
*/

print " " to message
print " _____ "
    to message
print " " to message
print "===> 4) ANALISI DELLA SIMULAZIONE <===" to message
print " _____ "
    to message
print " " to message
print " " to message
print " " to V_output_messaggi
print " _____ "
    to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
print "===> 4) ANALISI DELLA SIMULAZIONE <===" to V_output_messaggi
print " _____ "
    to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
/* calcolo dei dati statistici della simulazione effettuata */
clone 1 load to P_statistiche
/* attesa del posizionamento nelle stanze di tutti i gruppi prima di fare
partire l'evacuazione */
wait to be ordered on OL_background
print " " to message
print "***** RUN TERMINATO *****" to message
print " " to message
print " " to V_output_messaggi
print "***** RUN TERMINATO *****" to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
terminate
end

```

⇒ P_leggi_input

Questo processo esegue la lettura di tutti i file esterni di input. Inoltre, leggendo le apposite variabili di input V_autostat e V_autostat_RPC, è in grado di capire se e quali variabili non debbano essere lette nei file di input in quanto gestite tramite AutoStat.

Il codice del processo è il seguente:

```
begin
/* 1 LAYOUT */
/* lettura da file esterno delle caratteristiche del layout */
open "arc/input_layout.txt" for reading save result as V_input_layout
read V_stringa_inutile from V_input_layout with delimiter "\t"
read V_stringa_inutile, V_numero_stanze from V_input_layout
  with delimiter "\t"
read V_stringa_inutile, V_numero_uscite from V_input_layout
  with delimiter "\t"
read V_stringa_inutile, V_numero_porte from V_input_layout
  with delimiter "\t"
read V_stringa_inutile, V_numero_incroci from V_input_layout
  with delimiter "\t"
print " " to message
print "==> Lettura da file esterno delle caratteristiche del layout: <=="
  to message
print "> Numero stanze = ", V_numero_stanze to message
print "> Numero uscite = ", V_numero_uscite to message
print "> Numero porte interne = ", V_numero_porte to message
print "> Numero incroci = ", V_numero_incroci to message
print " " to V_output_messaggi
print "==> Lettura da file esterno delle caratteristiche del layout: <=="
  to V_output_messaggi
print "> Numero stanze = ", V_numero_stanze to V_output_messaggi
print "> Numero uscite = ", V_numero_uscite to V_output_messaggi
print "> Numero porte interne = ", V_numero_porte to V_output_messaggi
print "> Numero incroci = ", V_numero_incroci to V_output_messaggi
if V_numero_stanze > V_max_stanze then
  begin
  print "!!!! N° stanze ammissibili non sufficiente per simulare
    l'evacuazione, mancano ", (V_numero_stanze - V_max_stanze),
    " stanze !!!!!" to message
  print "!!!!* aumentare il numero di stanze ammissibili di default
```

```

        nella simulazione e tentare nuovamente *!#!*" to message
print "!!!! N° stanze ammissibili non sufficiente per simulare
    l'evacuazione, mancano ", (V_numero_stanze - V_max_stanze),
    " stanze !!!!!" to V_output_messaggi
print "!!#!* aumentare il numero di stanze ammissibili di default
    nella simulazione e tentare nuovamente *!#!*"
    to V_output_messaggi
terminate
end
if V_numero_uscite > V_max_uscite then
begin
print "!!!! N° uscite ammissibili non sufficiente per simulare
    l'evacuazione, mancano ", (V_numero_uscite - V_max_uscite),
    " uscite !!!!!" to message
print "!!#!* aumentare il numero di uscite ammissibili di default
    nella simulazione e tentare nuovamente *!#!*" to message
print "!!!! N° uscite ammissibili non sufficiente per simulare
    l'evacuazione, mancano ", (V_numero_uscite - V_max_uscite),
    " uscite !!!!!" to V_output_messaggi
print "!!#!* aumentare il numero di uscite ammissibili di default
    nella simulazione e tentare nuovamente *!#!*"
    to V_output_messaggi
terminate
end
/* 2 RPC */
/* verifico se devo leggere i pesi dei vari RPC da file esterno o provvederà
autostat ad inizializzarli */
if V_autostat_RPC = 0 then /* esecuzione tramite lettura da input */
begin
/* lettura da file esterno */
read V_stringa_inutile from V_input_layout with delimiter "\t"
read V_stringa_inutile from V_input_layout with delimiter "\t"
read V_stringa_inutile, V_W_RPC(1) from V_input_layout
    with delimiter "\t"
read V_stringa_inutile, V_W_RPC(2) from V_input_layout
    with delimiter "\t"
read V_stringa_inutile, V_W_RPC(3) from V_input_layout
    with delimiter "\t"
read V_stringa_inutile, V_W_RPC(4) from V_input_layout
    with delimiter "\t"
print " " to message
print "==> Lettura da file esterno dei pesi degli RPC: <=="
    to message
print "Peso RPC_1 = Distanza = ", V_W_RPC(1) to message

```

```

print "Peso RPC_2 = Tempo = ", V_W_RPC(2) to message
print "Peso RPC_3 = Lunghezza primo tratto = ", V_W_RPC(3) to message
print "Peso RPC_4 = Punti di decisione = ", V_W_RPC(4) to message
print " " to V_output_messaggi
print "==> Lettura da file esterno dei pesi degli RPC: <=="
      to V_output_messaggi
print "Peso RPC_1 = Distanza = ", V_W_RPC(1) to V_output_messaggi
print "Peso RPC_2 = Tempo = ", V_W_RPC(2) to V_output_messaggi
print "Peso RPC_3 = Lunghezza primo tratto = ", V_W_RPC(3)
      to V_output_messaggi
print "Peso RPC_4 = Punti di decisione = ", V_W_RPC(4)
      to V_output_messaggi
end
if V_autostat_RPC = 1 then /* esecuzione tramite autostat */
begin
/* leggo comunque, ma senza memorizzarli, gli input */
read V_stringa_inutile from V_input_layout with delimiter "\t"
read V_stringa_inutile from V_input_layout with delimiter "\t"
read V_stringa_inutile, V_stringa_inutile from V_input_layout
      with delimiter "\t"
read V_stringa_inutile, V_stringa_inutile from V_input_layout
      with delimiter "\t"
read V_stringa_inutile, V_stringa_inutile from V_input_layout
      with delimiter "\t"
read V_stringa_inutile, V_stringa_inutile from V_input_layout
      with delimiter "\t"
/* calcolo degli RPC percentuali da utilizzare nella simulazione */
set q to V_autostat_RPC1 + V_autostat_RPC2 + V_autostat_RPC3
      + V_autostat_RPC4
set V_W_RPC(1) to ( ( V_autostat_RPC1 / q ) * 100 )
set V_W_RPC(2) to ( ( V_autostat_RPC2 / q ) * 100 )
set V_W_RPC(3) to ( ( V_autostat_RPC3 / q ) * 100 )
set V_W_RPC(4) to ( ( V_autostat_RPC4 / q ) * 100 )
set q to V_W_RPC(1) + V_W_RPC(2) + V_W_RPC(3) + V_W_RPC(4)
if q <> 100 then
begin
print "!!!!!! ERRORE BILANCIAMENTO PESI RPC !!!!!!"
      to V_output_messaggi
terminate
end
/* stampa dei pesi degli RPC che saranno utilizzati */
print " " to V_output_messaggi
print "==> ESECUZIONE DELLA SIMULAZIONE IN MODALITA' AUTOSTAT <=="

```

```

        to V_output_messaggi
    print " -> i pesi degli RPC sono gestite da AutoStat e non letti da
        file di input <-" to V_output_messaggi
    print "Peso RPC_1 = Distanza = ", V_W_RPC(1) to V_output_messaggi
    print "Peso RPC_2 = Tempo = ", V_W_RPC(2) to V_output_messaggi
    print "Peso RPC_3 = Lunghezza primo tratto = ", V_W_RPC(3)
        to V_output_messaggi
    print "Peso RPC_4 = Punti di decisione = ", V_W_RPC(4)
        to V_output_messaggi
end

/* lettura da file esterno del range accettabilità di percorsi subottimi */
read V_stringa_inutile from V_input_layout with delimiter "\t"
read V_stringa_inutile, V_range_percorsi from V_input_layout
    with delimiter "\t"
print " " to message
print "=> Lettura da file esterno del range dei percorsi sub-ottimi
    accettabili <==" to message
print "Range dei percorsi sub-ottimi = ", V_range_percorsi, " % rispetto al
    migliore " to message
print " " to V_output_messaggi
print "=> Lettura da file esterno del range dei percorsi sub-ottimi
    accettabili <==" to V_output_messaggi
print "Range dei percorsi sub-ottimi = ", V_range_percorsi, " % rispetto al
    migliore " to V_output_messaggi

/* 3 AFFOLLAMENTO - PORTE SIGNIFICATIVE */
/* verifico se devo leggere affollamento e porte da considerare da file
    esterno o provvederà autostat ad inizializzarli */
if V_autostat = 0 then /* esecuzione tramite lettura da input */
    begin
        /* lettura da file esterno del numero di porte che fanno rallentare i
            gruppi */
        read V_stringa_inutile, V_porte_significative from V_input_layout
            with delimiter "\t"
        print " " to message
        print "=> Lettura da file esterno del numero di porte che rallentano
            i gruppi di persone <==" to message
        print "Numero di porte che rallenteranno i gruppi = ",
            V_porte_significative to message
        print " " to V_output_messaggi
        print "=> Lettura da file esterno del numero di porte che rallentano
            i gruppi di persone <==" to V_output_messaggi
        print "Numero di porte che rallenteranno i gruppi = ",
            V_porte_significative to V_output_messaggi
    end
end

```

```

/* lettura da file esterno della densità di persone nell'edificio */

read V_stringa_inutile, V_affollamento from V_input_layout
  with delimiter "\t"
if V_affollamento < 10 then
  begin
print "Affollamento ipotizzato del << ", V_affollamento, "%
      >>, la simulazione non sarebbe significativa!!! "
      to message
print "Si considera necessario un affollamento minimo del
      << 10% >>, quindi la simulazione sara' terminata!!! "
      to message
print "Affollamento ipotizzato del << ", V_affollamento, "%
      >>, la simulazione non sarebbe significativa!!! "
      to V_output_messaggi
print "Si considera necessario un affollamento minimo del
      << 10% >>, quindi la simulazione sara' terminata!!! "
      to V_output_messaggi

terminate
end
print " " to message
print "=="> Lettura da file esterno dell'affollamento che ci sara'
      nell'edificio <==" to message
print "Sara' presente il << ", V_affollamento, "/100 >> di persone
rispetto
      al massimo possibile" to message
print " " to V_output_messaggi
print "=="> Lettura da file esterno dell'affollamento che ci sara'
      nell'edificio <==" to V_output_messaggi
print "Sara' presente il << ", V_affollamento, "/100 >> di persone
rispetto
      al massimo possibile" to V_output_messaggi
end
if V_autostat = 1 then /* esecuzione tramite autostat */
  begin
print " " to V_output_messaggi
print "=="> ESECUZIONE DELLA SIMULZIONE IN MODALITA' AUTOSTAT <=="
      to V_output_messaggi
print " -> densita' e numero di porte che rallenteranno i gruppi <-"
      to V_output_messaggi
print " -> sono gestite da AutoStat e non lette da file di input <-"
      to V_output_messaggi
print " 1) Affollamento nell'edificio = << ", V_affollamento, "/100
      >> rispetto al massimo possibile" to V_output_messaggi

```

```

print " 2)Numero di porte che rallenteranno i gruppi = ",
      V_porte_significative to V_output_messaggi
/* leggo comunque senza memorizzare gli input */
read V_stringa_inutile, V_stringa_inutile from V_input_layout
      with delimiter "\t"
read V_stringa_inutile, V_stringa_inutile from V_input_layout
      with delimiter "\t"
end

/* 4 PORTE INTERNE */
/* lettura da file esterno delle caratteristiche delle porte interne */
open "arc/input_porte.csv" for reading save result as V_input_porte
read V_stringa_inutile, V_stringa_inutile, V_stringa_inutile
      from V_input_porte with delimiter ";"
print " " to message
print "==> Lettura da file esterno delle caratteristiche delle porte interne
      <==" to message
print " " to V_output_messaggi
print "==> Lettura da file esterno delle caratteristiche delle porte interne
      <==" to V_output_messaggi
set i to 1
while i <= V_numero_porte do
  begin
    read j, V_caratt_porte(i,1), V_caratt_porte(i,2)
      from V_input_porte with delimiter ";"
    set V_caratt_porte(i,1) to V_caratt_porte(i,1) / 1000
    print "Caratteristiche porta ", j, " : larghezza ",
          V_caratt_porte(j,1)," [m] e UFR ",V_caratt_porte(j,2),
          "[persone/(m/s)]" to message
    print "Caratteristiche porta ", j, " : larghezza ",
          V_caratt_porte(j,1)," [m] e UFR ",V_caratt_porte(j,2),
          "[persone/(m/s)]" to V_output_messaggi
    if i <> j then
      begin
        print "!!! errore relativo alle porte interne nel file input -
              la simulazione sar  terminata !!!" to message
        print "!!! errore relativo alle porte interne nel file input -
              la simulazione sar  terminata !!!" to V_output_messaggi
        terminate
      end
    inc i by 1
  end
end
read V_stringa_inutile from V_input_layout with delimiter "\t"
/* 5 USCITE */
/* lettura da file esterno delle caratteristiche delle uscite */

```

```

open "arc/input_uscite.csv" for reading save result as V_input_uscite
read V_stringa_inutile, V_stringa_inutile, V_stringa_inutile,
    V_stringa_inutile from V_input_uscite with delimiter ";"
print " " to message
print "==> Lettura da file esterno le caratteristiche delle uscite: <=="
    to message
print " " to V_output_messaggi
print "==> Lettura da file esterno le caratteristiche delle uscite: <=="
    to V_output_messaggi
set i to 1
while i <= V_numero_uscite do
    begin
    read j, V_caratt_uscite(i,1), V_caratt_uscite(i,2),
        V_caratt_uscite(i,3) from V_input_uscite with delimiter ";"
    set V_caratt_uscite(i,1) to V_caratt_uscite(i,1) / 1000
    if V_caratt_uscite(i,3) = 1 then
        begin
        print "Uscita ", j, "DISPONIBILE con caratteristiche:
            larghezza ", V_caratt_uscite(j,1), " [m], UFR
            ",V_caratt_uscite(j,2), "[persone/(m/s)]"
            to message
        print "Uscita ", j, "DISPONIBILE con caratteristiche:
            larghezza ",V_caratt_uscite(j,1), " [m], UFR
            ",V_caratt_uscite(j,2), "[persone/(m/s)]"
            to V_output_messaggi
        end
    if V_caratt_uscite(i,3) = 0 then
        begin
        print "Uscita ", j, "NON DISPONIBILE con caratteristiche:
            larghezza ",
            V_caratt_uscite(j,1), " [m], UFR ",V_caratt_uscite(j,2),
            "[persone/(m/s)]" to message
        print "Uscita ", j, "NON DISPONIBILE con caratteristiche:
            larghezza ", V_caratt_uscite(j,1), " [m], UFR
            ",V_caratt_uscite(j,2), "[persone/(m/s)]"
            to V_output_messaggi
        end
    if (V_caratt_uscite(i,3) <> 0 and V_caratt_uscite(i,3) <> 0 and
        i <> j) then
        begin
        print "!!! Errore relativo al file input sulle uscite -
            la simulazione sar  terminata !!!" to message
        print "!!! Errore relativo al file input sulle uscite -
            la simulazione sar  terminata !!!" to V_output_messaggi

```

```

        terminate
    end
    inc i by 1
end
/* 6 STANZE */
/* lettura da file esterno delle caratteristiche delle stanze */
open "arc/input_stanze.csv" for reading save result as V_input_stanze
print " " to message
print "==> Lettura da file esterno delle caratteristiche delle stanze <=="
    to message
print " " to V_output_messaggi
print "==> Lettura da file esterno delle caratteristiche delle stanze <=="
    to V_output_messaggi
read V_stringa_inutile, V_stringa_inutile, V_stringa_inutile
    from V_input_stanze with delimiter ";"
set i to 1 /* stanza */
set V_numero_persone to 0
set V_area_totale to 0
while i <= V_numero_stanze do
begin
    read j, V_stanze(i,1), V_densita_max(i)
        from V_input_stanze with delimiter ";"
    /* settaggio numero di occupanti iniziali per la stanza */
    set V_stanze(i,2) to
        (((V_densita_max(i) * V_stanze(i,1)) * V_affollamento) / 100 )
    if V_stanze(i,2) < 1 then
        set V_stanze(i,2) to 1
    /* incremento numero persone totali nella simulazione */
    inc V_numero_persone by V_stanze(i,2)
    /* incremento dell'area totale delle stanze nella simulazione */
    inc V_area_totale by V_stanze(i,1)
    /* verifica correttezza file input */
    if j <> i then
        begin
            print "!!! errore relativo alle stanze nel file input -
                la simulazione sara' terminata !!!" to message
            print "!!! errore relativo alle stanze nel file input -
                la simulazione sara' terminata !!!" to V_output_messaggi
            terminate
        end
    print "Stanza ", j, " con area = ", V_stanze(i,1), " ed occupanti
        iniziali = ", V_stanze(i,2) to V_output_messaggi
    inc i by 1
end
end

```

```

print " " to message
print "=> Affollamento nella simulazione e' del ", V_affollamento, " %
rispetto al massimo possibile" to message
print "=> Sara' presente un numero complessivo di ", V_numero_persone, "
persone nell'edificio durante la simulazione" to message
print " " to message
print " " to V_output_messaggi
print "=> L'affollamento nella simulazione e' del ", V_affollamento, " %
rispetto al massimo possibile" to V_output_messaggi
print "=> Sara' presente un numero complessivo di ", V_numero_persone, "
persone nell'edificio durante la simulazione" to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
/* riattivo il main */
order all loads from OL_background to continue
send to die
end

```

⇒ **P_percorsi**

Tramite questo processo avviene la valutazione e la memorizzazione di tutti i percorsi considerati nella simulazione, ciò avviene tramite la registrazione di tutti i *control point* che compongono ogni processo.

```

begin
print " " to V_output_messaggi
print "=="> Individuazione dei percorsi utilizzabili durante la simulazione:
<==" to V_output_messaggi
set i to 1 /* stanze */
set j to 1 /* uscite */
while i <= V_numero_stanze do
begin
while j <= V_numero_uscite do
begin
/* il primo CP del percorso è quello della stanza da cui si
parte */
insert percorsi.room_(i) into V_L_CP(i,j) at beginning
set VLA_CP(1) to percorsi.room_(i)
set VLA_CP(2) to (VLA_CP(1) absolute next location along path
to percorsi.ext_(j) )
/* eseguo finchè il prossimo CP è quello esterno
all'uscita desiderata */
while VLA_CP(2) <> percorsi.ext_(j) do
begin

```

```

        set VLA_CP(2) to (VLA_CP(1) absolute next
            location along path to percorsi.ext_(j))
        insert VLA_CP(2) into V_L_CP(i,j) at end
        /* aggiornno l'ultimo CP inserito */
        set VLA_CP(1) to VLA_CP(2)
        end
        print "Percorso dalla stanza ", i, " alla uscita ", j, "
            = ", V_L_CP(i,j) to V_output_messaggi
        inc j by 1
        end
    set j to 1
    inc i by 1
end
order all loads from OL_background to continue
send to die
end

```

⇒ P_RPC

In questo processo sono eseguite le operazioni principali per svolgere la seconda fase del modello teorico realizzato: sono cioè calcolati i costi di tutti i possibili percorsi.

```

begin
/*RPC 1 => calcolo lunghezza di tutti i percorsi */
print " " to V_output_messaggi
print "==> RPC 1 - lunghezza del percorso dalla stanza all'uscita: <=="
    to V_output_messaggi
set i to 1 /* stanze */
while i <= V_numero_stanze do
    begin
        set j to 1 /* uscite */
        while j <= V_numero_uscite do
            begin
                /* calcolo della distanza tra la stanza i e l'uscita j */
                set V_distanze(i,j,1) to percorsi.room_(i) absolute path
                    distance to percorsi.exit_(j)
                print "Distanza tra stanza ", i, " ed uscita ", j, " di ",
                    V_distanze(i,j,1), " [m]" to V_output_messaggi
                inc j by 1
            end
        inc i by 1
    end
end

```

```

/*ricerca di RPC 1 normalizzato per ogni percorso */
set i to 1 /* stanze */
while i <= V_numero_stanze do
  begin
    set j to 1 /* uscite */
    /*inizialmente assumo come peggior distanza quella verso l'uscita 1*/
set q to V_distanze(i,j,1)
while j <= V_numero_uscite do
  begin
    /*verifico se la distanza tra stanza i e uscita j è peggiore*/
    if q < V_distanze(i,j,1) then
      begin
        set q to V_distanze(i,j,1)
      end
    inc j by 1
  end
  /* ora in q ho memorizzato la max distanza verso un uscita */
  print "Distanza massima da un uscita per la stanza ", i, " = ", q, "
[m]" to V_output_messaggi
  /* posso calcolare tutte le distanze normalizzate per la stanza i */
  set j to 1 /* uscite */
  while j <= V_numero_uscite do
    begin
      set V_distanze(i,j,2) to ( V_distanze(i,j,1) / q )
      print "Distanza normalizzata tra la stanza ", i, " e l'uscita
          ", j, " = ",V_distanze(i,j,2), "[]" to V_output_messaggi
      inc j by 1
    end
  inc i by 1
end
/*RPC 2 => calcolo tempo di percorrenza di tutti i percorsi */
print " " to V_output_messaggi
print "=> RPC 2 - tempo di percorrenza del percorso dalla stanza
all'uscita: <===" to V_output_messaggi
/* calcolo del numero di porte presenti in ogni tragitto */
set i to 1 /* stanze */
while i <= V_numero_stanze do
  begin
    set j to 1 /* uscite */
    while j <= V_numero_uscite do
      begin
        /* porte tra la stanza i e l'uscita j */
        set k to 1
        while k <= V_L_CP(i,j) size do

```

```

begin
set q to 1
while q <= V_numeroporte do
begin
if V_L_CP(i,j)(k) = percorsi.door_(q) then
inc V_porte_percorso(i,j) by 1
inc q by 1
end
end
inc k by 1
end
inc j by 1
end
inc i by 1
end
/* calcolo tempo di percorrenza di tutti i percorsi */
set i to 1 /* stanze */
while i <= V_numerostanze do
begin
set j to 1 /* uscite */
while j <= V_numerouscite do
begin
/* calcolo tempo per raggiungere l'uscita j dalla stanza i */
set V_tempo_fuga(i,j,1) to ( (V_distanze(i,j,1) / 1.35) +
( (V_porte_percorso(i,j) * 20) / 1.33 * 2 ) )
print "Stima tempo necessario per tragitto tra stanza ", i, "
ed uscita ", j, " di ", V_tempo_fuga(i,j,1),"[s]"
to V_output_messaggi
inc j by 1
end
end
inc i by 1
end
/*ricerca di RPC 2 normalizzato per ogni percorso */
set i to 1 /* stanze */
while i <= V_numerostanze do
begin
set j to 1 /* uscite */
/* inizialmente assumo come peggior tempo quello verso l'uscita 1 */
set q to V_tempo_fuga(i,j,1)
while j <= V_numerouscite do
begin
/* verifica se questo tempo è peggiore */
if q < V_tempo_fuga(i,j,1) then
begin
set q to V_tempo_fuga(i,j,1)

```

```

        end
        inc j by 1
    end
    /* ora in q ho memorizzato il max tempo di fuga dalla stanza */
    print "Tempo massimo di fuga dalla stanza ", i, " = ", q, " [s]"
        to V_output_messaggi
    /* posso calcolare tutti i tempi normalizzati per la stanza i */
    set j to 1 /* uscite */
    while j <= V_numero_uscite do
        begin
            set V_tempo_fuga(i,j,2) to ( V_tempo_fuga(i,j,1) / q )
            print "Tempo normalizzato tra la stanza ", i, " e l'uscita ",
                j, " = ", V_tempo_fuga(i,j,2), "[]" to V_output_messaggi
            inc j by 1
        end
    end
    inc i by 1
end

/*RPC 3 => calcolo lunghezza primo tratto di tutti i percorsi */
print " " to V_output_messaggi
print "==" RPC 3 - lunghezza del primo tratto del percorso dalla stanza
all'uscita: <=="
to V_output_messaggi
set i to 1 /* stanze */
while i <= V_numero_stanze do
begin
    set j to 1 /* uscite */
    while j <= V_numero_uscite do
        begin
            /* calcolo della distanza tra la stanza i e l'uscita j */
            set V_lung_primo_tratto(i,j,1) to V_L_CP(i,j)(1)
                absolute path distance to V_L_CP(i,j)(2)
            print "Lunghezza primo tratto tra stanza ", i, " ed uscita ",
                j, " di ", V_lung_primo_tratto(i,j,1),"[m]"
                to V_output_messaggi
            inc j by 1
        end
    end
    inc i by 1
end

/*ricerca di RPC 3 normalizzato per ogni percorso */
set i to 1 /* stanze */
while i <= V_numero_stanze do
begin
    set j to 1 /* uscite */
    /* inizialmente assumo come peggior distanza quella verso uscita 1 */

```

```

set q to V_lung_primo_tratto(i,j,1)
while j <= V_numero_uscite do
    begin
        /* verifica se questa lunghezza è peggiore */
        if q < V_lung_primo_tratto(i,j,1) then
            begin
                set q to V_lung_primo_tratto(i,j,1)
            end
        inc j by 1
    end

    /* ora in q ho memorizzato la max lunghezza del primo tratto */
    print "Lunghezza massima primo tratto per la stanza ", i, " = ", q, "
        [m]" to V_output_messaggi
    /* posso calcolare tutte le lunghezze normalizzate per la stanza i */
    set j to 1 /* uscite */
    while j <= V_numero_uscite do
        begin
            set V_lung_primo_tratto(i,j,2) to
                ( ( q - V_lung_primo_tratto(i,j,1) ) / q )
            print "Lunghezza normalizzata primo tratto tra la stanza ", i,
                " e l'uscita ", j, " = ", V_lung_primo_tratto(i,j,2),
                "[]" to V_output_messaggi
            inc j by 1
        end
    end
    inc i by 1
end

/*RPC 4 => calcolo numero di incroci e quindi di punti di decisione di tutti
i percorsi */
print " " to V_output_messaggi
print "=> RPC 4 - numero di punti di decisione nel percorso dalla stanza
    all'uscita: <===" to V_output_messaggi
set i to 1 /* stanze */
while i <= V_numero_stanze do
    begin
        set j to 1 /* uscite */
        while j <= V_numero_uscite do
            begin
                /* incroci dalla stanza i all'uscita j */
                set k to 1
                while k <= V_L_CP(i,j) size do
                    begin
                        set q to 1
                        while q <= V_numero_incroci do
                            begin

```

```

                                if V_L_CP(i,j)(k) = percorsi.cross_(q) then
                                    inc V_n_decision_points(i,j,1) by 1
                                inc q by 1
                                end
                                inc k by 1
                                end
                                print "Decision points nel percorso dalla stanza ", i, "
                                    alla uscita ", j, " = ",
                                    V_n_decision_points(i,j,1), "[]"
                                    to V_output_messaggi
                                inc j by 1
                                end
                                inc i by 1
                                end
                                /*ricerca di RPC 4 normalizzato per ogni percorso */
                                set i to 1 /* stanze */
while i <= V_numero_stanze do
    begin
        set j to 1 /* uscite */
        /* inizialmente assumo come peggior tempo quello verso
        l'uscita 1 */
set q to V_n_decision_points(i,j,1)
while j <= V_numero_uscite do
    begin
        /* verifica se la distanza tra la stanza i e l'uscita j
        è quella massima*/
        if q < V_n_decision_points(i,j,1) then
            begin
                set q to V_n_decision_points(i,j,1)
            end
        inc j by 1
        end
        /* in q ho memorizzato il max numero di CP attraversabili
        uscendo dalla stanza */
        print "Numero massimo di CP incontrati fuggendo dalla stanza
            ", i, " = ", q, " []" to V_output_messaggi
        /* posso calcolare numero CP normalizzati per stanza i */
        set j to 1 /* uscite */
        while j <= V_numero_uscite do
            begin
                set V_n_decision_points(i,j,2) to
                    ( V_n_decision_points(i,j,1) / q )
                print "Numero CP normalizzato tra la stanza ", i, " e
                    l'uscita ", j, " = ", V_n_decision_points(i,j,2),

```

```

                                "[]" to V_output_messaggi
                                inc j by 1
                                end
                                inc i by 1
                                end
/* riattivo il main */
order all loads from OL_background to continue
send to die
end

```

⇒ **P_sirena(100)**

Processo di molteplicità 100, cioè il numero massimo di uscite ammissibili, che si occupa di gestire la sirena i-esima nella simulazione. In particolare, se la sirena si riferisce ad una uscita disponibile, viene gestito il lampeggiamento della sirena.

```

begin
/* sirena inizialmente spenta */
set color to white
/* posizionamento della sirena nella coda relativa all'uscita corretta */
move into Q_sirena(procindex)
/* la sirena dovrà lampeggiare solo se si riferisce ad una uscita
disponibile */
if V_caratt_uscite(procindex,3) = 0 then
    begin
        set color to red
        print "**** Uscita ", procindex, " non utilizzabile nella simulazione
        ****" to message
        print "**** Uscita ", procindex, " non utilizzabile nella simulazione
        ****" to V_output_messaggi
        wait to be ordered on OL_garage
    end
if V_caratt_uscite(procindex,3) = 1 then
    begin
        set color to green
        print "**** Sirena dell'uscita <<", procindex, ">> attiva ****"
        to message
        print "**** Sirena dell'uscita <<", procindex, ">> attiva ****"
        to V_output_messaggi
        wait to be ordered on OL_garage
    end
end
end

```

⇒ P_prepara_stanze

In questo processo avviene la suddivisione delle persone che occupano le stanze in sottogruppi, ognuno dei quali diretto verso una particolare uscita.

```
begin
print " " to V_output_messaggi
print "===> Suddivisione delle persone nelle stanze in gruppi <===>"
to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
print " " to message
print "===> Suddivisione delle persone nelle stanze in gruppi <===>"
to message
print " " to message
/* Suddivisione in gruppi degli occupanti le varie stanze */
set V_gruppi to 0
set i to 1 /* stanze */
while i <= V_numero_stanze do
begin
print " " to V_output_messaggi
print "=> Nella stanza ", i, " inizialmente sono presenti ",
V_stanze(i,2), " persone <=" to V_output_messaggi
print "Costi dei percorsi partenti dalla stanza ", i
to V_output_messaggi
/* calcolo dei costi dei percorsi dalla stanza i */
set j to 1 /* uscite */
while j <= V_numero_uscite do
begin
set V_costo_percorso(i,j,1) to (V_W_RPC(1) * V_distanze(i,j,2)
+ V_W_RPC(2) * V_tempo_fuga(i,j,2)
+ V_W_RPC(3) * V_lung_primo_tratto(i,j,2)
+V_W_RPC(4) * V_n_decision_points(i,j,2))
print "Costo del percorso << stanza ", i, " - uscita ", j, "
>> = ", V_costo_percorso(i,j,1) to V_output_messaggi
inc j by 1
end
/* inizializzazione del costo minimo */
set V_suddividi_costo(i,1) to 0
set j to 1 /* uscite */
while j <= V_numero_uscite do
begin
if V_caratt_uscite(j,3) = 1 then
begin
```

```

        /* inizializzo il costo minimo */
        set V_suddividi_costo(i,1) to V_costo_percorso(i,j,1)
        end
    inc j by 1
    end
if V_suddividi_costo(i,1) = 0 then
    begin
    print "!!!!!! Errore 0 nella suddivisione dei gruppi: nessuna
        uscita raggiungibile dalla stanza <<", i, ">> !!!!!!"
        to message
    print "!!!!!! Errore 0 nella suddivisione dei gruppi: nessuna
        uscita raggiungibile dalla stanza <<", i, ">> !!!!!!"
        to V_output_messaggi
    terminate
    end
/* ricerca del costo minimo */
set j to 1 /* uscite */
while j <= V_numero_uscite do
    begin
    if ( V_costo_percorso(i,j,1) < V_suddividi_costo(i,1) and
        V_costo_percorso(i,j,1) > 0 and
        V_caratt_uscite(j,3) = 1 ) then
        /* per il momento è il costo minimo, lo memorizzo */
        set V_suddividi_costo(i,1) to V_costo_percorso(i,j,1)
    inc j by 1
    end
/* definizione del range di accettabilità dei costi dei percorsi */
set V_suddividi_costo(i,2) to V_suddividi_costo(i,1)
    + (V_suddividi_costo(i,1) * V_range_percorsi / 100)
print "Costo massimo accettabile per i percorsi di evacuazione della
    stanza ", i, " = ", V_suddividi_costo(i,2)
    to V_output_messaggi
/* ricerca dei percorsi disponibili con costo entro il range */
set j to 1 /* uscite */
set V_suddividi_costo(i,3) to 0 /* somma appetibilità */
set V_suddividi_persono(i,1)to 0 /* numero di uscite utilizzabili */
while j <= V_numero_uscite do
    begin
    if V_costo_percorso(i,j,1) < V_suddividi_costo(i,2) and
        V_caratt_uscite(j,3) = 1 then
    begin
    print "Percorso << stanza ", i, " - uscita ", j, " >>
        ammissibile" to V_output_messaggi
    /* incremento il numero di uscite da utilizzare a

```

```

partire dalla stanza i */
inc V_suddividi_persone(i,1) by 1
/* incremento la somma delle appetibilità */
set V_suddividi_costo(i,3) to V_suddividi_costo(i,3)
      + ( 1 / V_costo_percorso(i,j,1) )
end
inc j by 1
end

/* dimensionamento gruppi partenti dalla stanza i */
set j to 1 /* uscite */
set V_suddividi_persone(i,2) to 0
set V_suddividi_persone(i,3) to 0
while j <= V_numero_uscite do
begin
if V_costo_percorso(i,j,1) > V_suddividi_costo(i,2)
or V_caratt_uscite(j,3) = 0 then
begin
/* dimensione gruppo da stanza i a uscita j */
set V_dimensione_gruppo(i,j) to 0
/* percentuale di persone nella stanza i che andranno da
stanza i a uscita j */
set V_costo_percorso(i,j,2) to 0
end

/* l'uscita va presa in considerazione */
if V_costo_percorso(i,j,1) <= V_suddividi_costo(i,2)
and V_caratt_uscite(j,3) = 1 then
begin
set V_costo_percorso(i,j,2) to( (1 /
      V_costo_percorso(i,j,1)) /
      V_suddividi_costo(i,3) )
if ( V_stanze(i,2) * V_costo_percorso(i,j,2) ) <=
      (V_stanze(i,2) - V_suddividi_persone(i,3) ) then
begin
set V_dimensione_gruppo(i,j) to ( V_stanze(i,2) *
      V_costo_percorso(i,j,2) )
if V_dimensione_gruppo(i,j) = 0 then
      set V_dimensione_gruppo(i,j) to 1
end
end

if ( V_stanze(i,2) * V_costo_percorso(i,j,2) ) >
      ( V_stanze(i,2) - V_suddividi_persone(i,3) ) then
begin
set V_dimensione_gruppo(i,j) to
      (V_stanze(i,2) - V_suddividi_persone(i,3) )
if ( V_suddividi_persone(i,2) + 1 ) =

```

```

        V_suddividi_persone(i,1) then
        begin
            if V_suddividi_persone(i,3) <>V_stanze(i,2) then
                begin
                    inc V_dimensione_gruppo(i,j) by
                    (V_stanze(i,2) - V_suddividi_persone(i,3))
                    inc V_suddividi_persone(i,3) by
                    (V_stanze(i,2) - V_suddividi_persone(i,3))
                end
            end
        end
        if V_dimensione_gruppo(i,j) > 0 then
            begin
                inc V_suddividi_persone(i,2) by 1
                inc V_gruppi by 1
            end
            print "Gruppo che utilizza il percorso << stanza ", i,
                " - uscita ", j, ">> di ", V_dimensione_gruppo(i,j), "
                persone" to V_output_messaggi
            inc j by 1
        end
        /* Controllo coerenza dimensione dei gruppi con persone iniziali
        nella stanza */
        if V_suddividi_persone(i,3) <> V_stanze(i,2) then
            begin
                print "!!!!!! Errore 1 nella suddivisione dei gruppi !!!!!"
                to message
                print "!!!!!! Errore 1 nella suddivisione dei gruppi !!!!!"
                to V_output_messaggi
                terminate
            end
            print "Stanza ", i, " suddivisibile in ", V_suddividi_persone(i,1), "
                gruppi " to V_output_messaggi
            print "Stanza ", i, " suddivisa in ", V_suddividi_persone(i,2), "
                gruppi " to V_output_messaggi
            /* suddivido in gruppi la stanza successiva */
            inc i by 1
        end
    send to P_invia_gruppi
end

```

⇒ P_invia_gruppi

Questo processo genera tutti i gruppi della simulazione facendoli entrare nell'edificio, inoltre provvede a parcheggiare tutti gli AGV non necessari.

```
begin
/* verifica disponibilità di sufficienti AGV */
set V_max_gruppi = percorsi vehicles size
print " " to V_output_messaggi
print "==> Veicoli disponibili inizialmente = ", V_max_gruppi
      to V_output_messaggi
print "==> Gruppi presenti nella simulazione = ", V_gruppi
      to V_output_messaggi
if V_gruppi > V_max_gruppi then
  begin
    print "!!!! AGV non sufficienti per simulare l'evacuazione, mancano
          ",(V_gruppi - V_max_gruppi), " veicoli !!!!!" to message
    print "!!!!* aumentare il numero di veicoli di default nella
          simulazione e tentare nuovamente *!!!!" to message
    print "!!!! AGV non sufficienti per simulare l'evacuazione, mancano
          ",(V_gruppi - V_max_gruppi), " veicoli !!!!!"
          to V_output_messaggi
    print "!!!!* aumentare il numero di veicoli di default nella
          simulazione e tentare nuovamente *!!!!" to V_output_messaggi
    terminate
  end
/* invio alle stanze dei gruppi*/
print " " to V_output_messaggi
print "===> Invio alle stanze dei gruppi di persone <=== "
      to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
print " " to message
print "===> Invio alle stanze dei gruppi di persone <=== " to message
print " " to message
print "Gruppo n°;Stanza;Uscita;IN;Velocità[m/sec];Persone;Cumulata
      Persone(tot=", V_numero_persone, ")" to V_output_gruppi
set k to 1
set V_usciti to 0
set i to 1
set q to 0
while i <= V_numero_stanze do
  begin
    set j to 1 /* uscite */
```

```

while j <= V_numero_uscite do
    begin
        if V_dimensione_gruppo(i,j) > 0 then
            begin
                set VLA_id_gruppo to k
                set VLA_mia_stanza to i
                set VLA_mia_uscita to j
                set VLA_mia_velocita to 10
                clone 1 load to P_gruppo_entra new load type L_gruppo
                print "Gruppo n° ", VLA_id_gruppo, " inviato alla stanza
                    ", i to V_output_messaggi
                inc q by V_dimensione_gruppo(i,j)
                print VLA_id_gruppo, ";", i, ";", j, ";IN;",
                    VLA_mia_velocita, ";", V_dimensione_gruppo(i,j),
                    ";", q to V_output_gruppi
                inc k by 1
                dec V_max_gruppi by 1
            end
            inc j by 1
        end
        inc i by 1
    end
/* verifica corretto numero di gruppi nel modello */
if V_gruppi = (k -1) then
    begin
        print "Gruppi creati correttamente" to V_output_messaggi
        print "Gruppo n°;Stanza;Uscita;OUT;Velocità[m/sec];Persone;
            T_fuga[min]"to V_output_gruppi
    end
    else
        begin
            print "Errore nella generazione dei gruppi nelle stanze" to message
            print "Errore nella generazione dei gruppi nelle stanze"
                to V_output_messaggi
        end
/* verifica corretto numero di persone nel modello */
set i to 1
set q to 0
while i <= V_numero_stanze do
    begin
        set j to 1 /* uscite */
        while j <= V_numero_uscite do
            begin
                set k to 1

```

```

        while k <= V_dimensione_gruppo(i,j) do
            begin
                inc q by 1
                inc k by 1
            end
        inc j by 1
    end
inc i by 1
end
if V_numero_persone = q then
    print "Persone inviate al modello correttamente" to message
if V_numero_persone <> q then
    print "!!! Persone inviate al modello NON correttamente !!!"
        to message
/* rimozione dalla simulazione dei veicoli in eccesso */
print " " to message
print "==> Sono presenti ", V_max_gruppi, " veicoli in eccesso"
    to V_output_messaggi
while ( V_max_gruppi > 0) do
begin
    /*create 1 load of load type L_garage to P_parcheggia*/
    clone 1 load to P_parcheggia
    dec V_max_gruppi by 1
    end
/* chiusura del processo */
/* sarà l'ultimo gruppo a posizionarsi nella propria stanza a riattivare il
main per iniziare la simulazione */
send to die
end

```

⇒ **P_parcheggia**

Questo processo si occupa di mantenere bloccati nel garage tutti gli AGV non necessari alla simulazione.

```

begin
inc V_parcheggiati by 1
print "Parcheggiato il carrello n° ", V_parcheggiati, " in eccesso"
    to V_output_messaggi
/* metto il load nella coda */
move into queue Q_garage
/* blocco il carrello nel control point di parcheggio */
move into percorsi.garage

```

```

/* congelo il load e il relativo carrello in eccesso fino alla fine della
simulazione */
wait to be ordered on OL_garage
/* in questo modo se servisse un nuovo carrello nel sistema potrei
scongelare */
/* questo load che libererebbe il carrello e uscirebbe dal sistema */
end

```

⇒ P_gruppo_entra

Questo processo viene eseguito da ogni gruppo presente nella simulazione; eseguendolo il gruppo entrerà nell'edificio ed andrà all'interno della stanza da cui inizierà l'evacuazione dopo il segnale di allarme.

```

begin
/* invio nel garage per salire sul carrello */
move into percorsi.garage
set this vehicle defined velocity to VLA_mia_velocita m/sec
set VLA_T_tempo(1) to ac
/* ingresso verso la propria stanza */
travel to percorsi.room_(VLA_mia_stanza)
set VLA_T_tempo(2) to ac
set VLA_T_tempo(3) to VLA_T_tempo(2) - VLA_T_tempo(1)
if V_primo_arrivato(VLA_mia_stanza) = 0 then
    /* sono il primo ad arrivare nella stanza */
    begin
    print " Gruppo ", VLA_id_gruppo, "pronto nella stanza",
        VLA_mia_stanza, " per primo della stanza" to V_output_messaggi
    set V_primo_arrivato(VLA_mia_stanza) to 1
    set k to 1 /* per verifica numero di stanze pronte */
    set i to 1 /* stanze */
    /* controllo se sono l'ultima stanze piena e vedo se dare allarme
oppure congelarmi */
    while i <= V_numero_stanze do
        begin
        set k to ( k * V_primo_arrivato(i) )
        inc i by 1
        end
    if k = 1 then
        begin
        /* sono arrivato per ultimo nella stanza */
        /* tutti i load sono pronti, si può iniziare la simulazione */
        print " Gruppo ", VLA_id_gruppo, " ultimo ad arrivare alla

```

```

        stanza e ha impiegato ",VLA_T_tempo(3), " secondi !!!"
        to V_output_messaggi
    /* riattivo il main perchè faccia partire la simulazione
    quando vuole */
    order all loads from OL_background to continue
    end

    /* attendo che il main faccia partire la simulazione */
    wait to be ordered on OL_allarme
    end

send to P_gruppo_esce
end

```

⇒ **P_gruppo_esce**

Questo processo viene eseguito da ogni gruppo presente nella simulazione; eseguendolo dopo il segnale di allarme il gruppo evacuerà l'edificio dirigendosi verso l'uscita precedentemente stabilita.

```

begin
/* VELOCITA' EVACUAZIONE */
/* settaggio caratteristiche gruppo per la simulazione dell'evacuazione */
set VLA_mia_velocita to 1.7639 *
    (pow (0.5891, (V_affollamento*V_densita_max(VLA_mia_stanza)/100)))
set this vehicle defined velocity to VLA_mia_velocita m/sec
print "Velocita' gruppo ", VLA_id_gruppo, " nella stanza ", VLA_mia_stanza,
    " settata a ", VLA_mia_velocita , "m/s" to V_output_messaggi
/* preparazione della memorizzazione del tempo di viaggio */
set VLA_T_tempo(1) to ac
/* viaggio verso l'uscita di competenza */
print "Gruppo ", VLA_id_gruppo, " nella stanza ", VLA_mia_stanza, " diretto
    verso uscita ", VLA_mia_uscita to V_output_messaggi
/* PORTE */
/* fuga con eventuale perdita di tempo alle porte */
set i to 1 /* contatore CP incontrati lungo il percorso */
set k to 0 /* porte già superate dal gruppo */
set VLA_CP(1) to V_L_CP(VLA_mia_stanza,VLA_mia_uscita)(i) /*CP corrente*/
set VLA_CP(2) to V_L_CP(VLA_mia_stanza,VLA_mia_uscita)(i+1) /*CP prossimo*/
/* controllo coerenza lista CP con posizione attuale */
if VLA_CP(1)<> percorsi.room_(VLA_mia_stanza) then
    begin
        print " " to message
        print " ERRORE: percorsi.room_(VLA_mia_stanza) DIVERSO DA

```

```

        V_L_CP(VLA_mia_stanza,VLA_mia_uscita)(1) !!!" to message
print " " to message
print " ERRORE: percorsi.room_(VLA_mia_stanza) DIVERSO DA
        V_L_CP(VLA_mia_stanza,VLA_mia_uscita)(1) !!!"
        to V_output_messaggi
terminate
end
/* ricerca della prossima porta interna nel percorso per potere simulare
l'attesa */
/* porte interne finite => viaggio verso l'uscita */
while k < V_porte_significative
        and VLA_CP(2) <> percorsi.exit_(VLA_mia_uscita) do
begin
/* controllo se il prossimo CP è una porta interna */
set j to 1 /* contatore porte */
while j <= V_numero_porte do
begin
/* se è una porta devo fermarmi, quindi simulo l'attesa */
if VLA_CP(2) = percorsi.door_(j) then
begin
travel to percorsi.door_(j)
/* attesa di un tempo funzione della dimensione del
gruppo e della larghezza della porta */
set q to V_dimensione_gruppo(VLA_mia_stanza,
        VLA_mia_uscita) * 0.91 / V_caratt_porte(j,1)
wait for q sec
print "Gruppo ", VLA_id_gruppo, " da stanza ",
        VLA_mia_stanza, " ha atteso ", q, "secondi alla
        porta interna", j to V_output_messaggi
print "Gruppo ", VLA_id_gruppo, " da stanza ",
        VLA_mia_stanza, " ha atteso ", q, "secondi alla
        porta interna", j to message
/* incremento il conteggio delle porte incontrate */
inc k by 1
end
/* aggiorno il contatore delle porte interne */
inc j by 1
end
inc i by 1
set VLA_CP(1) to V_L_CP(VLA_mia_stanza,VLA_mia_uscita)(i)
set VLA_CP(2) to V_L_CP(VLA_mia_stanza,VLA_mia_uscita)(i+1)
end
/* a questo punto ho controllato tutti i CP fino all'uscita oppure ho
superato le porte significative */

```

```

/*raggiungo l'uscita controllando se il gruppo deve rallentare alla porta*/
set VLA_CP(2) to percorsi.exit_(VLA_mia_uscita)
travel to VLA_CP(2)
/* se all'uscita devo fermarmi, simulo l'attesa */
if k < V_porte_significative then
  begin
    set q to V_dimensione_gruppo(VLA_mia_stanza,VLA_mia_uscita) *
      0.91 / V_caratt_uscite(VLA_mia_uscita,1)
    wait for q sec
    print "Gruppo ", VLA_id_gruppo, " da stanza ", VLA_mia_stanza,
      "attende ", q, "secondi alla porta di uscita ", VLA_mia_uscita
      to V_output_messaggi
    inc k by 1
  end
/* a questo punto il gruppo ha evacuato l'edificio ma è ancora sull'AGV
sopra al CP della uscita */
/* liberazione dell'AGV */
move into Q_attendiambulanza
/* memorizzazione del tempo di evacuazione */
set VLA_T_tempo(2) to ac
set VLA_T_tempo(3) to VLA_T_tempo(2) - VLA_T_tempo(1)
set V_T_evacuazione(VLA_mia_stanza, VLA_mia_uscita) to VLA_T_tempo(3)
/* aggiornamento del numero di gruppi che hanno evacuato l'edificio
correttamente */
inc V_usciti by 1
print "Gruppo ", VLA_id_gruppo, " (gruppo", V_usciti, " di ",V_gruppi, " )
  proveniente dalla stanza ", VLA_mia_stanza, " ha evacuato l'edificio
  correttamente in ", VLA_T_tempo(3) / 60, " [min]"
  to V_output_messaggi
print "Gruppo ", VLA_id_gruppo, " (gruppo", V_usciti, " di ",V_gruppi, " )
  proveniente dalla stanza", VLA_mia_stanza," ha evacuato l'edificio
  correttamente in ", VLA_T_tempo(3) / 60, " [min]"
  to message
print VLA_id_gruppo, ";", VLA_mia_stanza, ";", VLA_mia_uscita, ";OUT;",
  VLA_mia_velocita, ";", V_dimensione_gruppo(VLA_mia_stanza,
  VLA_mia_uscita), ";", VLA_T_tempo(3) to V_output_gruppi
/* verifica dello stato complessivo dell'evaquazione */
if V_usciti >= V_gruppi then
  begin
    /* sono stato l'ultimo ad uscire dall'edificio */
    print " " to V_output_messaggi
    print "Gruppo ", VLA_id_gruppo, " ha raggiunto PER ULTIMO l' uscita
      con successo!" to message
    print "Gruppo ", VLA_id_gruppo, " ha raggiunto PER ULTIMO l' uscita

```

```

        con successo!" to V_output_messaggi
    order all load from OL_background to continue
end
/* attesa della fine della simulazione */
wait to be ordered on OL_attendi_ambulanza
end

```

⇒ **P_statistiche**

Questo processo viene eseguito dopo che è stata conclusa la simulazione dell'evacuazione, a quel punto si possono infatti calcolare i principali dati statistici sulla simulazione effettuata e si possono realizzare i file di output, compito che appunto svolge questo processo.

```

begin
print " " to message
print "===> Calcolo delle statistiche relative alla simulazione <==="
    to message
print " " to message
print " " to V_output_messaggi
print "===> Calcolo delle statistiche relative alla simulazione <==="
    to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi

/*TEMPI*/
/*1) Ricerca del tempo minimo e massimo di evacuazione */
/* Inizializzo le variabili */
set k to 0 /* variabili non inizializzate */
set i to 1 /* stanze */
while i <= V_numero_stanze and k = 0 do
    begin
        set j to 1 /* uscite */
        while j <= V_numero_uscite do
            begin
                /* inizializzo le variabili al primo tempo non nullo */
                if V_dimensione_gruppo(i,j) > 0 and V_T_evacuazione(i,j) > 0
                    then
                        begin
                            /* tempo minimo di evacuazione */
                            set V_T_evacuazione_stat(1) to V_T_evacuazione(i,j)
                            set V_T_min(1) to i
                            set V_T_min(2) to j
                            /* tempo massimo di evacuazione */

```

```

        set V_T_evacuazione_stat(2) to V_T_evacuazione(i,j)
        set V_T_max(1) to i
        set V_T_max(2) to j
        set k to 1
        end
    inc j by 1
end
inc i by 1
end
/* cerco massimo e minimo */
set i to 1 /* stanze */
while i <= V_numero_stanze do
begin
set j to 1 /* uscite */
while j <= V_numero_uscite do
begin
/* considero il tempo solo se appartiene a un percorso
utilizzato da qualche gruppo */
if V_dimensione_gruppo(i,j) > 0 then
begin
/* aggiorno tempo minimo di evacuazione */
if V_T_evacuazione(i,j) < V_T_evacuazione_stat(1)
and V_T_evacuazione(i,j) > 0 then
begin
set V_T_evacuazione_stat(1) to
V_T_evacuazione(i,j)
set V_T_min(1) to i
set V_T_min(2) to j
end
/* aggiorno tempo massimo di evacuazione */
if V_T_evacuazione(i,j) > V_T_evacuazione_stat(2)
and V_T_evacuazione(i,j) > 0
then
begin
set V_T_evacuazione_stat(2) to
V_T_evacuazione(i,j)
set V_T_max(1) to i
set V_T_max(2) to j
end
end
/* uscita successiva dalla stanza i */
inc j by 1
end
/* tempi dalla stanza successiva */

```

```

        inc i by 1
    end
/*2) Calcolo del tempo medio di evacuazione */
set q to 0
set i to 1 /* stanze */
while i <= V_numero_stanze do
    begin
        set j to 1 /* uscite */
        while j <= V_numero_uscite do
            begin
                /* sommo tutti i tempi di evacuazione */
                if V_dimensione_gruppo(i,j) > 0 then
                    inc q by V_T_evacuazione(i,j) * V_dimensione_gruppo(i,j)
                end
            end
            inc j by 1
        end
        inc i by 1
    end
set V_T_evacuazione_stat(3) to ( q / V_numero_persone )
/*3) Calcolo della varianza del tempo di evacuazione */
set q to 0
set i to 1 /* stanze */
while i <= V_numero_stanze do
    begin
        set j to 1 /* uscite */
        while j <= V_numero_uscite do
            begin
                /* sommo tutti i tempi di evacuazione */
                inc q by V_dimensione_gruppo(i,j) *
                pow ( (V_T_evacuazione(i,j) - V_T_evacuazione_stat(3)) , 2 )
            end
            inc j by 1
        end
        inc i by 1
    end
set V_T_evacuazione_stat(4) to ( q / V_numero_persone )
/*4) Calcolo della deviazione standard del tempo di evacuazione */
set V_T_evacuazione_stat(5) to sqrt (V_T_evacuazione_stat(4))
/*DISTANZE*/
/*5) Ricerca della lunghezza minima e massima dei percorsi */
/* Inizializzo le variabili */
set i to 1 /* stanze */
while i <= V_numero_stanze do
    begin
        set k to 0 /* variabili non inizializzate */
        set j to 1 /* uscite */

```

```

while j <= V_numero_uscite and k = 0 do
  begin
    /* inizializzo le variabili alla prima distanza non nulla */
    if V_dimensione_gruppo(i,j) > 0 then
      begin
        /* lunghezza minima percorso */
        set V_distanze_stat(1) to V_distanze(i,j,1)
        set V_distanza_min(1) to i
        set V_distanza_min(2) to j
        /* lunghezza massima percorso */
        set V_distanze_stat(2) to V_distanze(i,j,1)
        set V_distanza_max(1) to i
        set V_distanza_max(2) to j
        set k to 1
      end
      inc j by 1
    end
  inc i by 1
end
/* cerco massimo e minimo */
set i to 1 /* stanze */
while i <= V_numero_stanze do
  begin
    set j to 1 /* uscite */
    while j <= V_numero_uscite do
      begin
        /* considero la distanza solo se appartiene a un percorso
        utilizzato da qualche gruppo */
        if V_dimensione_gruppo(i,j) > 0 then
          begin
            /* aggiorno lunghezza minima percorso */
            if V_distanze(i,j,1) < V_distanze_stat(1) and
              V_distanze(i,j,1) > 0 then
              begin
                set V_distanze_stat(1) to V_distanze(i,j,1)
                set V_distanza_min(1) to i
                set V_distanza_min(2) to j
              end
            /* aggiorno lunghezza massima percorso */
            if V_distanze(i,j,1) > V_distanze_stat(2) and
              V_distanze(i,j,1) > 0 then
              begin
                set V_distanze_stat(2) to V_distanze(i,j,1)
                set V_distanza_max(1) to i

```

```

                                set V_distanza_max(2) to j
                                end
                                end
                                /* uscita successiva dalla stanza i */
                                inc j by 1
                                end
                                /* tempi dalla stanza successiva */
                                inc i by 1
                                end
/*6) Calcolo della lunghezza media dei percorsi */
set q to 0
set i to 1 /* stanze */
while i <= V_numero_stanze do
    begin
        set j to 1 /* uscite */
        while j <= V_numero_uscite do
            begin
                /* sommo tutte le lunghezze dei percorsi */
                inc q by V_distanze(i,j,1) * V_dimensione_gruppo(i,j)
                inc j by 1
            end
            inc i by 1
        end
set V_distanze_stat(3) to ( q / V_numero_persone )
/*7) Calcolo della varianza della lunghezza dei percorsi */
set q to 0
set i to 1 /* stanze */
while i <= V_numero_stanze do
    begin
        set j to 1 /* uscite */
        while j <= V_numero_uscite do
            begin
                /* sommo tutti i tempi di evacuazione */
                inc q by V_dimensione_gruppo(i,j) *
                pow ( ( V_distanze(i,j,1) - V_distanze_stat(3) ) , 2 )
                inc j by 1
            end
            inc i by 1
        end
set V_distanze_stat(4) to ( q / V_numero_persone)
/*8) Calcolo della deviazione standard della lunghezza media dei percorsi */
set V_distanze_stat(5) to sqrt (V_distanze_stat(4))
/*STAMPA STATISTICHE*/
print " " to message

```

```

print "Tempo medio di evacuazione = ", V_T_evacuazione_stat(3)/60, "minuti =
      ", V_T_evacuazione_stat(3), " secondi " to message
print " " to message
print "Varianza del tempo di evacuazione = ", V_T_evacuazione_stat(4)/3600,
      "minuti^2 = ", V_T_evacuazione_stat(4), " secondi^2 " to message
print " " to message
print "Deviazione standard del tempo di evacuazione = ",
      V_T_evacuazione_stat(5)/60, " minuti = ", V_T_evacuazione_stat(5), "
      secondi " to message
print " " to message
print "Tempo minimo di evacuazione = ", V_T_evacuazione_stat(1)/60, "minuti =
      ", V_T_evacuazione_stat(1), " secondi " to message
print " " to message
print "Tempo massimo di evacuazione = ", V_T_evacuazione_stat(2)/60, "minuti
      = ", V_T_evacuazione_stat(2), " secondi " to message
print " " to message
print " " to V_output_messaggi
print "Tempo medio di evacuazione = ", V_T_evacuazione_stat(3)/60, "minuti =
      ", V_T_evacuazione_stat(3), " secondi " to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
print "Varianza del tempo di evacuazione = ", V_T_evacuazione_stat(4)/3600,
      "minuti^2 = ", V_T_evacuazione_stat(4), " secondi^2 " to
      V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
print "Deviazione standard del tempo di evacuazione = ",
      V_T_evacuazione_stat(5)/60, " minuti = ", V_T_evacuazione_stat(5), "
      secondi " to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
print "Tempo minimo di evacuazione = ", V_T_evacuazione_stat(1)/60, "minuti =
      ", V_T_evacuazione_stat(1), " secondi " to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi
print "Tempo massimo di evacuazione = ", V_T_evacuazione_stat(2)/60, "minuti
      = ", V_T_evacuazione_stat(2), " secondi " to V_output_messaggi
print " " to V_output_messaggi

/* TEMPI file .CSV */
if V_autostat = 0 and V_autostat_RPC = 0 then
  begin
    print " " to V_output_tempi
    print "Porte;Aff[%];Pers;TM[sec];VarTM[sec^2];DevStdTM[sec];",
          "t[sec];T[sec]; Tempi Di Evacuazione [sec]" to V_output_tempi
    end
if V_autostat_RPC = 0 then
  begin

```

```

/* nella prima parte della riga del file di output scrivo la parte
statistica */
print V_porte_significative, ";", V_affollamento, ";",
      V_numero_persone, ";", V_T_evacuazione_stat(3), ";",
      V_T_evacuazione_stat(4), ";", V_T_evacuazione_stat(5), ";",
      V_T_evacuazione_stat(1), ";", V_T_evacuazione_stat(2) no line
to V_output_tempi
/* nella seconda parte della riga del file di output elenco tutti i
tempi di evacuazione */
set i to 1 /* stanze */
while i <= V_numero_stanze do
  begin
    set j to 1 /* uscite */
    while j <= V_numero_uscite do
      begin
        set q to 1
        while q <= V_dimensione_gruppo(i,j) do
          begin
            print ";", V_T_evacuazione(i,j) no line
to V_output_tempi
          inc q by 1
          end
        inc j by 1
        end
      inc i by 1
      end
    print ""to V_output_tempi
    end
if V_autostat_RPC = 1 then
  begin
    /* nella prima parte della riga del file di output scrivo la parte
    statistica */
    print V_W_RPC(1), ";", V_W_RPC(2), ";", V_W_RPC(3), ";", V_W_RPC(4),
      ";", V_numero_persone, ";", V_T_evacuazione_stat(3), ";",
      V_T_evacuazione_stat(4), ";", V_T_evacuazione_stat(5), ";",
      V_T_evacuazione_stat(1), ";", V_T_evacuazione_stat(2) no line
to V_output_tempi
    /* nella seconda parte della riga del file di output elenco tutti i
    tempi di evacuazione */
    set i to 1 /* stanze */
    while i <= V_numero_stanze do
      begin
        set j to 1 /* uscite */
        while j <= V_numero_uscite do

```

```

begin
set q to 1
while q <= V_dimensione_gruppo(i,j) do
begin
print ";", V_T_evacuazione(i,j) no line
to V_output_tempi
inc q by 1
end
inc j by 1
end
inc i by 1
end
print ""to V_output_tempi
end
/* DISTANZE file .CSV */
/* Funzionamento in modalità astandard con lettura input da file esterno */
if V_autostat = 0 and V_autostat_RPC = 0 then
begin
print " " to V_output_distanze
print "RPC 1-Distanza;RPC 2-Tempo Stimato;RPC 3-Lungh.Primo Tratto;
RPC 4-N'P.ti Decisione;", "Pers;LMedia[m];VarLM[m^2];
DevStdLM[m];l[m];L[m];DistanzePercorse[m]"
to V_output_distanze
end
if V_autostat = 0 then
begin
/* print prima parte delle distanze del file di output: la parte
statistica */
print V_W_RPC(1), ";", V_W_RPC(2), ";", V_W_RPC(3), ";", V_W_RPC(4),
";", V_numero_persone, ";", V_distanze_stat(3), ";",
V_distanze_stat(4), ";", V_distanze_stat(5), ";",
V_distanze_stat(1), ";", V_distanze_stat(2) no line
to V_output_distanze
/* print nella seconda parte del file di output elenco tutti le
distanze percorse per l'evacuazione */
set i to 1 /* stanze */
while i <= V_numero_stanze do
begin
set j to 1 /* uscite */
while j <= V_numero_uscite do
begin
set q to 1
while q <= V_dimensione_gruppo(i,j) do
begin

```

```
        print ";", V_distanze(i,j,1) no line
            to V_output_distanze
        inc q by 1
    end
    inc j by 1
end
inc i by 1
end
print "to V_output_distanze
end
order all loads from OL_background to continue
send to die
end
```

3.3.7 Comportamento dei passeggeri

AutoMod, come i principali software simulativi, può fornire la possibilità di rappresentare i comportamenti “estremi” dei passeggeri, come potrebbe verificarsi in incidenti reali. Comportamenti competitivi anziché cooperativi, come i sorpassi dei gruppi più lenti, potrebbero infatti essere rappresentati spuntando, nel menu riguardante il sistema *Path Mover*, l’opzione “accumulate between control point” che consentirebbe ai veicoli di superarsi anziché formare una coda nel caso qualche veicolo lento si trovi davanti ad altri più veloci; tuttavia nelle simulazioni realizzate si sono sempre ipotizzate situazioni di evacuazione ordinata, condizione effettivamente auspicabile in condizioni di pericolo.

Parameter	Default	Units
Acceleration	0.4	Meters / Seconds / Seconds
Deceleration	0.4	Meters / Seconds / Seconds
Forward Velocity	1	Meters / Seconds
Curve Velocity	1	Meters / Seconds
Spur Velocity	1	Meters / Seconds
Reverse Velocity	1	Meters / Seconds
Curve Velocity	1	Meters / Seconds
Spur Velocity	1	Meters / Seconds
Crab Velocity	1	Meters / Seconds
Rotation Velocity	30	Degrees per Seconds
Stop Distance	0	Meters

Figura 3.2 - Caratteristiche dei gruppi

La figura precedente mostra le caratteristiche predefinite dei gruppi, bisogna però ricordare che la velocità di avanzamento di tutti i gruppi è modificata dai *load* prima dell’evacuazione secondo la funzione seguente, di cui già si è argomentato al paragrafo 3.2.4.

$$vel = 1,7639 * 0,5891^{D_i}$$

3.3.8 Input del modello

Il modello, per simulare correttamente e raggiungere la massima conformità alla realtà, richiede quattro file di input.

- ✓ Input_layout.txt; contenente le principali caratteristiche dell'edificio di cui si vuole simulare l'evacuazione e i parametri da utilizzare nella simulazione. Per quanto riguarda le caratteristiche dell'edificio devono essere indicati:
 - numero di stanze;
 - numero di uscite;
 - numero di porte interne;
 - numero di punti di decisione.

Relativamente alla particolare simulazione che si vuole effettuare vanno invece indicati:

- peso da assegnare ad ogni Route Preference Criteria;
 - range di accettabilità dei percorsi;
 - numero di porte significative;
 - affollamento percentuale dell'edificio.
- ✓ Input_porte.csv; contenente le caratteristiche delle porte interne all'edificio; per ogni porta, che deve essere numerata in maniera concorde alla numerazione dei *Control Point* del modello, devono essere indicati la larghezza in millimetri e il tasso di scorrimento unitario "UFR", indicato in persone al secondo.
 - ✓ Input_uscite.csv; contenente le caratteristiche delle porte di uscita dell'edificio; in particolare, analogamente al file Input_porte.csv, devono essere indicati la larghezza in millimetri e il tasso di scorrimento unitario "UFR", indicato in persone al secondo.
 - ✓ Input_stanze.csv; contenente le informazioni riguardanti le stanze dell'edificio, in particolare saranno indicati per ogni stanza l'area in metri quadrati e la densità massima di persone ammissibile.

3.3.9 Output del modello

Il modello, terminata la simulazione, restituisce quattro file di output.

- ✓ Output_gruppi.csv; contenente l'elenco di tutti i gruppi che hanno preso parte alla simulazione, per ognuno dei quali si mostrano la stanza di partenza, l'uscita utilizzata, il numero di persone che componevano il gruppo, la velocità di fuga e il tempo impiegato per l'evacuazione.
- ✓ Output_messaggi.txt; file di testo contenente tutti i messaggi stampati durante l'evacuazione, tramite esso si può ricostruire l'andamento della simulazione ed eventuali situazioni anomale verificatesi.
- ✓ Output_stat_distanze.csv; contenente i pesi dei Route Preference Criteria utilizzati nella simulazione, il numero di persone presenti nella simulazione e i principali dati relativi alle distanze percorse dai gruppi nella simulazione: distanza media, distanza minima, distanza massima e distanza percorsa da ogni gruppo per evacuare l'edificio.
- ✓ Output_stat_tempi.csv; che, oltre a mostrare l'affollamento e il numero di persone presenti nella simulazione, mostra i principali dati relativi ai tempi di evacuazione: tempo medio, tempo minimo, tempo massimo e tempo impiegato da ogni gruppo per evacuare l'edificio.

4 APPLICAZIONI DEL MODELLO SIMULATIVO

Il programma realizzato è stato utilizzato per testare la risposta a una situazione di emergenza in due edifici specifici:

- ✓ la Facoltà di Ingegneria situata in Via Terracini;
- ✓ il Dipartimento di Meccanica del DIEM posto dinanzi alla facoltà.

Per entrambi gli edifici sono state realizzate diverse simulazioni, in modo da potere analizzare una vasta gamma di variabili in grado di influenzare l'esito dell'evacuazione.

Una prima serie di test è stata realizzata per verificare l'influenza dell'affollamento dell'edificio sui tempi di evacuazione; quindi sono stati eseguiti test per valutare l'importanza dei pesi attribuiti ai Route Preference Criteria, infine si è tentato di valutare l'impatto della disponibilità o meno di tutte le uscite, simulando, di fatto, incendi localizzati in una certa area.

Per ognuno di questi test si è seguito un approccio per gradi: in un primo momento si sono valutati i dati relativi l'edificio del DIEM e in un secondo momento si sono analizzati quelli relativi la Facoltà di Ingegneria di via Terracini la cui area e complessità è notevolmente maggiore.

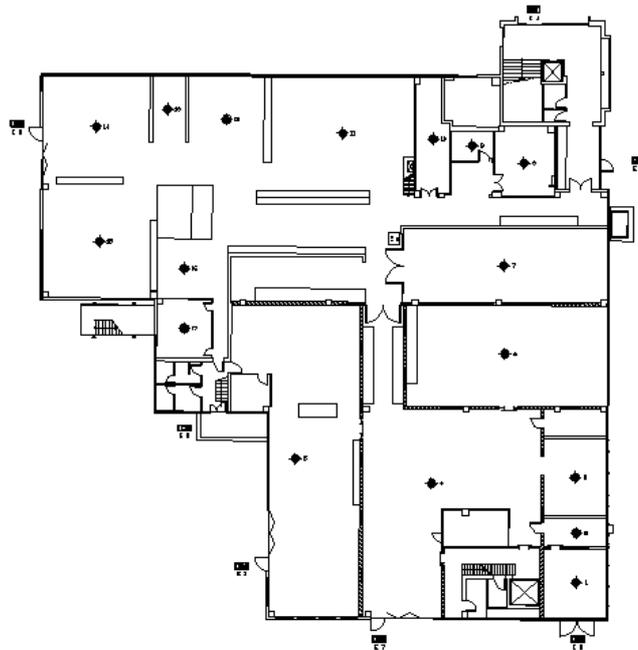
Quest'approccio è stato scelto principalmente in virtù delle differenti dimensioni degli edifici, che rendono più agevole un'analisi iniziale dei dati, più compatti, relativi al DIEM. Realizzate delle ipotesi basandosi sull'analisi dei dati riguardanti il DIEM, si è proceduto all'analisi di quelli relativi la Facoltà di Ingegneria di via Terracini, che risultavano molto più numerosi e complessi, ma fornivano la possibilità di trovare una validazione maggiormente significativa per le ipotesi formulate.

Nel seguito del capitolo saranno presentati i dati principali relativi agli edifici e alle simulazioni ad essi relative eseguite.

4.1 Dipartimento di meccanica del DIEM

In Figura 4.1 è mostrata la planimetria dell'edificio del DIEM posto dinanzi alla Facoltà di Ingegneria situata in Via Terracini.

Piano Terra



Primo Piano

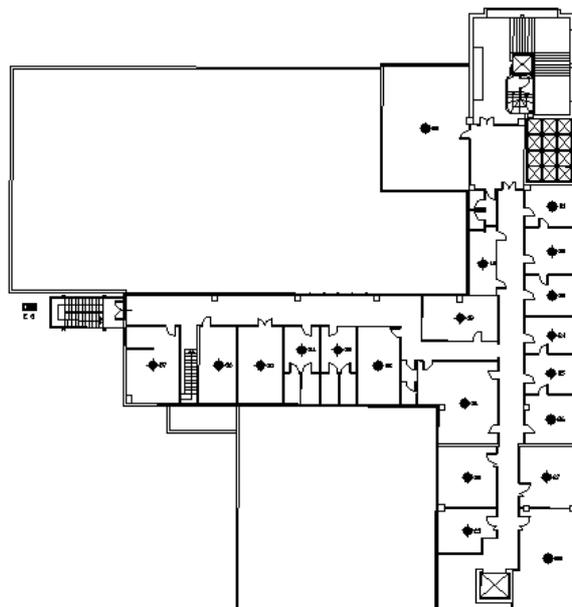


Figura 4.1 - Planimetria edificio DIEM

L'edificio è organizzato su due piani: al piano terra sono presenti i laboratori mentre al primo piano sono situati gli uffici.

Nella tabella seguente sono riassunte le caratteristiche principali dell'edificio.

Caratteristiche Layout	Piano Terra	Primo Piano	Edificio
Numero stanze	17	20	37
Numero uscite	7	1	8
Numero porte interne	15	29	44
Numero punti di decisione	32	35	67

Tabella 4.1 - Caratteristiche edificio DIEM

Oltre a queste informazioni, per realizzare una simulazione che fornisca risultati realistici, dalla pianta dell'edificio sono state ricavate anche le larghezze di tutte le porte, interne ed esterne, e le aree di tutte le stanze dell'edificio.

Una volta ricavata la larghezza di ogni porta è stato possibile calcolare anche l'UFR, "Unit Flow Rate", cioè il tasso unitario di flusso per le porte, utilizzando la formula seguente:

$$UFR = \frac{\text{Larghezza porta [mm]}}{910}$$

Infine, relativamente alle stanze, si è valutata la densità massima che ogni locale poteva prevedere. Questa scelta è particolarmente delicata poiché, per ogni simulazione eseguita, il numero di persone presenti nell'edificio è dipendente dall'affollamento ipotizzato e, appunto, della densità massima consentita in ogni stanza.

Per eseguire in maniera sistematica questa valutazione, in un primo momento i locali sono stati suddivisi in otto categorie in funzione della loro destinazione d'uso, quindi, come mostrato in Tabella 4.2, è stata ipotizzata una massima densità possibile per ognuna di esse.

Tipologia di Locale	Densità Massima [persone/m ²]
Sala prova	0,1
Officina	0,1
Magazzino	0,1
Ufficio	0,2
Spogliatoio	0,4
Zona Esposizione	0,5
Sala Riunioni	0,5
Laboratorio	1

Tabella 4.2 - Tipologie di locali DIEM e loro densità massima

In Figura 4.2 è possibile notare come si presentava una simulazione dell'edificio. I due piani dell'edificio sono correttamente posti uno sopra l'altro in modo tale da rendere conforme alla realtà anche la lunghezza delle scale di collegamento. Nella figura si possono inoltre notare i gruppi che iniziano l'evacuazione: quasi tutti hanno lasciato le stanze di partenza e si stanno dirigendo verso l'uscita più opportuna.

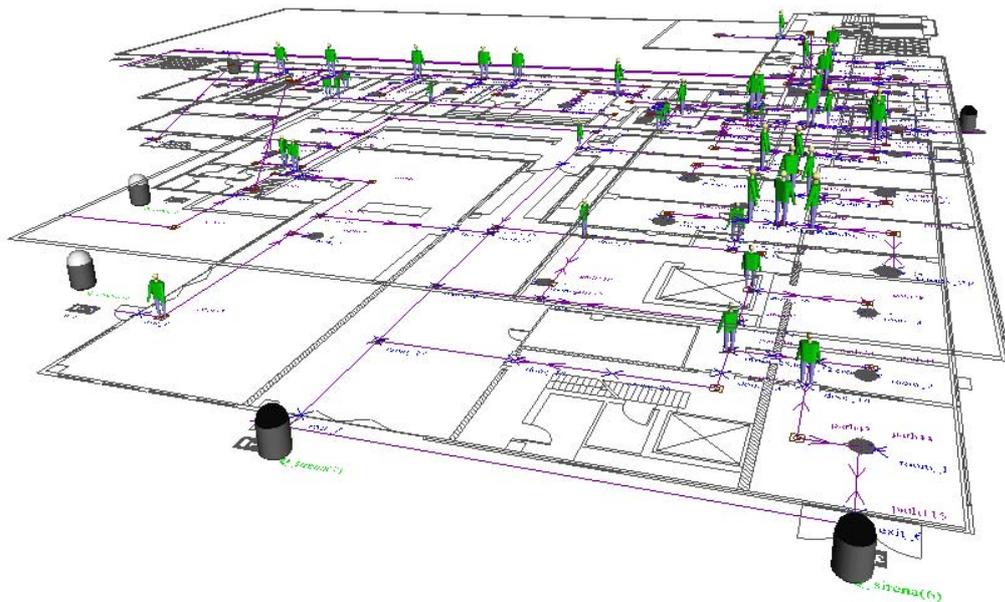
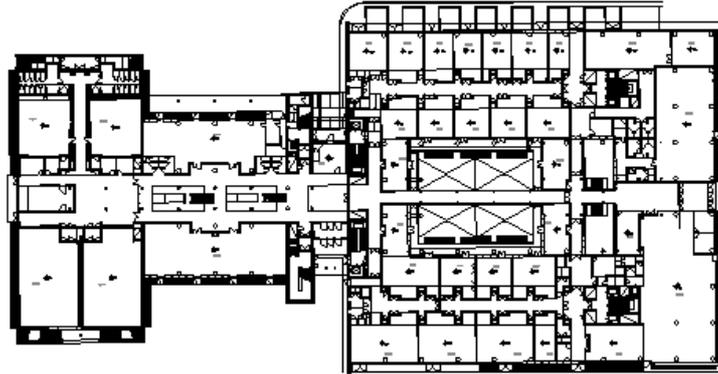


Figura 4.2 - Particolare di una simulazione di evacuazione dell'edificio del DIEM

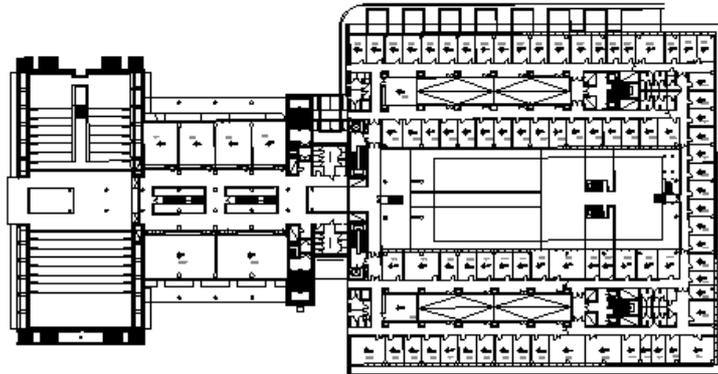
4.2 Ingegneria sita in via Terracini

Per quanto riguarda la Facoltà di Ingegneria situata in Via Terracini, si è proceduto in maniera analoga a quanto fatto per preparare le simulazioni dell'edificio del DIEM.

Piano Terra



Primo Piano



Secondo Piano

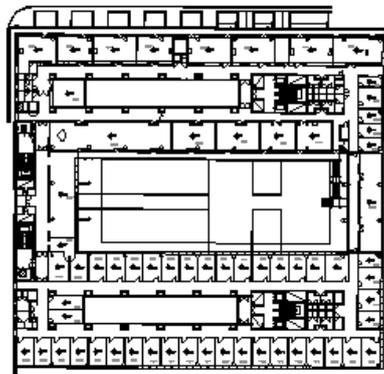


Figura 4.3- Planimetria Facoltà di Ingegneria sita in via Terracini

In Figura 4.3 sono presentate le piante dei tre livelli su cui è realizzato l'edificio in questione. Si può notare, e ciò influenzerà la distribuzione degli occupanti l'edificio durante le simulazioni, che il piano terra è essenzialmente adibito ad uso prettamente didattico: qui si trovano infatti soltanto aule, sale studio, laboratori e biblioteca. Il primo piano è suddiviso in due zone: nella prima (a sinistra nella pianta) si trovano delle aule, mentre nella seconda (a destra nella pianta) troviamo alcuni dipartimenti con i relativi uffici. Infine, al terzo piano, si trovano solo degli uffici.

Nella tabella seguente sono riassunte le principali caratteristiche, ai fini della simulazione, di ogni piano e quelle complessive dell'edificio.

Caratteristiche Layout	Piano Terra	Primo Piano	Secondo Piano	Edificio
Numero stanze	37	89	64	190
Numero uscite	35	1	-	36
Numero porte interne	88	119	90	297
Numero punti di decisione	97	116	84	297

Tabella 4.3 - Caratteristiche edificio Facoltà di Ingegneria sito in via Terracini

Le informazioni sopra riportate evidenziano quanto detto in precedenza, cioè che in questo caso si tratta di un edificio estremamente più complesso ed articolato rispetto al precedente; questa complessità, pur introducendo qualche difficoltà di analisi dei numerosi dati ottenibili, ha fornito una grossa fonte di informazioni che in conclusione è risultata particolarmente preziosa.

Anche in questo caso è stata necessaria una ulteriore analisi delle planimetrie al fine di ricavare la dimensione di tutte le porte ed uscite dell'edificio e di calcolare l'area di tutti i locali dello stesso.

La scelta della densità massima per i vari ambienti è stata realizzata suddividendo i locali nelle dieci categorie mostrate in Tabella 4.4.

Tipologia di Locale	Densità Massima [persone/m ²]
Portineria	0,1
Ufficio	0,2
Laboratorio	0,3
Segreteria	0,5
Laboratorio Informatico	0,8
Sala Riunioni	0,9
Biblioteca	1
Sala Studio	1
Aula	1,1
Mensa	1,5

Tabella 4.4 - Tipologie di locali dell'edificio della Facoltà di Ingegneria sita in via Terracini e loro densità massima

Nelle figure seguenti sono mostrate alcune vedute di diverse fasi di simulazioni della sede di Ingegneria sita in via Terracini.

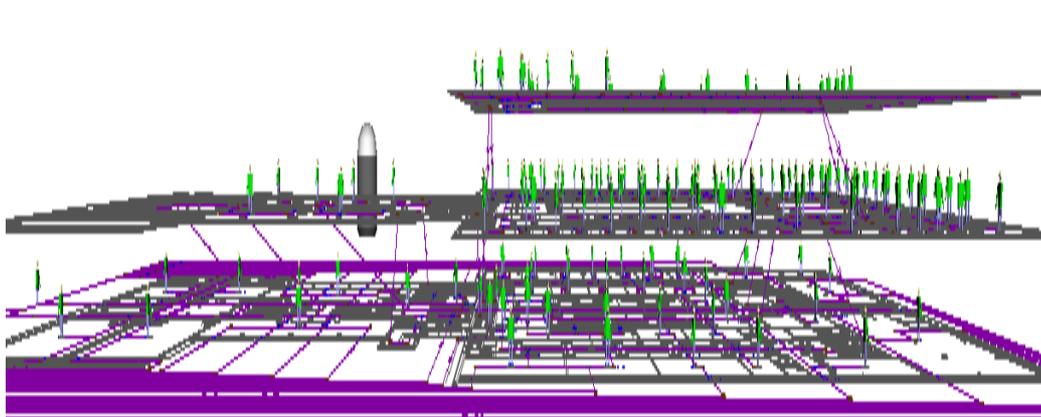


Figura 4.4 - Vista laterale di una evacuazione della sede di Ingegneria in via Terracini

Come si può notare dalla Figura 4.4, anche per questa applicazione del modello simulativo i tre piani dell'edificio sono stati correttamente posti uno sopra l'altro per rendere realistica la lunghezza delle scale e tutto il modello in generale.

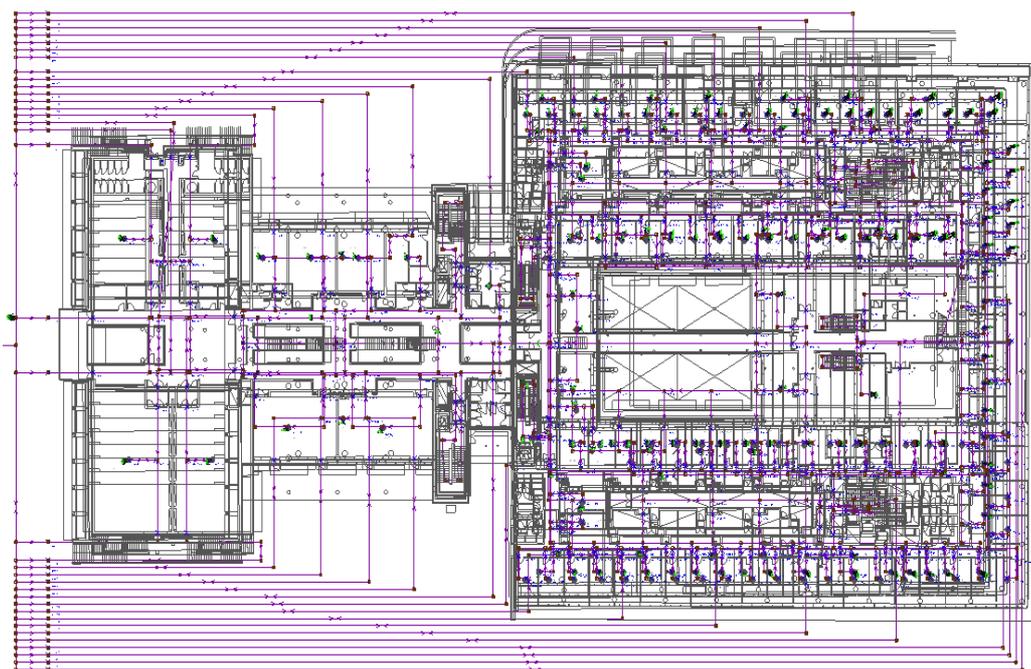


Figura 4.5 - Vista dall'alto di una evacuazione della sede di Ingegneria in via Terracini

In Figura 4.5 è invece possibile, tramite una vista dall'alto dei tre livelli sovrapposti dell'edificio, rilevare la complessità del sistema realizzato per questa seconda applicazione del modello.

5 LE SIMULAZIONI REALIZZATE

Tutte le simulazioni sono state realizzate tramite AutoStat, potente strumento di AutoMod che permette di eseguire in sequenza numerose simulazioni variando un set di parametri in input.

Il motivo di questa scelta risiede nell'obiettivo stesso delle simulazioni, cioè non tanto nella valutazione delle prestazioni di evacuazione degli edifici in una particolare situazione, quanto nel tentativo di estrapolare un comportamento generale e di valutare l'incidenza di una serie di parametri sulle evacuazioni.

Gli ambiti di analisi su cui ci si è concentrati possono essere raggruppati in quattro macro gruppi.

Inizialmente ci si è soffermati su di una grandezza del modello, il numero di porte significative, che indica quante volte un gruppo deve fermarsi simulando l'attraversamento della porta da parte di tutti i componenti del gruppo. Ci si è chiesti se ciò dovesse accadere ogni volta oppure se esistesse un valore ottimale per tale parametro.

Dopodiché, preso un edificio in condizioni ottimali, cioè con tutte le uscite disponibili, si è analizzata l'influenza del numero di persone nell'edificio, e quindi dell'affollamento, sui tempi di evacuazione.

Il terzo gruppo di simulazioni ha avuto come obiettivo la valutazione dell'influenza del peso assegnato ai Route Preference Criteria sulla scelta dei percorsi e dei tempi di evacuazione complessivi.

Infine, limitando il numero di uscite disponibili, si sono simulati incendi localizzati in particolari aree dell'edificio per valutarne l'impatto sui tempi di evacuazione.

5.1 Numero delle porte significative

Inizialmente ci si è soffermati sull'analisi dell'impatto di un parametro tecnico particolarmente legato al modello realizzato: il numero di porte in cui fare

rallentare un gruppo. Come detto in precedenza, sono presenti studi che mettono in relazione la larghezza di una porta col flusso di persone che essa è in grado di garantire.

Nel modello realizzato, come già sottolineato, le persone evacuano l'edificio per gruppi. Il modello simulativo è stato implementato in maniera tale che ogni gruppo rallenti ad ogni porta incontrata attendendo un tempo, funzione della larghezza della porta e del numero di persone componenti il gruppo, calcolabile tramite l'equazione già approfondita e riportata in seguito.

$$WAIT = \frac{\text{Numero persone gruppo} * 910}{\text{Larghezza porta}}$$

In un secondo momento si è valutata l'influenza di questa scelta sulle evacuazioni simulate e se non si potesse fissare il numero delle porte da considerare ad un valore ottimale.

Per valutare l'impatto di questo parametro si sono compiute diverse simulazioni con affollamento massimo degli edifici e mantenendo fissi tutti i parametri ad eccezione del numero di "Porte Significative", che è stato fatto variare da 0 a 5.

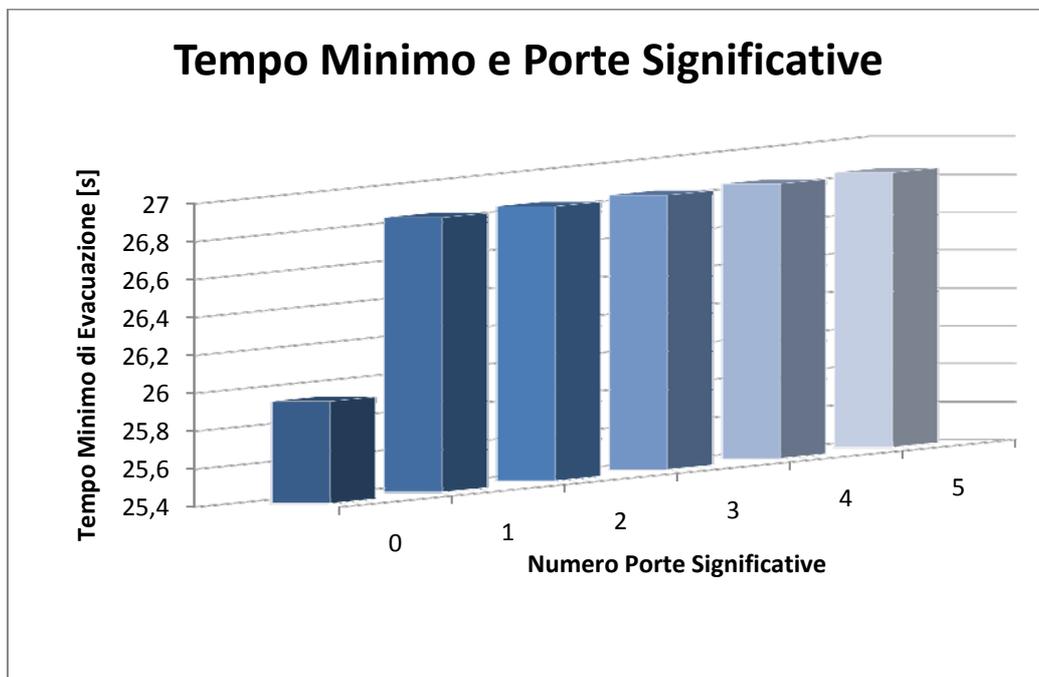


Figura 5.1 - Influenza del numero di porte significative sul tempo minimo di evacuazione

Analizzando la Figura 5.1 si nota che l'unica differenza rilevante nei tempi minimi si verifica passando da 0 ad 1 porta significativa, dopodiché le variazioni non sono considerevoli; tuttavia si deve pensare che il tempo minimo di una evacuazione sia quello realizzabile da un gruppo che si trova ad evacuare l'edificio partendo da un locale vicino ad una uscita, quindi presumibilmente con poche porte che si trovano su questo percorso.

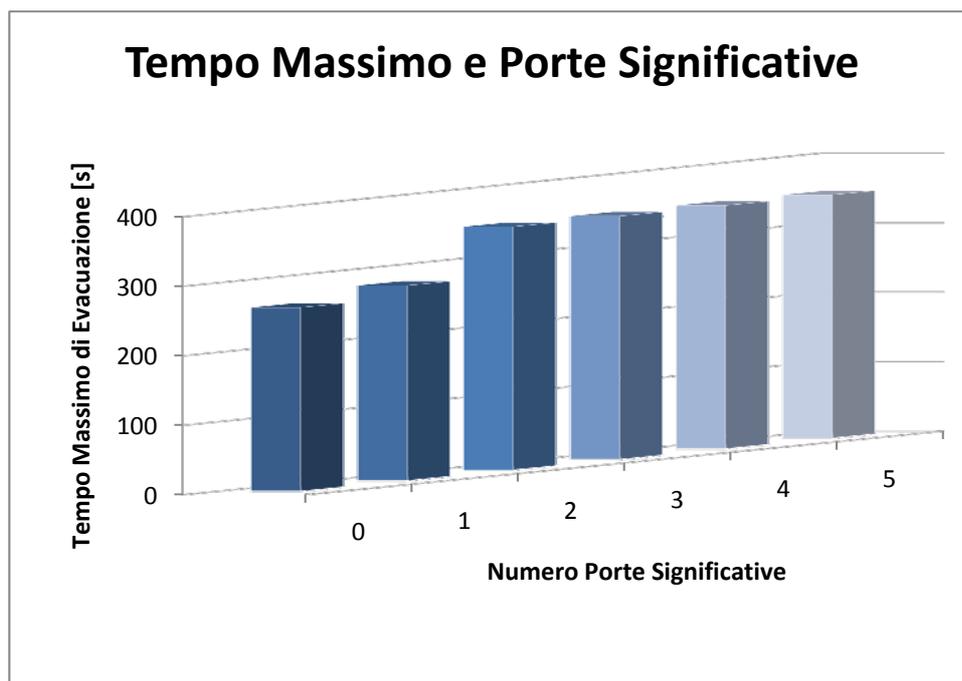


Figura 5.2 - Influenza del numero di porte significative sul tempo massimo di evacuazione

Maggiormente indicativi risultano i dati in Figura 5.2, che pur evidenziando differenze percentualmente minori tra le varie simulazioni, mostrano come l'assestamento dei tempi massimi di evacuazione si verifichi per un numero di porte significative superiore a 2.

Questa valutazione è confermata anche dall'analisi dei dati sui tempi medi di evacuazione, riportati in Figura 5.3, dove ancora una volta si nota un aumento rilevante dei tempi medi passando 0 ad 1 e poi a 2 porte significative, ma poi i tempi paiono assestarsi. Il valore ottimale suggerito dalle simulazioni per questo parametro pare perciò essere di 2 porte significative.

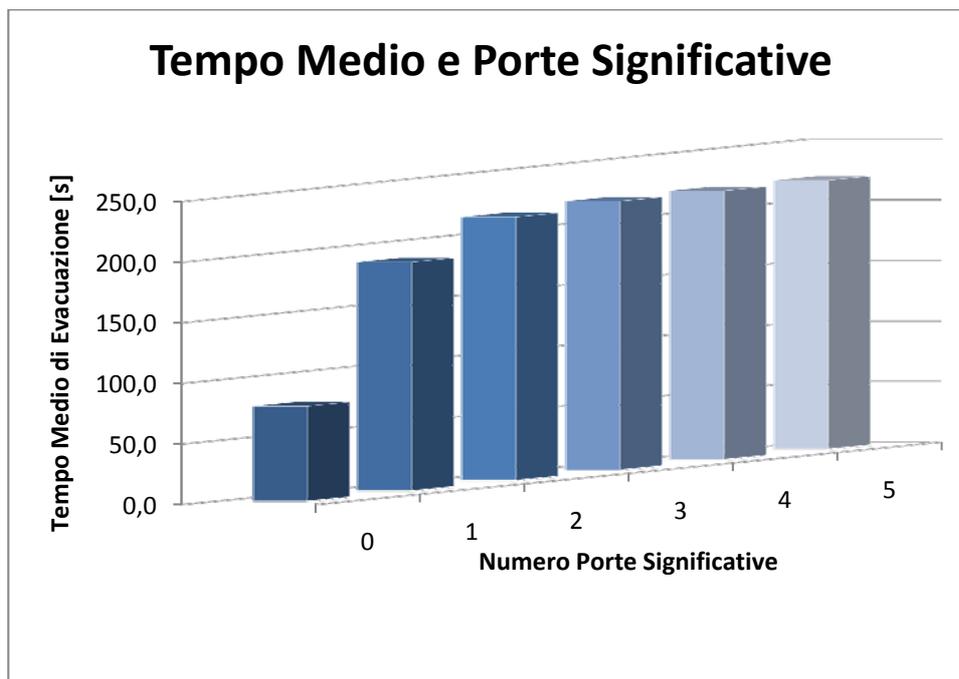


Figura 5.3 - Influenza del numero di porte significative sul tempo medio di evacuazione

Ritornando al significato iniziale che aveva il parametro “Porte Significative”, cioè il numero di porte che, raggiunte da parte di un gruppo, impongono una attesa funzione del numero di persone rappresentate, è opportuna una nuova considerazione.

Sebbene, per motivi d’implementazione e leggibilità dei dati, tutte le persone che partono da una stanza per dirigersi verso la stessa uscita siano state rappresentate attraverso un unico gruppo, riflettendo sulle dinamiche reali di una evacuazione si può comprendere facilmente che, pur ammettendo tutti i fenomeni socio-comportamentali che portano alla formazione e al movimento in gruppi, ognuno di essi, pur mantenendosi tale, dopo aver superato qualche porta non raggiungerà quelle successive totalmente compatto e quindi le porte successive non risulteranno un freno come lo sarebbero state se tutte le persone fossero arrivate contemporaneamente. Se si aggiunge che raramente, seguendo una via di fuga, si devono superare più di 2 porte poiché essa solitamente si svolge lungo scale o corridoi, ecco che il valore suggerito dalle simulazioni effettuate sembra essere valido.

Per tutte le analisi svolte in seguito, si è perciò considerato un valore pari a 2 per il numero di porte significative durante l'evacuazione.

5.2 Affollamento

L'analisi di questo paragrafo riguarda l'impatto che ha l'affollamento di un edificio sulla sua evacuazione. L'affollamento è il parametro che definisce indirettamente il numero di persone presenti negli edifici durante le simulazioni.

Come illustrato ai capitoli 3 e 4, tra gli input necessari per eseguire le simulazioni sono presenti l'area A_i delle stanze e la densità D_i^{MAX} massima accettabile per ognuna di esse; quindi, definita per ogni specifica simulazione un livello di affollamento AFF , è semplice ricavare il numero N_i di persone presenti inizialmente nella stanza i tramite la relazione seguente:

$$N_i = A_i * D_i^{MAX} * AFF$$

Sommando gli occupanti di ogni stanza si può quindi ricavare il numero totale d'individui nell'edificio a inizio simulazione. Relativamente a questa grandezza si è voluto quindi analizzare, a parità di condizioni esterne, se e come il numero di occupanti influenzasse i tempi di evacuazione.

In Figura 5.4 e Figura 5.5 è mostrata l'influenza dell'affollamento dell'edificio sui tempi minimi e massimi di evacuazione dello stesso. Si può notare come la variazione dei tempi minimi sia molto ridotta: si va da 26,25 ad un massimo di 26,85 secondi sufficienti per l'evacuazione. Questa scarsa variabilità è facilmente comprensibile se si valutando che si sta simulando l'evacuazione di edifici reali, nei quali è verosimile che ci siano locali particolarmente favorevoli i cui occupanti risentono in maniera molto limitata del numero totale di persone, è il caso per esempio di stanze o uffici situati vicino alle uscite di sicurezza.

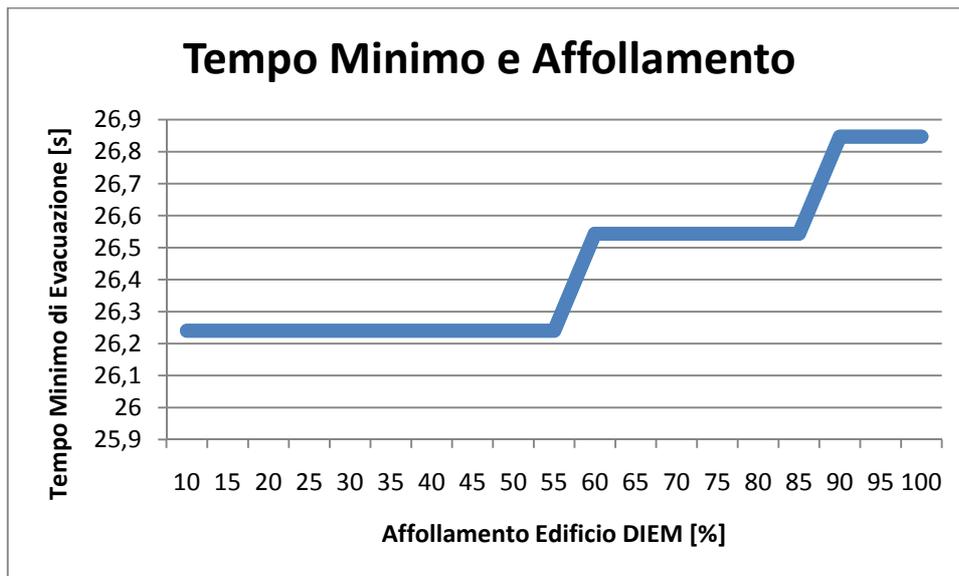


Figura 5.4 - Tempi minimi di evacuazione del DIEM al variare dell'affollamento

Per i tempi massimi si va da un minimo di 270 secondi ad un massimo di 350 secondi necessari per l'evacuazione.

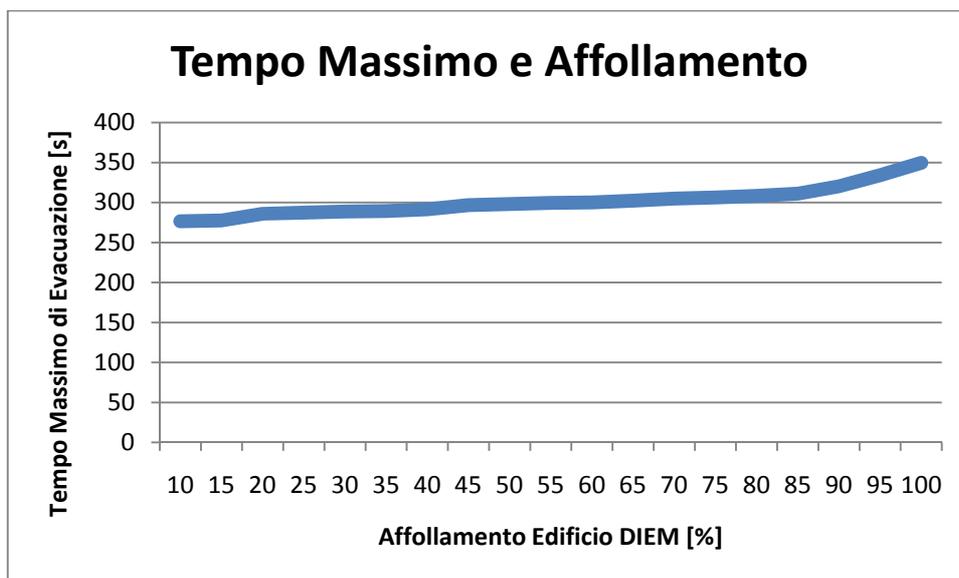


Figura 5.5 - Tempi massimi di evacuazione del DIEM al variare dell'affollamento

Sebbene la variazione sembri scarsamente rilevante, bisogna notare che, pur essendo ridotta la variazione percentuale, in termini assoluti questo aumento va considerato significativo: per evacuare l'edificio del DIEM partendo dal locale meno agevole possono essere infatti sufficienti 270 secondi oppure servirne 350 nel caso l'edificio sia affollato al massimo.

Va certamente rilevato che una differenza di 80 secondi per evacuare un edificio in situazioni di pericolo non è certo da considerare priva di importanza.

La Figura 5.6 è indicativa ai fini dell'analisi della relazione tra affollamento di un edificio e tempi medi necessari per la sua evacuazione. Vi sono, infatti, presentati i tempi medi di evacuazione del DIEM al variare della densità al suo interno.

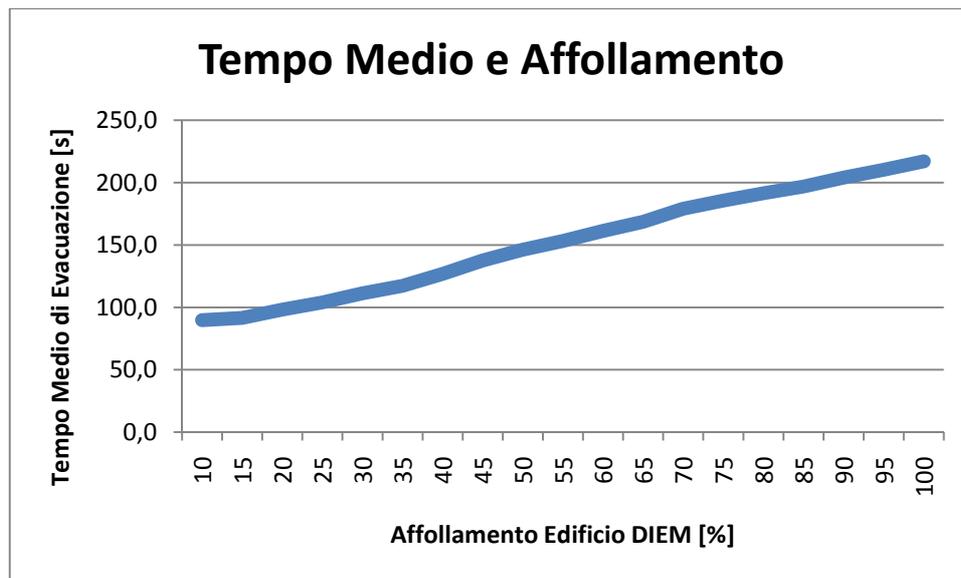


Figura 5.6 - Tempi medi di evacuazione del DIEM al variare dell'affollamento

Si può notare come l'impatto dell'affollamento sui tempi di evacuazione sia notevole. Se sono sufficienti mediamente 90 secondi per evacuare l'edificio del DIEM nel caso vi sia all'interno solo il 10% di persone rispetto la sua capienza massima, nel caso l'edificio sia popolato al 100% quando scatta l'allarme saranno necessari mediamente 217 secondi per evacuarlo. In questo caso si assiste ad un aumento significativo sia in termini assoluti, con un incremento di quasi 130 secondi tra il caso migliore e quello peggiore, sia in termini percentuali, dal momento che si può avere un incremento del 140% dei tempi medi di evacuazione. Tutte le conclusioni appena raggiunte sono state confermate dai dati ottenuti analizzando le simulazioni relative l'edificio della Facoltà di Ingegneria situato in via Terracini.

5.3 Route Preference Criteria

Come approfondito al Paragrafo 3.2.2, Elaborazione delle informazioni raccolte, il secondo step del modello teorico implementato prevede l'utilizzo dei cosiddetti Route Preference Criteria, RPC, per la scelta delle uscite verso cui dirigersi da parte degli individui che devono evacuare l'edificio.

Gli RPC impiegati nel modello sono:

1. distanza – RPC_1 ;
2. tempo stimato – RPC_2 ;
3. lunghezza del primo tratto – RPC_3 ;
4. punti di decisione – RPC_4 .

Tra gli input selezionabili per ogni simulazione è presente il peso, W^1, W^2, W^3, W^4 , da associare ad ognuno dei quattro criteri utilizzabili per scegliere l'uscita ottimale. In questo paragrafo si vuole analizzare l'impatto che ha l'importanza assegnata ad ogni criterio sulle evacuazioni.

Relativamente a questa indagine oltre ai tempi, che comunque rimangono il principale parametro per la valutazione di una evacuazione, si sono volute analizzare le variazioni che avvenivano nelle distanze percorse per sgomberare gli edifici.

In Figura 5.7 è evidenziata la variazione dei tempi medi di evacuazione di un edificio nel caso si assegni un peso percentualmente sempre più rilevante ad un RPC mantenendo agli altri criteri un peso percentuale uguale.

Si può notare che, assegnando il 10% di importanza alla lunghezza del primo tratto e il 30% di peso agli altri RPC, il tempo medio è più basso, quindi migliore, di quanto si possa ottenere assegnando il 70% di importanza alla lunghezza del primo tratto e il 20% agli altri criteri. Possiamo quindi dedurre che questo criterio, pur avendo indiscutibilmente un peso rilevante nella scelta reale della direzione da tenere in caso di emergenza, potrebbe addirittura risultare fuorviante nel caso ci si basasse solo su di esso per la scelta della via di fuga; non sarà quindi consigliabile attribuirgli un peso superiore al 35%.

Per quanto riguarda l'influenza del peso assegnato ad RPC_1 , la lunghezza del percorso scelto, i tempi medi di evacuazione possono subire variazioni significative assegnando più o meno importanza alla scelta di un percorso breve. L'andamento dei tempi medi, in funzione del peso assegnato alla distanza percorsa, mostra chiaramente che questo parametro è molto importante, ma al tempo stesso non deve prendere il sopravvento sugli altri, i tempi di evacuazione migliorano, infatti, solo se il valore di W^1 è compreso tra il 30% ed il 80%.

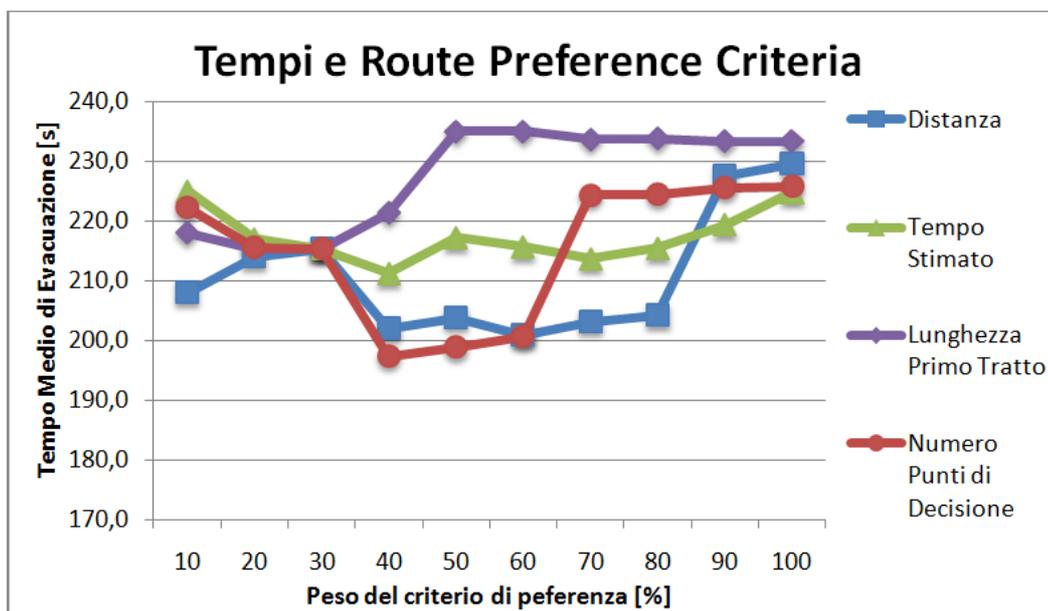


Figura 5.7 - Variazione dei tempi medi di evacuazione al variare del peso assegnato agli RPC

Analizzando gli effetti del peso assegnato ad RPC_2 , il tempo di evacuazione stimato, si può notare che il tempo medio migliora aumentando l'importanza per questo criterio di preferenza. Tuttavia un peso troppo elevato alla stima del tempo di evacuazione, che ricordiamo essere calcolato tramite l'equazione $T = \frac{L}{vel} + \frac{N*Q}{UFR*W}$ illustrata al Capitolo 3.2.2, risulta essere controproducente. Si può infatti notare che, superando 60% di importanza assegnato ad RPC_2 , il tempo medio di evacuazione inizia a salire.

Questo fenomeno può essere spiegato col cosiddetto "imbottigliamento", vale a dire che, se il tempo stimato prende il sopravvento sugli altri criteri, tutte le

persone scelgono le vie principali creando maggiore traffico, amplificando quindi l'effetto dei colli di bottiglia e non sfruttando eventuali vie secondarie vantaggiose.

Il peso assegnato al numero di punti decisionali lungo il percorso sortisce un effetto analogo a quello di RPC_1 , ma ulteriormente amplificato. In questo caso è maggiormente evidente il range entro cui mantenere W^4 , che dovrebbe essere superiore al 20% ma inferiore al 60%.

In Figura 5.8 è mostrato l'andamento delle distanze percorse dalle persone nell'edificio al variare dei pesi assegnati ai criteri di preferenza.

Come prevedibile, aumentando il valore di W^1 , peso associato alla lunghezza del percorso, la distanza media percorsa per evacuare l'edificio cala costantemente. Effetto opposto si verifica invece aumentando il peso assegnato al tempo stimato e alla lunghezza del primo tratto, che, se prevalenti, portano le persone a percorrere più strada per raggiungere l'uscita.

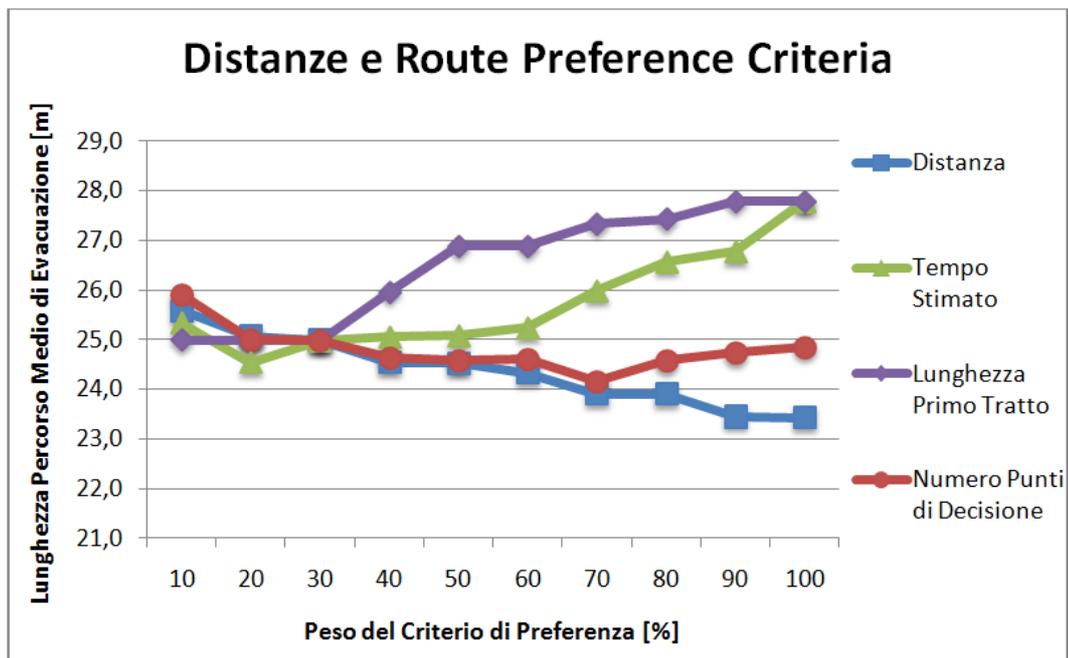


Figura 5.8 - Variazione delle distanze medie di evacuazione al variare del peso assegnato agli RPC

Infine anche un peso significativo associato al numero di punti di decisione incontrati, quindi una forte preferenza a percorsi semplici verso le uscite, porta a percorrere poca strada durante l'evacuazione.

In conclusione anche l'andamento delle distanze medie conferma l'analisi realizzata basandosi sul parametro fondamentale in caso di emergenza: il tempo di evacuazione.

Criteri di Preferenza dei Percorsi	Range Ottimale	Impatto	Configurazione Consigliata
Lunghezza del Percorso	30% - 60%	ALTO	35%
Stima del Tempo di Evacuazione	< 60%	MEDIO	30%
Lunghezza del Primo Tratto	< 35%	BASSO	10%
Numero Punti di Decisione	20% - 60%	ALTO	25%

Tabella 5.1 – Bilanciamento e significatività dei Route Preference Criteria

In Tabella 5.1 è riassunto il range di peso da assegnare ai vari RPC per ottimizzare il tempo medio e la distanza media di evacuazione; inoltre è presentata la significatività dell'effetto che la variazione del singolo criterio di preferenza ha sulle prestazioni evacuative.

Infine è mostrata la configurazione dei pesi W^1, W^2, W^3, W^4 associati ai quattro Route Preference Criteria che è stata valutata ottimale e che quindi è stata utilizzata nelle varie simulazioni realizzate.

5.4 Uscite disponibili

Terminiamo il capitolo, riguardante le simulazioni realizzate, mostrando i risultati ottenuti simulando particolari scenari al fine di verificare come cambierebbero i tempi di evacuazione se all'occorrenza di incendi o eventi catastrofici si rendessero indisponibili un certo numero di uscite.

Tutte le simulazioni presentate nel seguito sono state realizzate utilizzando la configurazione degli RPC precedentemente mostrata e considerando due porte significative. Inoltre, per considerare la massima criticità possibile, in tutti gli scenari si è utilizzato un affollamento del 100% ipotizzando che l'evacuazione dovesse avere luogo in un momento in cui l'edificio accogliesse al suo interno il numero massimo possibile di persone.

5.4.1 Scenario 1: Evacuazione precauzionale del DIEM con tutte le uscite a disposizione

Questo scenario vuole rappresentare un'evacuazione in situazioni ottimali, quando cioè tutte le uscite sono disponibili e gli occupanti possono scegliere la migliore uscita in relazione alla loro posizione.

Analizzeremo questo scenario in maniera approfondita per verificare in seguito l'entità del peggioramento dei tempi di evacuazione negli scenari in cui sarà introdotta l'indisponibilità di alcune uscite.

L'evacuazione simulata in questa configurazione ha avuto come esito un tempo massimo di 349,7 secondi e un tempo medio personale di evacuazione di 215,4 secondi, si può quindi affermare che l'evacuazione è piuttosto rapida.

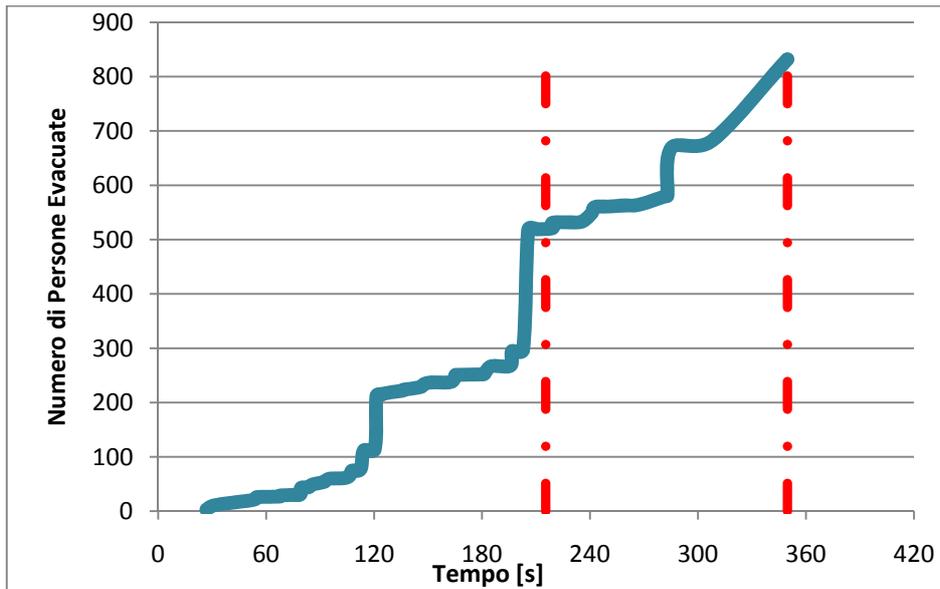


Figura 5.9 - Cumulata dell'evacuazione delle persone dal DIEM nello Scenario 1

In Figura 5.9 è mostrata la curva cumulata dell'evacuazione delle persone presenti nel DIEM, confrontando il grafico con la Figura 5.10 si può notare che i salti nella curva di Figura 5.9 si presentano nei momenti in cui riesce ad uscire dall'edificio un gruppo numeroso di persone.

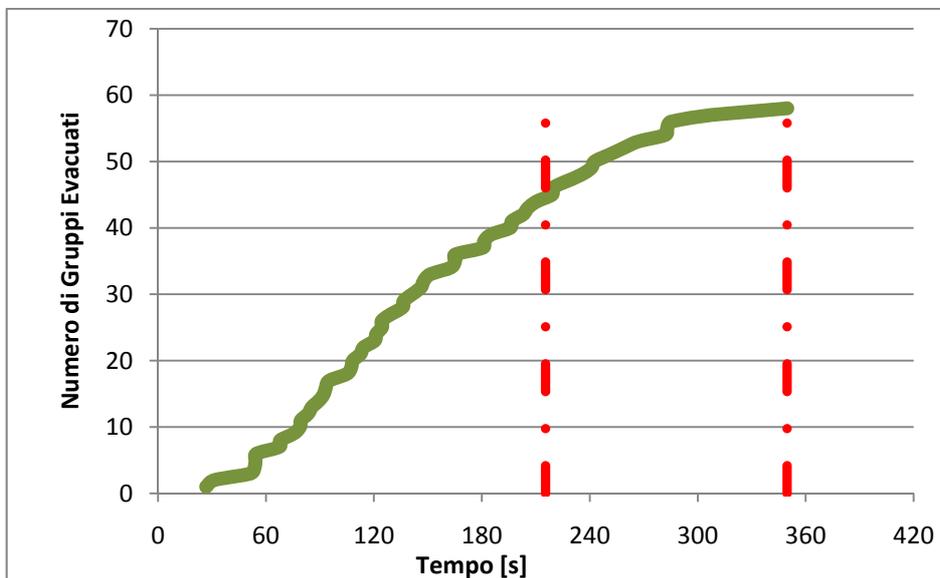


Figura 5.10 - Cumulata per gruppi dell'evacuazione del DIEM nello Scenario 1

L'andamento della curva in Figura 5.10 mostra, infatti, l'andamento tipico che ci si attende in un'evacuazione: rapidamente avviene la prima fase con l'uscita dall'edificio della maggior parte dei gruppi, quindi arrivano i cosiddetti

ritardatari, cioè tutti quei gruppi che provenivano dai locali disposti lontano dalle uscite. Va comunque rilevato che l'evacuazione avviene in maniera sostanzialmente omogenea, a conferma che le irregolarità nel grafico riguardante l'evacuazione dei singoli occupanti corrispondono all'uscita di gruppi numerosi di persone.

Si vuole infine sottolineare che, entro il tempo medio avviene l'evacuazione del 63% delle persone, cioè del 76% dei gruppi, il che conferma quanto detto precedentemente, cioè che sono presenti pochi gruppi che necessitano di un tempo relativamente più alto degli altri. Se quindi si volesse intervenire strutturalmente sull'edificio per migliorarne i tempi di evacuazione sarebbe consigliabile iniziare cercando di migliorare la segnaletica e gli accorgimenti volti a facilitare la ricerca dell'uscita da queste zone dell'edificio.

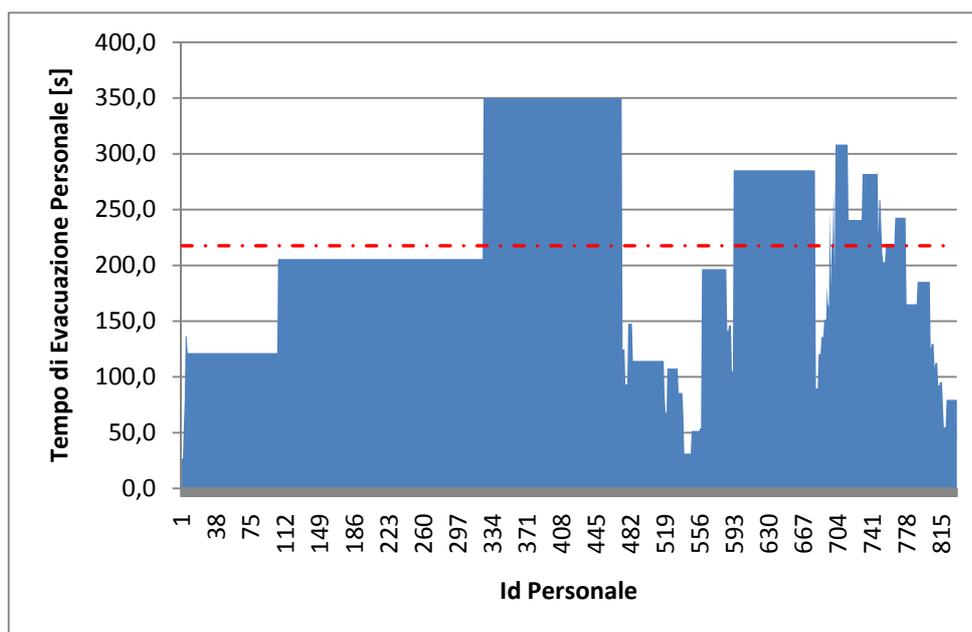


Figura 5.11 - Andamento dei tempi di evacuazione per ogni occupante del DIEM nello Scenario 1

In Figura 5.11 sono mostrati tutti i tempi personali di evacuazione dell'edificio, dai quali emerge ulteriormente come solo un ridotto numero di occupanti impieghi un tempo superiore alla media, rappresentata da una linea tratteggiata, per la fuga.

La Figura 5.12 costituisce una nuova conferma di quanto detto in precedenza, dal momento che emerge chiaramente come solo un ridotto numero di gruppi impieghi un tempo superiore alla media.

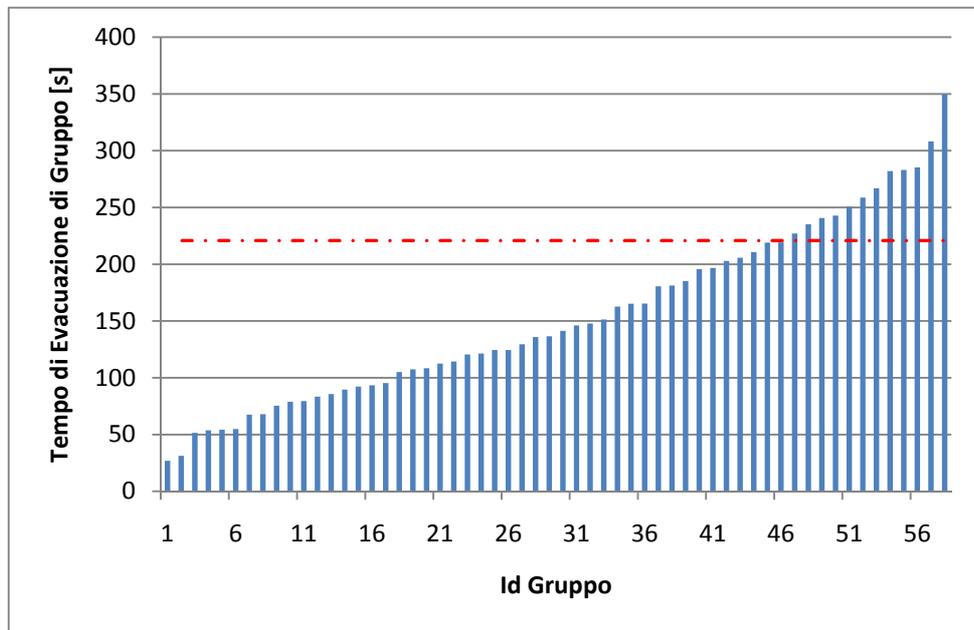


Figura 5.12 - Andamento dei tempi di evacuazione del DIEM per ogni gruppo nello Scenario 1

Il fatto che solo pochi gruppi richiedano un tempo superiore alla media potrebbe avere due distinte ragioni:

1. i gruppi che impiegano un tempo superiore alla media sono molto numerosi;
2. i gruppi più lenti necessitano di un tempo significativamente superiore agli altri.

In ognuno dei due casi ci si trovi, se si volesse tentare di abbassare i tempi di evacuazione sarebbe opportuno iniziare con interventi mirati agli ambienti da cui provengono i gruppi più lenti, data la loro evidente maggiore criticità.

5.4.2 Scenario 2: Evacuazione del DIEM con le uscite della zona Nord indisponibili

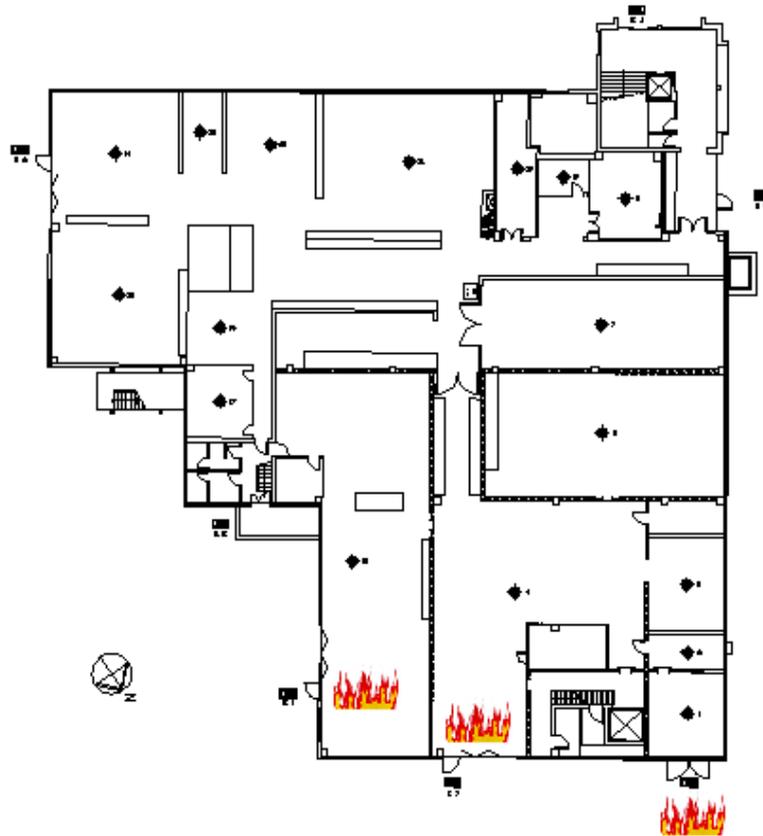


Figura 5.13 - Incendio che si propaga dalla zona Nord rendendo inutilizzabili le uscite 1, 6 e 7

Lo scenario 2 vuole simulare l'evacuazione dell'edificio del DIEM nel caso in cui un incendio si propaghi a partire dalla zona Nord. In questo scenario non saranno quindi utilizzabili, come mostrato in Figura 5.13, le porte di uscita numero 1, 6 e 7.

In Figura 5.14 è mostrato l'andamento cumulato dell'evacuazione delle persone dall'edificio in questa situazione. Si può notare facilmente il notevole incremento, rispetto alle condizioni ottimali, del tempo medio e di quello massimo di evacuazione che passano da 215 a 330 secondi e da 350 a 550 secondi.

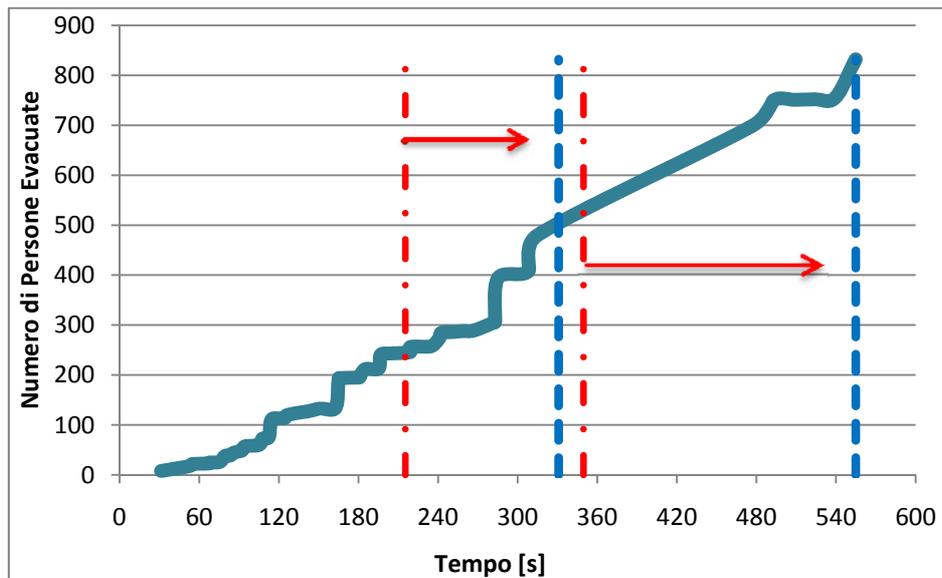


Figura 5.14 - Cumulata dell'evacuazione delle persone dal DIEM nello Scenario 2

Il notevole incremento dei tempi di evacuazione potrebbe risultare preoccupante, tuttavia, analizzando la Figura 5.15, appare chiaramente come sia il tempo medio che quello massimo siano traslati a destra a causa del ritardo nell'evacuazione di pochi gruppi. Questo fenomeno era prevedibile, dato che è presumibile che tutti i gruppi che avrebbero scelto le tre uscite indisponibili in questo scenario impiegheranno tempi superiori agli altri per raggiungere delle uscite disponibili.

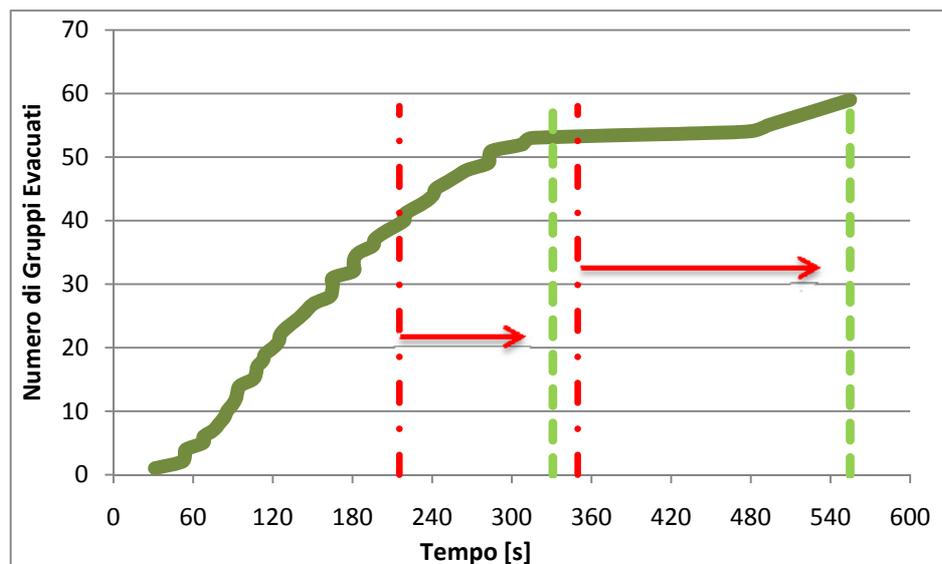


Figura 5.15 - Cumulata per gruppi dell'evacuazione del DIEM nello Scenario 2

Questa considerazione è confermata dalla Figura 5.16, che mostra come solo un ridotto numero di gruppi, quelli provenienti dai locali adiacenti alla zona di origine dell'incendio, necessiti di un tempo di evacuazione decisamente superiore alla media.

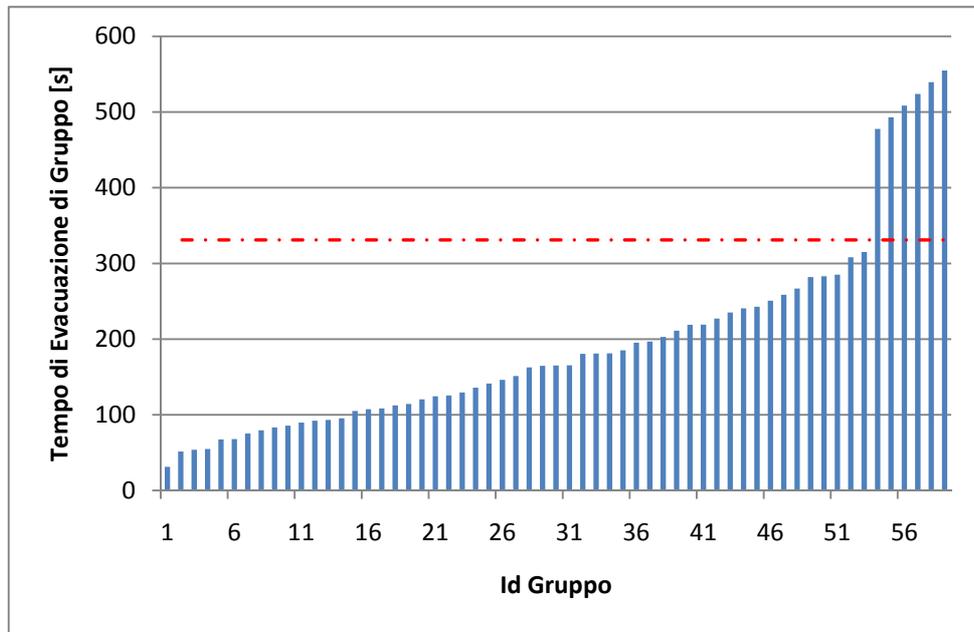


Figura 5.16 - Andamento dei tempi di evacuazione del DIEM per ogni gruppo nello Scenario 2

5.4.3 Scenario 3: Evacuazione del DIEM con le uscite della zona Ovest indisponibili

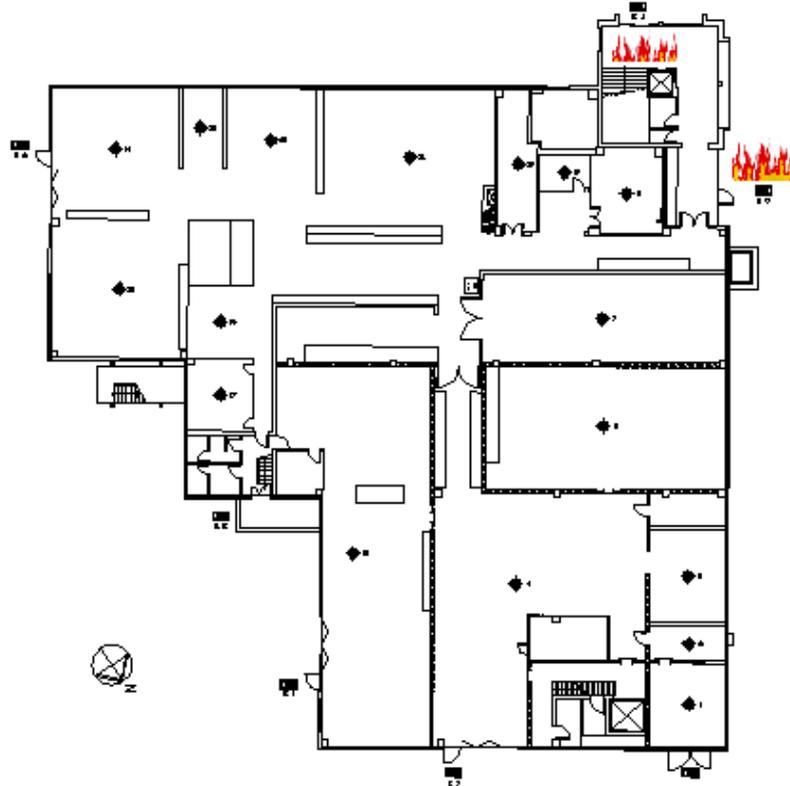


Figura 5.17 – Incendio che si propaga dalla zona Ovest rendendo inutilizzabili le uscite 4 e 5

Lo scenario 2 simula l'evacuazione dell'edificio del DIEM nel caso in cui un incendio si propaghi a partire dalla zona Ovest. In questo scenario non saranno quindi utilizzabili, come mostrato in Figura 5.17, le uscite numero 4 e 5.

L'andamento dell'evacuazione delle persone in questo scenario è mostrato in Figura 5.18; diversamente dallo scenario 2, possiamo notare che l'incremento dei tempi di evacuazione in questo caso non è particolarmente significativo: il tempo medio passa da 215 a 241 secondi, mentre il tempo massimo di evacuazione passa da 350 a 410 secondi.

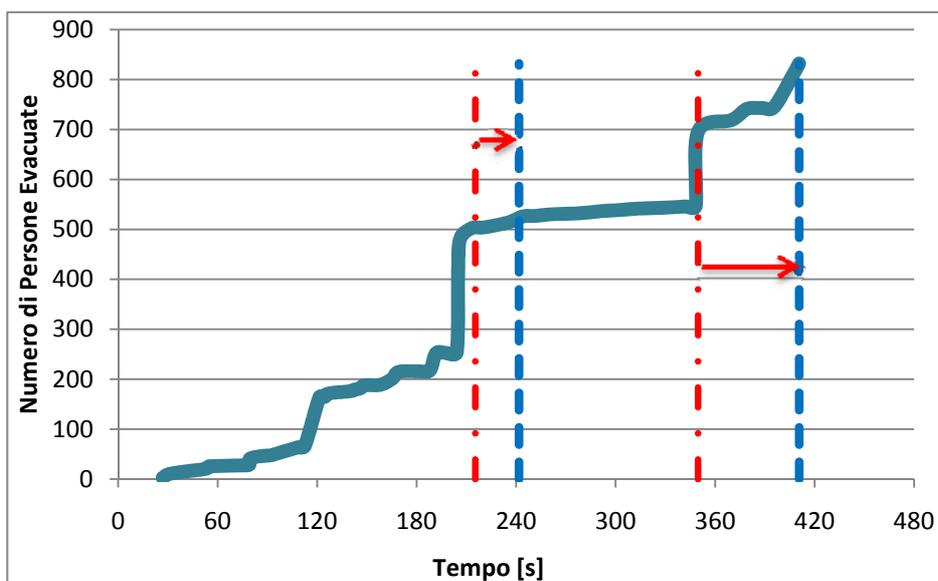


Figura 5.18 - Cumulata dell'evacuazione delle persone dal DIEM nello Scenario 3

In Figura 5.19 è mostrato l'andamento dell'evacuazione dei gruppi dall'edificio, tramite il quale possiamo notare come la curva di evacuazione sia piuttosto regolare, indicando che l'impatto dell'indisponibilità delle uscite 4 e 5 non rallenta gruppi numerosi e al tempo stesso non costringe i gruppi che avrebbero scelto queste uscite ad impiegare tempi molto superiori per raggiungerne di diverse.

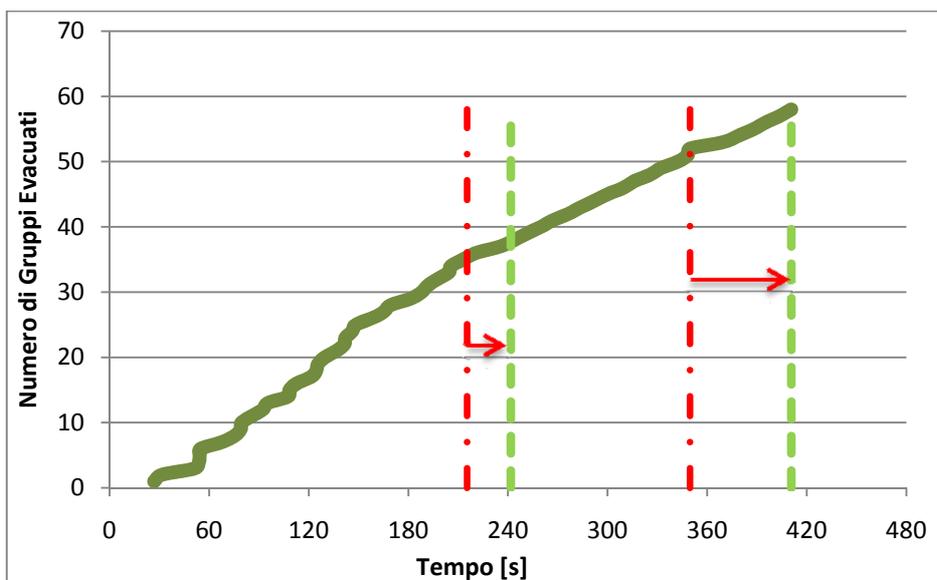


Figura 5.19 - Cumulata per gruppi dell'evacuazione del DIEM nello Scenario 3

In Figura 5.20 sono presentati tutti i tempi personali di evacuazione dell'edificio, mostrando come, pur essendoci tempi più alti, non sono presenti picchi particolarmente elevati, quindi nessun'occupante dovrà fronteggiare situazioni particolarmente critiche.

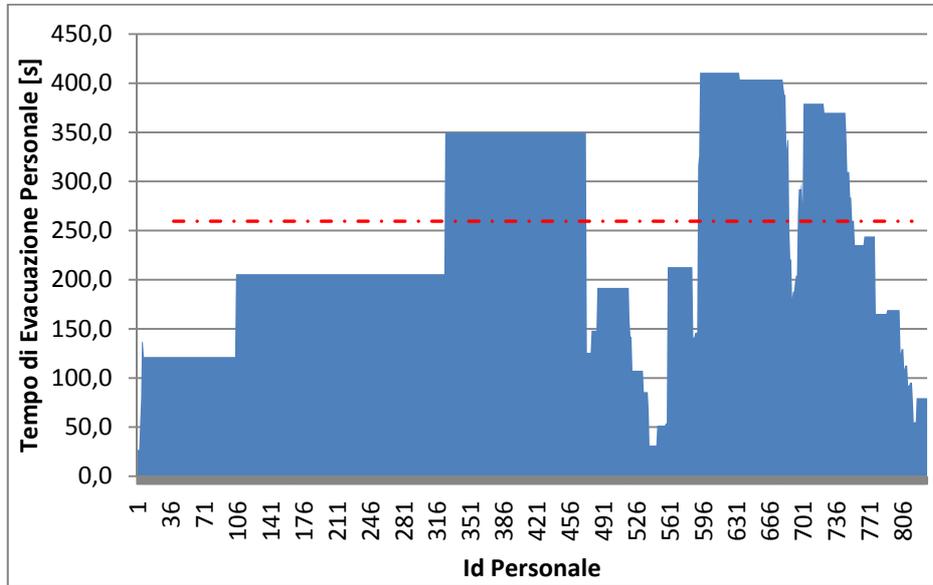


Figura 5.20 - Andamento dei tempi di evacuazione per ogni occupante del DIEM nello Scenario 3

Infine, Figura 5.21 conferma ulteriormente quanto detto in precedenza.

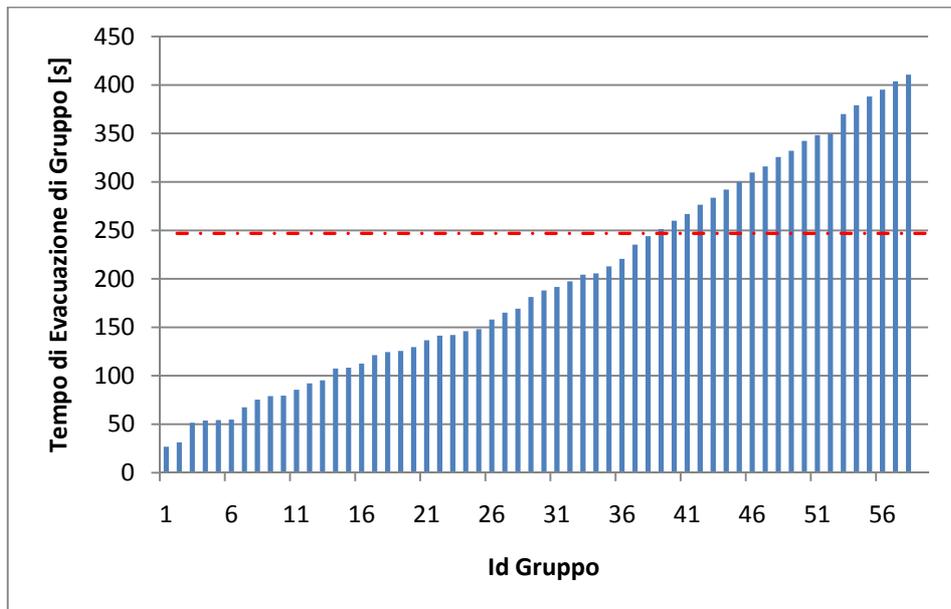


Figura 5.21 - Andamento dei tempi di evacuazione del DIEM per ogni gruppo nello Scenario 3

I tempi di evacuazione dei gruppi risultano, infatti, piuttosto omogenei, a differenza di quanto accadeva nello scenario 2 (Figura 5.16), a conferma della possibilità per ogni gruppo di deviare senza troppa difficoltà la propria scelta verso una uscita disponibile.

5.4.4 Scenario 4: Evacuazione del DIEM con le uscite della zona Est indisponibili

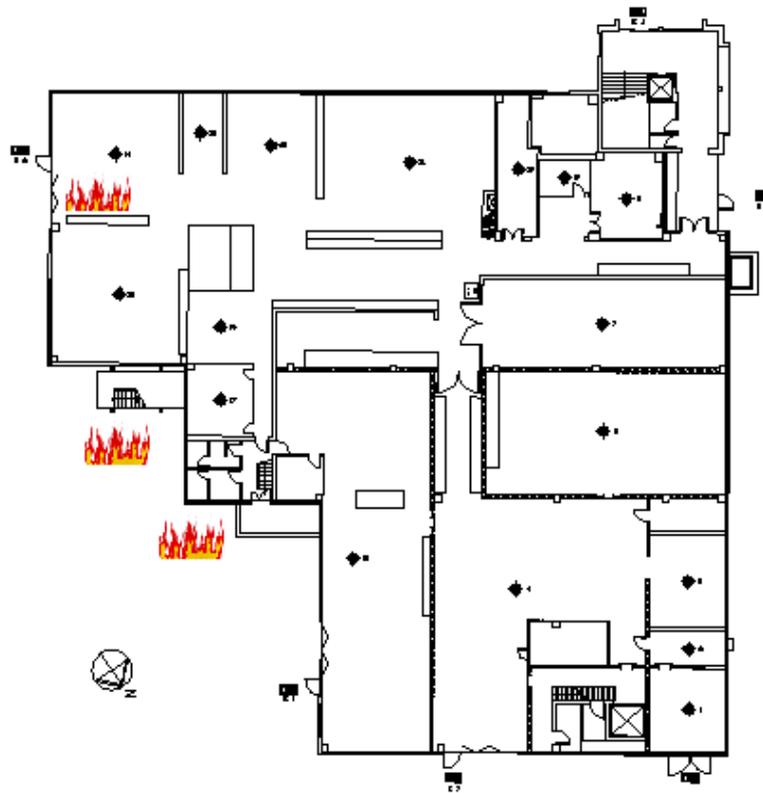


Figura 5.22 - Incendio che si propaga dalla zona Est rendendo inutilizzabili le uscite 2, 3 e 8

Lo scenario 4, ultimo analizzato per l'edificio del DIEM, simula l'evacuazione nel caso in cui un incendio si propaghi a partire dalla zona Est. Come mostrato in Figura 5.22, le porte di uscita numero 2 e 3 al primo piano ed 8 al secondo, non saranno utilizzabili.

In Figura 5.23 è mostrato l'andamento cumulato dell'evacuazione delle persone dall'edificio in questo scenario, in cui il tempo medio di evacuazione passa da 215 a 248 secondi e quello massimo passa da 350 a 360 secondi.

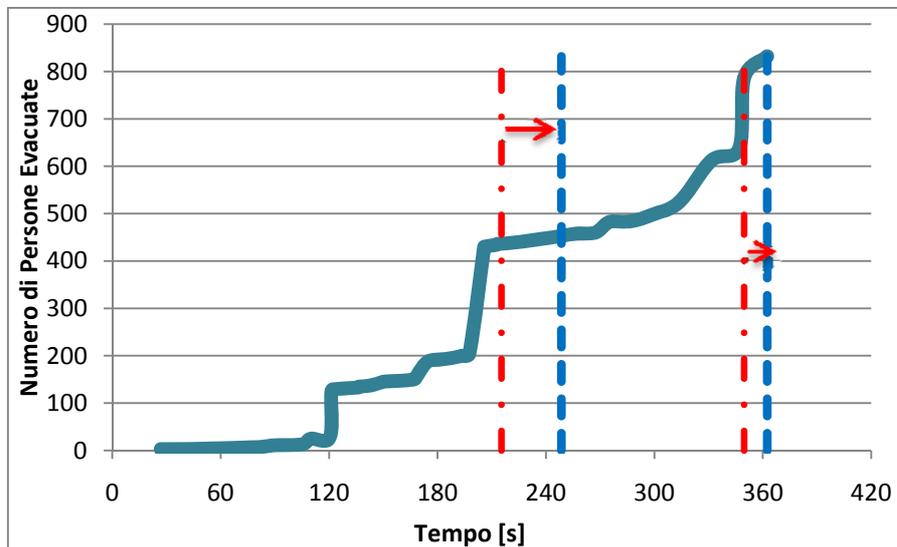


Figura 5.23 - Cumulata dell'evacuazione delle persone dal DIEM nello Scenario 4

L'incremento dei tempi di evacuazione risulta quindi relativamente basso, in particolare l'incremento del tempo massimo risulta particolarmente ridotto.

Anche i dati, mostrati in Figura 5.24, relativi all'evacuazione dei gruppi risultano incoraggianti, si nota infatti un andamento piuttosto omogeneo dell'evacuazione.

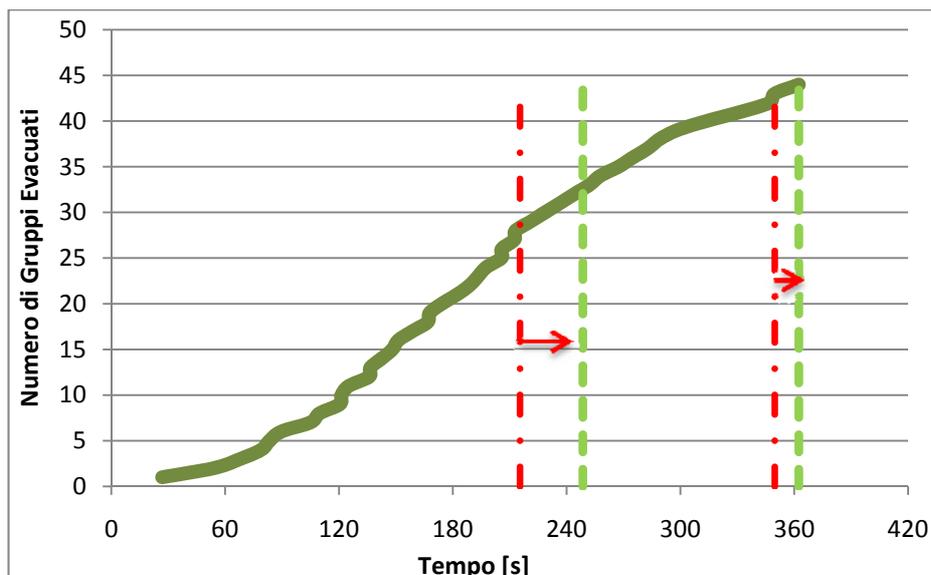


Figura 5.24 - Cumulata per gruppi dell'evacuazione del DIEM nello Scenario 4

In Figura 5.25 sono mostrati i tempi personali di evacuazione che si dispongono in maniera piuttosto regolare attorno alla media, senza mostrare, fortunatamente, particolari picchi sopra di essa.

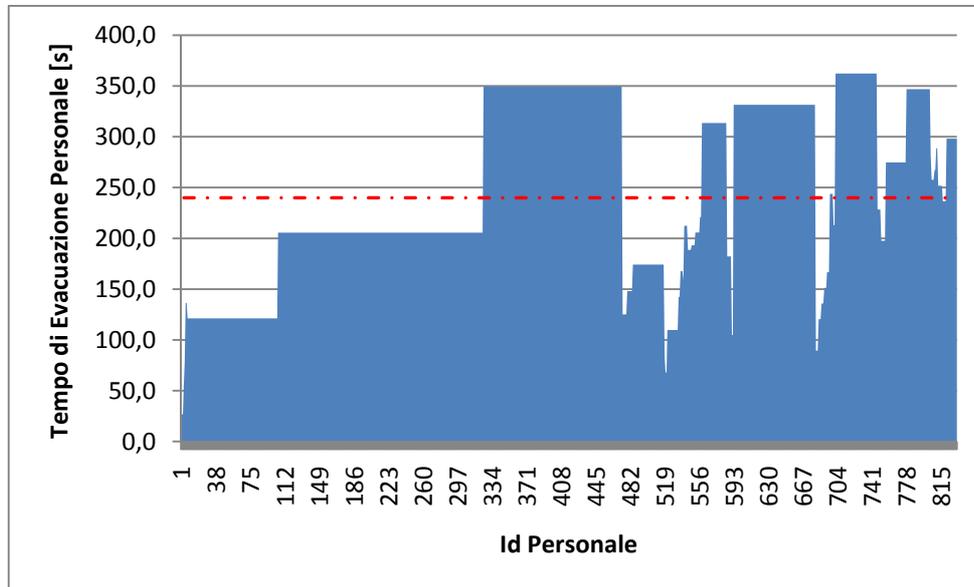


Figura 5.25 - Andamento dei tempi di evacuazione per ogni occupante del DIEM nello Scenario 4

Infine sono presentati i singoli tempi di evacuazione dei gruppi, che risultano positivamente regolari e ben distribuiti.

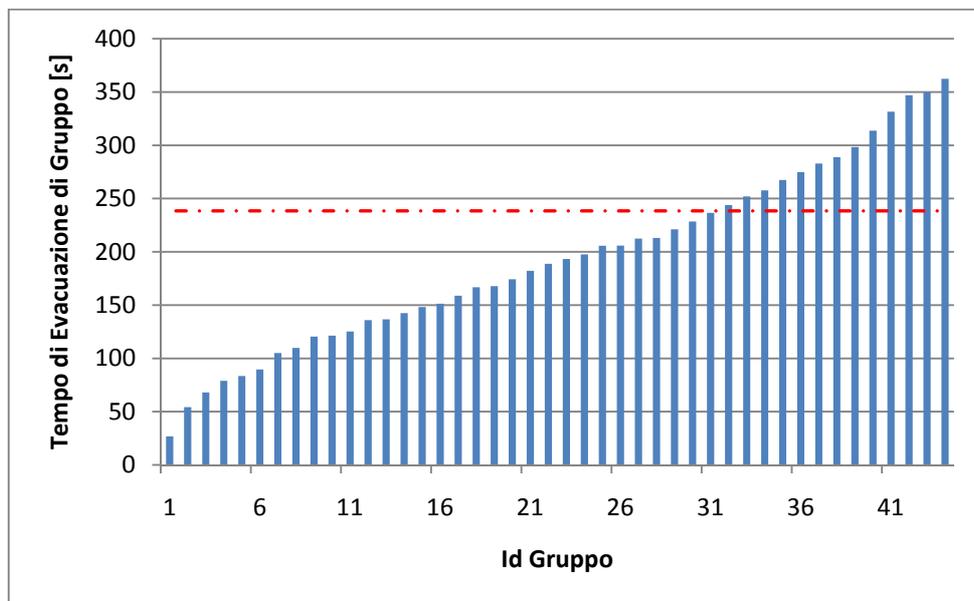


Figura 5.26 - Andamento dei tempi di evacuazione del DIEM per ogni gruppo nello Scenario 4

Possiamo quindi affermare che fra i tre scenari di allarme presentati, questo è sicuramente il meno pericoloso dato il minimo scostamento che comporta con i tempi di evacuazione ottenibili in condizioni ottimali.

In Tabella 5.2 ed in seguito in Figura 5.27 sono riassunti i tempi di evacuazione dell'edificio del DIEM nei quattro scenari analizzati.

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Uscite Disponibili	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	2, 3, 4, 5, 8	1, 2, 3, 6, 7, 8	1, 4, 5, 6, 7
Uscite Indisponibili	-	1, 6, 7	4, 5	2, 3, 8
Tempo Medio di Evacuazione	215,4 s	330,9 s	241,7 s	248,5 s
Incremento Tempo Medio	-	53,6%	12,2%	15,4%
Tempo Massimo di Evacuazione	349,7 s	554,8 s	410,7 s	362,4 s
Incremento Tempo Massimo	-	58,7%	17,4%	3,6%

Tabella 5.2 - Riassunto delle simulazioni di evacuazione dell'edificio del DIEM

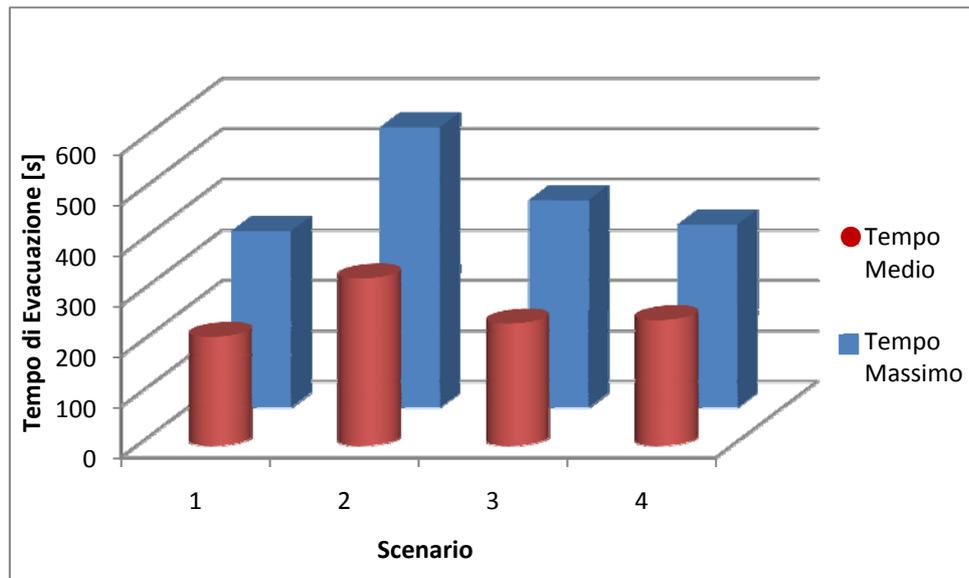


Figura 5.27 - Riassunto delle simulazioni di evacuazione dell'edificio del DIEM

Si può notare come nello Scenario 4 i tempi di evacuazione si discostino in maniera minima da quelli ottenibili in condizioni ottimali. Anche nello Scenario 3 i tempi non sono particolarmente superiori alle condizioni ottimali, tuttavia si può notare come le condizioni di emergenza simulate nello Scenario 2 possano essere particolarmente pericolose.

Se si volesse tentare di migliorare la sicurezza dell'edificio si dovrebbe certamente iniziare tentando di abbassare i tempi di evacuazione in questo particolare e sfortunato caso, data la criticità evidentemente maggiore.

5.4.5 Scenario 5: Evacuazione precauzionale dell'edificio di Ingegneria in via Terracini con tutte le uscite a disposizione

Come per la trattazione delle casistiche nel caso dell'edificio del DIEM, inizieremo l'analisi di particolari scenari per l'edificio della Facoltà di Ingegneria sito in via Terracini presentando una evacuazione precauzionale, svolta in condizioni ottimali, quindi con tutte le porte disponibili, e con le persone che possono scegliere la migliore uscita in relazione alla loro posizione.

Questo scenario sarà quindi esaminato per verificare eventuali anomalie nell'evacuazione dell'edificio e per poter quantificare in seguito l'entità del peggioramento dei tempi di evacuazione negli scenari con l'indisponibilità di alcune uscite.

L'evacuazione simulata in questa configurazione ha avuto come esito un tempo medio personale di evacuazione di 167,9 secondi ed un tempo massimo di 551,1 secondi.

Analizzando questi tempi di evacuazione, si può subito notare che il tempo medio è notevolmente basso, specialmente se si considera la dimensione dell'edificio, risulta invece non ottimale il tempo massimo di fuga.

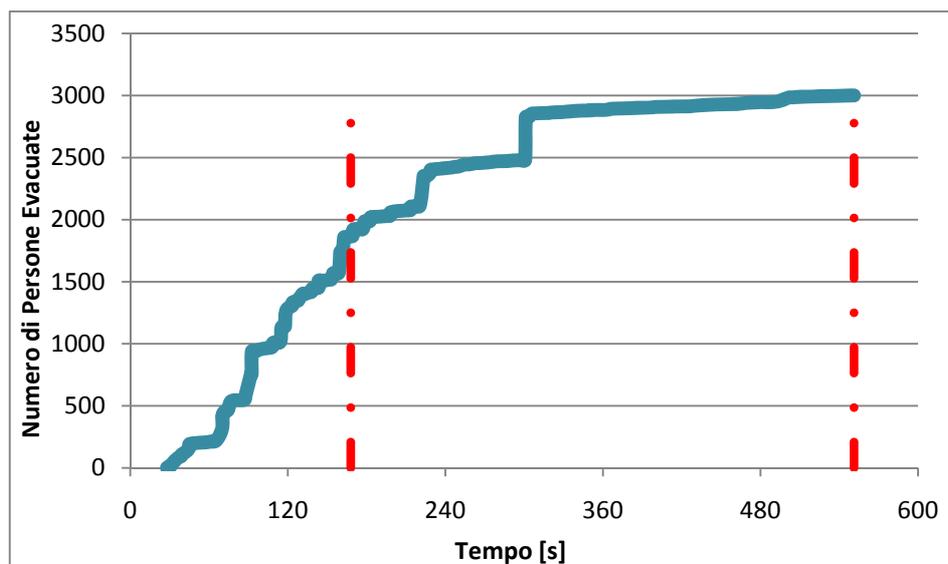


Figura 5.28 – Cumulata, nello Scenario 1, dell'evacuazione delle persone dalla Facoltà di Ingegneria sita in via Terracini

Come mostrato in Figura 5.28, circa il 70% delle persone riesce ad evacuare l'edificio in un tempo inferiore a quello medio, e un altro 15% impiega un tempo di poco superiore. L'elemento principale su cui riflettere è il tempo, particolarmente alto, che impiegano le persone provenienti dal terzo piano dell'edificio a concludere l'evacuazione.

Si può infatti notare che la maggior parte degli occupanti ha lasciato l'edificio entro i 300 secondi, ma poi trascorre un tempo significativo prima che l'ultima persona concluda la fuga. Questa considerazione è confermata dalla Figura 5.29, che mostra come un numero rilevante di gruppi di piccole dimensioni provenienti dagli studi al terzo piano dell'edificio, impieghino un tempo notevolmente superiore a quello medio, talvolta più che triplo, per evacuare l'edificio.

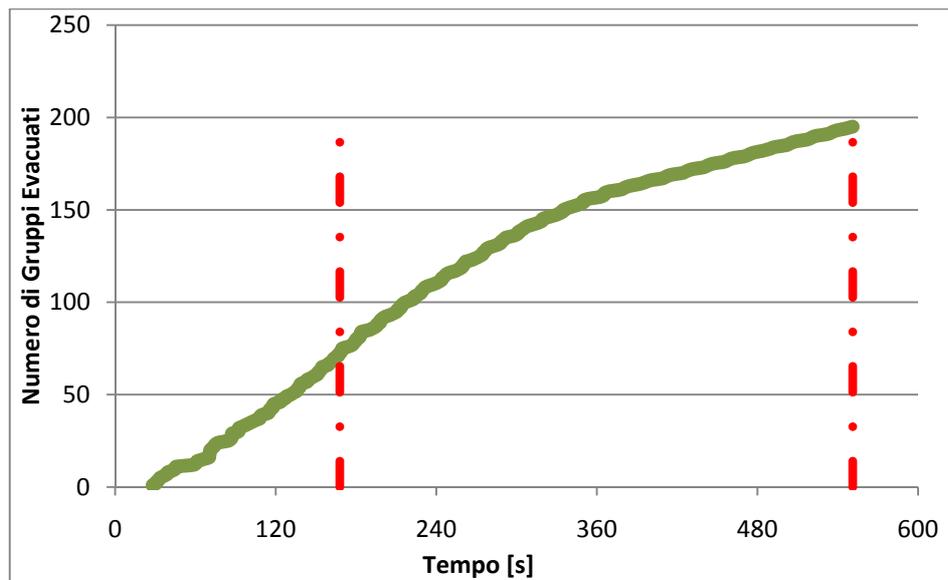


Figura 5.29 - Cumulata, nello Scenario 1, dell'evacuazione dei gruppi dalla Facoltà di Ingegneria sita in via Terracini

Il fatto che gli ultimi ad evacuare l'edificio provengano dagli studi al terzo piano è confermato dalla semplice considerazione che dopo 300 secondi dall'allarme ha evacuato l'edificio la maggior parte delle persone, ma un numero ristretto di gruppi; infatti dai piani inferiori provengono pochi gruppi molto numerosi provenienti dalle aule.

In Figura 5.30 è chiaramente confermata la considerazione appena fatta, cioè che solo poche persone impiegano tempi nettamente superiori alla media per l'evacuazione alzando significativamente il tempo massimo di evacuazione.

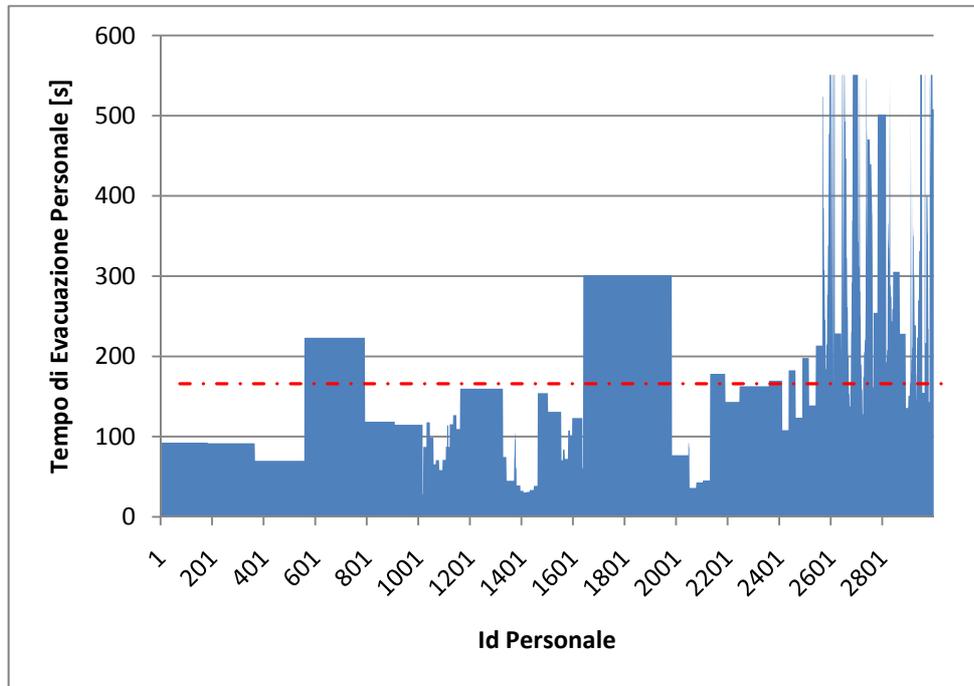


Figura 5.30 – Andamento, nello Scenario 1, dei tempi di evacuazione di ogni occupante della Facoltà di Ingegneria in via Terracini

Si può infatti notare la presenza di picchi, poco numerosi ma di valore molto elevato, nel grafico che mostra i tempi di evacuazione di ogni singola persona. Infine la Figura 5.31, analizzata anche in relazione alla precedente, mostra ulteriormente come tutti i gruppi più lenti siano rappresentativi di poche persone ognuno. Si tratta, infatti, di gruppi che non riescono, pur essendo molto numerosi, ad influenzare significativamente il tempo medio di evacuazione.

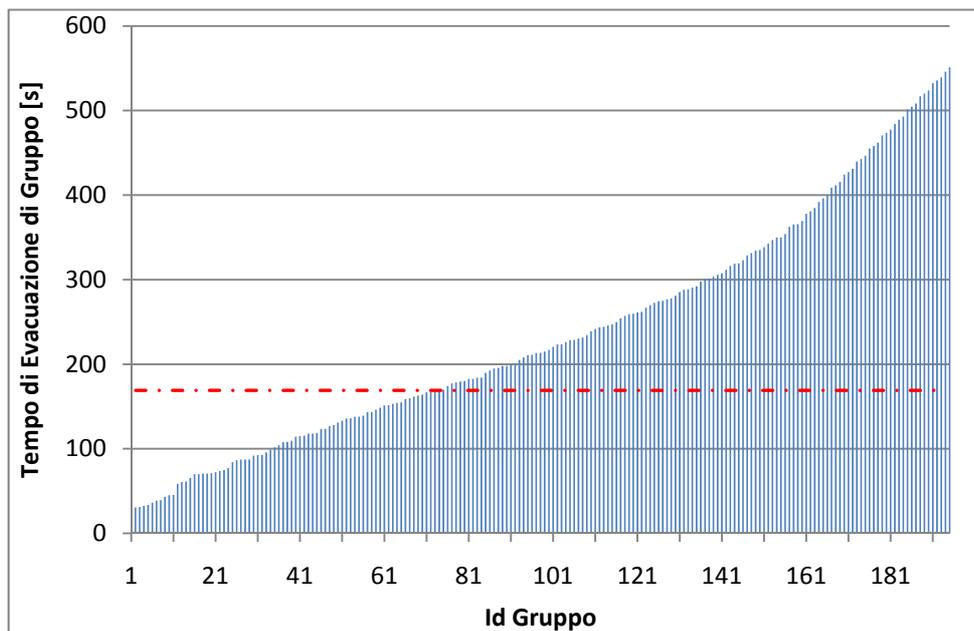


Figura 5.31 - Andamento, nello Scenario 1, dei tempi di evacuazione per ogni gruppo della Facoltà di Ingegneria in via Terracini

Possiamo identificare questi gruppi con quelli provenienti dal terzo piano dell'edificio, che quindi per evacuare l'edificio dovranno trovarsi ad affrontare percorsi significativamente più lunghi, un maggiore numero di ostacoli come le porte, un maggiore numero di punti di decisione in cui scegliere il percorso ed ovviamente un maggiore traffico.

5.4.6 Scenario 6: Evacuazione dell'edificio di Ingegneria in via Terracini con le uscite della zona Nord indisponibili

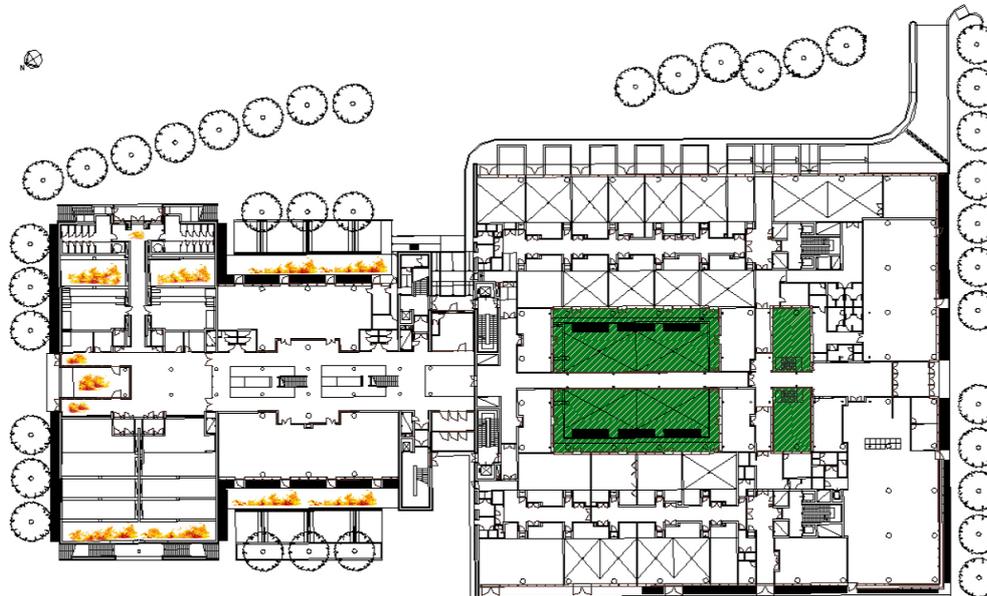


Figura 5.32 - Incendio che si propaga dalla zona Nord

Come mostrato in Figura 5.32, in questo scenario non sono utilizzabili le uscite della zona Nord, cioè quelle dalla numero 2 alla numero 16 al piano terra e l'uscita 36 del primo piano.

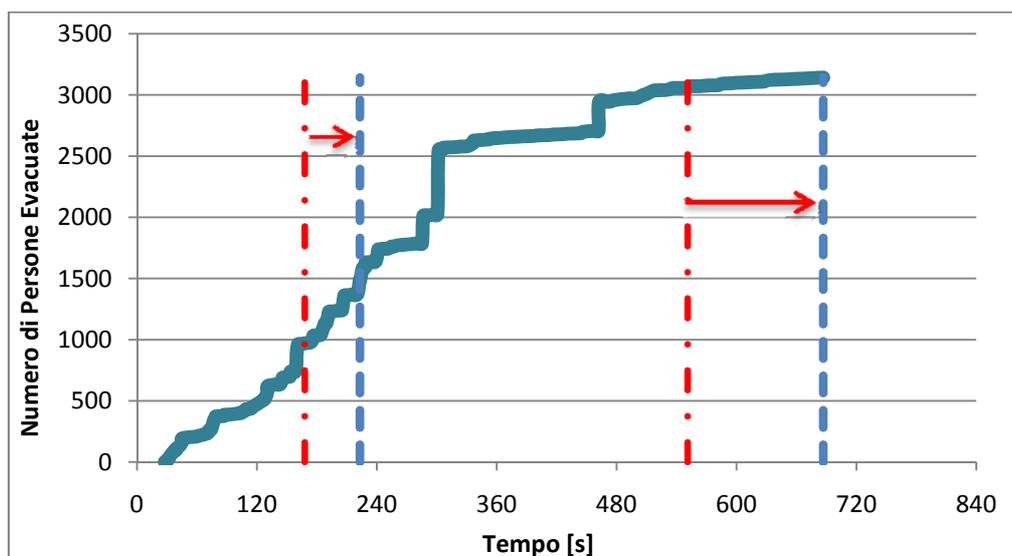


Figura 5.33 - Cumulata, nello Scenario 6, dell'evacuazione delle persone dalla Facoltà di Ingegneria sita in via Terracini

L'andamento dell'evacuazione delle persone in questo scenario è mostrato in Figura 5.33. Possiamo notare che si verifica un aumento del tempo massimo doppio dell'aumento di quello medio: il primo passa da 551 a 687 secondi, mentre il secondo da 168 a 223 secondi. Analizzando la Figura 5.34 si nota che i tempi personali di evacuazione dell'edificio sono generalmente distribuiti attorno al valore medio, mentre le poche persone provenienti dai piani superiori dell'edificio impiegano, come nel caso precedente, un tempo significativamente superiore per l'evacuazione.

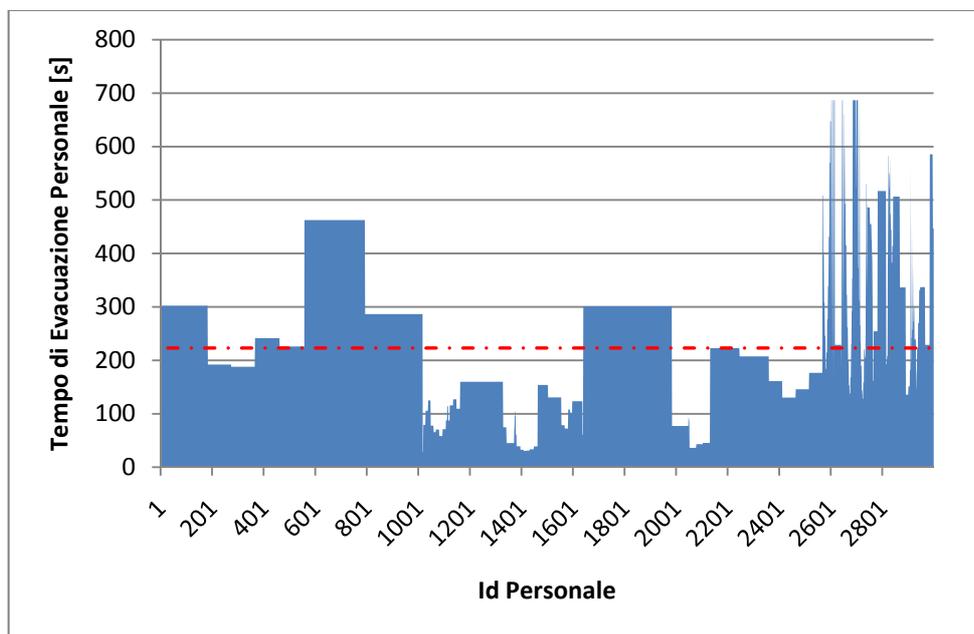


Figura 5.34 - Andamento, nello Scenario 6, dei tempi di evacuazione di ogni occupante della Facoltà di Ingegneria in via Terracini

Sebbene l'aumento dei tempi di evacuazione possa sembrare non troppo elevato, una valutazione più accurata deve considerare che il tempo medio di evacuazione aumenta del 32,9% e quello massimo del 24,6%, valori decisamente non trascurabili. L'incremento maggiore del tempo medio rispetto a quello massimo va interpretato considerando che in questo scenario sono penalizzati soprattutto gli occupanti delle zone più popolate, le aule al piano terra, andando ad incrementare notevolmente il tempo medio, mentre risentiranno solo in maniera indiretta del pericolo gli occupanti dei piani superiori localizzati nella zona non intaccata direttamente dal pericolo.

5.4.7 Scenario 7: Evacuazione dell'edificio di Ingegneria in via Terracini con le uscite della zona Sud-Est indisponibili

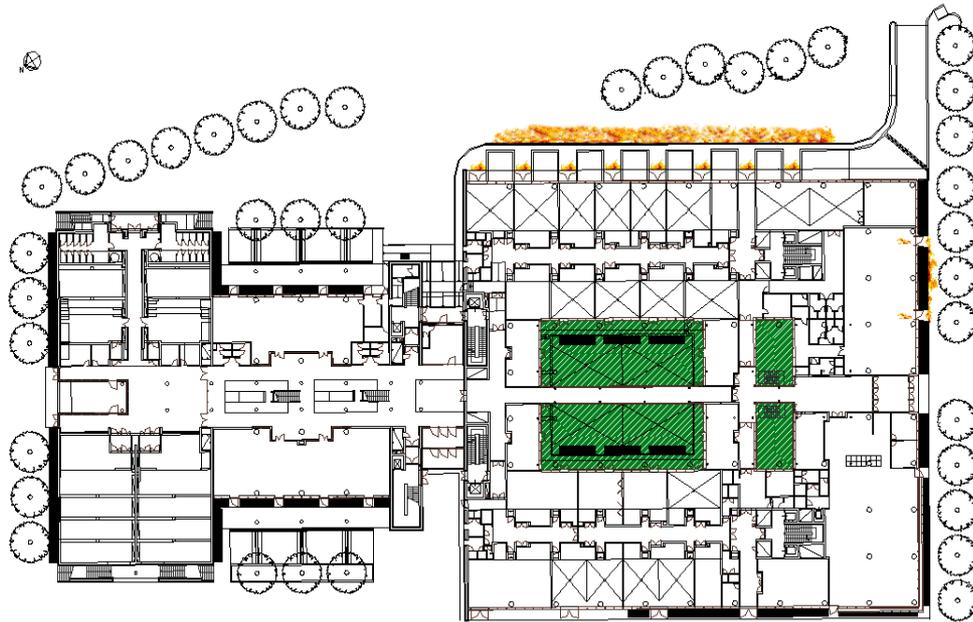


Figura 5.35 - Incendio che si propaga dalla zona Sud-Est

Lo scenario 7 simula l'evacuazione della Facoltà di Ingegneria in via Terracini nel caso un incendio si propaghi a partire dalla zona Sud-Est.

Come mostrato in Figura 5.35, in questa evenienza non sarebbero disponibili per l'evacuazione tutte le uscite comprese tra la numero 18 e la numero 27.

In Figura 5.36 è mostrato l'andamento dell'evacuazione delle persone in questo scenario. Si può notare che, come nel caso precedente, il tempo medio non è particolarmente maggiore di quello ottimale, si passa cioè da 168 a 182 secondi; mentre va registrato un aumento del tempo massimo di evacuazione che passa da 551 a 604 secondi.

Specialmente il dato relativo al tempo massimo di evacuazione va considerato in maniera piuttosto positiva. Questo scenario prevede infatti l'indisponibilità di alcune uscite posizionate nella zona in cui l'edificio si sviluppa su tre piani, per cui era preventivabile un incremento dei tempi massimi di evacuazione.

I dati ottenuti mostrano invece come, potendo fuggire velocemente gli occupanti delle zone più popolate, le altre persone riescono in maniera essenzialmente rapida ad evacuare l'edificio

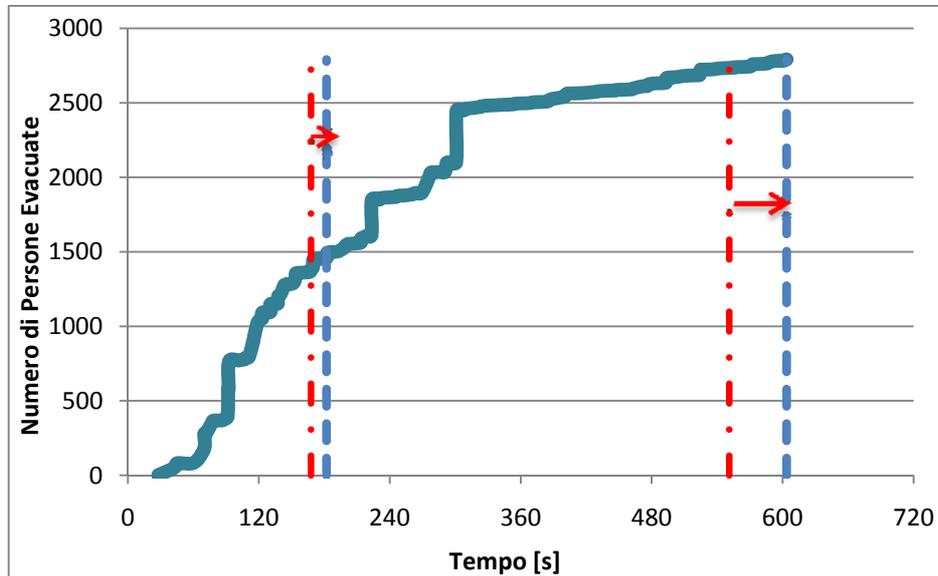


Figura 5.36 - Cumulata, nello Scenario 6, dell'evacuazione delle persone dalla Facoltà di Ingegneria sita in via Terracini

Analizzando Figura 5.37 trova conferma quanto detto in precedenza.

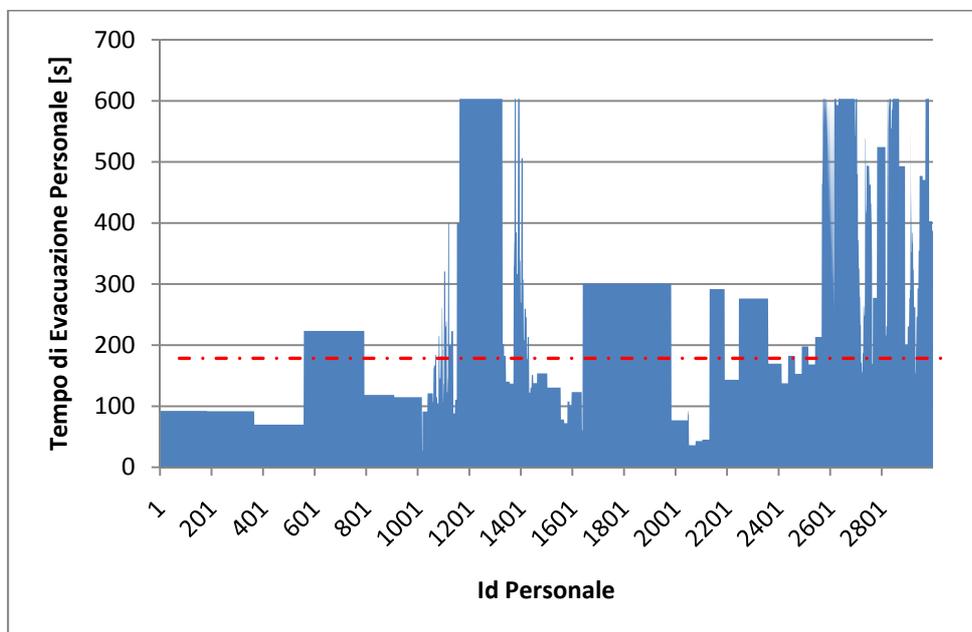


Figura 5.37 -Andamento, nello Scenario 6, dei tempi di evacuazione di ogni occupante della Facoltà di Ingegneria in via Terracini

Si può infatti notare che i tempi personali di evacuazione sono generalmente bassi, mentre esistono dei gruppi, provenienti dai piani superiori dell'edificio, che impiegano tempi considerevoli per l'evacuazione e sui quali si dovrebbero concentrare le attenzioni dei soccorsi nel caso si verificasse effettivamente uno scenario di emergenza di questo tipo.

I tempi di evacuazione delle persone al terzo piano, già erano peggiori di quelli degli altri, sono quindi peggiorati, aggravando la criticità dell'evacuazione veloce dei piani superiori.

5.4.8 Scenario 8: Evacuazione dell'edificio di Ingegneria in via Terracini con le uscite della zona Ovest indisponibili

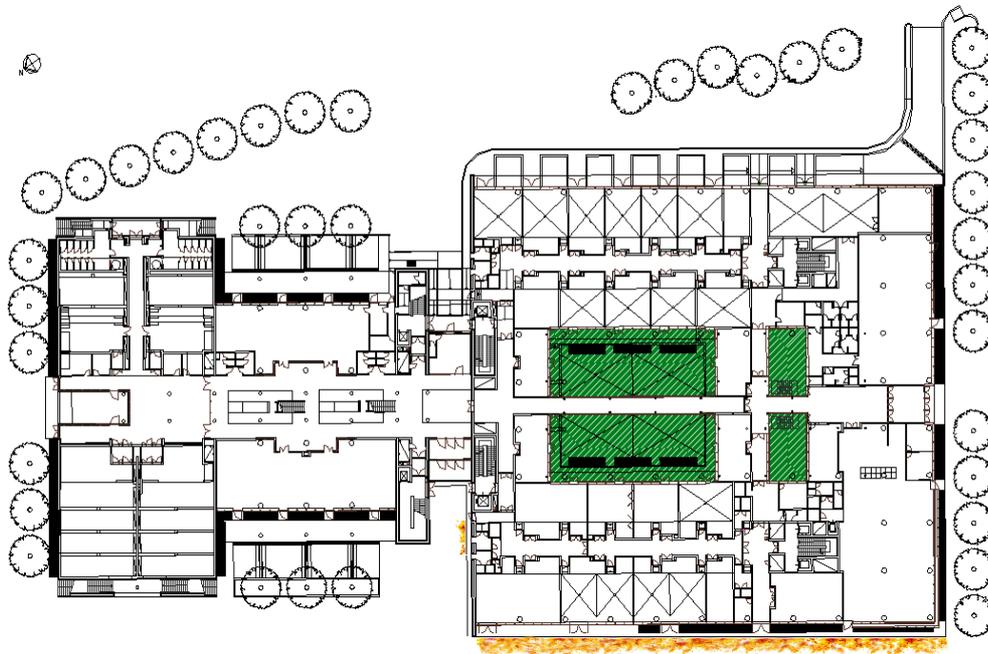


Figura 5.38 - Incendio che si propaga dalla zona Ovest

Lo scenario 8 vuole, infine, simulare l'evacuazione della Facoltà di Ingegneria in via Terracini nel caso un incendio si propaghi dalla zona Ovest rendendo, come mostrato in Figura 5.38, inutilizzabili tutte le uscite dalla numero 30 alla numero 35.

L'andamento dell'evacuazione dell'edificio da parte dei singoli individui in questo scenario è mostrato in Figura 5.39.

L'aumento del tempo medio di evacuazione è uno dei minori: da 167 a 188 secondi; ed anche l'aumento del tempo massimo di evacuazione è contenuto, passando da 551 a 567 secondi.

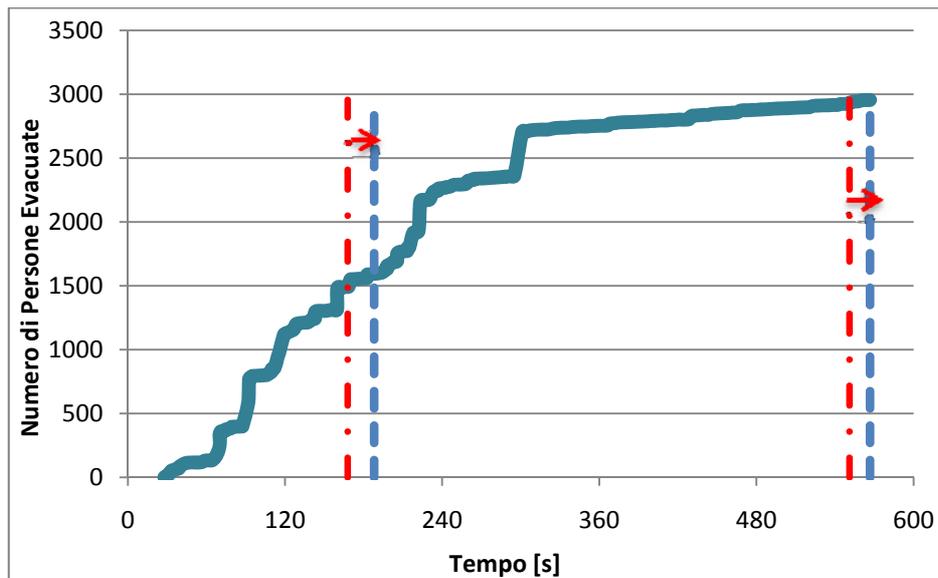


Figura 5.39 - Cumulata, nello Scenario 6, dell'evacuazione delle persone dalla Facoltà di Ingegneria sita in via Terracini

Anche in questo caso possiamo notare, come mostrato in Figura 5.40, il raggruppamento dei tempi di evacuazione in funzione del piano di provenienza.

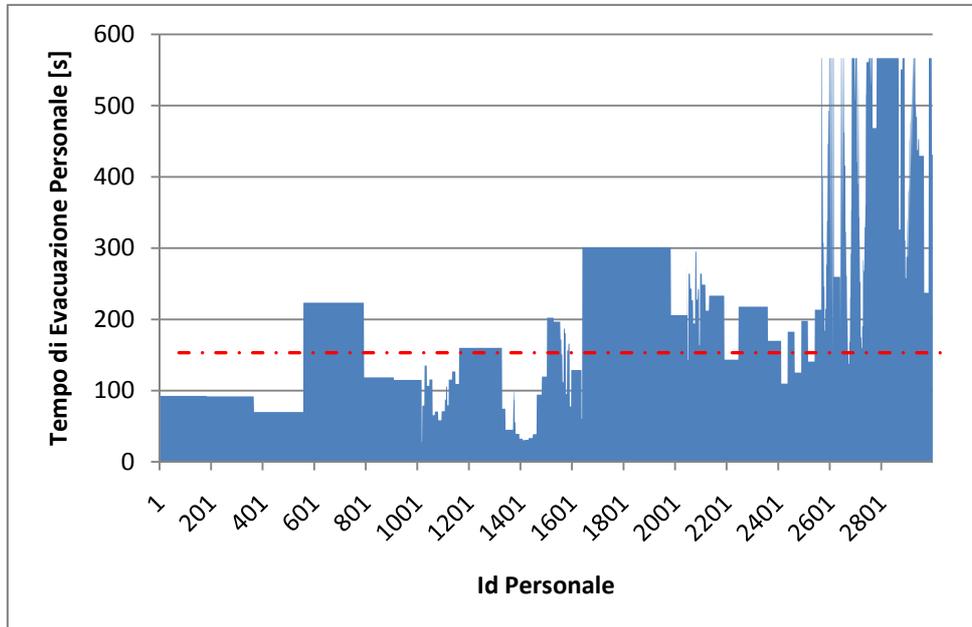


Figura 5.40 - Andamento, nello Scenario 6, dei tempi di evacuazione di ogni occupante della Facoltà di Ingegneria in via Terracini

Si nota chiaramente che la maggior parte delle persone, provenienti dai piani bassi dell'edificio, riesce a fuggire in un tempo minore o scarsamente

superiore a quello medio; tuttavia sono ancora presenti pochi occupanti il cui tempo di evacuazione è significativamente alto.

In Tabella 5.3 e poi in Figura 5.41 sono riassunti i tempi di evacuazione dell'edificio della Facoltà di Ingegneria sita in via Terracini nei quattro scenari analizzati.

	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7	Scenario 8
Uscite Disponibili	1 - 36	1, 17 - 35	1 - 17, 28 - 36	1 - 29, 36
Uscite Indisponibili	-	2 - 16, 36	18-27	30-35
Tempo Medio di Evacuazione	167.9	223.0	182.1	188.1
Incremento Tempo Medio	-	32,9 %	8,5%	12%
Tempo Massimo di Evacuazione	551.1	686.7	603.6	566.7
Incremento Tempo Massimo	-	24,6%	9,5%	2,8%

Tabella 5.3- Riassunto delle simulazioni di evacuazione della Facoltà di Ingegneria in via Terracini

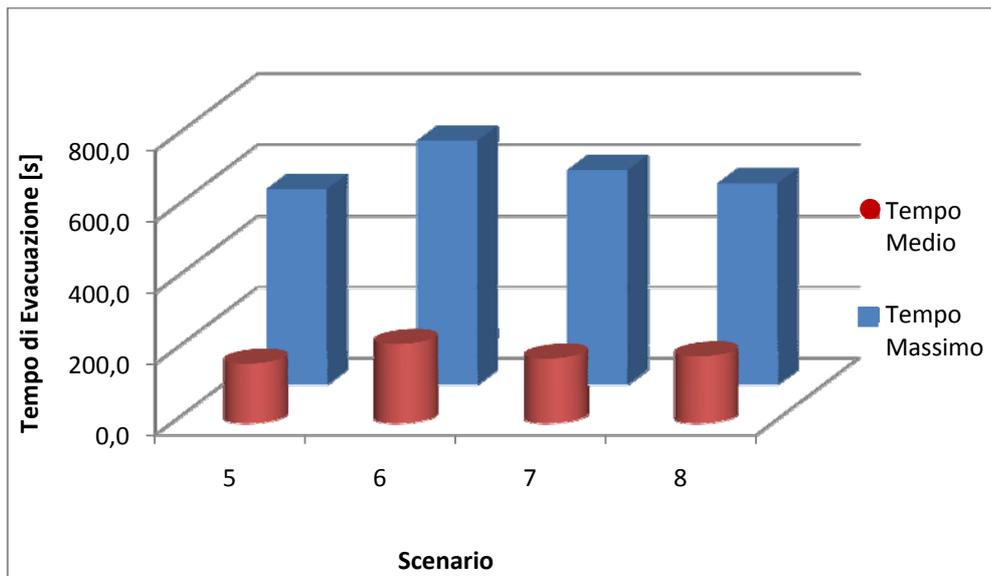


Figura 5.41 - Riassunto delle simulazioni di evacuazione della Facoltà di Ingegneria in via Terracini

Possiamo notare come il tempo medio di evacuazione non subisca variazioni particolarmente significative, a conferma del fatto che le parti dell'edificio più densamente popolate, cioè il piano terra e il primo piano, vengono lasciate con discreta rapidità in tutti gli scenari analizzati.

Tuttavia va rilevato che il tempo massimo di evacuazione, già alto in condizioni ottimali, è soggetto a variazioni anche notevoli in funzione dello scenario di emergenza che si deve affrontare.

Questa situazione è inevitabile per edifici organizzati su più piani, ma va sottolineato che l'organizzazione dell'edificio, con i luoghi più popolosi ai piani bassi e quelli meno popolosi ai piani alti, tende a minimizzarne l'influenza in termini di sicurezza nelle evacuazioni.

Sebbene non esistano interventi che possano significativamente impattare sui tempi massimi di evacuazione in questo tipo di edifici, vanno sempre ricordate le loro peculiarità durante la stesura dei piani di evacuazione o nel caso si verifichi una emergenza reale: in questo modo si saprà sempre quali sono i soggetti più a rischio e che quindi necessitano di particolare attenzione.

5.5 Analisi dei risultati

Come detto in precedenza, ai fini dell'analisi delle evacuazioni, il dato più significativo ottenuto risulta sempre essere il tempo massimo, dato che ne indica il tempo totale di durata; tuttavia è stato mostrato come l'analisi di molti altri fattori possa fornire importanti indicazioni per prevenire o comunque migliorare le evacuazioni.

Tramite le simulazioni realizzate si è potuto mostrare come i percorsi più svantaggiati siano quelli più complessi, che contengono il maggior numero di ostacoli o complicazioni, che possono essere intesi come le porte da superare, ma anche i punti di decisione in cui scegliere il percorso da seguire.

Si è anche mostrato come il numero di persone presenti nell'edificio, cioè il suo affollamento, in occasione di una emergenza siano parametri estremamente rilevanti nella determinazione dei tempi necessari all'evacuazione; quindi si sono analizzati i fattori che possono regolare la scelta di un percorso piuttosto che un altro da parte delle persone che si trovano in un edificio, riuscendo a determinare quali effettivamente possano portare a scelte migliori degli altri.

Infine si sono valutati i tempi di evacuazione di alcuni scenari realistici di pericolo negli edifici oggetto di analisi, che risultano particolarmente utili se utilizzati nell'ottica del calcolo del Required Safe Egress Time, RSET.

Negli ultimi anni, infatti, è stato registrato un elevato sviluppo dello studio della protezione e valutazione dei rischi da incendio, tema chiave nel campo della ricerca della sicurezza antincendio. I modelli realizzati a questo proposito si sono focalizzati soprattutto sul calcolo dei due tempi:

- ✓ Required Safe Egress Time – RSET, ovvero il tempo richiesto di uscita;
- ✓ Available Safe Egress Time – ASET, ovvero il tempo disponibile di uscita.

Nel caso specifico in cui la situazione di emergenza sia il fuoco, la sicurezza del sistema è comunemente stabilito numericamente seguendo la disuguaglianza seguente:

$$RSET < ASET$$

Il tempo massimo di evacuazione ottenuto nelle simulazioni potrà essere utilizzato per stimare il Required Safe Egress Time, che dovrà essere inferiore all'Available Safe Egress Time, calcolabile tramite metodi che considerano la propagazione degli incendi e dei loro fumi tossici all'interno degli edifici.

Se RSET fosse minore di ASET, la stima dimostrerebbe che in una situazione d'emergenza tutti gli individui presenti nell'edificio riuscirebbero ad evacuarlo; in caso contrario dovrebbero essere previsti dei correttivi per abbassare RSET.

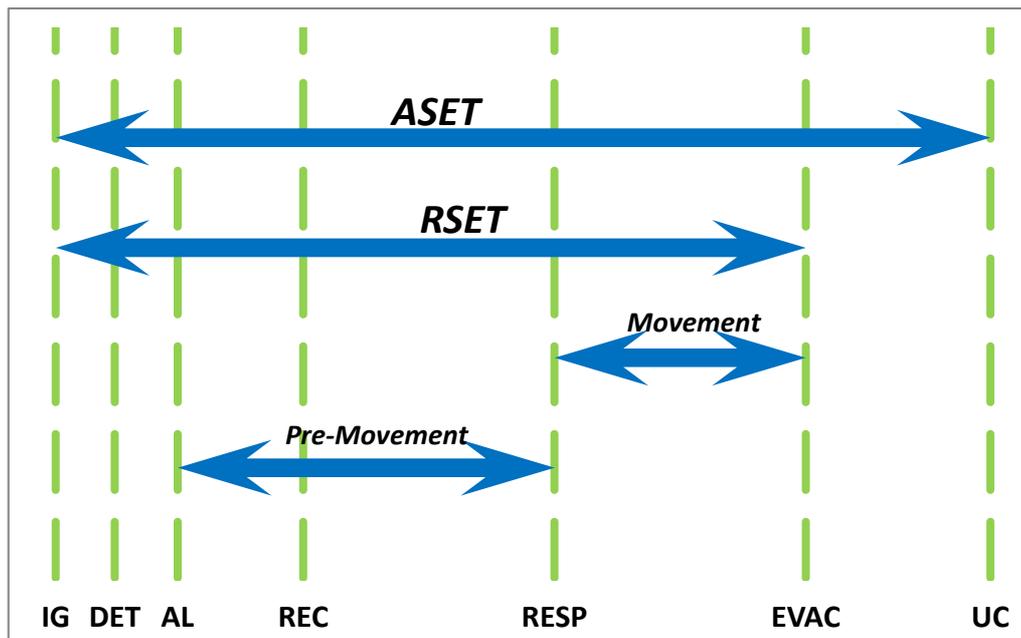


Figura 5.42 – Fasi principali di una evacuazione

Nella Figura 5.42 sono schematizzate le principali fasi di una evacuazione, che aiutano a comprendere al meglio la disuguaglianza precedente.

Gli istanti schematizzati sono:

- ✓ Ignition – IG, istante in cui inizia l'incendio;
- ✓ Detection – DET, istante in cui i sistemi di rilevazione sono attivati;
- ✓ Alarm – AL, istante in cui l'allarme suona;
- ✓ Recognition – REC, istante in cui gli occupanti riconoscono la situazione di pericolo;
- ✓ Respons – RESP, istante in cui gli occupanti rispondono alla situazione di emergenza iniziando il movimento di fuga;
- ✓ Evacuation – EVAC, istante in cui gli occupanti terminano l'evacuazione;
- ✓ Untenable Condition – UC, istante in cui i prodotti del fuoco, come fumo, calore, gas tossici, gas narcotici o gas irritanti, potrebbero uccidere gli occupanti.

La differenza tra ASET ed RSET rappresenta il margine di sicurezza; pertanto la Figura 5.42 dimostra chiaramente che, per la corretta riuscita del processo di evacuazione, è necessario avere ASET maggiore di RSET.

Come detto, tutta la trattazione relativa RSET ed ASET si basa sul tempo massimo di evacuazione ottenuto; tuttavia anche il tempo medio, e il suo confronto con quello massimo, può fornire importanti informazioni.

Se il tempo medio e quello massimo non fossero particolarmente differenti, ci si troverebbe di fronte a edifici nei quali è si potrebbe prevedere una evacuazione essenzialmente omogenea, come nel caso dell'evacuazione dell'edificio del DIEM.

Se invece i due tempi risultassero significativamente discordanti, come nel caso dell'evacuazione della Facoltà di Ingegneria in via Terracini, sapremmo dell'esistenza di zone dell'edificio particolarmente svantaggiate e verso le quali sarebbe opportuno concentrare le attenzioni nel caso di situazioni di emergenza.

CONCLUSIONI

In questa tesi si è mostrato come i modelli simulativi per l'evacuazione di edifici in caso di emergenza possano offrire una valida alternativa alle dimostrazioni dal vivo.

Il risultato ottenuto può definirsi certamente soddisfacente: da un lato i risultati paiono attendibili e verosimili, dall'altro la flessibilità raggiunta consente lo studio di innumerevoli scenari differenti tra loro. Possono essere realizzate valutazioni sulla correttezza delle evacuazioni, monitoraggi delle zone maggiormente critiche e valutazioni di possibili migliori degli edifici.

Va però tenuta in considerazione la principale fonte di incertezza di tutti i modelli di questo tipo: la completa comprensione del comportamento umano.

Per quanto sia stia lavorando su questa tematica e siano disponibili numerosi studi al riguardo, sono tuttora presenti lacune relativamente alla previsione del comportamento umano in condizioni di pericolo, specialmente in relazione alla precisa quantificazione delle prestazioni in termini di velocità di spostamento, di tempo di reazione e tempo di esitazione.

L'utilizzo di AutoMod, in un ambito distante da quello per cui nasce ed è impiegato solitamente, ha dato esiti certamente positivi e incoraggianti per un possibile sviluppo futuro in questo campo.

Particolarmente preziosa per questo nuovo utilizzo di AutoMod risulterà la compatibilità con AutoCAD e la possibilità di importare piante di edifici reali, caratteristica che, unita all'elevata immediatezza e semplicità di utilizzo del software, garantirà una notevole flessibilità combinata con risultati sempre precisi e dettagliati.

Le approfondite analisi realizzate per la Facoltà di Ingegneria situata in Via Terracini e per il Dipartimento di Meccanica del DIEM posto dinanzi ad essa dimostrano inoltre come sia effettivamente possibile valutare in modo approfondito gli scenari desiderati anche per edifici particolarmente complessi.

BIBLIOGRAFIA

- A.R., M. (n.d.). Understanding mass panic and other collective response to threat and disaster. *Psychiatry, interpersonal and biological processes* , 68, 95-113.
- Bryab, J. L. (2002). Behavioral Response to Fire and Smoke. *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* , 3.315 - 3.379.
- Dyregrov, S. B. (2000). Mental mobilization in critical incident stress situations. *International Journal of Emergency Mental Health*, 2 , 73-81.
- Fruin, J. (1971, ristampa 1987). Service Pedestrian Planning and Design. *MAUDEP* .
- Galea, E. (2009). Human Behaviour in fire. *Conference Proceedings*.
- Humbo Li, W. T. (2004). Behaviour Based Motion Simulation for Fire Evacuation Procedures. *Theory and Practice of Computer Graphics* , 112-118.
- J.D., S. (1985). "Movement towards the familiar: person and place affiliation in a fire entrapment setting. *Environment and Behavior*, 17 , 697-724.
- Mileti, D. e. (2005). *The social construction of safety*.
- Mileti, D. e. (2005). *The social construction of safety: considering the importance of communicating risk information*.
- Padoan, F. (2006). *Il panico di massa e i comportamenti collettivi di fronte alla minaccia*.
- Pierantoni, P. *Il comportamento umano negli incendi*.
- Predtechenskii, V. e. (1978). Planning for Foot Traffic Flow in Buildings. *National Bureau of Standards* .
- Prolux. (2005). *Analysis of published accounts of the World Trade Center disaster*.
- R. Machado Tavares, E. G. (n.d.). Evacuation modelling analysis within the operational research context: A combined approach for improving enclosure designs.
- Rodrigue, E. R. (2005). *Earthquake Disasters*.

S. Gwynne, E. G. The Collection and Analysis of Pre-evacuation Times Derived from Evacuation Trials and Their Application to Evacuation Modelling.

Schroeder, G. T. (1992). *Modeling human behavior in aircraft evacuations*.

Testo Unico 81 allegato IV. (2008).

RINGRAZIAMENTI

Giunto al termine di questo lavoro desidero ringraziare ed esprimere la mia riconoscenza a tutte le persone che, in modi diversi, mi sono state vicine e hanno permesso e incoraggiato sia i miei studi che la realizzazione e la stesura di questa tesi.

Innanzitutto i miei ringraziamenti vanno a chi mi ha seguito durante questi mesi di lavoro, il professor Mauro Gamberi, per la fiducia e la stima dimostratami fin da subito, per la totale disponibilità e per i continui stimoli e consigli volti a migliorare il lavoro.

Un enorme ringraziamento va ai miei genitori, ai miei fratelli e a tutta la mia famiglia per il sostegno che non mi hanno mai fatto mancare; vorrei che questo traguardo raggiunto, per quanto possibile, fosse un premio anche per loro.

Come non ringraziare i coinquilini di questa avventura bolognese per i bei momenti condivisi ma soprattutto per tutte le volte in cui hanno sopportato la mia maniacalità; in particolare Jonathan per essere sempre stato una valvola di sfogo e una finestra verso un modo diverso di vedere le cose.

Grazie agli “Amici dell’Università”: Anna Rita, Chiara, Domiz, Luca, Miki, Tizi e Vale, che col passare del tempo sono diventati molto più che compagni incontrati per caso!

Un ringraziamento davvero sentito a tutti quelli che nei modi più svariati, con i calcetti, i giochi serali protratti ad oltranza, le giornate passate insieme, o semplicemente con la disponibilità e il piacere di passare del tempo con me, mi hanno aiutato e sostenuto in questo lungo e faticoso percorso.

Per ultima, ma non per importanza, ringrazio la persona senza la quale sicuramente non sarei quello che sono, che ha saputo stare al mio fianco a volte con discrezione ed altre con fermezza, senza mancare mai in ogni momento, di gioia o di difficoltà, rendendo possibile il raggiungimento di questo traguardo. Grazie Chiara!