

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

**DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA**

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE A CICLO UNICO IN INGEGNERIA EDILE-ARCHITETTURA**

**TESI DI LAUREA**

**in**

**ORGANIZZAZIONE DEL CANTIERE**

**FIRE SAFETY ENGINEERING E MODELLAZIONE DELL'ESODO  
CON METODI INNOVATIVI:  
APPLICAZIONE AD UN CASO DI EDILIZIA SCOLASTICA**

**CANDIDATO:**

**Margherita Vinci**

**RELATORE:**

**Chiar.mo Prof. Ing. Marco Alvisè Bragadin**

**CORRELATORE:**

**Ing. Filippo Battistini**

**Anno Accademico 2017/2018**

**Sessione II**



*Zeal without knowledge is fire without light.*

THOMAS FULLER



# Sommario

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>PARTE I</b>	<b>5</b>
<b>1. La Prevenzione Incendi in Italia</b>	<b>7</b>
1.1 La normativa antincendio nella storia	7
1.2 L'evoluzione della normativa in ambito scolastico	14
<b>2. L'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio</b>	<b>19</b>
2.1 La progettazione antincendio	19
2.2 Dal prescrittivo al prestazionale	23
2.3 La Fire Safety Engineering	31
<b>3. L'esodo</b>	<b>37</b>
3.1 L'esodo tradizionale in Italia	37
3.2 L'esodo innovativo secondo il Nuovo Codice di Prevenzione Incendi	40
3.3 L'esodo nelle scuole: differenze tra DM 26/08/1992 e DM 07/08/2017	46
3.4 La pianificazione dei sistemi di esodo	50
3.5 Metodi di calcolo dei tempi di evacuazione	58
<b>4. Il comportamento umano in caso di incendio</b>	<b>65</b>
4.1 Il comportamento individuale	65
4.2 Il comportamento collettivo	68

<b>5.</b>	<b>I software di modellazione dell'esodo</b>	<b>71</b>
5.1	L'importanza della simulazione dell'esodo	71
5.2	Classificazione dei software di modellazione esistenti	74
5.3	Pathfinder: un modello basato sul movimento	80
5.4	CPI win® FSE - EVAC: un modello basato sul comportamento	95
<b>PARTE II</b>		<b>105</b>
<b>6.</b>	<b>Il caso studio</b>	<b>107</b>
6.1	Inquadramento generale	107
6.2	Il DM 26/08/1992	116
6.3	Il DM 03/08/2015 e il DM 07/08/2017 - Soluzione conforme	124
6.4	Il DM 03/08/2015 e il DM 07/08/2017 - Soluzione alternativa	140
6.5	Elaborati tecnici	155
6.6	Modellazione dell'esodo con Pathfinder	157
6.7	Modellazione dell'esodo con CPI win® FSE - EVAC	174
6.8	Confronto tra i software utilizzati: risultati ottenuti	186
<b>Conclusioni</b>		<b>191</b>
<b>Appendice</b>		<b>195</b>
<b>Bibliografia</b>		<b>201</b>
<b>Allegati</b>		<b>205</b>



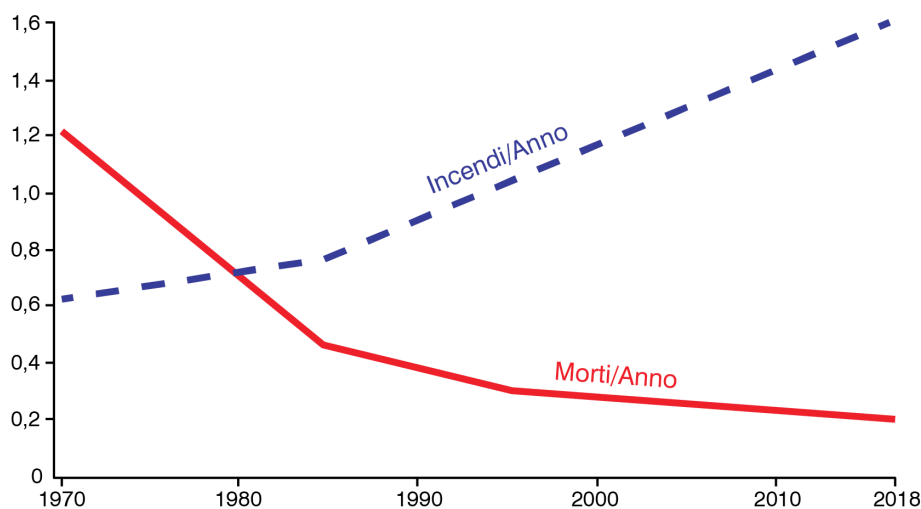




## Introduzione

La prevenzione incendi ha come oggetto di tutela la sicurezza della vita umana e l'incolumità delle persone dai rischi dell'incendio, esigenze avvertite dalla società soprattutto in occasione di eventi tragici. Per garantire la sicurezza della vita umana però, non basta costruire strutture ed impianti a regola d'arte, ma occorre gestirli, mantenerli, svilupparli adeguatamente durante l'esercizio ed accompagnarli da un efficace sistema di controllo.

In Italia in particolare, dove l'incidenza degli incendi è molto elevata (*Figura 1*), la prevenzione incendi ha un ruolo fondamentale nella sicurezza degli ambienti di lavoro.



*Figura 1 - Grafico con i dati Inail che rapportano il tasso di incendi annuo alla relativa mortalità, in Italia*

Gli approcci alla prevenzione incendi sono sostanzialmente due: prescrittivo e prestazionale. Il rispetto delle norme e la conseguente verifica di conformità (approccio prescrittivo), risolvono la maggior parte dei casi, ma in alcune situazioni questa strada non è percorribile o risulta poco soddisfacente. Attraverso una valutazione scientifica di tutti gli aspetti del fenomeno incendio, è invece sempre possibile prevedere misure di prevenzione ottimali, adatte ad una specifica situazione (approccio prestazionale).

I professionisti mirano oggi ad individuare le misure ed i provvedimenti più idonei al fine di limitare il pericolo d'incendio e di mitigarne le conseguenze, studiando a fondo ed affrontando in modo alternativo rispetto al passato le problematiche di prevenzione incendi, ma raggiungendo comunque gli stessi obiettivi di sicurezza antincendio. Sono stati infatti introdotti in commercio alcuni software specifici, la cui attendibilità è stata adeguatamente verificata, che permettono di verificare l'affidabilità e il livello di sicurezza delle soluzioni progettate secondo l'approccio prestazionale.

Il presente testo si sviluppa a partire da queste considerazioni ed è suddiviso in due parti: da un primo sguardo a come si è evoluta la normativa antincendio in Italia, con particolare riferimento alle problematiche relative all'esodo ed ai software che sono stati sviluppati per simularlo e prevederne gli esiti, si passerà all'analisi di un caso di studio di edilizia scolastica.

Relativamente a questo caso di studio, si confronteranno i risultati delle normative che si possono attualmente applicare in vista di un adeguamento antincendio, cioè il DM 26/08/1992 ed il DM 03/05/2015 (Nuovo Codice di Prevenzione Incendi) integrato dal DM 07/08/2017 (Regola Tecnica Verticale per le scuole), valutandone pro e contro. Il Codice in particolare, prevede due soluzioni: conforme ed alternativa. La soluzione alternativa riguarda l'approccio prestazionale e comporta l'utilizzo di software di modellazione dell'esodo.

Attraverso due software attualmente in commercio, Pathfinder e CPI win® FSE - EVAC, verrà realizzato un modello della scuola e si porranno a confronto i risultati ottenuti. Questi software utilizzano differenti modelli di calcolo e richiedono quindi input diversi nonostante forniscano entrambi come output una simulazione di evacuazione, in quanto il primo è basato sul movimento delle persone, mentre il secondo sul loro comportamento, fattore il cui studio risulta determinante al fine di prevedere le dinamiche dell'evacuazione.

Lo scopo del presente testo è quindi quello di presentare e confrontare le diverse strade attualmente percorribili per far fronte alle problematiche antincendio, attraverso l'applicazione diretta di esse ad un caso di studio, in modo da valutarne gli effettivi benefici. In particolare si vuole valutare l'affidabilità e confrontare i risultati dei software di modellazione dell'esodo analizzati, che negli ultimi anni stanno prendendo piede in Italia e sono soggetti ad un costante monitoraggio delle aziende produttrici, in modo da migliorarli e renderli quanto più possibili aderenti alla realtà.





## **PARTE I**



## La Prevenzione Incendi in Italia

*La Prevenzione Incendi, come definita già nell'art. 2 del DPR 29/07/1982 n. 57, è una materia di rilevanza interdisciplinare nel cui ambito vengono promossi, studiati, predisposti e sperimentati provvedimenti, accorgimenti e modi di azione intesi ad evitare l'insorgenza di un incendio e a limitarne le conseguenze, secondo le norme emanate dagli organi competenti. In particolare si definisce **prevenzione** l'insieme di misure volte a limitare la probabilità di insorgenza di un incendio, mentre si definisce **protezione** l'insieme di misure volte a limitare le conseguenze di un incendio su persone e cose.*

### 1.1 La normativa antincendio nella storia

Le prime regole tecniche in materia antincendio sono state il Regio Decreto (RD) 31/07/1934, che riguardava in realtà molto più genericamente l'approvazione delle norme di sicurezza per la lavorazione, l'immagazzinamento, l'impiego, la vendita e il trasporto di oli minerali, e nell'ordine le Circolari 16/1951, 91/1961 e 73/1971. Negli stessi anni sono state regolate le procedure per la prevenzione degli incendi da: DPR 547/1955, nel quale per la prima volta viene pubblicato l'elenco delle attività soggette a tale prevenzione (Tabelle 1.1 e 1.2), L. 469/1961, e DPR 689/1959.

In particolare il Decreto del 27 aprile 1955 n. 547 ha introdotto in tutte le attività lavorative l'obbligo di dotarsi di idonei mezzi di estinzione degli incendi, i quali devono essere mantenuti in efficienza e controllati una volta ogni sei mesi da personale "esperto". Nel DPR 689/1959 vengono invece determinate le aziende e le lavorazioni soggette al controllo del Comando del Corpo dei Vigili del Fuoco, per quanto riguarda la prevenzione dagli incendi.

Nel DM 16/02/1982 compare poi il secondo elenco dei depositi e industrie pericolose soggetti alle visite ed ai controlli di prevenzione incendi (art. 4 della legge 26 luglio 1965, n. 966), il quale comprende per l'esattezza 97 attività. Nella tabella presente in questo decreto (Tabella 1.3), oltre alla descrizione delle attività, è riportata la durata, espressa in anni, del Certificato di Prevenzione Incendi (CPI).

1. *La Prevenzione Incendi in Italia*

<i>Tabella A – Aziende e lavorazioni nelle quali si producono, si impiegano, si sviluppano e si detengono prodotti infiammabili, incendiabili o esplosivi (articolo 36, lett. a, DPR 27 aprile 1955, n.547)</i>	
N. ordine	Denominazione e settore di attività
1	Officine od impianti per la produzione di gas combustibili ottenuti per distillazione, reazione, carburazione od altri processi.
2	Aziende che utilizzano gas combustibili per sottoporli a successive trasformazioni.
3	Aziende per la produzione di gas combustibili compressi, disciolti o liquefatti.
4	Magazzini e depositi di bombole o bidoni di gas combustibili: compressi, per capacità complessiva delle bombole superiori a 2000 litri; disciolti o liquefatti, per quantitativi di gas superiori a 500 kg.
5	Centrali di compressione, stazioni di travaso e depositi di metano e di gas idrocarburi.
6	Aziende per l'idrogenazione di olii e grassi.
...	...

*Tabella 1.1 - Attività lavorative aventi l'obbligo di dotarsi di attrezzature antincendio (DPR 579/55)*

<i>Tabella B – Aziende e lavorazioni che per dimensioni, ubicazione ed altre ragioni presentano in caso di incendio gravi pericoli per la incolumità dei lavoratori (art. 36, lett. b, D.P.R. 27 aprile 1955, n. 547)</i>	
N. ordine	Denominazione e settore di attività
1	Aziende per la lavorazione della foglia del tabacco con oltre 100 addetti.
2	Fabbriche di mobili e di infissi con oltre 50 addetti.
3	Industria dell'arredamento e dell'abbigliamento con oltre 75 addetti.
4	Industria della carta con oltre 100 addetti e della cartotecnica con oltre 25 addetti.
5	Magazzini di vendita con oltre 50 addetti.
6	Aziende in genere nelle quali sono occupati contemporaneamente in un unico edificio a più di un piano oltre 500 addetti.
7	Attività esercitate in locali costruiti prevalentemente in legno o con solai o scale in legno, nelle quali sono occupati contemporaneamente oltre 15 addetti.

*Tabella 1.2 - Attività lavorative aventi l'obbligo di dotarsi di attrezzature antincendio (DPR 579/55)*



N. attività	Attività	Durata del CPI (in anni)
1	Stabilimenti ed impianti ove si producono e/o impiegano gas combustibili, gas comburenti (compressi, disciolti, liquefatti) con quantità globali in ciclo o in deposito superiori a 50 Nmc/h.	3
2	Impianti di compressione o di decompressione dei gas combustibili e comburenti con potenzialità superiore a 50 Nmc/h.	6
3	Depositi e rivendite di gas combustibili in bombole:	
	a) compressi: per capacità complessiva da 0,75 a 2 mc	6
	per capacità complessiva superiore a 2 mc	3
	b) disciolti o liquefatti (in bombole o bidoni):	
4	Depositi di gas combustibili in serbatoi fissi:	
	a) compressi: per capacità complessiva da 0,75 a 2 mc	6
	per capacità complessiva superiore a 2 mc	3
	b) disciolti o liquefatti: per capacità complessiva da 0,3 a 2 mc	6
5	per capacità complessiva superiore a 2 mc	3
	Depositi di gas comburenti in serbatoi fissi:	
6	a) compressi per capacità complessiva superiore a 3 mc	6
	b) liquefatti per capacità complessiva superiore a 2 mc	6
6	Reti di trasporto e distribuzione di gas combustibili, compresi quelli di origine petrolifera o chimica, con esclusione delle reti di distribuzione cittadina e dei relativi impianti con pressione di esercizio non superiore a 5 bar.	Una Tantum
7	Impianti di distribuzione di gas combustibili per autotrazione.	6
8	Officine e laboratori con saldatura e taglio dei metalli utilizzando gas combustibili e/o comburenti, con oltre 5 addetti.	6
9	Impianti per il trattamento di prodotti ortofrutticoli e cereali utilizzando gas combustibili.	6
10	Impianti per l'idrogenazione di olii e grassi.	6
11	Aziende per la seconda lavorazione del vetro con l'impiego di oltre 15 becchi a gas.	6
...	...	...

Tabella 1.3 - Alcune delle 97 attività da assoggettare a CPI (DM 16/02/1982)

## 1. *La Prevenzione Incendi in Italia*

Da queste prime normative emerge una netta separazione dei doveri in materia antincendio tra i privati e la pubblica amministrazione.

Dopo l'incendio del Cinema Statuto di Torino, la sera del 13 febbraio 1983, in cui persero la vita 64 persone per intossicazione da fumi e per ustioni, sono state effettuate perizie che hanno dimostrato che le cause, oltre che nelle responsabilità o nelle negligenze individuali, risiedevano nel sistema di leggi vigenti in materia di sicurezza nell'Italia dei primi anni '80, redatte e conseguentemente applicate in maniera superficiale.

Le nuove normative hanno quindi approvato un aumento della responsabilità dei professionisti in materia antincendio, ai quali avrebbero fatto capo eventualmente anche le relative conseguenze amministrative e penali.

La Legge del **7 dicembre 1984, n.818** consente alle attività sorte prima del 10/12/1984 sprovviste di certificato di prevenzione incendi, di proseguire l'esercizio dotandosi di un Nulla Osta Provvisorio (NOP), rilasciato dai comandi dei Vigili del Fuoco a seguito del controllo delle dichiarazioni e delle certificazioni predisposte da professionisti iscritti negli elenchi del Ministero dell'Interno (**DM 25/03/1985**). La documentazione e le certificazioni dovevano dimostrare l'osservanza delle misure antincendio più urgenti ed essenziali contenute nel **DM 08/03/1985**.

Per esempio, le misure più urgenti ed essenziale da applicare agli edifici scolastici erano:

- 0: estintori - sicurezza impianti elettrici - resistenza al fuoco
- 2.2: separazioni da attività pericolose
- 2.3: divieto di deposito sostanze infiammabili se non in accordo con il successivo punto 13
- 3.1: limitazione del carico incendio
- 5.2: capacità di deflusso (120 persone ogni 60 cm)
- 6.3: reazione al fuoco
- 7\* (per capacità > 1.000 persone): impianti fissi di estinzione
- 8\* (per scuole serali): illuminazione di sicurezza
- 13: requisiti antincendio depositi di sostanze infiammabili
- 14: requisiti antincendio depositi di combustibili, archivi, biblioteche.

Tra gli anni '80 e '90 si sono poi susseguite norme di sicurezza antincendio più specifiche: il **DM 16/05/1987** per gli edifici di civile abitazione; il **DM 20/05/1992** per gli edifici storici e artistici destinati a musei, gallerie, esposizioni e mostre; il **DM 26/08/1992**

per l'edilizia scolastica; il **DPR 418/1995** per gli edifici di interesse storico-artistico destinati a biblioteche ed archivi; infine il **DM 19/08/1996 n. 214** per i locali d'intrattenimento e di pubblico spettacolo.

Successivamente alla fine degli anni '90, il **DPR 37/1998** ha introdotto la Dichiarazione d'Inizio Attività (DIA) e il rinnovo d'ufficio con perizia giurata (il professionista si sostituisce ai Vigili del Fuoco per un tempo limitato). Il Tecnico de Vigili del Fuoco deve invece verificare la sussistenza e la presenza delle certificazioni necessarie a dimostrare presenza requisiti di prevenzione incendi. Questo per l'esigenza di semplificare le procedure della normativa, ora tecnicamente più complessa.

Sempre nello stesso anno, il **DM 10/03/1998** ha proposto i criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro.

Le ultime normative presentavano però alcuni limiti, per esempio non esisteva proporzionalità fra il livello di rischio di un'attività soggetta e gli adempimenti di prevenzione incendi; il lavoro di verifica e controllo veniva eseguito indistintamente su tutte le 97 attività predisposte dal DM 16/02/1982, il quale non era più stato aggiornato nonostante le trasformazioni della realtà sociale e produttiva.

Alcune attività come metropolitane e le aerostazioni che presentano un notevole livello di rischio, non essendo incluse nelle 97 definite dal DM 16/02/1982, non erano allora assoggettate agli adempimenti di prevenzione incendi.

Con il **DPR 200/2004**, si stabilisce che il CPI attesti il rispetto delle prescrizioni previste dalla normativa di prevenzione incendi (non più la sola conformità, come prima) e la sussistenza dei requisiti di sicurezza antincendio. Inoltre, la responsabilità della certificazione un impianto passa dal tecnico dei Vigili del Fuoco al professionista.

Con l'art. 15 del **D.Lgs n. 139/2006**, *Norme tecniche e procedurali di prevenzione incendi*, vengono adottate le norme tecniche di prevenzione incendi, fondate su presupposti tecnico-scientifici, le quali specificano misure ed accorgimenti atti a: ridurre la probabilità dell'insorgere di incendi attraverso sistemi o impianti che agiscono direttamente sulle sorgenti di ignizione o sul materiale combustibile o sull'agente ossidante; limitare le conseguenze dell'incendio attraverso sistemi, dispositivi, impianti specifici per tale scopo.

Il **DM 09/05/2007** dà poi le direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio. Si verifica quindi un passaggio dal metodo prescrittivo, in cui il progettista doveva attenersi strettamente alla normativa senza apportare alcun contributo personale, al metodo prestazionale, il cui il progettista e il committente individuano insieme il livello di prestazione richiesto ed il progettista ne verifica il raggiungimento.

Con il **DM 05/08/2011** è stata prevista una riorganizzazione dei corsi di preven-

zione incendi, ai quali i progettisti devono aggiornarsi.

Il **DPR 1 agosto 2011, n.151** ha mostrato l'esigenza di: salvaguardare la specificità dei procedimenti di Prevenzione Incendi a seguito dell'introduzione della Segnalazione Certificata di Inizio Attività "SCIA" (Legge 122/10) assicurandone l'integrale applicazione; di perseguire gli obiettivi di semplificazione delineati nel Piano per la riduzione degli oneri amministrativi (DM 10/09/2009); e di raccordare i procedimenti di prevenzione incendi con la normativa vigente in materia di sportello unico per le attività produttive (DPR 160/2010). Sono stati quindi adottati i seguenti provvedimenti: è stato introdotto il *principio di proporzionalità*, il quale ha reso più efficace l'azione dei Vigili del Fuoco, che ora possono concentrare il loro lavoro di verifica e controllo sui casi dove sia davvero necessario (per esempio negli ospedali). Inoltre gli adempimenti amministrativi sono stati diversificati in relazione alla dimensione, al settore in cui opera l'impresa e all'effettiva esigenza di tutela degli interessi pubblici.

Con l'applicazione del principio di proporzionalità è stato abbandonato un approccio che non riconosce alcuna differenza tra le attività soggette. Le attività sottoposte ai controlli di prevenzione incendi sono state quindi suddivise in tre diverse categorie per le quali è prevista una disciplina differenziata in relazione al rischio: A, B, C, a cui corrispondono diversi adempimenti e procedure. Tali categorie *sono individuate in relazione alla dimensione dell'impresa, al settore di attività, alla esistenza di specifiche regole tecniche, alle esigenze di tutela della pubblica incolumità*.

Viene inoltre esteso l'uso dell'autocertificazione e delle attestazioni rilasciate a cura dei professionisti abilitati. Infatti, fino ad allora si chiedeva l'autorizzazione a esercitare una (o più) attività mentre da quel momento si segnala (SCIA, Segnalazione Certificata di Inizio Attività).

Il titolare attività segnala l'inizio dell'attività stessa (SCIA); il tecnico abilitato assevera la conformità da punto di vista antincendio; infine il tecnico abilitato ed iscritto negli albi speciali del Ministero dell'Interno certifica la conformità antincendio di strutture, impianti, ecc.

Il DPR 151/2011 ha infatti delineato un nuovo ruolo del professionista abilitato, affidandogli maggiori poteri e quindi maggiori responsabilità.

Con l'introduzione di questo tipo di approccio verrà, in parte, modificato il tipo di attività svolta dai Vigili del Fuoco, che tenderà a trasformarsi da attività di verifica preventiva ad attività di controllo da eseguire in un momento successivo all'avvio dell'attività, e solo nei casi realmente necessari.

Il **DM 07/08/2012** ha introdotto nuove disposizioni riguardo le modalità di presentazione delle istanze concernenti i procedimenti di prevenzione incendi e la documentazione da allegare.

Nel 2015 è stato pubblicato il *Nuovo Codice di Prevenzione Incendi (DM 03/08/2015)*. Tale codice ha lo scopo di aggiornare le tecniche di prevenzione incendi, rendendole più semplici, chiare e sostenibili, in linea con lo sviluppo del paese. Queste regole sono infatti meno prescrittive e più prestazionali, quindi flessibili, e si ispirano ai principi di massima tutela della pubblica e privata incolumità (persone, beni, ambiente) in caso di incendio. Le principali innovazioni apportate dal nuovo codice relativamente alle tecniche di prevenzione incendi sono: la generalità del metodo, applicabile a tutte le attività; la flessibilità delle soluzioni per il raggiungimento dei livelli di sicurezza richiesti; la standardizzazione del linguaggio utilizzato in materia di prevenzione incendi, al fine di integrare la normativa italiana con quelle vigenti in Europa; l'evidenza dei contenuti, basati su standard internazionalmente riconosciuti; l'inclusione di persone con disabilità temporanee o permanenti; infine la facile aggiornabilità del documento (DM 03/08/2015) qualora si manifestassero nuove tecnologie o nuove conoscenze.

Gli obiettivi del nuovo codice sono: minimizzare le cause di incendio e limitare gli incendi sia interni sia esterni; garantire la stabilità delle strutture, la sicurezza degli occupanti, la tutela di arte e storia ; e limitare il danno ambientale. Per garantire tali obiettivi si è reso necessario ridefinire le seguenti misure:

- Resistenza al fuoco;
- Reazione al fuoco;
- Compartimentazione;
- Separazione;
- Esodo;
- Controllo e spegnimento dell'incendio;
- Controllo di fumi e calore;
- Rilevazione dell'incendio e allarme;
- Gestione della sicurezza antincendio;
- Operatività antincendio;
- Sicurezza degli impianti.

Il nuovo codice, col quale assume maggior importanza la FSE, ovvero l'ingegneria antincendio, deve essere applicato a tutte le attività, con attenzione particolare a quelle esistenti.

## 1.2 L'evoluzione della normativa in ambito scolastico

Le norme per la gestione del rischio di incendio in ambito scolastico si sono così susseguite:

Il **DM 26/08/1992** presenta in allegato le *Norme di prevenzione incendi per l'edilizia scolastica*, articolate in:

1. Generalità;
2. Caratteristiche costruttive;
3. Comportamento al fuoco;
4. Sezionamenti;
5. Misure per l'evacuazione in caso di emergenza;
6. Spazi a rischio specifico;
7. Impianti elettrici;
8. Sistemi di allarme;
9. Mezzi e impianti fissi di protezione ed estinzione degli incendi;
10. Segnaletica di sicurezza.

Con questa normativa, le scuole vengono suddivise in categorie riferite al proprio affollamento, considerando le presenze effettive contemporaneamente in essere prevedibili di alunni e di personale docente e non docente.

Il **DM 10/03/1998** definisce i criteri generali di sicurezza antincendio e di gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro (validi quindi anche per l'ambito scolastico).

Il **D.Lgs. 81/2008 (art. 46)** affronta la problematica d'incendio sotto il profilo organizzativo, formulando prescrizioni a carico dei dirigenti scolastici rispetto alle misure di prevenzione e a quelle da attuare in caso d'evacuazione.

Il **DPR 01/08/2011 n. 151** presenta un regolamento recante una semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione incendi (valido anche per l'ambito scolastico).

Il **DM 03/08/2015** costituisce la nuova Regola Tecnica Orizzontale (RTO). Tale decreto, denominato anche Codice di Prevenzione Incendi, inizialmente non era applicabile alle attività scolastiche, per questo nel 2017 è stato integrato dalla Regola Tecnica Verticale (RTV) sulle attività scolastiche, che ne permette l'applicazione anche a questa tipologia di attività.

Il **DM 07/08/2017**, in vigore dal 25 agosto successivo, contiene dunque la nuova Regola Tecnica Verticale (RTV) prestazionale in merito alla prevenzione incendi nelle scuole, e impone l'obbligo che gli edifici scolastici di ogni tipo, ordine e grado, vi si adeguino entro il 31 dicembre 2017. Tale decreto si pone in alternativa al precedente DM 26/08/1992 e permette di superare i casi in cui quest'ultimo risultava di difficile applicazione.

Le due norme (nuovo metodo prestazionale, RTV del 2017 e vecchia normativa prescrittiva, DM del 1992), coesisteranno fino al 31 dicembre 2019, data in cui il Ministero dell'Interno e il MIUR termineranno il monitoraggio dell'applicazione della nuova norma, riservandosi la possibilità di apportarvi delle correzioni e valutando l'eventuale abrogazione delle RTV prescrittive esistenti.

Nella RTV del 2017, il *Capitolo V.7*, che tratta le attività scolastiche, si articola in:

- V.7.2 – Classificazioni;
- V.7.3 – Profili di rischio;
- V.7.4 – Strategia antincendio;
- V.7.5 – Vani degli ascensori.

Con questa normativa, le scuole vengono suddivise in categorie in relazione al numero degli occupanti ed alla massima quota dei piani.

La RTV del 2017 reca disposizioni di prevenzione incendi riguardanti edifici o locali adibiti ad attività scolastica di ogni ordine, grado e tipo, collegi e accademie, con affollamento superiore a 100 occupanti, esclusi gli asili nido. Tuttavia è possibile fare riferimento a tale norma anche per edifici con meno di 100 occupanti. Sono invece esclusi dal campo di applicazione, le scuole aziendali e gli ambienti didattici ubicati all'interno di attività non scolastiche.

L'approccio prestazionale determinato dalla RTV del 2017, lascia al professionista una maggiore libertà nel delineare una strategia antincendio su misura, valutata in base alla specifica realtà nella quale si trova ad operare, muovendosi tra i vincoli stabiliti dalla normativa. Il professionista è lasciato libero di scegliere inoltre, a parità di sicurezza, l'alternativa più conveniente dal punto di vista economico.

Il nuovo **DM 21/03/2018**, *Applicazione della normativa antincendio agli edifici e ai locali adibiti a scuole di qualsiasi tipo, ordine e grado, nonché' agli edifici e ai locali adibiti ad asili nido*, ha lo scopo di avviare una fase di adeguamento alla normativa delle scuole esistenti ancora sprovviste di CPI e SCIA antincendio.

Prevede quindi tre livelli di priorità di cui si deve tenere conto nel programmare le attività di adeguamento antincendio degli edifici scolastici (*Tabella 1.4*). Il decreto sot-

1. *La Prevenzione Incendi in Italia*

tolinea anche che tali attività di adeguamento potranno essere effettuate, in alternativa, con l'osservanza delle norme tecniche del DM 3 agosto 2015 come integrato dal DM 7 agosto 2017.

Le indicazioni programmatiche prioritarie sono volte a consentire un cambiamento graduale con lo scopo di eliminare le carenze rilevate in materia antincendio, fornendo un utile strumento nella programmazione delle attività, utilizzabile sia da Comune e Province quali proprietari di edifici scolastici, sia dai Comandi Provinciali dei Vigili del Fuoco per impartire prescrizioni graduali e graduate, qualora rilevino carenze o lacune negli adempimenti inseriti nei diversi livelli di priorità dal decreto.

Livelli di priorità	Indicazioni programmatiche per le scuole
A	Osservanza delle disposizioni del DM 26/08/1992 relative a impianto elettrico di sicurezza, sistemi di allarme, estintori, segnaletica di sicurezza, norme di esercizio.
B	Osservanza delle disposizioni del DM 26/08/1992 relative a spazi per esercitazioni, spazi per depositi, spazi per l'informazione e le attività parascolastiche, spazi per servizi logistici, impianti fissi di rivelazione e/o di estinzione degli incendi.
C	Le restanti disposizioni del decreto.

Tabella 1.4 - Livelli di priorità programmatica a cui riferirsi per l'adeguamento antincendio delle scuole (DM 21/03/2018)

Nello svolgimento dell'attività professionale, al giorno d'oggi, visti i continui aggiornamenti normativi, è possibile scegliere uno dei seguenti approcci progettuali (Figura 1.1), in base a quale sia, di volta in volta, il più conveniente:

1. Le Regole Tecniche tradizionali, in particolare il DM 26/08/1992;
2. Il Codice di Prevenzione Incendi, integrato dalla nuova RTV del 2017;
3. La Fire Safety Engineering (FSE).

Le prime due metodologie sono alternative tra di loro, la prima è prescrittiva e la seconda prestazionale, mentre la FSE può essere applicata nel caso in cui sia necessario chiedere una deroga ad una particolare misura prevista dalla norma.

I continui aggiornamenti normativi degli ultimi anni hanno avuto lo scopo di fornire ai progettisti, degli strumenti più flessibili e delle linee guida applicabili sia ai casi comuni, sia ai casi particolari. Hanno inoltre comportato una progressiva specializzazione professionale del progettista antincendio, facendo così nascere nuove figure professionali che fanno della progettazione antincendio la propria esclusiva vocazione.



L'avvento dell'obbligo dell'aggiornamento professionale periodico, favorisce la specializzazione dei professionisti: solo un professionista antincendio specializzato possiede infatti le competenze e l'esperienza per applicare efficacemente le misure previste dalle nuove normative di tipo prestazionale.

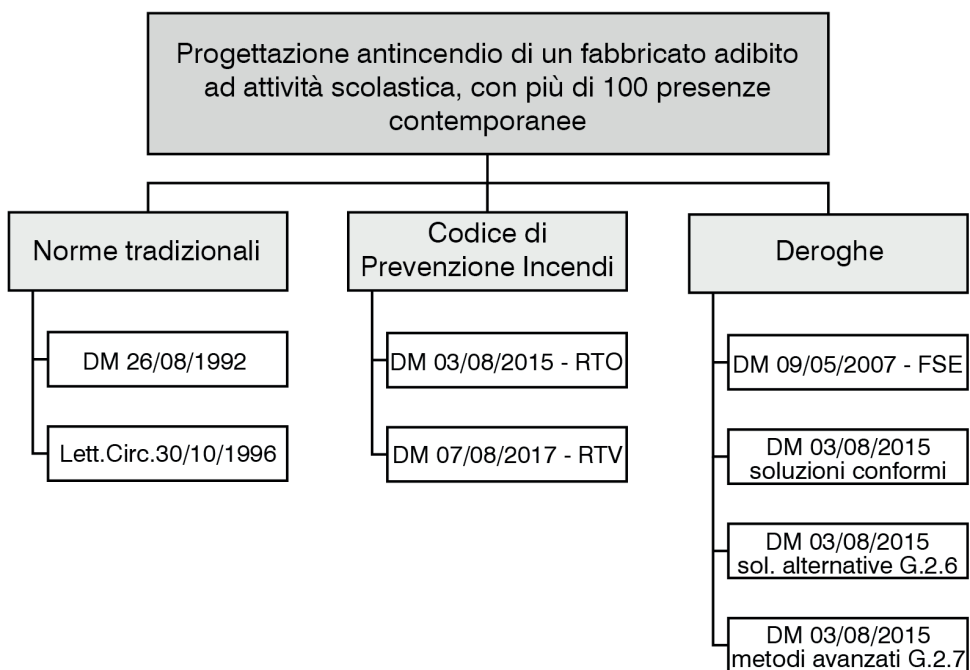


Figura 1.1 - Schema delle normative a cui è possibile riferirsi per la progettazione antincendio



## L'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio

*L'approccio ingegneristico è un metodo basato sulla predizione della dinamica evolutiva dell'incendio tramite l'applicazione di idonei modelli di calcolo. La sua estrema flessibilità si può spiegare attraverso l'analogia del sarto: l'approccio prestazionale (FSE) è paragonabile ad un abito realizzato su misura, che si adatta perfettamente alla persona per cui è stato fatto; l'approccio prescrittivo al contrario è paragonabile ad un abito di taglia XXL, che pertanto può adattarsi a tutti, nonostante risulti sovraddimensionato nella maggior parte dei casi.*

### 2.1 La progettazione antincendio

La progettazione antincendio, di cui nei paragrafi successivi si chiariranno i diversi approcci, è strettamente connessa alle specifiche norme vigenti in tema di prevenzione incendi.

L'allegato I del DM 07/08/2012, stabilisce i requisiti minimi della documentazione tecnica di prevenzione incendi in riferimento alle caratteristiche di sicurezza antincendio delle attività soggette ai controlli di prevenzione incendi riportate nell'allegato I del DPR 01/08/2011 n.151. In particolare si distinguono: relazione tecnica (punto A.1 dell'allegato I del DM 07/08/2012) ed elaborati grafici (punto A.2 del DM 07/08/2012).

La **relazione tecnica** deve contenere, almeno:

1. L'individuazione dei pericoli di incendio – gli elementi che permettano tale individuazione sono, ad esempio:
  - destinazione d'uso (generale e particolare);
  - sostanze pericolose e loro modalità di stoccaggio;
  - carico di incendio nei vari compartimenti;
  - impianti di processo;

2. *L'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio*

- lavorazioni;
  - macchine, apparecchiature ed attrezzi;
  - movimentazioni interne;
  - impianti tecnologici di servizio;
  - aree a rischio specifico.
2. La descrizione delle condizioni ambientali – cioè le condizioni nelle quali i pericoli sono inseriti, al fine di consentire la valutazione del rischio di incendio connesso ad essi, ad esempio:
- condizioni di accessibilità e viabilità;
  - lay-out aziendale (distanziamenti, separazioni, isolamento);
  - caratteristiche degli edifici (tipologia edilizia, geometria, volumetria, superfici, altezza, piani interrati, articolazione planovolumetrica, compartimentazione, ecc.);
  - aerazione (ventilazione);
  - affollamento degli ambienti, con particolare riferimento alla presenza di persone con ridotte od impedito capacità motorie o sensoriali;
  - vie di esodo.
3. La valutazione qualitativa del rischio di incendio, l'indicazione degli obiettivi di sicurezza assunti e l'indicazione delle azioni messe in atto per perseguirli.
4. La compensazione del rischio di incendio (strategia antincendio) – la descrizione delle misure di prevenzione e protezione antincendio, la descrizione dei provvedimenti da adottare nei confronti dei pericoli di incendio, delle condizioni ambientali, e la descrizione delle misure preventive e protettive assunte, con particolare riguardo:
- al comportamento al fuoco delle strutture e dei materiali;
  - ai presidi antincendio;
  - alle norme tecniche di prodotto e di impianto prese a riferimento.
- Relativamente agli impianti di protezione attiva la relazione deve indicare:
- le norme di progettazione seguite;
  - le prestazioni dell'impianto;
  - le sue caratteristiche dimensionali, (quali ad esempio, portate specifiche, pressioni operative, caratteristica e durata dell'alimentazione dell'agente estinguente,

ecc.);

- le caratteristiche dei componenti da impiegare nella sua realizzazione, nonché l' idoneità dell'impianto in relazione al rischio di incendio presente nella attività.

È utile rammentare che, a norma del DM 22/01/2008 n.37, ogni progetto di impianto deve essere elaborato secondo la regola dell'arte, che considera oltre alla normativa vigente, anche le indicazioni delle guide e delle norme dell'UNI, del CEI o di altri Enti di normalizzazione appartenenti agli Stati membri dell'UE, ed in accordo a specifiche tecniche internazionali emanate da enti riconosciuti nel settore della sicurezza antincendio, come, ad esempio, gli standard NFPA.

5. Infine, la gestione dell'emergenza deve indicare, in via generale, gli elementi strategici della pianificazione di essa che dimostrino la perseguibilità dell'obiettivo della mitigazione del rischio residuo attraverso un'efficiente organizzazione e gestione aziendale.

Gli **elaborati grafici di progetto** devono invece contenere, almeno:

- a. Planimetria generale in scala (da 1:2000 a 1:200), a seconda delle dimensioni dell'insediamento, dalla quale risultino:
  - l'ubicazione delle attività;
  - le condizioni di accessibilità all'area e di viabilità al contorno, gli accessi pedonali e carrabili;
  - le distanze di sicurezza esterne;
  - le risorse idriche della zona (idranti esterni, corsi d'acqua, acquedotti e riserve idriche);
  - gli impianti tecnologici esterni (cabine elettriche, elettrodotti, rete gas, impianti di distribuzione gas tecnici);
  - l'ubicazione degli elementi e dei dispositivi caratteristici del funzionamento degli impianti di protezione antincendio e degli organi di manovra in emergenza degli impianti tecnologici;
  - quanto altro ritenuto utile per una descrizione complessiva dell'attività ai fini antincendio, del contesto territoriale in cui l'attività si inserisce ed ogni altro utile riferimento per le squadre di soccorso in caso di intervento.
- b. Piante in scala da 1:50 a 1:200, a seconda della dimensione dell'edificio o locale dell'attività, relative a ciascun piano, recanti l'indicazione degli elementi caratterizzanti il rischio di incendio e le misure di sicurezza e protezione riportate nella relazione tecnica quali, in particolare:

2. *L'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio*

- la destinazione d'uso ai fini antincendio di ogni locale con indicazione delle sostanze pericolose presenti, dei macchinari ed impianti esistenti e rilevanti ai fini antincendio;
  - l'indicazione dei percorsi di esodo, con il verso di apertura delle porte, i corridoi, i vani scala, gli ascensori, nonché le relative dimensioni;
  - le attrezzature mobili di estinzione e gli impianti di protezione antincendio, se previsti;
  - l'illuminazione di sicurezza.
- c. Sezioni ed eventuali prospetti degli edifici, in scala adeguata.

## 2.2 Dal prescrittivo al prestazionale

**F**ino al 2006 in Italia i progetti antincendio dovevano rispettare punto per punto le condizioni imposte dalle norme, a seconda del tipo di attività o del profilo di rischio corrispondente, senza alcuna possibilità alternativa.

L'**approccio prescrittivo**, od ordinario, consiste infatti nella semplice applicazione, da parte dei professionisti, di norme e di regole tecniche in cui sono già definite dettagliatamente tutte le misure da adottare per raggiungere la sicurezza antincendio, e nel ricorso a semplici strumenti di calcolo, come le curve standard di incendio o gli Eurocodici per il calcolo analitico della classe REI delle strutture. Il rispetto di tali regole rappresenta, quindi, garanzia di un livello di rischio residuo accettabile.

Nell'approccio prescrittivo non è ammessa alcuna soluzione progettuale alternativa a quella imposta dal legislatore: è lui stesso, infatti, che ha il compito di definire gli scenari critici di incendio e la valutazione del rischio, imponendo un minimo livello di sicurezza da raggiungere attraverso specifiche misure prescrittive.

Questo approccio affonda le sue radici nella prima legge sulla sicurezza sul lavoro (DPR 27/04/1955 n.547) e, in particolare, nella richiesta di misure di prevenzione e protezione antincendio in tutte le realtà in cui, per esigenze produttive o particolari dimensioni, si presentano gravi pericoli per l'incolumità delle persone. Al fine di garantire accettabili livelli di sicurezza antincendio, ugualmente validi sul territorio nazionale, la progettazione e l'esercizio di determinate attività viene assoggettata al controllo dei VV.F. e, praticamente, vincolata a stringenti regole tecniche. Le regole tecniche da rispettare vengono fissate quindi ex ante dallo stesso legislatore che, attraverso l'organo competente, ne verifica anche il corretto adempimento ex post.

L'approccio prescrittivo è di tipo storico-empirico e non consente una valutazione quantitativa della sicurezza. I codici prescrittivi sono in genere più semplici da utilizzare sia per i progettisti, sia per gli organi di controllo, le norme impongono il rispetto di requisiti minimi di sicurezza attraverso l'adozione di misure prescrittive. Tale approccio risulta quindi vantaggioso in quanto estremamente semplice e omogeneo nella sua applicazione (progettazione e controllo dei sistemi di sicurezza), il progettista ha minori responsabilità, ma non può apportare alcun contributo alternativo se non ricorrendo a deroghe. La formazione del professionista infatti, come quella dei tecnici e degli organi di controllo, non fa riferimento ad un apparato scientifico consolidato bensì alla visione della sicurezza come rispetto della norma. Un ulteriore vantaggio è rappresentato dalla certezza del raggiungimento del livello minimo di sicurezza antincendio, inoltre semplifica il controllo e garantisce uniformità alla disciplina anche dal punto di vista del controllore VV.F. Il progettista, così come il responsabile di attività a rischio, non deve fare

## 2. *L'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio*

altro che attenersi pedissequamente, senza facoltà di interpretazione, alle prescrizioni di riferimento, universalmente valide a compensare il rischio previsto e valutato ex ante.

Di contro, le regole tecniche e le procedure di calcolo sono spesso troppo rigide e conservative, quindi risultano o non applicabili, o costituiscono vincoli o limitazioni nei casi di opere complesse, innovative, edifici storici, ecc., oppure costringono a ricorrere a misure antincendio eccessive e troppo dispendiose per l'attività in questione. Tale approccio infatti normalizza eccessivamente le soluzioni, basate su ipotesi generali e, ignorando la specificità del contesto reale, trascurando spesso soluzioni altrettanto valide, tecnicamente diverse o economicamente meno impegnative.

L'approccio prescrittivo alla sicurezza antincendio suddivide le misure di sicurezza in due gruppi legati ai due principali obiettivi dell'attività di prevenzione:

1. le misure destinate a limitare le probabilità che un evento incidentale si manifesti;
2. le misure destinate a limitare i danni nei casi in cui si verifichi un incendio.

Per determinare le misure di sicurezza più idonee si possono utilizzare i criteri di valutazione del rischio d'incendio (codificati nel DM 10/03/1998) oppure, se sono disponibili delle norme, si possono attuare le misure previste nelle singole disposizioni adottate con Decreto del Ministero dell'Interno, che riportano i requisiti dei diversi componenti edilizi, impiantistici e gestionali necessari per assicurare il livello di sicurezza necessario alla data attività.

Il metodo prescrittivo è stato necessariamente l'unico approccio valido e possibile nella prevenzione incendi fino alla prima introduzione del metodo prestazionale con il DM 09/05/2007 e rafforzato con il Nuovo Codice di Prevenzione Incendi. Con il DM 09/05/2007 recante le *Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio*, infatti, il Ministro dell'Interno ha definito gli aspetti procedurali e i criteri da adottare per valutare il livello di rischio e progettare le conseguenti misure compensative, utilizzando, in alternativa a quanto previsto dal DM 04/05/1998, l'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio.

Viene così posta l'attenzione sulla Fire Safety Engineering (FSE), inizialmente solo per quanto riguarda la resistenza al fuoco delle strutture. A livello internazionale ma soprattutto nei paesi anglosassoni invece, già dal 1988 il sottocomitato SC4 dell'ISO TC 92 aveva elaborato una bozza degli standard internazionali della FSE, basata sul risultato delle più moderne ricerche antincendio; nel 1999 poi l'ISO aveva pubblicato il TR (Technical Report) 13387 *Fire Safety Engineering*, diviso in otto parti successivamente aggiornate alla versione 2008, quindi l'approccio prestazionale aveva iniziato a prendere piede.

In particolare la metodologia prestazionale (performance-based design) veniva definita dal documento **ISO TR 13387** come: *L'applicazione di principi ingegneristici, di*



regole e di giudizi esperti basati sulla valutazione scientifica del fenomeno della combustione, degli effetti dell'incendio e del comportamento umano, finalizzati alla tutela della vita umana, alla protezione dei beni e dell'ambiente, alla quantificazione dei rischi d'incendio e dei relativi effetti nonché alla valutazione analitica delle misure di protezione ottimali, necessarie a limitare, entro livelli prestabiliti, le conseguenze dell'incendio.

Il DM 09/05/2007 è costituito da otto articoli, che stabiliscono le procedure per adottare l'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio; ed un allegato tecnico, suddiviso in cinque punti che indicano il processo di valutazione e progettazione nell'ambito dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio (FSE).

Secondo l'art.2 del DM 09/05/2007, la procedura ingegneristica è finalizzata a:

- l'individuazione dei provvedimenti da adottare nell'ambito delle attività soggette alla disciplina di prevenzione incendi, nel caso di attività non regolate da specifiche disposizioni antincendio;
- l'individuazione delle misure di sicurezza che si ritengono idonee a compensare il rischio aggiuntivo nell'ambito del procedimento di deroga.

Nello stesso articolo vengono inoltre specificati i campi di applicazione, tra cui: gli insediamenti di tipo complesso o a tecnologia avanzata, e gli edifici di particolare rilevanza architettonica e/o costruttiva, compresi quelli pregevoli per arte o storia o ubicati in ambiti urbanistici di particolare specificità.

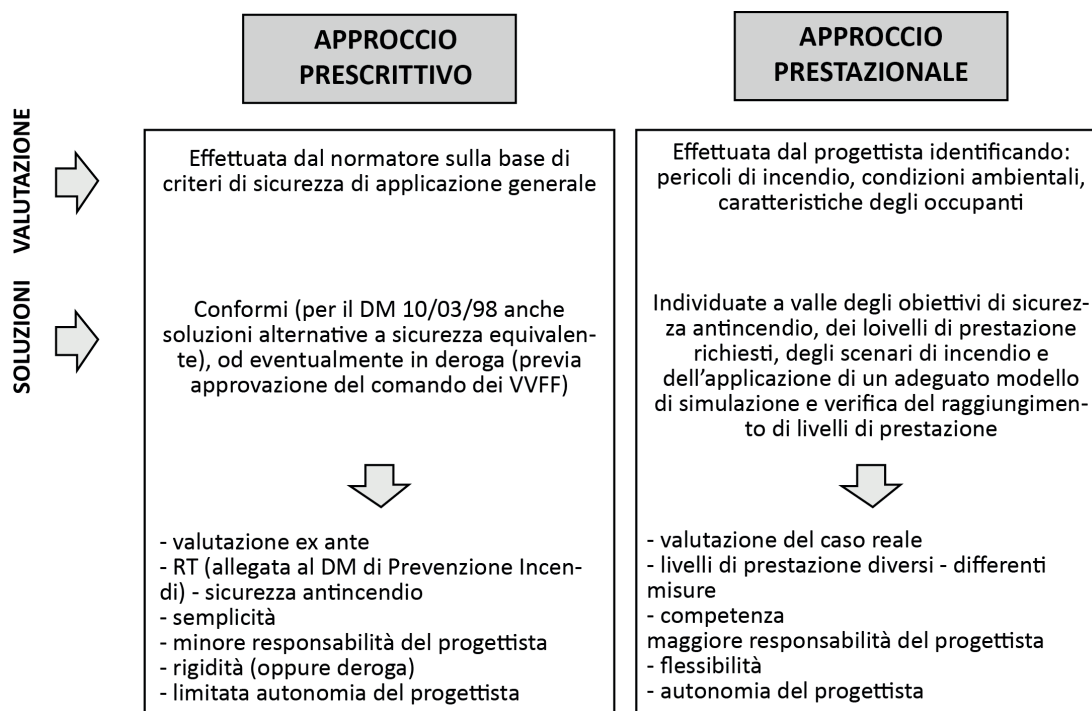


Figura 2.1 - Schema di confronto tra l'approccio prescrittivo e l'approccio prestazionale

## 2. *L'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio*

Il DM 09/05/2007 stabilisce quindi un nuovo iter procedurale che si affianca, ma non sostituisce, quelli esistenti. Le norme prescrittive rappresentano infatti un requisito necessario, ma non sempre sufficiente, al fine della garanzia del raggiungimento di un adeguato livello di sicurezza antincendio.

L'**approccio prestazionale**, o ingegneristico, non si occupa di verificare il rispetto di una norma o di una probabilità di accadimento, ma consente di progettare superando i tradizionali metodi prescrittivi previsti dalle regole tecniche di prevenzione incendi: il progettista definisce lo scopo del progetto e l'obiettivo da conseguire ed effettua la verifica sulla rispondenza dei requisiti stabiliti. Effettua quindi una valutazione quantitativa del livello di sicurezza antincendio: gli effetti dell'incendio sono quantificati e il livello di sicurezza antincendio valutato rispetto a soglie prestazionali prestabilite (temperatura, visibilità, altezza dello strato libero da fumo, ecc..).

Questo tipo di approccio consente a progettista e committente di definire obiettivi comuni generali, individuando il livello di prestazione necessario alla singola attività in questione, di cui poi spetta al professionista verificarne il raggiungimento. Vengono quindi specificate le condizioni che concorrono a definire il rischio presente nell'attività, attraverso una valutazione matematica quantitativa avanzata. Il progettista può dare alla progettazione, ora molto più flessibile, un proprio contributo professionale, assumendosi di conseguenza le relative responsabilità.

Attraverso l'approccio prestazionale è inoltre possibile individuare più nello specifico quali sono i sistemi di protezione attiva e passiva maggiormente adatti ad una data attività, in modo da commisurare le misure di protezione antincendio alle reali necessità e da minimizzare il rapporto costi/benefici. L'effetto di ogni misura di sicurezza può essere quindi quantificato e valutato mediante l'utilizzo di modelli di calcolo, con un maggiore controllo del rapporto rischi/misure di sicurezza.

Mediante questo approccio, di tipo scientifico-predittivo, si individuano soluzioni utilizzando modelli matematici per prevedere gli effetti di un determinato evento. In questi studi sono coinvolte varie discipline diverse fra loro: di tipo scientifico (es. matematica, fisica, chimica, informatica, architettura, ingegneria), di tipo umanistico (es. psicologia, comportamento umano), di tipo medico (es. fisiologia) e di tipo finanziario (es. economia, statistica, sistemi di gestione, ecc..). L'aspetto scientifico dell'approccio prestazionale è legato al fatto che sono svolte simulazioni dell'incendio con codici di calcolo, le quali consentono di valutare, ad esempio, l'esodo delle persone o di prevedere le prestazioni della struttura in esame. L'approccio prestazionale affronta la valutazione del rischio incendio mediante la previsione di scenari verosimili e lo studio delle prestazioni minime del progetto durante l'evoluzione dell'incendio. Nell'approccio tradizionale invece, tali calcoli erano sostituiti da valutazioni convenzionali, che si adattavano genericamente a varie tipologie di attività senza particolari distinzioni.

Con il metodo prestazionale l'analisi è più mirata: per ogni caso studio è possibile prevedere il comportamento dell'evento incendio e di tutte le variabili ad esso associate, in questo modo la progettazione risulta *su misura* e comporta un risparmio per quanto riguarda le misure antincendio da adottare, definite in modo più preciso, ma richiedendo al contrario un maggiore dispendio di tempi e risorse da parte del professionista.

Il principale vantaggio di questa metodologia è rappresentato infatti dalla sua flessibilità, che permette la simulazione d'incendi di complessità elevata, previa valutazione di alcuni dati di input, da assegnare a seconda dell'attività in esame (es. geometria del dominio di calcolo, tipo e quantità dei combustibile, condizioni di ventilazione, curva HRR, ecc.). Questo approccio presenta però anche alcuni limiti, come la validazione sperimentale dei modelli utilizzati, l'approfondita preparazione richiesta ai professionisti ed ai controllori, la necessità di dover progettare sistemi di gestione della sicurezza ad hoc per ogni singolo progetto, e infine la complessità dei procedimenti di calcolo, nel caso di complessi scenari di progetto.

La validazione del rischio non è fatta ex ante ma sul caso reale e concreto in esame, la sua eliminazione è impossibile ma l'obiettivo dell'approccio prestazionale alla sicurezza antincendio è identificarlo, gestirlo, ridurlo e mantenerlo nel tempo ad un livello accettabile. La novità dell'approccio ingegneristico alla sicurezza consiste nel fatto che, di ogni misura alternativa, può essere quantificato l'effetto; fino ad oggi, invece, si accettavano misure secondo un criterio qualitativo, senza nessuna possibilità di misurare l'impatto effettivo dei singoli strumenti sull'evoluzione dell'incendio.

Di contro all'approccio prescrittivo, quello prestazionale attribuisce alle misure gestionali (formazione, addestramento, gestione dell'emergenza, sorveglianza, ecc.) un ruolo pari alle altre misure (resistenza e reazione al fuoco, compartimentazione, estinzione, rivelazione e allarme incendi, ecc.), conferendo alle medesime una funzione strategica nel contesto della progettazione antincendio. È previsto infatti, con l'utilizzo di tale metodologia, l'adozione di un Sistema di Gestione della Sicurezza capace di assicurare nel tempo il livello assunto dallo scenario di incendio ipotizzato dal progettista.

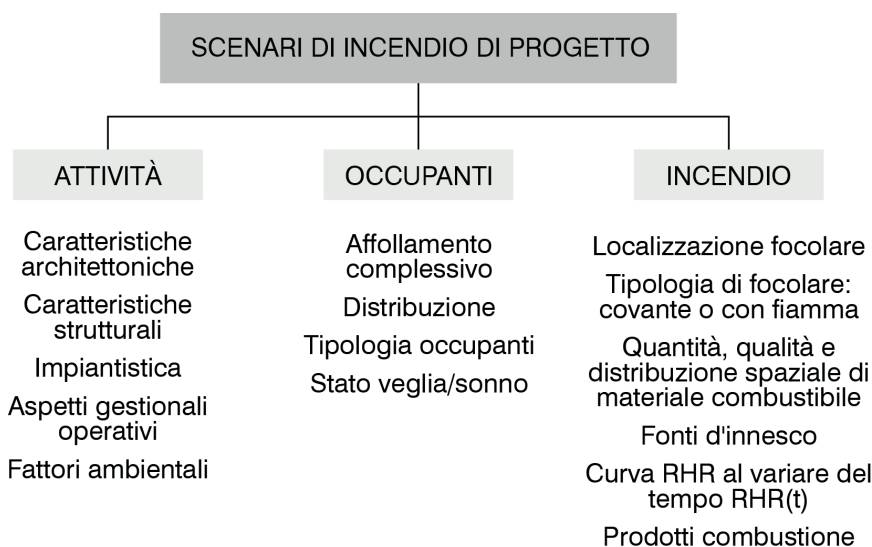


Figura 2.2 - Schema delle fasi caratteristiche del metodo ingegneristico (Allegato al DM 09/05/2007)

## 2. L'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio

La metodologia di progettazione prestazionale, esplicitata nell'Allegato al DM 09/05/2007, si compone di due fasi, riassunte nello schema in *Figura 2.2*:

1. L'analisi preliminare definisce le condizioni di rischio caratteristiche dell'attività in esame ed i livelli di prestazione a cui riferirsi in relazione agli obiettivi da perseguire. Attraverso la definizione del progetto si esplicitano la destinazione d'uso dell'attività ed i pericoli d'incendio connessi ad essa; le criticità e le difformità rispetto alle norme prescrittive di riferimento, chiarendo il perchè si vuole fare ricorso all'approccio prestazionale per la progettazione antincendio; gli eventuali vincoli progettuali derivanti da previsioni normative o esigenze proprie dell'attività; le caratteristiche degli occupanti in relazione alla tipologia di edificio ed alla destinazione d'uso. Il professionista antincendio stabilisce quindi lo scopo del progetto e gli obiettivi di sicurezza che l'attività in esame richiede, successivamente traduce tali obiettivi in soglie di prestazione sia qualitative sia quantitative, per poter capire, nella seconda fase di progettazione, quali soluzioni progettuali soddisfano gli obiettivi prefissati e quali no, per esempio per quanto riguarda il livello di salvaguardia dell'incolumità degli occupanti ed il massimo danno tollerabile all'attività ed al suo contenuto. Infine viene avviata la procedura di identificazione, selezione e quantificazione degli scenari di incendio di progetto (descritta nel capitolo M.2 del DM 03/08/2015), che rappresentano la schematizzazione degli eventi che possono verificarsi nell'attività in relazione alle caratteristiche del focolare, dell'edificio e degli occupanti (*Figura 2.3*).



*Figura 2.3 - Caratteristiche degli scenari di incendio di progetto*

Tra tutti gli scenari di incendio possibili, quelli di progetto vengono scelti mediante la valutazione del Rischio R, connesso a ciascuno scenario, ottenuto dal prodotto della Probabilità P di accadimento di esso (stimate usando i dati disponibili in letteratura o il giudizio ingegneristico) e dei Danni C, che può provocare:  $R=P \times C$  (ISO/DS 16733),

e dall'approccio presente nell'Annesso E della norma EN1991-1-2 (EC 1), secondo il quale i fenomeni capaci di modificare lo sviluppo dell'incendio sono considerati attraverso coefficienti riduttivi del carico d'incendio. Nel processo di individuazione degli scenari di incendio di progetto, devono essere valutati gli incendi realisticamente ipotizzabili nelle condizioni di esercizio previste, scegliendo i più gravosi per lo sviluppo e la propagazione dell'incendio.

2. L'analisi quantitativa consente di calcolare e quantificare gli effetti dell'incendio in relazione agli obiettivi assunti e di confrontare tali risultati con i livelli prestazionali prestabiliti. In questa fase è necessario condividere con il funzionario dei Vigili del Fuoco tutta la progettazione preliminare, o a voce o in forma scritta, al fine di ottenerne l'approvazione. Il progettista elabora alcune soluzioni progettuali per l'attività, congruenti con le finalità definite inizialmente, e le sottopone a verifica per accertare che soddisfino gli obiettivi di sicurezza antincendio. Per tale verifica vengono utilizzati modelli di calcolo analitici o numerici, che forniscono i parametri essenziali ai fini della verifica prestazionale ed i cui risultati quantitativi consentono di descrivere l'evoluzione dell'incendio e gli effetti su strutture, occupanti e ambiente. Il DM 09/05/2007 non specifica nulla sui parametri numerici attraverso i quali descrivere l'incendio, ma indica il documento interpretativo per il requisito essenziale n. 2 *Sicurezza in caso d'incendio* della direttiva prodotti da costruzione 89/106/CEE, come possibile riferimento per la loro individuazione. A questo punto il progettista confronta i risultati ottenuti con le soluzioni progettuali ipotizzate e seleziona, tra tutte quelle che sono state verificate positivamente rispetto agli scenari di incendio di progetto, quella che gli sembra più idonea.

Infine il professionista di sicurezza antincendio predisponde la documentazione di progetto riferita alla soluzione finale da lui scelta. Tale documentazione è costituita da:

- Sommario tecnico, relativo alla fase preliminare, firmato congiuntamente dal professionista antincendio e dal responsabile dell'attività, che sintetizza il processo seguito per individuare gli scenari di incendio di progetto ed i livelli di prestazione;
- Relazione tecnica, che presenta i risultati dell'analisi quantitativa, illustrati con tabelle, disegni, schemi ed immagini che rappresentino quantitativamente i parametri rilevanti ai fini del raggiungimento degli obiettivi di sicurezza antincendio, ed il percorso progettuale seguito, cioè le soluzioni previste per gli scenari di incendio di progetto. Il professionista in questo documento deve inoltre fornire indicazioni e giustificazioni sui modelli utilizzati, sui parametri e valori associati, sulla origine e caratteristiche dei codici di calcolo (incluse le indicazioni sulla riconosciuta affidabilità degli stessi codici) e sul confronto fra risultati e livelli di prestazione;
- Programma per l'attuazione del sistema di gestione della sicurezza antincendio (SGSA), strumento documentale necessario ai fini dell'implementazione della me-

## 2. *L'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio*

Metodologia prestazionale, che per le attività a rischio di incidente rilevante riporta le specifiche modalità di attuazione delle misure di gestione della sicurezza antincendio, da attuare per evitare che si verifichi una riduzione del livello di sicurezza assicurato inizialmente. Viene inoltre stabilito che l'attuazione del sistema di gestione della sicurezza antincendio sia soggetta a verifiche periodiche da parte del personale del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco. La prima verifica del SGSA deve avvenire in concomitanza con il sopralluogo finalizzato al rilascio del Certificato di Prevenzione Incendi, mentre le verifiche successive avranno cadenza pari alla validità del CPI e, in ogni caso, non superiore a sei anni. Il SGSA è quindi uno strumento che può subire cambiamenti nel corso della vita di esercizio dell'attività, ma deve sempre essere tale da garantire all'attività in esame il medesimo livello di sicurezza inizialmente determinato ovvero tale da non ridurre le prestazioni attese e stabilite nel progetto.

Con l'approccio prestazionale si richiede infatti una maggiore attenzione, da parte dei titolari delle attività, nei confronti dell'aspetto gestionale connesso alla sicurezza antincendio. Inoltre, viste le numerose novità introdotte, il DM 09/05/2007 ritiene necessario attivare un apposito organismo di osservazione denominato *Osservatorio per l'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio* il quale opera nell'ambito della direzione centrale per la prevenzione e la sicurezza. Tale osservatorio ha come principale obiettivo quello di favorire la massima integrazione tra tutti i soggetti chiamati all'attuazione delle disposizioni inerenti l'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio, espletando a tale proposito attività di monitoraggio, adottando misure tese ad uniformare le modalità attuative dell'approccio prestazionale al procedimento di prevenzione incendi.

Le normative NTC 2008 e DM 09/03/2007, distinguono cinque livelli di prestazione da richiedere alla struttura in caso di incendio in funzione degli obiettivi prefissati:

- Livello 1 – Nessun requisito di resistenza specifico al fuoco dove le conseguenze del crollo delle strutture siano accettabili o dove il rischio di incendio sia trascurabile.
- Livello 2 – Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per un periodo sufficiente a garantire l'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro all'esterno della costruzione.
- Livello 3 – Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per un periodo congruo con la gestione dell'emergenza.
- Livello 4 – Requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per garantire, dopo la fine dell'incendio, un limitato danneggiamento delle strutture stesse.
- Livello 5 – Requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per garantire, dopo la fine dell'incendio, il mantenimento della totale funzionalità delle strutture stesse.

## 2.3 La Fire Safety Engineering

La Fire Safety Engineering (FSE), chiamata anche Ingegneria Antincendio, o Metodo Prestazionale, o Approccio Ingegneristico, o Performance-based Design, è una branca della progettazione ingegneristica applicata alle tematiche della sicurezza antincendio che consente di analizzare il fenomeno degli incendi in termini scientifici, al pari delle strutture e dei sistemi impiantistici. Permette infatti di predire la dinamica evolutiva dell'incendio tramite l'applicazione di idonei modelli di calcolo. Veniva inizialmente applicata ad insediamenti complessi come capannoni industriali o edifici di particolare rilevanza storica o architettonica, o ad attività non regolate da specifiche disposizioni antincendio o per le quali, seguendo il tradizionale approccio prescrittivo, era necessario attivare il procedimento di deroga con previsione di misure di sicurezza compensative.

L'approccio prestazionale alla sicurezza antincendio rende necessario formalizzare tutti i passaggi che conducono il professionista ad individuare le condizioni più rappresentative del rischio al quale l'edificio è l'attività in esame sono soggetti. Dopo la definizione degli scenari di incendio si passa poi al calcolo, cioè all'analisi quantitativa degli effetti dell'incendio, del comportamento umano e degli impianti attivi di estinzione. L'analisi quantitativa non deve necessariamente riguardare tutti gli aspetti antincendio ma può riferirsi anche solo alla sicurezza strutturale o all'evacuazione delle persone.

Da quando in Italia il DM 09/05/2007 ha consentito l'analisi prestazionale come metodo progettuale e grazie agli sviluppi normativi e alla diffusione di software particolarmente affidabili ad essa dedicati, la FSE si sta progressivamente affermando. Il DM 03/08/2015, cioè il Codice di Prevenzione Incendi, e le successive Regole Tecniche Verticali (RTV) a sua integrazione, hanno poi ampliato il ventaglio delle possibili applicazioni della FSE.

Tale metodo può essere applicato per:

- Quantificare le prestazioni delle misure corrispondenti alle **soluzioni conformi** (prescrittive) del Codice;
- Analizzare il livello di sicurezza equivalente delle **soluzioni alternative**;
- Dimostrare l'efficacia delle strategie antincendio in **deroga** alle soluzioni prescrittive.

Risulta chiaro quindi come la FSE possa essere applicata in ogni ambito, dal momento che le strategie antincendio possono classificarsi come soluzioni conformi, alternative o in deroga. Ai progettisti è lasciata la libertà di scelta tra: rispetto delle norme di sicurezza tradizionali o adozione di misure di sicurezza diverse, giustificate sulla base delle valutazioni effettuate secondo l'approccio ingegneristico.

## 2. L'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio

Nel campo del procedimento di deroga, in particolare, l'approccio prestazionale dimostra la sua indispensabilità, dal momento che al contrario degli altri approcci, è in grado di quantificare l'effetto che le misure di sicurezza avranno sull'evoluzione dell'incendio, e di dimostrare che è possibile raggiungere gli obiettivi di sicurezza anche con misure diverse da quelle previste dalla norma.

Esistono due macro tipologie che caratterizzano gli studi di FSE:

1. La sicurezza delle persone (life safety), che mira a definire il comportamento dell'incendio prima del flash-over;
2. La resistenza al fuoco, che mira a determinare la curva temperatura-tempo dell'ambiente dopo il flash-over (Figura 2.4).

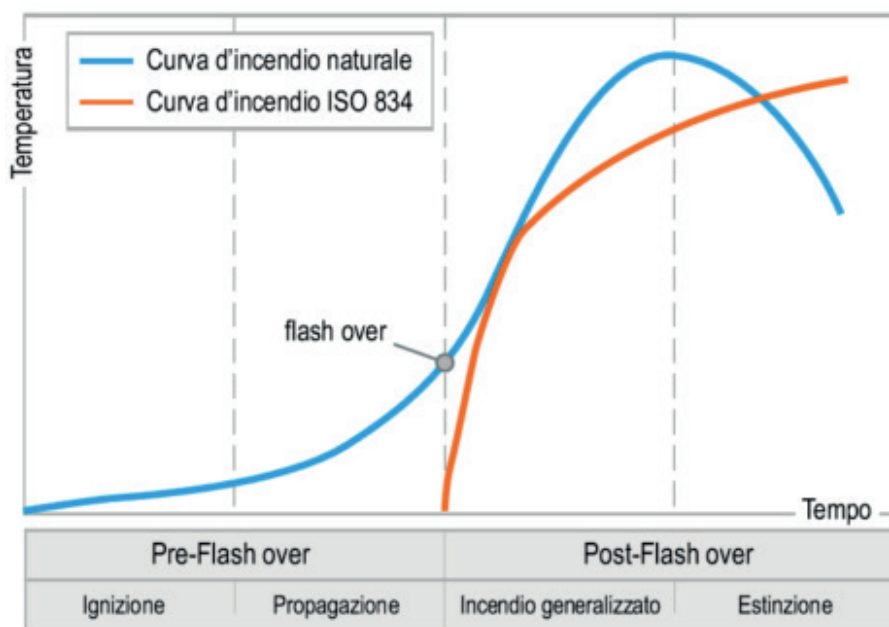


Figura 2.4 - Grafico dello sviluppo dell'incendio con le relative fasi. Confronto tra curva d'incendio naturale (per incendio generalizzato) e curva tempo-temperatura prevista dalla norma ISO 834

Definendo l'andamento della curva temperatura-tempo sulla base dei materiali presenti si può definire l'effettiva durata dell'incendio e le temperature coinvolte. Le curve rappresentate in Figura 2.4, si riferiscono: una, blu, alla curva naturale d'incendio, utile alla valutazione dei livelli di sicurezza mediante approccio prestazionale; l'altra, arancione, alla curva nominale d'incendio definita dalla norma ISO 834, utilizzata invece dall'approccio prescrittivo. In entrambi i casi, le curve permettono di verificare gli elementi con caratteristiche di resistenza al fuoco.



L'approccio ingegneristico su cui si basa la FSE è caratterizzato dai seguenti punti essenziali:

- Definizione di una metodologia di progettazione antincendio subordinata alla scelta di codici di calcolo idonei a schematizzare la situazione reale;
- Definizione degli scenari incidentali, in accordo con gli organi di controllo, su cui sviluppare le successive valutazioni;
- Valutazione oggettiva delle conseguenze di un incendio in relazione allo scenario prescelto e misura del livello di sicurezza presumibile.

In relazione agli obiettivi di sicurezza individuati, il progettista deve quindi indicare quali sono i parametri significativi (per esempio: temperature massime dei gas, livelli di visibilità, livelli di esposizione termica per le persone o per i materiali, ecc..) presi a riferimento per garantire il soddisfacimento degli obiettivi stessi. Successivamente devono essere quantificati i livelli di prestazione, valori numerici rispetto ai quali verificare i risultati attesi dal progetto. Tali valori possono essere desunti dalla letteratura tecnica condivisa tra cui, ad esempio, le norme ISO/TR 13387, BS 7974, il decreto del Ministero dei Lavori Pubblici 9/05/2001, ecc.. Nella ISO /TR 13387 ed nel BS 7974 si ritrova anche la definizione di ASET (Available Safe Egress Time) e RSET (Request Safe Egress Time), parametri attraverso i quali, relativamente alle condizioni di esodo, è possibile verificare la sicurezza raggiunta per gli occupanti. La valutazione della sicurezza secondo l'approccio prestazionale infatti deve consentire di verificare il rispetto della disequazione:  $ASET > RSET$ , cioè il tempo disponibile per l'esodo deve essere maggiore di quello ad esso necessario.

I progetti sviluppati con la FSE risultano però più costosi di quelli tradizionali, in quanto richiedono un alto livello di competenza al progettista e ai funzionari dei Vigili del Fuoco, dei tempi di elaborazione più lunghi, l'uso di software costosi, l'integrazione tra diverse discipline specialistiche e il coordinamento del team di progettazione. Tutti gli aspetti della sicurezza antincendio sono infatti connessi tra di loro, quindi il progettista deve avere a disposizione tutte le informazioni necessarie da parte del committente e degli altri membri del team.

Visti quindi gli elevati costi di tale tipo di progettazione, l'approccio prestazionale viene utilizzato di base solo nei casi in cui: il Comando dei Vigili del Fuoco richieda un approfondimento di determinati aspetti progettuali; le soluzioni alternative o in deroga garantiscano un notevole risparmio economico a parità di sicurezza antincendio; le caratteristiche dell'attività in esame risultino fuori dal campo di applicazione della normativa vigente o non sia possibile l'integrale osservanza di essa.

Tuttavia si ritiene che la FSE sia preferibile agli altri metodi di progettazione antincendio per le seguenti ragioni:

## 2. *L'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio*

- **Maggiore flessibilità** – la FSE viene utilizzata per dimostrare scientificamente che le soluzioni alternative o in deroga si possono adottare efficacemente al posto di quanto previsto dalle norme prescrittive. La maggiore flessibilità di questo tipo di progettazione antincendio permette di superare la rigidità delle norme tradizionali, spesso di ostacolo alla messa a norma delle attività esistenti, le quali ricorrono a continue proroghe piuttosto che adeguarsi alla normativa vigente (es. scuole, alberghi, ospedali, ecc..). Solo una ridotta percentuale di esse risulta infatti a norma e con CPI in vigore.
- **Estesa applicabilità** – la FSE è un metodo ingegneristico che quindi spazia a qualsiasi aspetto della sicurezza antincendio e può portare alla definizione di soluzioni progettuali differenti da quelle previste dal professionista, se si dimostrano equivalenti in termini di sicurezza, consentono un risparmio economico e risultano tecnicamente più semplici. La FSE può inoltre essere utilizzata per qualsiasi destinazione d'uso, sia pubblica che privata.
- **Basi scientifiche** – la FSE consente ai progettisti di utilizzare, qualora fosse conveniente e sempre dimostrandone il livello di sicurezza equivalente raggiungibile, normative straniere, articoli scientifici o ricerche sperimentali, ai quali fa riferimento anche il Codice di Prevenzione Incendi.
- **Costante aggiornamento** – la FSE si aggiorna continuamente e automaticamente con la pubblicazione di nuovi esperimenti o ricerche, con lo scopo di risolvere le problematiche presenti in ogni progetto specifico.
- **Inclusione** – la FSE approfondisce gli aspetti relativi alle limitazioni dei diversi soggetti che possono usufruire dell'attività in esame e considera le disabilità temporanee o permanenti al fine di progettare una sicurezza inclusiva. Attraverso le simulazioni di incendio e di esodo è possibile analizzare la sicurezza di tipologie di occupanti previsti nell'attività ma che non godono di particolari prescrizioni nella normativa (es. anziani, stranieri, bambini, ecc..). Il Codice prevede dei profili di rischio  $R_{vita}$  per gli occupanti ma la FSE permette al progettista di integrarli ulteriormente.
- **Risparmio economico su strutture e aumento del carico di incendio** – la FSE permette di dimostrare scientificamente che è possibile raggiungere per le misure di protezione attiva, per il sistema di esodo e per la corretta gestione e pianificazione delle emergenze, livelli prestazionali di sicurezza antincendio equivalenti a quelli delle "classi REI" richieste dalla norma. Alla resistenza al fuoco delle strutture vengono infatti assegnati tradizionalmente valori elevati, al fine di coprire con adeguato margine di sicurezza le variabili che possono caratterizzare ogni singolo progetto, ma questo rigore eccessivo ha comportato negli anni un notevole esborso da parte dei proprietari delle attività in questione, spesso non giustificato dal raggiungimento di un livello di sicurezza utile, dal momento che spesso una classe di resistenza al fuoco

elevata non incrementa le effettive condizioni di sicurezza di un'attività.

- Risparmio economico sui materiali di finitura – la FSE permette di analizzare dettagliatamente il comportamento al fuoco dei materiali attraverso modellazioni con software CFD (Computational Fluid Dynamics) sulla base di prove reali. Consente quindi in molti casi di non sostituire le finiture esistenti, di evitare rivestimenti protettivi incombustibili e di incrementare il carico di incendio rispetto al valore limite prefissato.
- Risparmio economico sulle opere di compartimentazione – la FSE permette di superare i limiti massimi di superficie dei compartimenti previsti dalle norme e di progettare compartimenti multipiano, dimostrandone preventivamente l'efficacia dal punto di vista della sicurezza antincendio.
- Risparmio economico nei componenti del sistema di esodo – la FSE permette di progettare un sistema di esodo più snello e razionale, calzato sul singolo caso specifico, in quanto a partire dal nuovo Codice la larghezza di esodo esula dai moduli di uscita di minimo 120 cm ma viene calcolata in millimetri in base al numero di occupanti. Attraverso l'applicazione di diverse misure compensative derivate dalle norme internazionali, permette anche di incrementare la lunghezza massima dei percorsi, di ridurre la larghezza delle vie di fuga ed il numero dei vani scala: si riduce dunque il numero dei casi in cui è obbligatoria la scala a prova di fumo o quella esterna, con conseguenti importanti risparmi economici. L'efficacia dei sistemi di esodo progettati si dimostra attraverso software che permettono di simulare l'evacuazione in diversi scenari di emergenza e configurazioni di utilizzo, analizzando la criticità e individuando di conseguenza idonee misure compensative, appropriate per lo specifico caso in esame e la tipologia di occupanti presenti.
- Risparmio economico nelle separazioni a prova di fumo – la FSE consente attraverso norme internazionali o simulazioni di incendio mediante software CFD (Computational Fluid Dynamics), di adottare soluzioni alternative a quella del filtro predisposta dalla normativa vigente per le separazioni a prova di fumo, dal momento che tale soluzione comporta costi aggiuntivi e problematiche dovute all'inserimento di condotti di aerazione per lo smaltimento dei fumi in edifici esistenti, spesso vincolati.
- Risparmio economico nelle misure di protezione attiva – la FSE, attraverso basi ingegneristiche idonee a dimostrare l'efficacia del sistema progettato, permette di ridurre le prestazioni delle misure di protezione attiva, con conseguenti risparmi legati alla realizzazione di sistemi di estinzione automatica degli incendi.
- Risparmio economico nell'aerazione ed evacuazione dei fumi e del calore – la FSE, sulla base del Codice, fornisce ai professionisti strumenti atti a determinare la migliore configurazione (conforme, alternativa o in deroga) del sistema di aerazione in

## 2. *L'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio*

rapporto ai vincoli esistenti ed agli obiettivi di progetto, differenziando i sistemi di smaltimento da quelli di evacuazione di fumo e calore.

- Valutazione del piano di emergenza e di evacuazione – la FSE, mediante le simulazioni di esodo, permette di verificare la correttezza del piano di evacuazione di un'attività, individuando e risolvendo progettualmente le criticità in vari scenari di emergenza. Attraverso la FSE è possibile seguire l'andamento di un incendio e la propagazione dei prodotti della combustione, e conoscere istante per istante la percentuale di sopravvivenza di una persona in un determinato ambiente. Permette quindi di giungere a piani di evacuazione ottimizzati, sicuri e fatti su misura per la specifica attività in esame.
- Ricerca delle cause di incendio – la FSE investiga le cause di incendio mediante la ricostruzione delle fasi di esso e la verifica o l'esclusione delle varie ipotesi incidentali.
- Applicazione agli edifici esistenti (tutelati dal punto di vista storico o architettonico) – la FSE può essere applicata agevolmente agli edifici sottoposti a vincolo o a quelli comunque caratterizzati da elementi architettonici o arredi di pregio, che raramente rientrano nelle prescrizioni delle normative vigenti. Il rispetto di tali regole risulta impossibile per alcuni motivi, per esempio: alcune caratteristiche come la resistenza al fuoco di elementi portanti storici sono difficilmente prevedibili, la realizzazione di reti impiantistiche per la protezione antincendio deturperebbe gli edifici di pregio storico-artistico, la larghezza minima di esodo potrebbe non essere garantita lungo i percorsi, ecc.. In questi casi la FSE mira a raggiungere gli obiettivi di sicurezza antincendio salvaguardando l'edificio tutelato ed i beni in esso contenuti.
- Migliore rappresentazione grafica – la FSE, attraverso una rappresentazione grafica curata delle strategie antincendio analizzate, permette di illustrare i ragionamenti alla base delle scelte progettuali fatte e di visualizzare immediatamente il livello di sicurezza antincendio garantito.

## L'esodo

*L'accertamento delle cause dell'incendio e l'individuazione delle responsabilità non servono ad evitare le vittime, solo attraverso la progettazione e la gestione della sicurezza si può in parte raggiungere questo obiettivo ed un Paese può essere degno di essere definito civile. A seguito dell'evoluzione della normativa verificatasi negli ultimi anni, la capacità dei modelli più raffinati di descrivere i comportamenti umani, ha reso ragionevole estenderne l'uso a nuovi ambiti della valutazione quantitativa del rischio e della gestione delle emergenze su larga scala.*

### 3.1 L'esodo tradizionale in Italia

**G**li incendi, per quanto si possa intervenire per limitare la loro frequenza, la loro furia devastante ed agire per contenere i loro effetti distruttivi, non si potranno mai eliminare, ma è stato sperimentato che realizzare una progettazione dell'esodo seria e consapevole e mantenere nel tempo le condizioni di sicurezza e di esercizio dei percorsi di esodo è imprescindibile per garantire la tutela delle persone.

È dunque necessario rispettare scrupolosamente la regolamentazione relativa ai sistemi di esodo, che devono consentire tempi di evacuazione sufficienti perché gli occupanti raggiungano il luogo sicuro senza essere esposti ai prodotti della combustione. In presenza di grandi folle, non basta infatti avere passaggi ed uscite di sicurezza regolamentari, ma è necessaria una gestione delle situazioni di emergenza dove il personale di servizio addetto alla sicurezza, sia specificamente formato e addestrato a gestire simili situazioni.

Dopo la tragedia del cinema Statuto di Torino che provocò 64 vittime, avvenuta del febbraio dell'83, solo pochi mesi dopo il grave incendio di Todi in cui persero la vita 39 persone, la prima reazione fu quella della Magistratura che oltre a ricercare le cause ed i colpevoli pose il problema dell'efficacia dei controlli. Da allora l'attività integrata tra i vari soggetti pubblici che in qualche modo partecipavano al sistema dei controlli subì una trasformazione, diventando penetrante, pervasiva e repressiva. Tale attività di con-

### 3. L'esodo

trollo in un primo tempo fu sì accolta con favore e largo consenso sociale ma col passare del tempo fu vista come ingombrante ed un ostacolo al vivere sociale generando quasi un senso di ostilità.

La prevenzione è d'altro canto conveniente, in quanto contribuisce a ridurre il tributo di vite umane ed anche i costi socio-economici che i disastri comportano. I benefici della prevenzione non sono immediatamente spendibili nè contabilizzabili nel bilancio di un'azienda, lo sono però nell'economia complessiva del corpo sociale e nella tenuta di quegli equilibri che legano una comunità.

In Italia le norme che per la prima volta hanno regolato la scelta delle misure di sicurezza per l'esodo, risalgono agli anni '50 del XX secolo e non sembrano essere state precedute da attività di ricerca. Probabilmente quindi, si sono ispirate a quanto si stava già affermando da diversi decenni negli Stati Uniti, dove la regolamentazione antincendio aveva iniziato a diffondersi già dalla fine del XIX secolo, in concomitanza con la realizzazione dei primi edifici alti.

Dalle prime norme americane si evince che le vie di esodo dovessero essere dimensionate in base alla loro *capacità*, riferita alla popolazione presente su un piano che doveva evacuare. Pertanto, la larghezza delle rampe di ogni singolo piano doveva essere tale da contenere il numero di persone previsto sul piano stesso. Nel 1913 si ipotizzò che la larghezza di riferimento fosse di 22 pollici (55,88 cm), secondo la previsione che le persone dovessero rimanere in piedi affiancate su ogni gradino. Gli studi si evolsero poi passando da un criterio di valutazione puramente capacitivo, a quello di **flusso** delle persone durante l'incendio, con una correlazione tra larghezza dei percorsi e velocità delle persone. Si ipotizzò inizialmente un flusso di 45 persone al minuto attraverso uscite larghe 22 pollici, fino ad arrivare, dopo un dibattito allargatosi tra gli anni '40 e '50 anche ad altri paesi, alla conclusione che in corrispondenza di densità maggiori la velocità di flusso decrescesse rispetto alle normali condizioni, per cui sarebbe risultato un flusso di 26 persone al minuto attraverso uscite di 22 pollici.

L'iter normativo che ha regolato l'esodo in Italia, in particolare, è stato il seguente:

- 1905 – elaborazione del *Modello a corsie*;
- 1951 – regolazione dell'esodo nei *luoghi di pubblico spettacolo*, attraverso la Circolare n.16;
- 1970-71 – superamento del Modello a corsie del 1905: si comprende che il flusso degli occupanti nelle vie d'esodo non dipende in modo discontinuo dal numero dei moduli di uscita (unit-width);
- 1986 – pubblicazione del manuale *Introduzione alla prevenzione incendi*, ad opera di A. Cascarino. In questo testo, Casarino illustra un modello matematico capacitivo

per calcolare i sistemi di vie d'esodo, che a prescindere dalla tipologia delle persone e dal tasso di crescita dell'incendio, interpreta il fenomeno del flusso delle persone attraverso varchi in un tempo di esodo predeterminato di un secondo.

Negli anni successivi la normativa si è evoluta con la realizzazione di nuove prove sperimentali e la predisposizione di nuovi modelli interpretativi. L'attenzione si è concentrata nelle prime fasi dell'incendio tenuto conto del tasso di crescita dell'incendio e delle diverse tipologie degli occupanti.

I nuovi metodi e modelli di progettazione superano e migliorano il modello tradizionale italiano per l'esodo, che appare oggi obsoleto. Le regole tecniche infatti:

- impiegano il *modello a corsie* (cioè a moduli) del 1905, considerato superato già dal 1970, che viene sostituito nel nuovo Codice dal *modello a misure unitarie*, con diretta proporzionalità tra larghezza della via d'esodo e numero degli occupanti che la impiegano (mm/persona) tenuto conto del profilo di  $R_{vita}$ ;
- non considerano il fenomeno della riduzione della larghezza efficace delle vie di esodo, anticipato dalle normative internazionali (in particolare *ISO 13571* del 2012 e *ISO/TR 16738* del 2009) e rispreso dal DM del 2015. Infatti si è dimostrato necessario tenere in considerazione che gli occupanti che si muovono in una via d'esodo non impieghino la totalità della larghezza di essa, ma mantengano una certa distanza dalle pareti, per cui solo la porzione centrale delle vie d'esodo viene efficacemente impiegata;
- impiegano regole empiriche per cui si considerava il tempo di esodo cautelativo pari ad un minuto (mostratosi inaccettabile nei casi di incendi ultra rapidi od in presenza di persone disabili), anacronistico in confronto ai metodi quantitativi  $ASET > RSET$ ;
- prevedono un dimensionamento tradizionale delle vie di esodo basato sulla popolazione mediamente abile, concetto oggi inaccettabile che è stato sostituito in favore della progettazione inclusiva.

Il DM 03/08/2015 – Nuovo Codice di Prevenzione Incendi, mediante l'uso dell'approccio ingegneristico, si pone l'obiettivo di rinnovare la tradizione. Una delle novità più significative da esso apportate consiste nella verifica del livello di sicurezza, effettuata confrontando i tempi di esodo con i tempi di compatibilità della permanenza delle persone nell'ambiente. Il calcolo dei tempi di esodo in questo processo ingegneristico, infatti, è svolto con modelli di tipo deterministico, che utilizzano i dati di velocità di marcia delle persone ed i dati sul loro comportamento, per stimare i tempi di allontanamento dalle aree a rischio. Più ci si allontana dagli scenari ordinari di esodo, più l'applicazione del metodo convenzionale, che non tiene conto degli effetti dei comportamenti e delle interazioni tra individui, riduce la precisione dei risultati e la loro aderenza ai comportamenti attesi.

## 3.2 L'esodo innovativo secondo il Nuovo Codice di Prevenzione Incendi

Il Nuovo Codice di Prevenzione Incendi (DM 03/08/2015), reimposta la valutazione dei requisiti necessari per le vie di fuga su standard allineati a quelli europei. Era diventato necessario, infatti, poter individuare una sorta di *Testo Unico della Prevenzione Incendi (RTO)*, per dare risposta e trovare semplificazione alla stratificazione di norme e provvedimenti accumulatisi negli ultimi anni per le attività di tipo civile, in modo da uniformare le soluzioni tecniche a criteri e scelte di tipo prestazionale già consolidate negli altri Paesi europei.

Il DM 03/08/2015, con riferimento a normative presenti nel resto dell'Europa, relativamente allo studio dell'esodo, delle vie di fuga e dell'affollamento, può beneficiare di strumenti di analisi flessibili, dotati di maggiore facilità di applicazione ordinaria, anche e soprattutto in tutte le attività antincendio che non trovano soluzione diretta nelle Regole Tecniche precedentemente in vigore e che oggi per essere applicate richiederebbero il ricorso alla Deroga (per esempio: edifici vincolati, edifici alti, edifici che per affollamento rivestono funzioni strategiche come ospedali o scuole, ecc..).

In Gran Bretagna, Francia e Germania, avevano preso piede da qualche anno modelli di calcolo come FDS + EVAC, che simulano il movimento delle persone in caso d'incendio. Utilizzando questi modelli è possibile prevedere il tempo di fuga ed il numero di persone presenti in qualsiasi momento ed in qualsiasi punto dell'edificio. Inoltre, anche se il risultato della simulazione dimostra che tutti gli occupanti riuscirebbero a fuggire in modo sicuro entro un tempo ragionevole, è possibile verificare i risultati di tali modelli con metodi teorici.

Il DM 03/08/2015 contiene due capitoli dedicati all'esodo ed alla salvaguardia della vita umana, in particolare:

- **Capitolo S.4:** *Strategia Antincendio – Esodo*
- **Capitolo M.3:** *Metodi – Salvaguardia della vita con la progettazione prestazionale*

Tali capitoli risultano tra le parti che propongono maggiore evoluzione dal metodo prescrittivo presente nelle Regole Tecniche precedentemente in vigore, e nuovi metodi prestazionali basati su analisi e considerazioni evolute, a cura del professionista.

La finalità del sistema di esodo progettato nel Nuovo Codice è quella di assicurare che gli occupanti possano raggiungere o permanere in un *luogo sicuro* (pubblica via o luogo non soggetto agli effetti dell'incendio in ogni caso collegato alla pubblica via - definizione da RTO) a prescindere dall'intervento dei Vigili del Fuoco. La novità risiede nel



termine *permanere*, e cioè il Nuovo Codice prevede che agli occupanti venga garantita protezione dall'incendio anche all'interno dell'attività, a patto che raggiungano un luogo sicuro.

Le procedure ammesse per l'esodo, accuratamente definite nel paragrafo G.1.9 del capitolo G.1 del Codice, sono le seguenti:

- esodo simultaneo – *modalità di esodo che prevede lo spostamento contemporaneo degli occupanti fino a luogo sicuro;*
- esodo per fasi (attuato soprattutto in edifici alti, centri commerciali, ecc..) – *modalità di esodo di una struttura organizzata con più compartimenti, in cui l'evacuazione degli occupanti fino a luogo sicuro avviene in successione dopo l'evacuazione del compartimento di primo innesco. Si attua con l'ausilio di misure antincendio di protezione attiva, passiva e gestionali;*
- esodo orizzontale progressivo (attuato soprattutto in ospedali, ecc..) – *modalità di esodo che prevede lo spostamento degli occupanti dal compartimento di primo innesco in un compartimento adiacente capace di contenerli e proteggerli fino a quando l'incendio non sia estinto o fino a che non si proceda ad una successiva evacuazione verso luogo sicuro;*
- protezione sul posto (attuata in luoghi come aerostazioni, ecc..) – *modalità di esodo che prevede la protezione degli occupanti nel compartimento in cui si trovano.*

In particolare i concetti di *esodo per fasi* e *protezione sul posto*, non erano stato fino ad ora contemplati dalle precedenti normative.

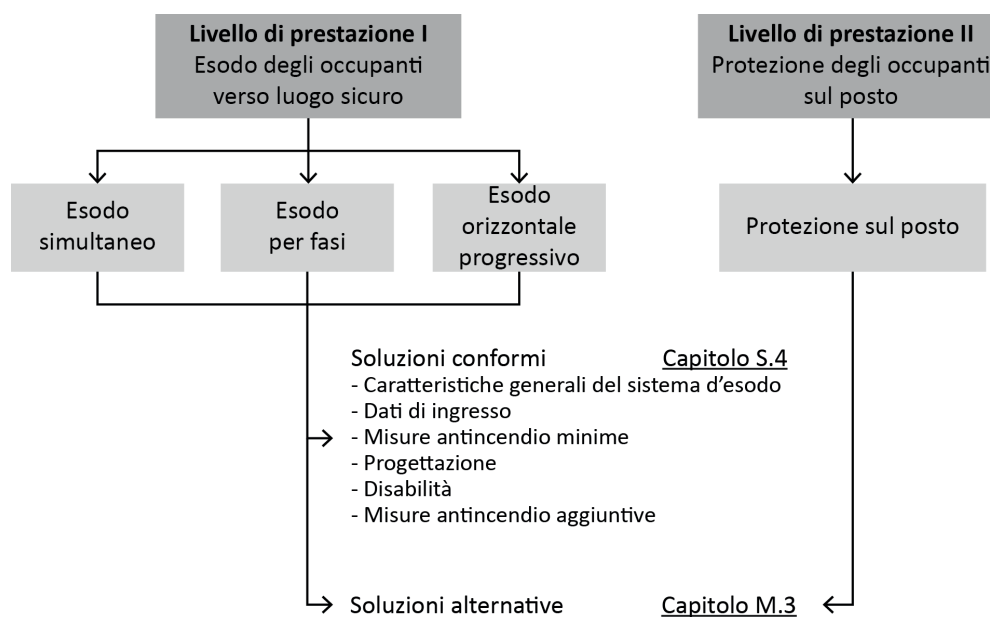


Figura 3.1 - Schema: soluzioni previste dal Codice per l'esodo degli occupanti

### 3. L'esodo

Il DM 03/08/2015 rappresenta una vera e propria rivoluzione nel panorama nazionale in merito alla sicurezza in caso di incendio nelle attività soggette al DPR 151/2011.

Nel capitolo S.4 del Codice, sono riportati i livelli di prestazione per l'esodo, attribuibili alle opere da costruzione, individuati con numero romano (I, II) e graduati in funzione della complessità crescente delle prestazioni previste, cioè più è alto il livello, più saranno alte le restrizioni. Attraverso i i profili di rischio  $R_{vita}$ ,  $R_{beni}$  ed  $R_{ambiente}$ , si attribuisce ad ogni ambito dell'attività un livello di prestazione per la reazione al fuoco dei materiali, da questi dati dipende l'entità delle misure antincendio necessarie. Gli obiettivi principali della nuova prevenzione incendi sono infatti la salvaguardia della vita umana (definita da  $R_{vita}$ ); la salvaguardia dei beni (definita da  $R_{beni}$ ); la salvaguardia dell'ambiente (definita da  $R_{ambiente}$ ).

Il profilo di rischio  $R_{vita}$  in particolare, da cui dipende la progettazione della larghezza e della lunghezza delle vie di esodo, si valuta sulla base di due elementi fondamentali che incidono sulla scelta di misure e soluzioni di prevenzione incendi: le caratteristiche fisico-mentali degli occupanti (cioè se conoscono l'edificio, se sono in stato di veglia oppure no, se sono sottoposti a cure mediche, ecc.); la velocità prevalente di crescita dell'incendio.

La larghezza totale delle vie di esodo, che precedentemente era fissata come minimo a 1200 mm, si individua ora moltiplicando il valore di  $R_{vita}$  (larghezza unitaria in mm/persona) per il numero degli occupanti che impiegano i percorsi di esodo. I valori della larghezza unitaria possono però essere ridotti, integrando il progetto con misure antincendio aggiuntive, in modo da consentire un maggior affollamento nel compartimento esaminato, per esempio: l'installazione di un impianto di rilevazione e allarme degli incendi, l'installazione di un sistema di evacuazione di fumo e calore o la verifica che altezza media del compartimento, servito dalle vie di esodo in progetto, sia maggiore di 3 metri.

Per quanto riguarda i valori massimi della lunghezza delle vie di esodo e dei corridoi ciechi, il progettista determina anch'essi in funzione di  $R_{vita}$ , ma è lasciato libero di incrementarli ricorrendo a misure antincendio aggiuntive. Inoltre viene introdotta la possibilità di individuare vie di esodo indipendenti mediante la regola della *filo teso* con angolo minimo pari a 45°.

Per ogni livello di prestazione di ciascuna misura antincendio, sono poi previste diverse soluzioni progettuali, l'applicazione delle quali deve garantire il raggiungimento del livello di prestazione richiesto:

1. Soluzioni conformi;
2. Soluzioni alternative;
3. Soluzioni in deroga.

Le *soluzioni conformi* sono le più facili da applicare, prevedono valutazioni e calcoli semplici e non è obbligato fornire ulteriori valutazioni tecniche per dimostrare il raggiungimento del collegato livello di prestazione. Sono ottime per ridurre i tempi di stesura della relazione tecnica, ma sono caratterizzate da alcune limitazioni e condizioni di utilizzo.

Soluzioni conformi per il livello di prestazione I – il sistema d'esodo deve essere progettato nel rispetto di numerosi parametri semi-prestazionali, governati principalmente dall' $R_{vita}$  e dall'affollamento. Tra questi troviamo ad esempio: le caratteristiche delle porte lungo le vie d'esodo, la densità di affollamento, il numero minimo di vie d'esodo ed uscite indipendenti, le lunghezze d'esodo e dei corridoi ciechi, il calcolo della larghezza minima delle vie d'esodo orizzontali e verticali, la verifica di ridondanza delle vie d'esodo orizzontali e verticali, il numero minimo di vie d'esodo orizzontali e verticali indipendenti, il calcolo della larghezza minima delle uscite finali e la gestione dell'esodo in presenza di occupanti con disabilità.

Soluzioni conformi per il livello di prestazione II – non è indicata, quindi si deve obbligatoriamente ricorrere alle soluzioni alternative.

Se la soluzione conforme risulta essere troppo vincolante e/o troppo onerosa nelle opere di adeguamento, la normativa prevede un strada alternativa a quella prescrittiva e la Fire Safety Engineering la percorre.

Le *soluzioni alternative* permettono di calcolare esattamente i tempi necessari all'esodo degli occupanti, modellando l'edificio nel suo insieme ed inserendo l'affollamento massimo, per poi confrontare il tempo necessario all'esodo (RSET = Required Safe Escape Time) con quello disponibile dagli scenari di incendio più rilevanti (ASET = Available Safe Escape Time). Tipicamente questo si traduce in possibilità di aumentare l'affollamento nei locali, regolarizzare situazioni con corridoi ciechi troppo lunghi e/o vie d'esodo in numero non sufficiente. Così come porte troppo strette o non apribili nel verso dell'esodo.

Se si fa ricorso alle soluzioni alternative si è tenuti a dimostrare il raggiungimento del collegato livello di prestazione, impiegando uno dei metodi di progettazione della sicurezza antincendio ammessi per ciascuna misura antincendio. Queste soluzioni, al fine di consentire la valutazione di tale dimostrazione da parte del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, possono essere impiegate solo nelle attività con valutazione del progetto (cat. B,C del DPR 151/2011), oppure in caso di deroga (Cat. A del DPR 151/2011).

Se non possono essere efficacemente applicate né le soluzioni conformi, né le soluzioni alternative, si può ricorrere al procedimento di deroga secondo le procedure previste dalla vigente normativa. Per le *soluzioni in deroga* si è tenuti a dimostrare il raggiungimento dei pertinenti obiettivi di prevenzione incendi, impiegando uno dei metodi

### 3. L'esodo

di progettazione della sicurezza antincendio previsti nel capitolo G.2 del Codice.

Un'applicazione della *soluzione conforme* e della *soluzione alternativa*, è presente ai *Capitoli 6.3 e 6.4* del presente testo.

Grazie al DM 03/08/2015, l'ingegneria della sicurezza antincendio (FSE) diventa metodologia principe per l'applicazione di flessibilità alla progettazione della sicurezza antincendio, costituisce cioè la soluzione alternativa. Qualora si impieghi la FSE in progettazione ordinaria, cioè non in deroga, il progettista è tenuto al rispetto di procedure, ipotesi e limiti cogenti indicati nei capitoli M.1, M.2, M.3.

Nell'applicazione del metodo prestazionale alla sicurezza antincendio per la salvaguardia della vita, gli obiettivi del professionista antincendio possono essere:

- la dimostrazione diretta ed esplicita della possibilità per tutti gli occupanti di un'attività di raggiungere o permanere in un luogo sicuro, senza che ciò sia impedito da una eccessiva esposizione ai prodotti dell'incendio;
- la dimostrazione della possibilità per i soccorritori di operare in sicurezza, secondo le indicazioni presenti nel capitolo M.3.

Infatti nel capitolo M.3 del Codice, viene introdotto un nuovo concetto di progettazione prestazionale del sistema di vie d'esodo (*Figura 6.26*), che consiste sostanzialmente nel calcolo e nel confronto tra due intervalli di tempo così definiti:

- **ASET** = tempo disponibile per l'esodo (Available Safe Escape Time);
- **RSET** = tempo richiesto per l'esodo (Required Safe Escape Time).

Si considera efficace il sistema d'esodo se **ASET > RSET**, cioè se il tempo a disposizione per l'esodo risulta maggiore del tempo minimo necessario per l'esodo. La differenza tra i due intervalli di tempo, *margin*e di sicurezza della progettazione prestazionale per la salvaguardia della vita, a meno di specifiche valutazioni deve essere  $\geq 100\%$  RSET, in caso di specifiche considerazioni è accettabile ridurlo a  $\geq 10\%$  RSET, ma in ogni caso non deve mai essere inferiore a 30 secondi.

ASET dipende strettamente dalle interazioni all'interno del sistema incendio-edificio-occupanti: l'incendio si innesca, si propaga e diffonde nell'edificio i suoi prodotti, fumi e calore. Gli occupanti sono esposti agli effetti dell'incendio in relazione alle attività che svolgono, alla loro posizione iniziale, al loro percorso nell'edificio ed alla loro condizione fisica e psicologica. Questo comporta che ciascun occupante possiede un proprio valore di ASET, che può essere determinato con modelli di calcolo numerico o assumendo ipotesi semplificative.

RSET si calcola tra l'innesco dell'incendio ed il momento in cui gli occupanti dell'edificio raggiungono un luogo sicuro. Anche RSET dipende dalle interazioni all'interno del

sistema incendio-edificio-occupanti: la fuga degli occupanti è fortemente influenzata dalle geometrie dell'edificio ed è rallentata dagli effetti dell'incendio. Il riferimento normativo per il calcolo di RSET è la **ISO/TR 16738**. RSET è dato dalla somma delle seguenti componenti:

- Il tempo di rivelazione (detection time);
- Il tempo di allarme generale (alarm time);
- Il tempo di pre-movimento (pre-travel activity time, PTAT);
- Il tempo di movimento (travel time) – calcolato mediante i software di modellazione dell'esodo.

Il nuovo Codice razionalizza dunque il quadro normativo vigente e fornisce, a parità di sicurezza, strumenti più flessibili per rispondere alle esigenze del mercato, cioè ad ogni prestazione di sicurezza antincendio richiesta all'attività corrisponde sempre la proposta di molteplici soluzioni progettuali prescrittive o prestazionali. Introduce novità tecniche che consentono al progettista di disporre di ulteriori e alternativi strumenti nella progettazione di nuove attività e nell'adeguamento alla sicurezza antincendio delle attività esistenti. Con il DM 03/08/2015, viene inoltre introdotto in Italia un nuovo modello per l'esodo basato su metodi quantitativi frutto dell'evidenza scientifica e su dati di input aggiornati.

### 3.3 L'esodo nelle scuole: differenze tra DM 26/08/1992 e DM 07/08/2017

L'art. 2 del **DM 07/08/2017** *Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi per le attività scolastiche, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139*, disciplina il campo di applicazione del decreto. Esso infatti si può applicare alle attività scolastiche, ad esclusione degli asili nido, individuate al numero 67, del DPR del 1° agosto 2011, n. 151, (*Tabella 3.1 e 3.2*) esistenti alla data di entrata in vigore del decreto ed a quelle di nuova realizzazione, in alternativa alle specifiche disposizioni di prevenzione incendi di cui al **DM 26/08/1992** *Norme di prevenzione incendi per l'edilizia scolastica*.

N.	[*]	Attività	Categoria		
			A	B	C
67	85	Scuole di ogni ordine, grado e tipo, collegi, accademie con oltre 100 persone presenti; Asili nido con oltre 30 persone presenti.	Fino a 150 persone	Oltre 150 e fino a 300 persone; asili nido	Oltre 300 persone
[*] Vecchi codici corrispondenti alle attività soggette di cui al DM 16/02/1982, come dalla tabella di equiparazione di cui all'allegato II al DPR n. 151/2011.					

Tabella 3.1 - Elenco delle attività soggette alle visite e ai controlli di prevenzione incendi (Allegato I al DPR 151/2011 - art.2, comma 2)

Attività	Sottocl.	Cat. DPR	Descrizione attività	Descrizione sottoclasse
67	1	A	Scuole di ogni ordine, grado e tipo, collegi, accademie con oltre 100 persone presenti; asili nido con oltre 30 persone presenti	Fino a 150 persone
	2	B	Scuole di ogni ordine, grado e tipo, collegi, accademie con oltre 100 persone presenti; asili nido con oltre 30 persone presenti	Oltre 150 e fino a 300 persone
	3	B	Scuole di ogni ordine, grado e tipo, collegi, accademie con oltre 100 persone presenti; asili nido con oltre 30 persone presenti	Asili nido
	4	C	Scuole di ogni ordine, grado e tipo, collegi, accademie con oltre 100 persone presenti; asili nido con oltre 30 persone presenti	Oltre 300 persone

Tabella 3.2 - Tabella di sottoclassificazione delle attività di cui all'allegato I del DPR 151/2011 (Allegato III al DM 07/08/2012)

Dopo il DPR 151/2011, viene data una definizione più dettagliata delle attività nel DM 07/08/2012, in cui si rilevano ulteriori distinzioni all'interno delle categorie determinate per ogni attività.

Prima del DM 07/08/2017 (RTV), che dedica il capitolo V.7 alle attività scolastiche, la normativa di riferimento utilizzata era:

- DM 26/08/1992 *Norme di prevenzione incendi per l'edilizia scolastica* e allegato;
- L.C. P2244/4122 sott. 32 del 30/10/1996.

Il DM 26/08/1992 prevedeva che le scuole fossero suddivise in relazione alle presenze effettive contemporaneamente in essere prevedibili, di alunni e di personale docente e non docente. Ogni edificio, facente parte di un complesso scolastico e non comunicante con altri edifici, rientrava quindi nella categoria riferita al proprio affollamento (*Tabella 3.3*).

La nuova RTV del 2017 prevede invece una classificazione in base non solo al presunto affollamento, ma anche alla massima quota dei piani degli edifici (*Tabella 3.4*).

Tipo	Affollamento previsto
0	fino a 100 persone (vi corrispondono particolari norme di sicurezza)
1	da 101 a 300 persone
2	da 301 a 500 persone
3	da 501 a 800 persone
4	da 801 a 1200 persone
5	oltre 1200 persone

Tabella 3.3 - Categorizzazione delle scuole in base all'affollamento previsto (DM 26/08/1992)

N. degli occupanti		Massima quota dei piani	
OA	100 < n ≤ 300 occupanti	HA	h ≤ 12 m
OB	300 < n ≤ 500 occupanti	HB	12 m < h ≤ 24 m
OC	500 < n ≤ 800 occupanti	HC	24 m < h ≤ 32 m
OD	800 < n ≤ 1200 occupanti	HD	32 m < h ≤ 54 m
OE	n > 1200 occupanti	HE	h > 54 m

Tabella 3.4 - Categorizzazione delle scuole in base ad affollamento previsto e quota massima dei piani degli edifici (DM 07/08/2017)

### 3. *L'esodo*

Inoltre le aree dell'attività vengono classificate come segue:

- TA: locali destinati ad attività didattica e spazi comuni;
- TM: depositi o archivi di superficie lorda maggiore di 25 m<sup>2</sup> e carico di incendio specifico  $q_f > 600 \text{ MJ/m}^2$ ;
- TO: locali con affollamento maggiore di 100 persone (per esempio aula magna, mensa, ecc.);
- TK: locali ove si detengano o trattino sostanze o miscele pericolose o si effettuino lavorazioni pericolose ai fini dell'incendio o dell'esplosione; locali con carico di incendio specifico  $q_f > 1200 \text{ MJ/m}^2$  (per esempio laboratori chimici, officine, sale prova motori, ecc..) – sono considerate aree a rischio specifico;
- TT: locali in cui siano presenti quantità significative di apparecchiature elettriche ed elettroniche, locali tecnici rilevanti ai fini della sicurezza antincendio (per esempio centri elaborazione dati, stamperie, cabine elettriche, ecc..) – le aule di informatica possono rientrare sia in TA che in TT, in tal caso devono rispettare tutte le relative prescrizioni;
- TZ: altre aree.

Dopo la classificazione dell'attività scolastica secondo quanto prescritto dalla RTV (*Tabella 3.4*), la RTO di riferimento (DM 03/08/2015) prevede la definizione dei profili di rischio illustrati nel capitolo G.3:

- $R_{vita}$  – per la salvaguardia della vita umana (attribuito per ciascun compartimento). Tale profilo dipende da fattori quali:  $\delta_{occ}$ , riferito alle caratteristiche prevalenti (cioè più rappresentative) degli occupanti che si trovano nel compartimento antincendio; e  $\delta\alpha$ , riferita alla velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio nel tempo  $t\alpha$  [s] impiegato dalla potenza termica per raggiungere 1000 kW;
- $R_{beni}$  – per la salvaguardia dei beni artistici e strategici (attribuito per l'intera attività);
- $R_{ambiente}$  – per la tutela dell'ambiente (attribuito per l'intera attività).

Questi profili di rischio non sono previsti invece dal DM 26/08/1992.

La RTV prevede anche che le misure di rivelazione dell'incendio e di allarme e la resistenza al fuoco dei compartimenti di cui è costituita l'attività in esame, dipendano dalla suddetta classificazione dell'attività stessa, mentre che le caratteristiche di compartimentazione e le misure di controllo dell'incendio, siano definite a seconda delle singole aree presenti nell'attività (precedentemente descritte).

Per quanto riguarda la resistenza al fuoco, il DM 26/08/1992 prevede invece che la classe di resistenza al fuoco venga definita in base al carico di incendio specifico di



progetto, e che la classe R delle strutture portanti e REI delle strutture separanti dipenda dall'altezza antincendio dell'edificio (in particolare distinguendo gli edifici con altezza fino a 24 metri e gli edifici con altezza superiore a 24 metri). In questo ambito il DM del 1992 risulta spesso più restrittivo della RTV.

Un'altra differenza tra le due normative risiede nella determinazione della superficie massima di compartimentazione: secondo il DM del 1992 essa dipende dall'altezza antincendio dell'edificio, mentre secondo la RTV dipende dall' $R_{vita}$  dell'edificio stesso. Anche in questo caso le prescrizioni del DM 26/08/1992 possono risultare più restrittive.

Infine relativamente agli impianti fissi di rilevazione e/o di estinzione degli incendi, il DM 26/08/1992 dà indicazioni limitatamente agli ambienti od ai locali il cui carico d'incendio superi i  $30 \text{ kg/m}^2$ , dove deve essere installato un impianto di rivelazione automatica d'incendio; la RTV definisce invece il livello di prestazione sulla base della classificazione dell'attività in esame. Il DM del 1992 ancora una volta risulta più restrittivo.

### 3.4 La pianificazione dei sistemi di esodo

In caso di incendio, per poter garantire la sicurezza degli occupanti, è fondamentale che venga resa possibile una rapida ed ordinata evacuazione dalla struttura in cui si trovano. Questo risulta difficile, dal momento che il comportamento della folla (per esempio le capacità psicomotorie o le reazioni psicologiche), il numero degli occupanti e la loro distribuzione all'interno dell'edificio, sono spesso imprevedibili. Tali fattori sono critici in quanto condizionano il fenomeno dell'evacuazione ma risultano aleatori, rendendo così necessaria l'attivazione di studi di **pianificazione dell'esodo**. Questa pianificazione, a seconda della struttura in esame e dei suoi occupanti, deve prevedere quali siano le misure di prevenzione più idonee da adottare. La pianificazione dell'esodo deve essere semplice e chiara, in accordo con le naturali tendenze dell'uomo, e deve consentire ad ogni persona di potersi mettere in salvo da sola.

Le misure per realizzare una corretta evacuazione vanno studiate e messe in atto preventivamente, perchè una volta sviluppatosi un incendio la prima reazione degli utenti sarà quella di allontanarsi al più presto dal luogo del pericolo in maniera disordinata, presi dal panico e, per lo più, incautamente.

La norma stabilisce il numero delle vie di esodo, la loro collocazione e la distanza possibile rispetto ai tempi di sfollamento attuabili in orizzontale o in verticale, teorizzati in modo che risultino inferiori al tempo che impiega un qualsiasi incendio per avere effetti dannosi su chi vi è coinvolto.

È necessario prestare particolare attenzione alla gestione globale degli edifici, mantenendo sempre sgombre le vie di fuga e le uscite, aspetto che riguarda la responsabilità personale più che i criteri normativi, e che si scontra con il generalizzato disinteresse della gente. L'esodo delle persone dall'interno di un edificio va considerato sia in senso orizzontale che in senso verticale (discesa dalle scale). In tutti i casi un ruolo determinante nell'evacuazione è rappresentato dalla **gestione della sicurezza**, cioè dall'insieme delle operazioni che consentono di effettuare un esodo ordinato dell'edificio senza che gli occupanti vengano presi dal panico. La gestione inizia con la predisposizione di un accurato piano di evacuazione che analizzi le vie di fuga, predisponga un'adeguata segnaletica di sicurezza (considerando anche la presenza di portatori di handicap visivi o sonori), distribuisca tutte le informazioni necessarie a sapersi orientare ed individui i compiti dei diversi responsabili.

Inoltre in assenza di un'adeguata pianificazione dell'esodo, lo sfollamento di emergenza può trasformarsi da evacuazione da normale, caratterizzata da un moto ordinato e direzionale della folla, a sfollamento di panico, caratterizzato da un moto precipitoso e disordinato che inizia in vari punti contemporaneamente ed è caratterizzato

dal predominio dei fattori fisici, che causa una tale densità di persone in prossimità delle uscite, da provocare l'arresto di esse ed il ricorso ad azioni sconsiderate, a danno proprio od altrui, nel tentativo di guadagnare la salvezza. Infatti un fattore fondamentale che condiziona l'esodo è dato dalle *reazioni psicologiche* degli occupanti.

Questa condizione di rallentamento e arresto in prossimità delle vie di uscita, è fisicamente assimilabile ad una corrente d'acqua che in corrispondenza di restringimenti di sezione o curve, provoca moti turbinosi di alcune particelle, rallentando anche il moto di quelle in arrivo. Analogamente il flusso delle persone è costituito da particelle, *corpi ellisse* (Figura 3.2), che procedono prima lontane, poi sempre più vicine fino a toccarsi. In prossimità di un restringimento di sezione (per esempio una porta di uscita), tali particelle si assebrano riducendo la propria area fino ad un minimo di  $0,22 \text{ m}^2$  e disponendosi ad arco: questo fenomeno è infatti conosciuto come *effetto arco* (Figura 3.3).

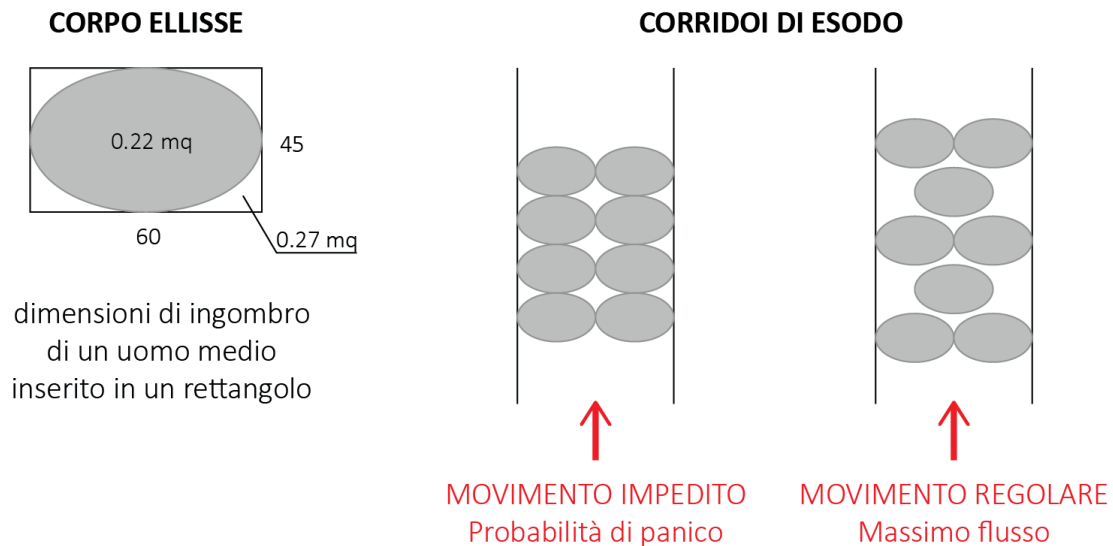


Figura 3.2 - Corpo ellisse e corridoi di esodo: condizioni sfavorevoli e favorevoli di percorrenza

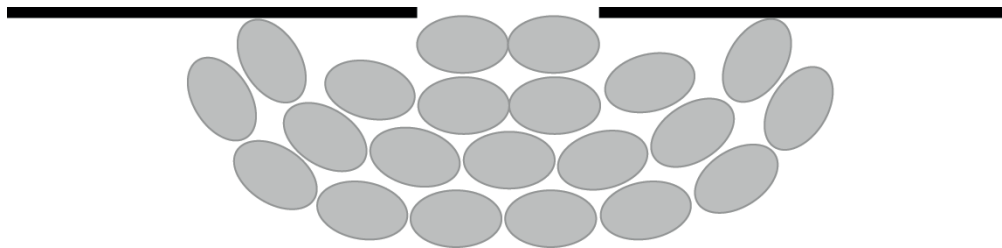


Figura 3.3 - Schematizzazione dell'effetto arco

### 3. L'esodo

Per quanto riguarda la definizione delle misure antropometriche medie del corpo umano, si fa riferimento alle norme tecniche UNI EN 547-1:1998 *Misure del corpo umano*. In queste norme la superficie occupata da una persona viene identificata come una superficie ellittica, proiezione verticale del corpo umano, avente l'asse maggiore pari a 60 cm e l'asse minore pari a 45 cm. Tale ellisse racchiude un'area di 0,22 m<sup>2</sup>. Il corpo ellisse può essere iscritto in un rettangolo di lato cm 60 x cm 45, che equivale ad un'area di 0,27 m<sup>2</sup>, superficie che si assume come lo spazio occupato da una persona in piedi. Se le dimensioni sono minori di quelle sotto indicate significa che vi è, con ragionevole sicurezza, una reale difficoltà per l'accesso e di conseguenza una condizione di rischio.

Relativamente all'effetto arco (*Figura 3.3*) invece, si considera che se la porta in questione ha un'apertura ridotta (75 cm), la pressione della folla non riesce a rompere l'arco, che ha una curvatura molto grande; se invece l'apertura è di almeno 90 cm, la spinta della folla riesce a rompere l'arco: un gruppo di persone passa ma subito dopo l'arco di riforma rallentando nuovamente il flusso che quindi procede "a singhiozzo". Per aperture superiori a 120 cm, la curvatura dell'arco si rompe a causa della spinta degli occupanti, per cui il loro moto risulta più fluido ed agevole. Per dimensionare le uscite è quindi necessario tener conto alcuni parametri variabili di caso in caso, in modo da evitare che il flusso degli occupanti in evacuazione si arresti provocando drammatiche conseguenze ad essi.

Il flusso degli sfollanti, nelle sue fasi, si può paragonare anche alla materia nei suoi stati: gassoso, solido e liquido. Il risultato che ne deriva viene definito *paragone idraulico* (*Tabella 3.5*).

I parametri caratteristici del moto di sfollamento sono:

- Modulo – in Italia per il dimensionamento delle vie di esodo si considera un modulo di 60 cm (coincidente con l'asse maggiore del corpo ellisse): le larghezze devono essere uguali a due moduli con una tolleranza tra il 2% e l'8%;
- Superficie occupata o *corpo ellisse* – corrisponde alla proiezione verticale del corpo umano (asse maggiore = 60 cm, asse minore = 45 cm e area minima = 0,22 m<sup>2</sup>) e si utilizza per determinare la massima capacità di uno spazio a contenere persone in piedi. Tale parametro si calcola mediante il rapporto tra superficie disponibile e numero di persone ed è quindi espresso in m<sup>2</sup>/pers. È in sostanza la superficie che ogni persona ha a disposizione;
- Densità di affollamento ( $\delta_s$ )– si calcola attraverso il rapporto tra il massimo numero prevedibile di persone ( $N_p$ ) e la superficie lorda (S):

$$\delta_s = \frac{N_p}{S} \left( \frac{\text{pers}}{\text{m}^2} \right)$$

Se invece si considera il rapporto tra il numero di persone presenti in una fila ( $N_{pl}$ )

Fase	Affollamento			Movimento		
	Tipo	Densità		Qualità	Velocità	Pressione
		Areale	Lineare			
Zero	Gas rarefatto	Come da progetto per le attività normali	Densità propria del normale comportamento	Razionale	Nulla o moderata	Nulla
Uno	Gas compresso	Non stabilizzata crescente verso le vie di uscita		Orientato ed ordinato per file // verso le uscite	Crescente sino ai valori di progetto per il sistema di vie di uscita	Nulla o lieve
Due	Liquido	Valori di progetto per il sistema di vie di uscita		Ordinato per file //	Stabilizzata sui valori di progetto per il sistema di vie di uscita	Moderata non ostacola il movimento
		max	max			
Tre	Gas in espansione	Gradualmente crescente		Ordinato divergente		
Riduzione delle sezioni di flusso		Densità areale e lineare crescente		Movimento irrazionale e disordinato	Velocità media in diminuzione Velocità individuali con senso e direzione irrazionali	Pressione in aumento, costituisce grave intralcio al movimento
	Liquido viscoso					
Barriere ed ostruzioni		La densità raggiunge valori abnormi		Movimento caotico tendente al blocco totale	Velocità media tendente a zero	La pressione raggiunge valori di panico
	Solido					

Tabella 3.5 - Paragone idraulico: confronto tra le fasi della materia ed i tipi di sfollamento

### 3. L'esodo

e la lunghezza della via di esodo (L), si ottiene la densità di sfollamento lineare ( $\delta_L$ ):

$$\delta_L = \frac{N_{PL}}{L} \left( \frac{\text{pers}}{m} \right)$$

- Velocità del moto – è un parametro che dipende da molte variabili, come la larghezza delle vie d'uscita e delle aperture, le traiettorie dei percorsi, la loro inclinazione, la densità di affollamento, le caratteristiche psicofisiche degli occupanti, ecc..

Da alcuni studi effettuati in Russia, sono emersi i seguenti valori di massima :

$$V = 0,27 \text{ m/sec} \quad \text{per } 10 < \delta < 12 \text{ pers/m}^2;$$

$$V = 0,17 \text{ m/sec} \quad \text{per scale in discesa di larghezza 2-4 moduli};$$

$$V = 0,13 \text{ m/sec} \quad \text{per scale in salita di larghezza 2-4 moduli};$$

Secondo studi effettuati in Giappone invece, si considera come valore massimo per la velocità del moto degli occupanti:  $V = 1,3 \text{ m/sec}$ , calcolato considerando altri parametri oltre alla densità di affollamento. A questo valore deve essere applicato un coefficiente di riduzione a seconda dei requisiti posseduti o meno dagli occupanti (per esempio età, sesso, disabilità, familiarità con l'edificio, ecc..) e delle particolari condizioni ambientali interne al fabbricato che possono verificarsi durante un incendio, come scarsa visibilità a causa del fumo, mancanza di elettricità e quindi di illuminazione artificiale, ecc.

Ulteriori studi ritengono che i valori massimi da considerare siano:

$$V = 0,60 \text{ m/sec} \quad \text{per percorsi orizzontali};$$

$$V = 0,45 \text{ m/sec} \quad \text{per percorsi in salita o discesa.}$$

- Capacità di deflusso (C) – questo parametro si calcola rapportando il numero di persone che devono sfollare ( $N_p$ ), con il numero di moduli che hanno a disposizione (M):

$$C = \frac{N_p}{M} \left( \frac{\text{pers}}{\text{mod}} \right)$$

Se si considera anche il tempo, si parla di portata di deflusso (Q), cioè il numero di persone che attraversano un'uscita nell'unità di tempo (t):

$$Q = \frac{N_p}{t} \left( \frac{\text{pers}}{\text{sec}} \right)$$

La portata di deflusso dipende dalla densità di affollamento, dalla larghezza dell'uscita e dal rapporto tra larghezza corrente degli sfollanti e larghezza d'uscita.

Dividendo la portata di deflusso per la larghezza dell'uscita in metri (B) oppure espressa mediante il numero dei moduli (M), si ottiene la portata specifica di deflusso ( $q_s$ ), cioè il numero di persone che attraversano un'uscita larga 1 m oppure un modulo (60 cm) nell'unità di tempo:

$$q_s = \frac{Q}{B} \left( \frac{\text{pers}}{m \times \text{sec}} \right) \quad \text{oppure} \quad q_s = \frac{Q}{M} \left( \frac{\text{pers}}{\text{mod} \times \text{sec}} \right)$$

Anche per questo parametro sono stati condotti alcuni studi, con l'obiettivo di individuare valori da poter utilizzare nella preparazione dei piani di evacuazione:

per larghezza  $\leq 90$  cm  $q_s = 48,52 \text{ pers/m} \times \text{min}$ ;

per larghezza  $\approx 140$  cm  $q_s = 58-60 \text{ pers/m} \times \text{min}$ ;

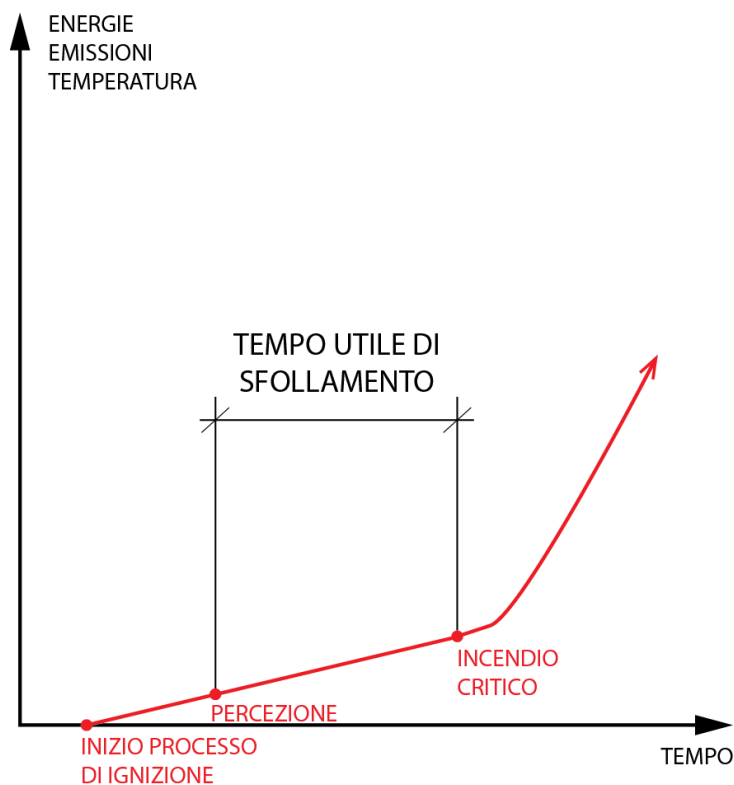
per larghezza  $\approx 180$  cm  $q_s = 62 \text{ pers/m} \times \text{min}$ ;

Solitamente, nella pratica, si considera  $q_s = 50 \text{ pers/m} \times \text{min}$  per uscite di larghezza fino a 150 cm, mentre per larghezze superiori si assume  $q_s = 60 \text{ pers/m} \times \text{min}$ .

La portata di deflusso (Q) può essere calcolata anche moltiplicando la velocità del moto (V) per la densità di affollamento ( $\delta_s$ ), per la larghezza dell'uscita (B):

$$Q = V \times \delta_s \times B \quad \left( \frac{\text{pers}}{\text{sec}} \right)$$

Tra tutti i parametri, quello più aleatorio è sicuramente la velocità. La difficoltà dovuta alla sua determinazione condiziona lo studio dell'organizzazione dell'evacuazione di emergenza. Tale evacuazione deve avvenire in un tempo inferiore a quello che impiega l'incendio per avere effetti dannosi sugli occupanti; inoltre, oltre al tempo di vero e proprio deflusso, bisogna tenere in considerazione anche altri valori-tempo e relazionarli con il tempo impiegato dall'incendio per diventare pericoloso (Figura 3.4).



TFigura 3.4 - Diagramma tempo/temperatura con individuazione del tempo utile di sfollamento

### 3. L'esodo

Risulta quindi necessario individuare un metodo di calcolo affidabile per determinare i tempi di evacuazione. A livello internazionale, le normative seguono di base due strade:

1. Fissare a priori le dimensioni delle vie di esodo e delle uscite in funzione della destinazione d'uso dell'edificio. In questo modo però l'edificio in questione potrebbe risultare in adatto nel caso di cambio di destinazione d'uso o di potenziamento del personale impiegato.
2. Fissare i tempi di sfollamento ammissibili ( $t_{amm}$ ), relativamente agli stadi di sfollamento e tenendo conto del grado di resistenza al fuoco, del carico d'incendio e della velocità di produzione e propagazione di fumi e gas tossici attraverso corridoi e scale; e fissare le modalità di calcolo per determinare il tempo di calcolo ( $t_c$ ) in base alle dimensioni delle vie di esodo e delle uscite. Affinchè il progetto di evacuazione risulti soddisfacente, dovrà verificarsi la relazione:

$$t_c \leq t_{amm}$$

Questo secondo metodo corrisponde concettualmente al criterio:  $RSET \leq ASET$ .

In base a studi svolti a livello Europeo, si possono assumere come tempi ammissibili di evacuazione, quelli riportati nella *Tabella 3.6*:

Tipo di edificio	$t_{amm}$
A grande affluenza	1 - 1,5 min per il I stadio 2 - 4 min per il II stadio 2 - 6 min per il III stadio
Industriale rischioso	0,6 - 1,25 min
Industriale meno rischioso	1 - 2 min

*Tabella 3.6 - Indicazione dei tempi ammissibili di evacuazione a seconda del tipo di edificio in esame*

Il I stadio di sfollamento comprende il moto delle persone da punti distanti fino ad un'uscita; il II stadio comprende il moto dall'uscita raggiunta ad un'uscita esterna; il III stadio corrisponde al moto attraverso le uscite esterne ed alla successiva dispersione delle persone (*Figura 3.5*).

Il tempo di calcolo si determina invece, in funzione della velocità del moto delle persone, della portata specifica del deflusso, della lunghezza delle vie di esodo e della larghezza delle uscite. Qualora la relazione che lega  $t_c$  a  $t_{amm}$  non sia soddisfatta, risulta necessario intervenire su  $t_c$ , modificando una o più variabili finchè la detta relazione non venga soddisfatta.



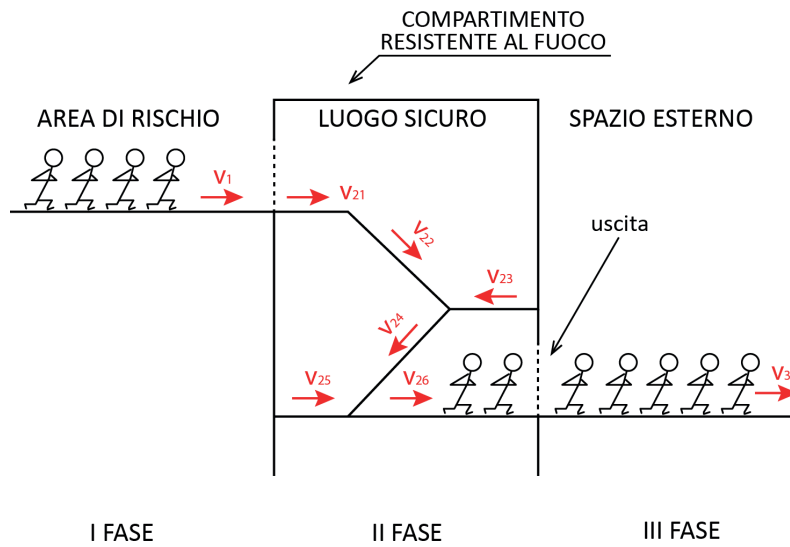


Figura 3.5 - Schema delle fasi di sfollamento e sistema di vie di uscita di emergenza

La pianificazione dell'evacuazione di emergenza è volta quindi a permettere a tutti gli occupanti di un edificio di completare il III stadio di sfollamento in tempi inferiori allo svilupparsi della fase iniziale dell'incendio, e a far sì che, se ciò non è possibile, siano predisposte misure particolari per permettere la salvaguardia degli occupanti (per esempio luoghi sicuri capaci di ospitarli, che assicurino loro adeguate condizioni di sicurezza e siano raggiungibili in un tempo pari od inferiore a quello necessario al I stadio).

### 3.5 Metodi di calcolo dei tempi di evacuazione

**V**alutare quantitativamente la durata dell'esodo serve sia per la prevenzione incendi sia per la pianificazione dell'emergenza, ed è uno degli aspetti più complessi della prevenzione incendi stessa.

Il problema dell'evacuazione si può considerare come un sistema integrato tra spazio fisico e aspetti comportamentali dei suoi fruitori, in un contesto di reciproca interazione. Riguardo ad esso è aperto un dibattito scientifico in ambito internazionale: sono stati avviati percorsi ed iniziative multidisciplinari, in cui psicologi, architetti, ingegneri ed altri operatori interessati alla sicurezza, hanno condotto un lavoro finalizzato a considerare il problema dell'evacuazione con l'obiettivo di individuare delle linee guida che pongano le reali esigenze delle persone al centro delle strategie di sicurezza.

Le persone contrappongono innumerevoli risposte fisiche e mentali ad una realtà complessa come l'incendio. Tali risposte, sviluppate per tutta la durata dell'azione critica, sono in continua interazione reciproca con l'ambiente e sono finalizzate a garantire la propria tutela. La prima azione tra queste è la più istintiva, cioè l'evacuazione.

Si considera che la velocità delle persone durante le situazioni di emergenza dipenda principalmente dalla loro mobilità, dall'affollamento, dal livello di luce, dalla presenza di fumo, dalla qualità delle superfici (muri e pavimenti), dalla larghezza dei percorsi di esodo (gradini, ecc.), e dalle loro caratteristiche comportamentali.

Per caratterizzare il sistema d'esodo, l'attuale normativa propone misure dimensionali (larghezza e lunghezza delle vie di esodo) che però tralasciano il contributo del comportamento individuale e collettivo.

L'obiettivo primario di qualsiasi strategia di sicurezza da attuare in caso d'incendio è la salvaguardia della vita umana, che si concretizza assicurando alle persone di poter uscire dall'edificio, o di portarsi in un luogo sicuro al suo interno o, ancora, di rimanere in sito senza subire conseguenze. Quando gli indicatori tipici dell'incendio vengono rilevati, tramite il diretto riscontro sensoriale o l'attivazione di sistemi automatici, le persone cominciano ad assumere comportamenti che si evolvono nel tempo e che caratterizzano le due fasi in cui si struttura l'evacuazione:

1. Il pre-movimento, che anticipa l'inizio dell'azione fisica vera e propria del movimento;
2. Il movimento, cioè l'evacuazione propriamente detta.

Si sviluppano quindi numerosi processi fisici e mentali: dalla consapevolezza degli indizi al raggiungimento di un luogo sicuro. In questo contesto si manifesta un'interazione uomo-edificio-ambiente in cui le caratteristiche delle persone presenti e quelle

ambientali giocano un ruolo importante. Approfondendo alcuni specifici aspetti si possono ipotizzare tre tipi di interazione, come definiti nel testo *SFPE – Engineering guide to human behaviour in fire*:

1. Interazione tra le capacità fisiche delle persone e l'ambiente: il caso più evidente è quello di persone con limitate o impedito capacità motorie che devono affrontare un percorso lungo le scale, ma anche la difficoltà determinata dagli agenti irritanti o tossici di un incendio che possono condizionare la velocità di spostamento.
2. Interazione tra le capacità cognitive delle persone e l'ambiente: la risposta individuale o collettiva in caso d'incendio può dipendere dalle modalità in cui le persone prendono le decisioni, percepiscono i rischi e conoscono il proprio comportamento nell'emergenza.
3. Interazioni tra le capacità fisiche e cognitive e l'ambiente, in cui viene considerata contemporaneità e sinergia degli effetti.

La variabile fondamentale è il tempo necessario per raggiungere un luogo sicuro dove le persone possano fermarsi, tutelate dagli effetti dell'incendio, che deve risultare inferiore al tempo in cui si sviluppano le condizioni di incompatibilità ambientale. Questi valori, già prima del Codice di Prevenzione Incendi, venivano identificati nei riferimenti internazionali con i termini: ASET, Available Safe Escape Time (cioè, letteralmente, il tempo disponibile per fuggire in sicurezza) e RSET, Required Safe Escape Time (cioè, letteralmente, il tempo richiesto per fuggire in sicurezza). La condizione di sicurezza viene garantita quando  $ASET > RSET$ .

I principali metodi di calcolo dei tempi di evacuazione (t), sono:

1. **Metodo tradizionale** – impiegato per edifici normali, luoghi di lavoro ordinari, ecc..

Le norme prescrittive non prevedono nel calcolo la valutazione esplicita del fattore *tempo di esodo*, ma utilizzano un metodo convenzionale, in cui si stabilisce la dimensione ed il numero delle uscite in funzione del numero di persone presenti. A questo tipo di calcolo sono associati i concetti di capacità di deflusso e di modulo di uscita. Il tempo massimo per l'esodo non è noto, ma è controllato indirettamente dal rapporto tra persone e larghezza totale delle vie di uscita. Un ulteriore controllo indiretto è dato dalla limitazione della lunghezza massima del percorso.

Nell'approccio tradizionale alla sicurezza antincendio, la sicurezza dell'esodo è risolta attraverso il calcolo delle larghezze delle vie di esodo in relazione alla capacità di deflusso dei percorsi:

$$\text{Larghezza minima} = \text{affollamento}/60$$

2. **Metodo cinematico (metodo di calcolo manuale)** – stabilisce che il tempo di sfolla-

3. L'esodo

mento sia pari a:

$$t = t_1 + t_2 + t_3 = \frac{L_1}{V_1} + \frac{L_2}{V_2} + \frac{L_3}{V_3} \quad (s)$$

considerando  $t_1, t_2, t_3$  i tempi,  $L_1, L_2, L_3$  le lunghezze dei percorsi e  $V_1, V_2, V_3$  le velocità di moto, riferite ai tre stadi di sfollamento, citati nel capitolo 4.2.

Per quanto riguarda la determinazione della lunghezza del percorso, nei tratti orizzontali non sorgono problemi, ma nei tratti verticali si assume usualmente  $L_s = 10$  m (lunghezza di una scala che collega due piani).

Relativamente alla velocità ( $V$ , calcolata in m/s) invece, essa si differenzia a seconda della densità ( $D$ , calcolata in persone/m<sup>2</sup>):

- per  $D > 3.8 \text{ p/m}^2 \rightarrow$  il moto si interrompe
- per  $3.8 \text{ p/m}^2 > D > 0.55 \text{ p/m}^2 \rightarrow V = k - akD$
- per  $D < 0.55 \text{ p/m}^2 \rightarrow V = 0.85k$  (non c'è interferenza tra le persone che si muovono indipendentemente, quindi la velocità di spostamento è pari a quella individuale).

$a$  è una costante pari a  $0.266 \text{ m}^2/\text{p}$

$k$  è una costante che varia a seconda delle caratteristiche del percorso (Tabella 3.7)

Elementi del percorso		k
Corridoi, rampe, porte		1.40
Scale		
Alzata(mm)	Pedata(mm)	
191	254	1.00
178	279	1.08
165	305	1.16
165	330	1.23

Tabella 3.7 - Valore della costante  $k$  in funzione delle caratteristiche degli elementi del percorso (SFPE, Engineering guide to human behaviour in fire)

Per rendere omogenei i dati che rappresentano l'affollamento e la larghezza delle vie di esodo si utilizza il flusso specifico, che permette di stabilire il numero di persone che transitano attraverso un varco (porta, corridoio, ecc..) per unità di tempo ed in funzione della larghezza effettiva del componente di esodo in esame (cioè la larghezza reale diminuita di una parte non utilizzabile della luce:  $B$ , boundary layer).

La larghezza effettiva è quindi la porzione di una via di uscita che viene effettivamente utilizzata dagli occupanti. Per ottenerla, si deve sottrarre all'ampiezza della via di

esodo, la larghezza inutilizzata a seconda dell'elemento in esame (come mostrato nella *Tabella 3.8*).

Elemento della via di esodo	Larghezza inutilizzata (cm)
Scale-muro o lato della pedata	15
Mancorrenti, ringhiere, parapetti	9
Corridoi, muri di rampe	20
Ostacoli	10
Larghi passaggi, ampie vie di esodo	46
Porte, volte	15

*Tabella 3.8 - Valori della larghezza inutilizzata lungo le vie di esodo a seconda degli elementi considerati*

Il flusso specifico ( $F_s$ ) è analogo al flusso specifico in idraulica, e si calcola come segue:

$$F_s = D \times v \quad (\text{persone/s} \times \text{m})$$

Sostituendo i termini della relazione precedente:

– per  $3.8 \text{ p/m}^2 > D > 0.55 \text{ p/m}^2 \rightarrow F_s = Dv = (1 - aD) \times kD$

– per  $D < 0.55 \text{ p/m}^2 \rightarrow F_s = 0.85k$

In letteratura è possibile consultare grafici e tabelle che indicano il flusso specifico massimo consentito, a seconda del componente di esodo considerato e della densità degli occupanti che lo percorrono: corrisponde al numero di persone che attraversano l'unità di larghezza effettiva nell'unità di tempo.

Riprendendo la relazione iniziale ed inserendovi le relazioni sopra citate, si deduce che il tempo richiesto per l'esodo attraverso l'elemento che controlla il flusso, si calcoli come:

$$t = \frac{Pers}{F_s \times L_e} \quad (s)$$

Bisogna tener conto che la formula empirica:  $V = k - akD$ , che relaziona velocità e densità di affollamento, è stata però elaborata considerando un'utenza irrealistica di soli adulti che non hanno capacità motorie limitate. Nella realtà bisogna considerare che la velocità individuale possa variare da 0,22 a 0,79 m/s, considerando anziani, bambini ed adulti che possono avere disabilità od essere impediti da bagagli o simili.

La limitazione di questo metodo è dovuta inoltre al fatto che esso non tiene conto della disposizione e delle modalità costruttive delle uscite e dei percorsi, ma si basa solo su parametri fisici, quali velocità e spazio. Presenta quindi delle incertezze qualora si verifichi l'incontro di più correnti di persone intente a proseguire l'esodo lungo la stessa via.

### 3. L'esodo

- 3. Metodo capacitivo (metodo di calcolo manuale)** – determina il tempo di sfollamento come:

$$t = \frac{N_p}{Q} = \frac{N_p}{q \times M} = \frac{N_p / M}{q} = \frac{C}{q} \quad (s)$$

dove  $N_p$  è il numero delle persone da sfollare e  $Q$  è la portata di sfollamento, esprimibile come portata specifica ( $q$ ) per numero dei moduli ( $M$ ). Dividendo numeratore e denominatore per il numero dei moduli si ottiene una relazione tra il tempo di sfollamento ed il rapporto tra portata di deflusso e portata specifica.

Questo metodo è basato sulla determinazione dell'area delle vie di esodo in funzione del numero massimo ipotizzato di occupanti di un edificio, e dell'area occupata da una singola persona. L'area delle scale viene considerata *luogo sicuro dinamico* e quindi deve essere tale da ospitare tutte le persone da sfollare: in questo modo il II stadio di sfollamento permette agli occupanti di mettersi già in salvo.

Il metodo capacitivo è efficace in quanto in sede di progettazione fa sì che le vie di fuga vengano dimensionate in modo da garantire che in ogni istante la somma del numero delle persone da sfollare ( $C_i$ ) dai vari piani ( $n$  = numero dei piani fuori terra), non superi la somma del numero di persone che giungono alle uscite esterne e di quelle in moto lungo le scale:

$$\sum_i^n C_i = \sum_i^n \delta_s^i S_i + \sum_i^n \Delta c_i$$

$S_i$  = superficie virtuale della scala al generico interpiano;

$\delta_s^i$  = densità superficiale al generico interpiano;

$\Delta c_i$  = numero di persone dell' $i$ -esimo piano che al tempo  $t$  compiono il II stadio di sfollamento.

- 4. Metodo Cascarino (metodo di calcolo manuale)** – è stato elaborato dall'Ing. Cascarino, dirigente generale dei Vigili del Fuoco, dopo aver analizzato attentamente il metodo capacitivo. Egli considera soltanto il II stadio di evacuazione, di particolare importanza soprattutto per gli edifici complessi e con alte densità di affollamento, e fissa i seguenti parametri significativi:

Portata di deflusso lungo le scale  $\rightarrow q = 0,75$  pers/M $\times$ sec;

Velocità di circolazione o sfollamento lungo le scale  $\rightarrow V_2 = 0,45$  m/sec;

Lunghezza del percorso lungo la sede da un piano a quello successivo  $\rightarrow L = 10$  m.

Quindi devono essere presi in considerazione i seguenti valori:

$C = 50$  pers/M per il piano terra;

$C = 37,5$  pers/M per i piano I e II fuori terra e per i piani cantinati.

5. **Modello di flusso (metodo di calcolo numerico)** – è utilizzato per edifici normali ma con necessità di specifiche valutazioni.

La capacità di esodo dei componenti approssima una funzione lineare della larghezza effettiva della porta. Il tempo di movimento è determinato dalla distanza da percorrere e dalla velocità, determinate entrambe a priori, secondo la relazione:

$$t = \frac{d}{V} \quad (s)$$

Sulla distanza, infatti, è determinante la scelta della persona, mentre la velocità è funzione della densità di persone e delle loro caratteristiche. Influenzano la velocità, inoltre, il fumo e la visibilità dei percorsi, la larghezza e la pendenza degli elementi, il tipo di superficie di muri e pavimenti.

Nel modello di flusso le informazioni di base devono disporre dei dati su:

- velocità (su corridoi, rampe, scale – per queste ultime si calcola la velocità diagonale tra le testate delle rampe);
  - flusso: il numero di persone che passa attraverso una particolare sezione del sistema di esodo per unità di tempo (persone/sec che oltrepassano una porta, una linea immaginaria in un corridoio, ecc.);
  - flusso specifico: il flusso per unità di superficie del componente di esodo (persone/sec×m di larghezza di un determinato elemento).
6. **Modelli di movimento (metodo di calcolo numerico)** – sono utilizzati per luoghi con rilevanti problemi decisionali.

Tale modelli si concentrano sullo spostamento delle persone da un punto ad un altro dell'edificio. La legge che governa il movimento nella maggior parte dei modelli è quella della correlazione tra velocità e densità.

In alcuni casi i modelli prevedono la possibilità di ottimizzare i risultati dell'esodo, considerando cioè la possibilità che non tutte le persone si spostino lungo il percorso più breve, ma che si distribuiscano in modo da realizzare la densità che produce il tempo di esodo più breve. In assenza di questa tecnica, i modelli di movimento seguono il criterio di spostare le persone con la minima distanza possibile.

La maggior parte dei modelli di movimento utilizza una griglia grossolana, costituita da nodi (i locali) ed archi (la distanza tra i punti mediani dei nodi).

La rappresentazione dell'esodo considera le persone come un gruppo omogeneo con le stesse capacità di movimento e che, quindi, si spostano fino all'uscita nel modo più rapido. Quindi non si considerano le differenze dovute al comportamento delle persone.

- 7. Modelli parzialmente comportamentali (metodo di calcolo numerico)** – sono modelli che calcolano in primo luogo lo spostamento delle persone, anche se prevedono l'influenza del comportamento in un modo semplificato, simulando il tempo di pre-movimento (distribuito tra le persone presenti), le difficoltà motorie, il sorpasso e l'effetto di fumo e calore.

La maggior parte di questi modelli ricorre alla legge della correlazione tra velocità e densità per calcolare il movimento delle persone.

Rispetto ai modelli comportamentali quelli parzialmente comportamentali introducono le differenze tra le persone in termini fisici (dimensioni del corpo, ritardo nel movimento, ecc..) piuttosto che sotto il profilo cognitivo. È quindi possibile modellare implicitamente il comportamento degli occupanti.

- 8. Modelli comportamentali (metodo di calcolo numerico)** – sono modelli che prendono in considerazione le decisioni ed il comportamento delle singole persone, oltre al movimento verso l'uscita.

La capacità decisionale e le regole di comportamento in base alle quali le persone si muovono (ad esempio, se una persona nota del fumo nel vano scala non vi entrerà e cercherà un'altra uscita), sono definite in ciascun modello.

Quasi tutti i modelli comportamentali hanno la possibilità di assegnare probabilità alle attività svolte da ogni persona. Tali probabilità sono associate sia alla verosimiglianza che le attività vengano svolte effettivamente, sia alla distribuzione dei tempi per ogni azione, secondo la probabilità di accadimento.

I metodi di calcolo numerico sopra citati, sono effettuati mediante l'utilizzo dei moderni software di simulazione dell'esodo.



## Il comportamento umano in caso di incendio

*Negli ultimi anni sono stati fatti passi avanti nello studio dei meccanismi di esodo in caso di emergenza, dal momento che le misure predisposte per favorire l'evacuazione nelle situazioni di incendio risultano di notevole importanza per la salvaguardia della vita umana. Da tali studi si è capito che il parametro da cui il tempo di evacuazione è maggiormente dipendente, è l'aspetto irrazionale del comportamento umano, quindi studiando quest'ultimo, sia a livello individuale che collettivo, è possibile sviluppare modelli di calcolo in grado di implementare e rendere più efficace l'azione preventiva.*

### 4.1 Il comportamento individuale

In caso di incendio o di ogni altra situazione di minaccia, le persone percepiscono il problema e, attraverso un processo cognitivo, lo analizzano ed elaborano una soluzione (*problem solving*). È quindi necessario comprendere quali siano i fattori che possono influenzare tale processo cognitivo, in modo da assicurare un'adeguata sicurezza agli occupanti di una struttura in caso di incendio.

Nella popolazione, durante le situazioni di emergenza, si assiste ad un'attivazione generalizzata dello stato neuropsicofisiologico, che si caratterizza nello stato di ansia e paura. L'ansia riguarda la risposta emotiva in seguito ad una minaccia, mentre la paura concerne l'elaborazione cognitiva alla minaccia stessa. In condizioni naturali la paura costituisce la difesa portante ai fini della sopravvivenza, in altre situazioni però si evolve nel panico, diventando così un meccanismo di difesa disfunzionale.

Di fronte ad un pericolo i singoli individui reagiscono in modo diverso, in funzione delle caratteristiche personali e socio-ambientali che li spingono a comportarsi in un certo modo. Conoscere tali comportamenti può essere utile sia per migliorare l'azione di soccorso, sia per garantire la sicurezza degli individui coinvolti. In particolare le decisioni che un individuo prende nelle situazioni di emergenza dipendono sostanzialmente da:

- Genere – dallo studio di numerosi incendi, è emerso che ci sono differenze nel comportamento di uomini e donne: gli uomini sono propensi a cercare un modo per

#### 4. Il comportamento umano in caso di incendio

estinguere l'incendio, mentre le donne cercano di raggiungere i propri cari e di mettersi in salvo.

- Età – a seconda dell'età degli individui, variano le loro abilità sensoriali, decisionali e di azione. Le persone anziane infatti, per esempio, risultano più esposte al rischio in quanto hanno una scarsa resistenza agli effetti debilitanti di fumo e calore.
- Capacità fisiche e sensoriali – le persone con disabilità fisiche o sensoriali, nelle situazioni di emergenza, possono causare un rallentamento sia della propria evacuazione che di quella di altri individui presenti. Infatti secondo i dati ISTAT (Figura 4.1), circa il 25% della popolazione ha difficoltà nell'effettuare le procedure di esodo autonomamente.

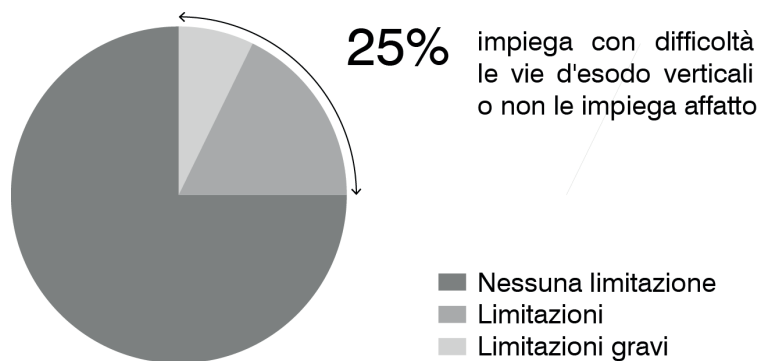


Figura 4.1 - Schema: inclusione sociale delle persone con limitazioni funzionali, invalidità o cronicità gravi, dati provenienti dal Ministero del lavoro ed ISTAT (21 luglio 2015)



Figura 4.2 - Comportamento di individui singoli in situazioni di emergenza

- Familiarità – nelle situazioni di emergenza solitamente, gli individui tendono a muoversi verso luoghi o persone a loro familiari.
- Attaccamento sociale – i legami sociali o affettivi causano rallentamenti durante l'evacuazione (per esempio cercandosi, aspettandosi ed aiutandosi a vicenda per raggiungere un luogo sicuro) e possono portare a conseguenze anche fatali. Risulta infatti che nei casi di evacuazione da un luogo pubblico, sia più facile che si mettano in salvo gli individui singoli, senza legami di alcun tipo con gli altri, rispetto ai gruppi di conoscenti o alle famiglie.
- Attaccamento agli oggetti – quando si verifica un incendio in un'abitazione, l'evacuazione può essere rallentata dalla ricerca di oggetti personali o animali.
- Cultura, ruolo e responsabilità – nelle situazioni di emergenza si è riscontrato come gli occupanti aventi un livello culturale od una posizione gerarchica superiore, si comportino diversamente dagli occupanti privi di una certa responsabilità.
- Reattività – l'assunzione di medicinali, alcol o droghe da parte degli occupanti può alterare la percezione del pericolo nelle situazioni di emergenza, ostacolando così una corretta evacuazione.

## 4.2 Il comportamento collettivo

Quando si verificano situazioni di emergenza (per esempio disastri, sommosse, cortei, ecc.), il comportamento del singolo individuo scompare in quanto viene influenzato dagli altri individui circostanti, che lo modificano verso un modo di agire comune. Subentra così il comportamento della folla, la quale diventa una sorta di *organismo autonomo* dotato di un proprio comportamento, diverso dalla somma dei comportamenti dei singoli individui che la compongono. Non è possibile individuare una regola generale che sta alla base del comportamento della folla, in quanto dipende dalle ragioni per cui essa si è formata e dalle differenze sociali, politiche e religiose degli individui che la compongono.

Si è verificato come al verificarsi di una situazione di emergenza come un incendio, sia più facile che si accorgano del pericolo dei soggetti soli piuttosto che dei soggetti in presenza di altre persone. Quando ci sono più persone in una stanza infatti, i singoli individui percepiscono in ritardo (o non percepiscono affatto) che stia accadendo qualcosa di anomalo. È quindi necessario conoscere anche le tipologie di comportamento che la folla può assumere nelle situazioni di emergenza, raggruppate come segue:

- Comportamenti gregari – in caso di emergenza, sotto uno stato di ansia e preoccupazione per la sopravvivenza, le persone che si trovano all'interno di un edificio tendono a muoversi ad alta velocità verso le uscite ed a spingere le persone accanto a loro, causando così la creazione di code e la formazione di *strutture ad arco* nei pressi delle uscite (*Figura 4.3*). L'aumento di velocità provoca paradossalmente dei rallentamenti in corrispondenza dei restringimenti di sezione del percorso di esodo (colli di bottiglia) a causa dell'accalcarsi di un numero sempre maggiore di persone. Inoltre l'accalcarsi può provocare la caduta di individui che diventano veri e propri ostacoli e possono essere calpestati dalla folla rimanendo feriti.
- Comportamenti pro-sociali – tra gli individui coinvolti in una situazione di emergenza si verifica questo tipo di comportamento, quando essi diventano cooperativi ed altruisti, mentre alcuni mostrano una capacità spontanea di leadership che li porta ad essere protagonisti efficaci dell'evacuazione.
- Panico – la reazione di panico che gli individui hanno nelle situazioni di emergenza è sostanzialmente un comportamento collettivo in cui le capacità di giudizio e di ragionamento sono deteriorate e la paura è tale da portare ad azioni sia autodistruttive sia eterodistruttive. Gli studi psicosociali di L. Pierantoni e G. Prati sui comportamenti di evacuazione hanno mostrato come, affinché si abbiano manifestazioni distruttive di panico di massa, debbano verificarsi contemporaneamente le seguenti *quattro condizioni* (cosa che accade solo eccezionalmente):

- ansietà diffusa, per esempio sottoforma di previsione che possa presentarsi un pericolo reale;
  - mancanza di una leadership riconoscibile e che sappia dare istruzioni chiare, per esempio quali comportamenti assumere;
  - percezione di rimanere intrappolati per lo sbarramento dell'unica via di fuga;
  - comparsa di un fattore che faccia precipitare l'ansia.
- Comportamento affiliativo – nelle situazioni di emergenza spesso i legami di gruppo contribuiscono ad aumentare il tasso di mortalità e di ferimento. Per esempio nelle evacuazioni dei condomini, le famiglie tendono ad evacuare in gruppo e gli adulti portano in braccio i bambini più piccoli. Essi tendono inoltre ad assumere la velocità del membro più lento della famiglia (anziano o bambino), il che fa ritardare nettamente l'evacuazione del gruppo.
  - Cluster di convergenza – spesso i gruppi di persone convergono verso un punto comune, percepito come luogo sicuro in quanto caratterizzato da assenza di fumo, maggiore visibilità, ventilazione, ecc.. In questo modo, trovandosi tutti insieme, gli occupanti in esodo percepiscono una riduzione dell'ansia e della tensione provocata dall'evento in atto.
  - Tendenza al rientro – a volte, le persone sfuggite ad un incendio, scelgono di rientrare all'interno dell'edificio per recuperare gli effetti personali o cercare le persone care. Solitamente questo comportamento non è dettato dall'ansia emotiva e viene assunto specialmente dagli individui di sesso maschile, che scelgono intenzionalmente di rientrare.

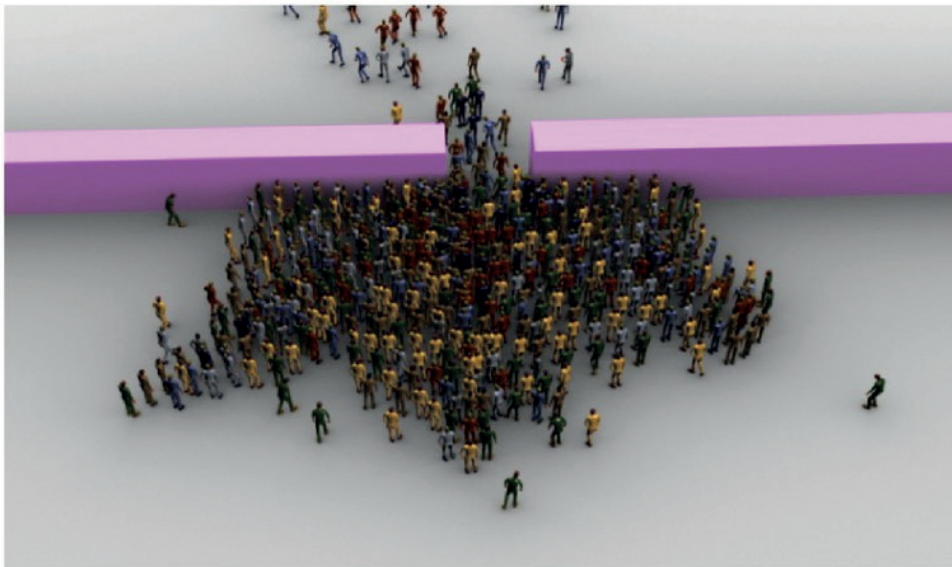


Figura 4.3 - Struttura ad arco causata dall'accalcarsi di persone nei pressi di un'uscita di sicurezza



## I software di modellazione dell'esodo

*I calcoli di evacuazione stanno diventando sempre di più una parte integrante delle analisi prestazionali per valutare il livello di sicurezza della vita negli edifici. In alcuni casi, gli ingegneri utilizzano calcoli manuali, mentre in altri vengono utilizzati modelli di evacuazione computazionale. I primi modelli elaborati presentavano limitazioni in quanto non riflettevano esattamente la natura variabile della reazione umana, negli ultimi decenni però, grazie a considerazioni chiave sul comportamento umano (come la risposta dell'organismo ai prodotti della combustione od i meccanismi mentali che ne governano le azioni), sono in elaborazione modelli di evacuazione più completi e predittivi.*

### 5.1 L'importanza della simulazione dell'esodo

Con il termine simulazione, s'intende generalmente la realizzazione di un modello della realtà che consente di valutare e prevedere lo svolgersi dinamico di una serie di eventi consequenziali all'imposizione di predeterminate condizioni al contorno. La simulazione è una tecnica molto importante di ricerca, forse la più usata a supporto di qualsiasi processo decisionale; negli ultimi anni è diventata un importante strumento di pianificazione con applicazioni molteplici in diversi ambiti, dall'economico-aziendale fino all'ingegneria ed alla gestione dell'esodo in emergenza.

La simulazione è una tecnica ormai consolidata, risponde in modo soddisfacente alle aspettative e, seppur con elevati oneri computazionali, può vantare i seguenti vantaggi:

- Studio del comportamento del sistema nelle condizioni presenti od in condizioni modificate, senza modificarlo realmente;
- Soluzioni a problemi non affrontabili in altro modo, neanche attraverso la sperimentazione diretta;
- Riduzione di costi e tempi rispetto alla fase sperimentale;
- Maggior comprensione del fenomeno, ripetibilità e scalabilità;
- Sicurezza e legalità nella ricerca di soluzioni innovative.

## 5. *I software di modellazione dell'esodo*

Al contrario la simulazione presenta anche alcuni svantaggi:

- Affidabilità non al 100%: i risultati della simulazione possono dare solo un'indicazione di quello che sarà il comportamento del sistema;
- Costi elevati: lo sviluppo del modello potrebbe risultare molto oneroso, sia per la necessità di dover disporre di personale qualificato sia per i tempi di calcolo;
- Complessità data dall'interpretazione dell'output nella ricerca della soluzione migliore.

In passato, la conoscenza dei parametri necessari alla realizzazione di misure di sicurezza era finalizzata ad assicurare l'efficacia e l'applicabilità delle norme di prevenzione incendi. La normativa vigente infatti, cioè l'approccio prescrittivo, stabilisce il numero e la larghezza delle vie di esodo in rapporto al numero di persone che le devono utilizzare, senza alcun riferimento al tempo necessario per l'evacuazione.

Da quando la ricerca ha rivolto la propria attenzione allo studio delle caratteristiche comportamentali individuali e collettive in situazioni di emergenza, sono stati sviluppati modelli in grado di supportare le valutazioni ingegneristiche della sicurezza antincendio degli edifici. Questo tipo di soluzione del problema, di tipo prestazionale, si basa sul confronto tra il tempo necessario per l'esodo e il tempo disponibile per raggiungere un luogo sicuro in condizioni accettabili.

Tale concetto si esprime mediante la formulazione  $ASET > RSET$  e deve comprendere sia la risposta fisiologica ai prodotti della combustione che la valutazione dei meccanismi mentali che governano il comportamento in emergenza delle persone.

In particolare, osservando eventi disastrosi che hanno coinvolto un elevato numero di persone (per esempio l'attentato del 11/09/2001 alle torri gemelle di New York), è emerso che lo studio dei parametri puramente meccanici dell'esodo non era in grado di rappresentare adeguatamente il reale svolgimento dell'esodo stesso. È infatti essenziale studiare il comportamento delle persone nelle situazioni di emergenza e la risposta che il cervello dà alle improvvise sollecitazioni esterne. Inoltre è risultato che, al crescere del numero di persone coinvolte in una situazione di emergenza, il tempo necessario all'evacuazione dipenda sia dagli aspetti meccanici del moto, che dalla psicologia delle masse.

Lo studio delle caratteristiche dei comportamenti collettivi (per esempio di gruppi familiari, lavorativi, occasionali, ecc..) ha inoltre ampliato la ricerca da un ambito ristretto agli edifici o al massimo agli spazi confinati (stazioni interrato, grandi complessi commerciali), alla valutazione delle caratteristiche di esodo a scala urbana, per rispondere alle seguenti necessità:

- Migliorare la valutazione della sicurezza degli edifici soggetti a grande affollamento, la quale deve riguardare le criticità legate all'esodo nelle aree esterne agli edifici.



- Quantificare i tempi di esodo delle persone nei percorsi urbani, in modo da migliorare i piani comunali di protezione civile mediante l'aggiunta di valutazioni quantitative a quelle qualitative.
- Pianificare e gestire l'emergenza nelle manifestazioni in cui sono previsti grandi affollamenti: mediante gli strumenti di simulazione dell'esodo infatti, si può trattare un grande evento con gli stessi strumenti concettuali degli edifici, verificando se gli spazi a disposizione siano adeguati ad un flusso in emergenza sicuro.

Grazie all'estensione dell'ambito di applicazione dei modelli di esodo, è quindi possibile valutare anticipatamente la sicurezza di eventi che prevedono il coinvolgimento di un elevato numero di persone, e disporre di strumenti di supporto alla gestione delle emergenze che riguardano grandi numeri di persone o vaste estensioni territoriali. In questi casi bisogna considerare che l'esodo di massa pone problemi di valutazione diversi da quelli che riguardano gli edifici e gli spazi ristretti. Infatti, quando la massa è costituita da un'alta densità di persone (per esempio se la densità è  $> 3$  pers/m<sup>2</sup>), gli aspetti di comportamento dei singoli sono meno rilevanti ai fini della previsione dei movimenti: questi ultimi non dipendono più dalla volontà degli individui ma sono guidati dalla pressione che i corpi esercitano su quelli circostanti. Anche il movimento complessivo non è casuale, ma risponde a specifiche regole (soprattutto legami familiari e sociali).

In caso di situazioni di particolare criticità non previste, invece, attraverso questi strumenti è possibile simulare come evolverà l'esodo, permettendo quindi di adottare scelte più consapevoli e migliorando il livello di sicurezza delle persone coinvolte.

Nel caso di strutture complesse, infine, il numero di scenari possibili e la loro complessità non è spesso compatibile con le ipotesi di gestione dell'emergenza predefinite, per cui è necessario consentire agli operatori di prendere le decisioni più adeguate in tempi estremamente ridotti. A queste esigenze è possibile dare risposta solo con una rapida simulazione dell'evoluzione dell'esodo.

## 5.2 Classificazione dei software di modellazione esistenti

I moderni sistemi di calcolo permettono di modellare l'esodo tenendo conto dell'interazione continua tra l'espressione fisica del moto ed i fattori comportamentali. Tra tutti i modelli non ne esiste uno giusto o sbagliato e i risultati non possono essere generalizzati, poichè ogni strumento è soggetto all'esperienza di chi lo applica ed alle priorità individuate dal professionista.

In passato, come esplicito nel *capitolo 3.5* del presente testo, i calcoli venivano effettuati solo manualmente, seguendo le equazioni riportate nel manuale *Society of Fire Protection Engineers (SFPE) Handbook* per calcolare il flusso di massa di evacuazione da qualsiasi punto dell'edificio. Si presumeva che gli occupanti si trovassero alla porta del componente di uscita di ogni piano, all'inizio dell'evacuazione. Il calcolo si concentrava principalmente sui punti di costrizione in tutto l'edificio (comunemente la porta verso l'esterno, transizioni tra i componenti di uscita, o dove diversi percorsi si fondono insieme) e calcolava il tempo che gli occupanti impiegavano a muoversi oltre questi punti e verso l'esterno. Questi calcoli trattavano gli occupanti come particelle che seguivano regole note. A parte la densità, le interazioni con altri individui, le condizioni dell'edificio (compresi gli effetti del fuoco) e i processi decisionali degli individui venivano ignorati.

Per ottenere un calcolo dell'evacuazione più realistico, o una soluzione più efficiente, gli ingegneri hanno quindi elaborato modelli computerizzati di evacuazione, in modo da riuscire a valutare gli aspetti chiave delle caratteristiche di sicurezza di un edificio. Attualmente, ci sono diversi modelli di evacuazione tra cui scegliere, ognuno con caratteristiche e specialità uniche. Questi modelli possono variare da un uso efficiente dei calcoli manuali (con le stesse limitazioni dei calcoli manuali) a modelli con equazioni complesse e occupanti con capacità decisionali.

Nella *Tabella 5.1*, i modelli (alcuni di quelli attualmente esistenti) sono raggruppati in base alla loro disponibilità: disponibili al pubblico, su base consulenziale, e non ancora pubblicati.

- **Modelli disponibili al pubblico** – EVACNET4, WAYOUT, STEPS, PedGo, PEDROUTE, Simulex, GridFlow, ASERI, FDS+Evac, Pathfinder, SimWalk, PEDFLOW, buildingEXODUS, Legion, SpaceSensor, Evacuation Planning Tool (EPT), e MassMotion.
- **Modelli disponibili su base consulenziale** – PathFinder, Myriad II, ALLSAFE, CRISP, EGRESS, e SGEM.
- **Modelli che non sono ancora stati rilasciati** – EXIT89, MASSEgress, e EvacuatioNZ.

Per ogni modello elencato, vengono quindi fornite informazioni riguardo le loro

caratteristiche principali. Tali caratteristiche descrivono lo stato di disponibilità del modello, lo scopo (in quanto riguarda la modellazione di alcuni tipi di edifici), le strategie di validazione e le tecniche di modellazione interna di cui l'utente dovrebbe essere a conoscenza prima di scegliere il modello per un progetto. Le tecniche di modellazione interna includono il metodo di spostamento degli occupanti, il metodo di simulazione del comportamento degli occupanti, l'incorporazione degli effetti del fuoco e il metodo di strutturazione dell'edificio all'interno del modello.

Nello specifico le caratteristiche principali sono:

- Disponibilità, cioè se il software è disponibile gratuitamente o a pagamento (Y), se non è ancora distribuito perché in fase di sperimentazione (N1), se non è più in uso (N2), se viene usato direttamente dalla società che l'ha elaborato nell'ambito di attività di consulenza (N3) o se la disponibilità non è nota (U).
- Metodo di modellazione, cioè se il modello è comportamentale e si considerano le azioni degli occupanti durante il movimento verso l'uscita e le loro capacità di decisione in funzione delle condizioni ambientali (B), se il modello può valutare il rischio derivante da una determinata situazione (B-RA), se il modello è basato sul movimento e simula lo spostamento degli occupanti da un certo punto ad un altro (luogo sicuro) e viene usato soprattutto per identificare aree di congestione (M), se il modello è in grado di individuare una configurazione ottimale di distribuzione degli ambienti, ecc.. (MO) o se il modello è parzialmente comportamentale, cioè calcola principalmente il movimento degli occupanti ma può simularne parzialmente anche il comportamento (PB).
- Scopo, cioè se applicabile ad ogni tipo di edificio (1), se specializzato nella simulazione di edifici residenziali (2), se specializzato per ambiti connessi col trasporto pubblico (3), se utilizzabile in edifici con altezza massima pari a 20 metri (4) o se consentono la simulazione con un solo percorso di fuga (5).
- Griglia, cioè in che modo viene suddiviso lo spazio quando si simula il movimento, se a maglia larga con unità ambientali estese in termini di superficie, come stanze, corridoi, ecc.. attraverso le quali gli occupanti possono muoversi (C), se a maglia stretta con piccole celle che rappresentano porzioni di unità ambientali (F) o se lo spazio è rappresentato in modo continuo (per esempio per piani), simulando eventualmente la presenza di ostacoli e barriere all'interno dell'edificio che possano influenzare la scelta del percorso di fuga da parte degli occupanti (Co).
- Prospettiva modello/occupante, cioè in che modo vengono rappresentati gli occupanti dal software ed in che modo essi percepiscono l'edificio, se l'insieme degli occupanti viene visto come un gruppo omogeneo di persone che si muove verso l'uscita (G) o se viene rappresentata la posizione di ogni singolo individuo nel tempo,

5. *I software di modellazione dell'esodo*

mostrando come ognuno scelga il percorso di esodo basandosi sulle informazioni presenti nel piano, l'esperienza personale e le informazioni ricevute dagli altri occupanti presenti (I).

- Comportamento degli occupanti, cioè se non viene considerato ma vengono considerati solo gli aspetti relativi agli spostamenti (N), se viene considerato ma in modo implicito, assegnando ritardi nei tempi di reazione all'allarme o caratteristiche degli occupanti che influenzano i movimenti e gli spostamenti durante l'evacuazione (I), se viene considerato ma in modo condizionale, differenziando i modelli che assegnano azioni individuali a persone o gruppi di occupanti influenzate da condizioni ambientali durante l'evacuazione (R/C), se i modelli utilizzano un insieme di equazioni (analogia funzionale) per rappresentare tutti gli occupanti (AF), se i modelli si basano su simulazioni artificiali dell'intelligenza umana (IA) o se i software fanno ricorso a modelli comportamentali probabilistici per cui ripetendo la stessa simulazione diverse volte si ottengono risultati diversi (P).
- Movimento, cioè in che modo gli occupanti si spostano durante la simulazione a seconda della situazione di congestionamento, se la velocità di flusso viene assegnata agli individui o ai gruppi di persone in funzione della loro densità nello spazio (D), se per ogni area dell'edificio l'utilizzatore del modello di simulazione può assegnare valori di velocità, flusso e densità (UC), se si considera ogni individuo come sfera, imponendo così dei vincoli di distanza minima tra gli occupanti, gli ostacoli e le parti dell'edificio (ID), se per ogni cella della griglia di rappresentazione viene assegnato un valore di potenziale rispetto ad un punto di riferimento dell'edificio, per guidare gli occupanti verso una direzione (P), se il movimento degli occupanti dipende dalla disponibilità delle celle adiacenti ad essi, per cui qualora tali celle siano occupate, gli occupanti dovranno mettersi in coda ed aspettare che si liberino, muovendosi poi in un ordine definito arbitrariamente dal modello (E), se il movimento degli occupanti dipende dalle condizioni ambientali, dalla struttura, dagli altri occupanti e dallo stato di propagazione dell'incendio (senza porre attenzione all'eventuale stato di congestionamento dell'edificio) (C), se vengono applicate equazioni per determinare il movimento, assimilato all'evoluzione di un fenomeno fisico come per esempio il moto di un fluido (FA), se il movimento viene calcolato da un altro software (OML), se il movimento non è desunto da algoritmi di simulazione ma da dati di altre evacuazioni (Ac K) o se si considera solo il libero movimento degli occupanti, a cui poi vanno aggiunti o sottratti i tempi di ritardo o di anticipo degli occupanti per calcolare il tempo di evacuazione finale.
- Dati sull'incendio, cioè se il modello può importare informazioni sull'incendio da un altro modello (Y1), se consente all'utilizzatore di inserire specifici dati sull'incendio, riferiti a specifici istanti di tempo (Y2), se ingloba al suo interno un modello di simulazione dell'incendio (Y3) o se non può considerare informazioni sull'incendio ma

elabora la simulazione come se fosse un'esercitazione antincendio nell'edificio (N).

- CAD, cioè se il software consente di utilizzare file CAD provenienti di un altro programma in modo da risparmiare tempo ed aumentare il livello di precisione nella rappresentazione grafica dell'edificio (Y), se non è possibile invece importare file da programmi CAD (N) o se la possibilità di utilizzo di file CAD è in corso di sperimentazione (F).
- Visualizzazione, cioè se il modello permette di visualizzare i punti di congestionamento ed i punti critici all'interno dell'edificio in modo bidimensionale (2-D), tridimensionale (3-D) oppure non permette di visualizzare tali punti (N).
- Validazione, cioè se i modelli vengono validati rispetto a normative codificate (C), rispetto a dati provenienti da esercitazioni antincendio ed esperimenti di evacuazione (FD), rispetto a dati presenti in letteratura specializzata su esperimenti di evacuazione (PE), rispetto ad altri modelli (OM) o se per i modelli non è prevista alcuna validazione (N).

Nella *Tabella 5.2* invece, per ogni modello elencato, vengono fornite informazioni riguardo le loro caratteristiche speciali, cioè aspetti specifici dell'evacuazione di un edificio che l'utente può essere interessato a simulare per determinati scenari.

Le caratteristiche speciali, molte delle quali possono essere abilitate o disabilitate dall'utente, sono le seguenti:

- Controcorrente;
- Blocco di uscita/ostacoli;
- Le condizioni di incendio influenzano il comportamento;
- Tossicità degli occupanti;
- Definizione dei gruppi;
- Disabilità/gruppi di occupanti lenti;
- Tempi di ritardo/preevacuazione;
- Uso dell'ascensore;
- Scelta del percorso degli occupanti.

5. I software di modellazione dell'esodo

Model	Available to public	Modeling Method	Purpose	Grid/ Structure	Perspective of M/O	Behavior <sup>a</sup>	Movement <sup>a</sup>	Fire data	CAD	Visual	Valid
EVACNET4	Y	M-O	1	C	G	N	UC	N	N	N	FD
WAYOUT	Y	M	5	C	G	N	D	N	N	2-D	FD
STEPS <sup>c</sup>	Y	B	1	F	I	C, P	P, E	Y1,2	Y	2,3-D	C,FD,PE
PEDROUTE	Y	PB	3	C	G	I	D	N	Y	2,3-D	N
Simulex <sup>b</sup>	Y	PB	1	Co.	I	I	ID	N	Y	2-D	FD,PE, 3P
GridFlow	Y	PB	1	Co.	I	I	D	N	Y	2,3-D	FD, PE
FDS+Evac <sup>c</sup>	Y	PB	1	Co.	I	I, C, P	ID	Y3	N/Y	2,3-D	FD,PE,OM
Pathfinder 2009 <sup>c</sup>	Y	PB	1	Co.	I/G	I	D,ID	N	Y	2,3-D	C,FD,PE,OM
SimWalk <sup>c</sup>	Y	PB	1,3	Co.	I	C, P	P	N	Y	2,3-D	FD,PE,3P
PEDFLOW <sup>c</sup>	Y	B	1	Co.	I	C, P	ID	Y2	Y	2,3-D	PE
PedGo <sup>c</sup>	Y,N1	PB/B	1	F	I/G	I/C, P	P,E (CA), C	Y2	Y	2,3-D	FD,PE,OM,3P
ASER1 <sup>c</sup>	Y	B-RA	1	Co.	I	C, P	ID	Y1,2	Y	2,3-D	FD, PE
BldEXO <sup>b</sup>	Y	B	1	F	I	C, P	P, E	Y1,2	Y	2,3-D	FD,PE,OM,3P
Legion <sup>c</sup>	Y,N1	B	1	Co.	I	AI, P	ID, C	Y1	Y	2,3-D	C,FD,PE,3P
SpaceSensor <sup>c</sup>	Y	B	3	Co.	I	C, P	C, Ac, K	N	Y	2,3-D	FD,OM
EPT <sup>c</sup>	Y,N1	B	1	F	I	AI	UC,C	Y2	Y	2,3-D	FD
Myriad II <sup>c</sup>	Y, N1	B	1	C, F, Co.	I	AI	D, UC, IP, Ac, K	Y1	Y	2,3-D	PE, 3P
MassMotion <sup>c</sup>	Y, N1	B	1	Co.	I/G	AI,P	C	N	Y	2,3-D	C,FD,PE,OM
PathFinder	N1	M	1	F	I/G	N	D	N	Y	2-D	N
ALLSAFE	N1	PB	5	C	G	I	Un F	Y1,2	N	2-D	OM
CRISP	N1	B-RA	1	F	I	C, P	E,D	Y3	Y	2,3-D	FD
EGRESS 2002	N1	B	1	F	I	C, P	P,D (CA)	Y2	N	2-D	FD
SGEM <sup>c</sup>	N1	PB	1	Co.	I	I	D	N	Y	2-D	FD,OM
EXIT89 <sup>c</sup>	N2	PB	1	C	I	I/C, P	D	Y1	N	N	FD,3P
MASSegress <sup>b</sup>	N2	B	1	Co.	I	C, AI	C	N	Y	2,3-D	PE,OM
EvacuatioNZ <sup>c</sup>	N2	B	1	C	I/G	I, C, P	D, UC	Y2	Y	2-D	FD, PE,OM

Tabella 5.1 - Caratteristiche principali dei modelli di esodo (NIST 2010)

Model	Counter-flow	Exit Block	Fire Conditions	Toxicity	Groups	Disabled / slower	Delays/pre- evacuation	Elevator use	Route choice
EVACNET4	N	N	N	N	N	N	N	Y	Optimal routes
WAYOUT	N	N	N	N	N	N	Y	N	1 route, flows merge
STEPS <sup>c</sup>	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Conditional
PEDROUTE	N	N	N	N	Y	Y	Y	N	Shortest, optimal, or signage
Simulex <sup>b</sup>	Y	Y	N	N	Y	Y	Y	N	Shortest or altered distance map
GridFlow	Y	Y	N	Y	N	Y	Y	N	Shortest, random, user-def.
FDS+Evac <sup>c</sup>	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	N	Optimal, conditional
Pathfinder 2009 <sup>c</sup>	Y	Y	N	N	Y	Y	Y	N	Shortest, user-def.
SimWalk <sup>c</sup>	Y	N	N	N	Y	Y	Y	Y	Shortest
PEDFLOW <sup>c</sup>	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Shortest, conditional
PedGo <sup>c</sup>	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	N	Probabilistic/conditional, user-def.
ASER1 <sup>c</sup>	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	Shortest, user-def., conditional
BldEXO <sup>b</sup>	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	Various
Legion <sup>c</sup>	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Conditional
SpaceSensor <sup>c</sup>	N	Y	N	N	N	N	N	Y	Conditional – visual perception
EPT <sup>c</sup>	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Shortest, conditional
Myriad II <sup>c</sup>	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Various
MassMotion <sup>c</sup>	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	Shortest, conditional
PathFinder	N	N	N	N	N	N	N	N	User's choice – 2 choices
ALLSAFE	N	N	Y	N	Y	N	Y	N	1-Choice
CRISP	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	Shortest, user-def., conditional
EGRESS 2002	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	Conditional
SGEM <sup>c</sup>	Y	Y	N	N	N	Y	Y	Y	Shortest time, conditional
EXIT89 <sup>c</sup>	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	N	Shortest distance, user-def.
MASSegress <sup>b</sup>	Y	Y	N	N	Y	Y	Y	N	Conditional – visual perception
EvacuatioNZ <sup>c</sup>	N	Y	Y	N	Y	Y	Y	N	Various

Tabella 5.2 - Caratteristiche speciali dei modelli di esodo (NIST 2010)

Dalle Tabella 5.1 e 5.2 si evince come quasi tutti i modelli consentano all'utente un facile utilizzo mediante l'incorporazione di disegni CAD, rendendo così possibile lo studio di progetti più complessi. Tuttavia, un aumento della facilità d'uso può portare a un maggior numero di errori, quindi l'utente deve sempre comprendere i limiti del modello scelto. Quasi tutti i modelli, inoltre, hanno la capacità di visualizzare 3D i risultati prodotti, per una migliore comprensione di essi da parte delle persone che li guardano, ampliando il pubblico potenziale.

Col passare del tempo i modelli hanno incluso al loro interno sempre di più gli aspetti comportamentali e le capacità decisionali degli utenti coinvolti nell'esodo. L'aspetto comportamentale è sicuramente quello più complesso e difficile da simulare nel processo di evacuazione. Nessun modello fino ad oggi affronta completamente tutti gli aspetti comportamentali identificati, anche se vi è una forte tendenza verso modelli che includono un maggior dettaglio comportamentale.

Per rappresentare il processo decisionale impiegato in caso di evacuazione, il modello deve incorporare un metodo appropriato di simulazione del comportamento delle persone esposte. Il fattore comportamentale, è sempre influenzato dalle caratteristiche della popolazione e dalla geometria considerata.

I modelli che utilizzano metodi di calcolo numerico per descrivere l'esodo degli occupanti, come anticipato nel *capitolo 3.5*, possono essere: **basati sul movimento** (idraulici) o **agent-based, cioè basati sul comportamento** (modelli comportamentali o parzialmente comportamentali). Questi ultimi in particolare possono essere ulteriormente suddivisi in base ai sistemi comportamentali adottati:

1. Nessuna regola comportamentale – Questi modelli non applicano regole di comportamento e affidano le scelte decisionali solo sulla base di influenze fisiche. Quindi il movimento della popolazione e la rappresentazione fisica della geometria influenzano e determinano il processo d'evacuazione;
2. Analogia funzionale del comportamento – I modelli di analogia funzionale del comportamento applicano delle equazioni alla popolazione, che complessivamente governano la risposta, minando il comportamento individuale. Questa funzione non deriva necessariamente dal comportamento di vita reale degli occupanti, ma molto più spesso proviene da altri ambiti di ricerca che si presumono essere analoghi al comportamento umano;
3. Comportamento implicito – Nei modelli di comportamento implicito viene spesso dichiarato l'uso di metodi fisici complessi basati sull'applicazione di dati secondari, che incorporano le influenze psicologiche o sociologiche;
4. Regola basate sul sistema comportamentale – I modelli in cui vengono riconosciuti esplicitamente i tratti comportamentali dei singoli occupanti solitamente adottano il modello con regola basata sul sistema comportamentale, permettendo di adottare scelte decisionali in base al set predefinito di regole. Queste regole possono essere attivate in circostanze specifiche e solo in tali circostanze, hanno effetto;
5. Intelligenza artificiale basata su sistema comportamentale – Solo di recente, l'intelligenza artificiale è stata applicata ai modelli di comportamento dove gli occupanti individuali sono progettati per mimare l'intelligenza umana, o approssimativamente ad essa, nel rispetto dell'ambiente circostante.

### 5.3 Pathfinder: un modello basato sul movimento

**P**athfinder è un simulatore di vie di esodo che utilizza comportamenti guida per modellare il movimento degli occupanti, è costituito da tre moduli: un'interfaccia utente grafica, il simulatore ed un visualizzatore di risultati 3D. Pathfinder combina un potente motore di simulazione con un controllo flessibile su popolazione e comportamento per fornire risultati migliori, consente così di valutare i modelli di evacuazione più rapidamente e di produrre una grafica più realistica rispetto ad altri simulatori.

Pathfinder fornisce supporto per l'importazione di file DXF e DWG in formato AutoCAD: attraverso lo strumento di estrazione del pavimento, consente di utilizzare la geometria importata per definire lo spazio di spostamento degli occupanti, per il modello di evacuazione. Anche i modelli PyroSim o Fire Dynamics Simulator (FDS) possono essere utilizzati per estrarre lo spazio per camminare. Se si dispone invece di una planimetria in formato GIF, JPG o PNG, può essere importata ed utilizzata come sfondo per aiutare a disegnare rapidamente il modello direttamente sull'immagine.

Il software utilizza un modello geometrico 3D, all'interno del quale la geometria del modello importato viene trasformata automaticamente in una mesh di navigazione (*navigation mesh*), cioè una superficie triangolare 2D, unilaterale e rappresentata per l'appunto da triangoli adiacenti. Come si può vedere dalla *Figura 5.1*, le ostruzioni (cioè qualsiasi ostacolo situato entro 1,8 metri dal pavimento) vengono rappresentate come spazi vuoti nella mesh di navigazione. La triangolazione facilita inoltre il movimento continuo delle persone in tutto il modello, che avviene proprio sulla mesh di navigazione, rispetto ad altri simulatori che suddividono lo spazio in celle che possono risultare artificialmente limitanti per il movimento degli occupanti. Dato che gli occupanti possono muoversi soltanto sulla mesh di navigazione, non sono presenti oggetti solidi che possano sovraccaricare od influenzare il software.

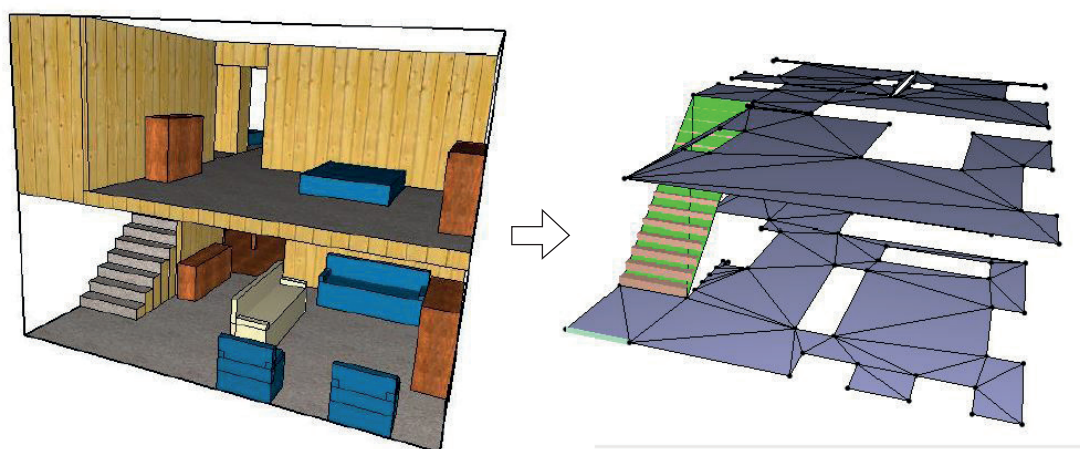


Figura 5.1 - A sinistra il modello di un edificio semplice, a destra la mesh di navigazione corrispondente



Pathfinder offre due opzioni principali per simulare il movimento degli occupanti e tramite l'interfaccia utente è possibile passare dall'una all'altra.

1. La modalità **SFPE Mode** implementa i concetti contenuti nel manuale SFPE di *Fire Protection Engineering* [Nelson and Mowrer, 2002]. È una modalità di flusso in cui le velocità di cammino sono determinate dalla densità degli occupanti all'interno di ogni stanza ed il flusso attraverso le porte è controllato dalla loro larghezza. I risultati SFPE forniscono una base utile per il confronto con altri risultati, ma in tale modalità gli occupanti non fanno alcun tentativo di evitarsi a vicenda e sono autorizzati a compenetrarsi, sebbene le porte impongano un limite di flusso e la velocità sia controllata dalla densità.
2. La modalità **Steering Mode** si basa su comportamenti guida inversi, presentati per la prima volta nel documento di Craig Reynolds *Steering behaviors for autonomous characters* [Reynolds, 1999], e successivamente perfezionati nel documento di Heni Ben Amor [Amor et. al., 2006]. Questa modalità cerca di emulare il più possibile il comportamento e il movimento umano. Consente inoltre di ottenere comportamenti complessi come risultato di algoritmi di movimento, eliminando la necessità di code in uscita e calcoli di densità di occupanti; gli agenti procedono indipendentemente al loro obiettivo, evitando altri occupanti e ostacoli, le portate delle porte non sono specificate (se non opzionalmente per ottenere una visualizzazione superiore in un modello vincolato) ma derivano dall'interazione degli occupanti tra loro e con i confini.

La geometria di navigazione è organizzata in stanze aventi confini invalicabili dagli occupanti, i quali per passare dall'una all'altra devono ricorrere all'uso di porte. Se una porta non collega due stanze ed è posta sul confine esterno di una di esse, viene definita *porta di uscita*. Quando un occupante entra in una porta di uscita in Steering Mode, viene rimosso immediatamente dalla simulazione, mentre quando vi entra in SFPE Mode, viene messo in coda e la velocità di flusso viene annullata.

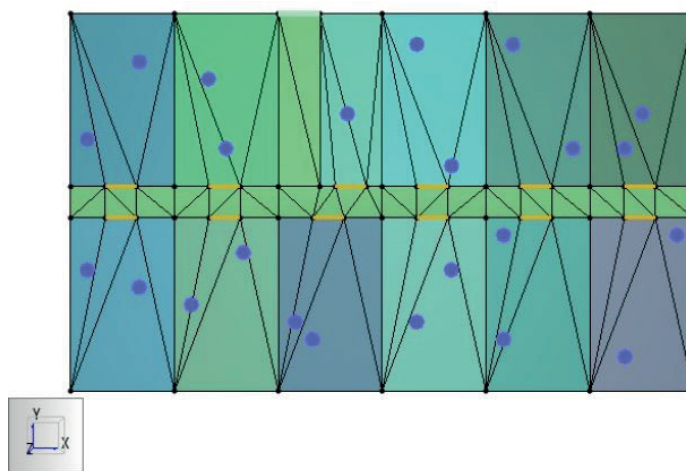


Figura 5.2 - Esempio di mesh di navigazione con indicate stanze, porte ed uscite

## 5. *I software di modellazione dell'esodo*

Nell'esempio in *Figura 5.2* si può notare come la mesh di navigazione sia sovrapposta alla geometria di base, gli occupanti siano individuati da punti blu e le porte siano rappresentate da linee spesse di colore arancione, se collegano due stanze od una stanza ed un corridoio, o di colore verde se si tratta di porte di uscita.

Qualsiasi posizione sulla mesh di navigazione può essere classificata come uno dei seguenti quattro tipi di zone: spazio aperto (rampe e stanza), porte, scale e uscita. Ogni zona ha un diverso effetto sul comportamento degli occupanti.

- Lo *spazio aperto* non impone vincoli espliciti sul movimento. Sono classificate come spazio aperto le stanze e le rampe. Le stanze sono considerate pianeggianti nel calcolo della velocità, infatti in SFPE Mode la massima velocità di camminata degli occupanti attraverso le stanze dipende dalla densità di occupazione di esse. Le rampe, realizzate nell'interfaccia utente allo stesso modo delle scale mediante uno degli strumenti di disegno, sono simili alle scale dal momento che presentano una porta ad ogni estremità, ma a differenza di esse non influenzano la velocità degli occupanti quando viene utilizzata la modalità di calcolo predefinita SFPE Mode per una determinata pendenza.
- Le *porte* che collegano due stanze adiacenti, in SFPE Mode fungono da meccanismo di controllo del flusso principale, mentre in Steering Mode registrano semplicemente il flusso tra le stanze per la visualizzazione dei risultati. Gli occupanti normalmente possono attraversare le porte in entrambe le direzioni, ma nell'interfaccia utente è possibile imporre che la porta sia a senso unico in modo che gli occupanti la attraversino solo nella direzione indicata, a meno che il loro profilo non gli imponga di agire diversamente (es. soccorritori).
- La *scale*, che collegano stanze situate su diversi livelli, corrispondono ad aree in cui la velocità massima degli occupanti è controllata da calcoli specifici per ogni modalità del software. All'inizio e alla fine di ogni scala, c'è una porta: queste porte, che dipendono per l'appunto dalle scale e non possono essere spostate o cancellate indipendentemente da esse, hanno la funzione di collegare la rete delle scale alla rete delle stanze adiacenti e funzionano come normali porte di collegamento. Come le porte, le scale possono essere attraversate in entrambe le direzioni oppure si può imporre che vengano percorse in un unico senso: in questo caso il simulatore impone che anche le porte alle estremità della scala siano a senso unico.
- Le *porte di uscita* sono un caso particolare di porte, che conducono al di fuori dell'edificio.

Il software permette inoltre di valutare gli elevatori come opzioni di evacuazione: ogni ascensore ha un elenco prioritario di piani di pick-up e un piano di scarico, gli occupanti possono passare direttamente all'ascensore più vicino o essere indirizzati verso un

piano di rifugio e attendere fino all'evacuazione con l'ascensore. I soccorritori di emergenza possono controllare gli ascensori selezionati per portarli nelle posizioni desiderate.

Di default ogni occupante utilizza una combinazione di parametri per selezionare il percorso corrente verso un'uscita. I parametri includono: i tempi di attesa per ogni porta della stanza corrente, il tempo per raggiungere ciascuna porta della stanza corrente, il tempo stimato da ciascuna porta all'uscita e la distanza già percorsa nella stanza. L'agente risponde dinamicamente al procedere delle code, alle aperture/chiusure delle porte e ai cambiamenti dei vincoli di velocità della stanza (simulando fumo e detriti). L'utente può modificare l'importanza dei parametri predefiniti per modificare il comportamento. Ad esempio, gli occupanti possono trascurare le code e cercare solo l'uscita più vicina, oppure agli occupanti possono essere assegnati obiettivi specifici (come andare in un luogo e attendere) od uscite o percorsi di esodo specifici, come l'uso delle scale per gli occupanti dei piani inferiori, o degli ascensori per gli occupanti dei piani superiori.

In Pathfinder, gli occupanti sono definiti in due parti: profili e comportamenti. Il profilo definisce le caratteristiche fisse degli occupanti, come la velocità massima, il raggio, l'avatar e il colore. Il comportamento definisce una sequenza di azioni che l'occupante intraprenderà durante la simulazione, come lo spostamento in una stanza, l'attesa e l'uscita.

Agli occupanti possono essere assegnate diverse forme del corpo, per esempio cilindri o poligoni convessi. Rispetto all'utilizzo di forme circolari, quello di poligoni rende più complesso rilevare ed evitare collisioni tra due o più forme. Pathfinder considera gli occupanti rappresentati con forme poligonali come veicoli, i quali non possono spostarsi lateralmente e ruotare completamente. Per evitare collisioni tra veicoli e pareti o tra più veicoli si utilizza la *differenza di Minkowski* che permette di calcolare la distanza di collisione tra due forme, la quale si ottiene sottraendo ogni punto della superficie convessa di una forma, al corrispondente punto più vicino della superficie dell'altra forma poligonale rispetto a cui è calcolata la distanza. Attraverso questo metodo si può calcolare la distanza tra due veicoli che traslano soltanto, mentre il rilevamento delle collisioni, che determina se un veicolo può ruotare di un certo angolo senza collisioni, include anche la rotazione nei calcoli di movimento. In situazioni difficili, per esempio se una forma rettangolare tocca un muro mentre sta attraversando una porta od un corridoio stretto, Pathfinder consente ai veicoli di sovrapporsi parzialmente agli ostacoli, in modo da proseguire il proprio percorso senza bloccarsi.

Il software include modelli umani che rappresentano una gamma di culture, età, abbigliamento e soccorritori di emergenza. Gli occupanti con particolari esigenze di mobilità possono essere modellati con sedie a rotelle e letti di ospedale per essere evacuati da assistenti designati. Questi modelli includono animazione completa per risultati realistici. I team di evacuazione separati possono concentrarsi sull'assistenza di specifici gruppi

di individui. È inoltre possibile aggiungere gli occupanti in modo dinamico ad un modello basato su di una tabella di portata determinata, in modo da simulare il flusso in entrata, con occupanti che entrano in vari momenti successivi. Ciò rende possibile rappresentare realisticamente il gruppo della popolazione di interesse. Pathfinder può inoltre animare senza problemi decine di migliaia di persone in tempo reale utilizzando una scheda grafica standard e può fornire strumenti semplici per creare filmati che documentino i risultati. I grafici disponibili nel software includono densità degli occupanti, utilizzo delle superfici, livello di servizio, ecc.. Ognuno di questi può essere personalizzato modificando opzioni come il numero di contenitori, l'intervallo di valori, i colori e le sfumature.

Pathfinder connette famiglie, colleghi, studenti o altri gruppi di occupanti in gruppi che si cercano a vicenda e mantengono una distanza minima. Questi gruppi possono essere formati con un profilo leader per le evacuazioni di gruppo organizzate o per scopi di non evacuazione, ad esempio una guida turistica attraverso un museo. Se un membro è troppo lontano, gli occupanti raggruppati possono essere disconnessi e rallenteranno per consentire al membro disconnesso di raggiungere il gruppo. In ambienti affollati, questo effetto viene attenuato dal momento che gli occupanti si rendono conto della necessità di mantenere il traffico in movimento.

Ogni persona nel modello agisce con un proprio profilo (es. dimensione e velocità di camminata) ed un proprio comportamento (es. uscite, tempi di attesa, tappe di percorso) assegnatogli nell'interfaccia utente. In base alle caratteristiche peculiari, ogni occupante prende decisioni autonomamente su come utilizzare il proprio spazio e su quale percorso di uscita seguire.

Un certo comportamento determina una sequenza di obiettivi che l'occupante deve raggiungere nella simulazione, i quali possono essere: obiettivi di ricerca cioè procedere per tappe, od obiettivi di inattività cioè attendere prima di procedere:

- Gli obiettivi di ricerca sono quelli in cui un occupante si muove verso una destinazione sulla mesh di navigazione, ad esempio una certa tappa, una stanza, un ascensore o un'uscita. L'occupante utilizza la pianificazione del percorso, la generazione del percorso ed il percorso derivante da essi, per raggiungere la destinazione.
- Gli obiettivi di inattività sono quelli in cui un occupante deve aspettare in un certo luogo fino a quando non si verifica un evento, ad esempio un determinato intervallo di tempo, oppure che un ascensore raggiunga il piano di scarico. Mentre l'occupante è in attesa, se il software è in SFPE Mode, rimane fermo finché non si verifica l'evento, se invece è in Steering Mode, utilizza la separazione per mantenere una distanza dagli altri occupanti. In Steering Mode l'occupante può spostarsi, per cui gli viene assegnata un'area di contenimento che dipende dall'obiettivo di ricerca precedente nel comportamento dell'occupante. Le aree sono così definite: se l'obiettivo di ricerca precedente era una tappa, l'occupante cerca di rimanere nel raggio di essa; se

l'obiettivo di ricerca precedente era una stanza od un ascensore, l'occupante cerca di rimanervi all'interno lontano da porte in modo da permettere ad altri occupanti di entrarvi; se non c'era alcun obiettivo di ricerca, l'occupante può spostarsi ovunque lungo la mesh di navigazione.

Questi comportamenti possono anche essere progettati per cambiare nel tempo. È possibile creare vari profili da assegnare agli occupanti, i parametri di ciascun profilo possono essere descritti utilizzando distribuzioni costanti, uniformi, normali standard o normali logaritmiche. È infatti possibile creare profili che rappresentino bambini e adulti e quindi determinare che la popolazione sia costituita per l'80% dai adulti e per il 20% da bambini.

In Steering Mode, quando gli occupanti ricevono istruzioni per andare in una stanza ed attendere, cercano di riempirla in modo da permettere anche ad altri occupanti di entrarvi. Per **riempire una stanza** gli occupanti seguono alcuni passaggi:

1. Ottenere una mappa di distanza dalla porta, cioè una mappa che indichi la distanza di una porta per qualsiasi punto della stanza. Tale mappa viene generata suddividendo la stanza in triangoli più piccoli, come mostrato nella *Figura 5.3*. Per ciascun vertice del triangolo suddiviso, viene generato un valore di distanza che è la distanza minima da un insieme di porte, cioè tutte le porte collegate alla stanza stessa. Ogni occupante controlla periodicamente la mappa di distanza dalla porta per vedere se è cambiata ed aggiornare di conseguenza le proprie decisioni;

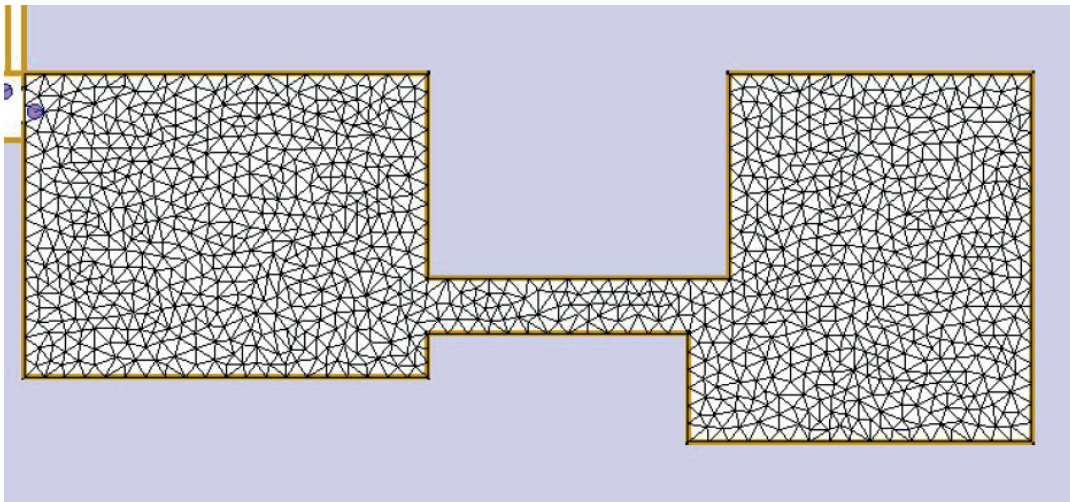


Figura 5.3 - Visualizzazione di una stanza suddivisa in triangoli per realizzare la mappa di distanza dalla porta

2. Determinare una direzione ideale di ricerca: tale direzione viene scelta dall'occupante tra le direzioni campione, ed è quella che dà la distanza maggiore da una porta, in base alla mappa di distanza dalla porta;

## 5. *I software di modellazione dell'esodo*

3. Decidere se spostarsi effettivamente verso la direzione ideale di ricerca o restare dove si è.

Quando un occupante ha una destinazione da cercare, ha bisogno di un piano per raggiungerla, un percorso da seguire ed un modo per seguirlo tenendo conto degli ostacoli dinamici in cui può imbattersi, come ad esempio altri occupanti. Possono esserci più percorsi per raggiungere una destinazione, ognuno con diversa lunghezza, numero di occupanti e pericoli. Un metodo per scegliere il percorso più idoneo può essere quello di scegliere la via più breve, anche se può non essere quella più veloce o la più adatta affinché l'occupante raggiunga la destinazione prefissata. Pathfinder risolve questo problema mediante un approccio che, attraverso le informazioni locali sulla stanza correntemente occupata e la conoscenza generale dell'edificio, suddivide i percorsi in modo gerarchico.

In generale un occupante **pianifica il percorso** basandosi sui seguenti passaggi:

1. Genera un elenco di obiettivi locali, che includono le porte collegate alla stanza correntemente occupata, che possono condurre all'obiettivo di ricerca; oppure se l'obiettivo di ricerca si trova nella stanza corrente, questo viene aggiunto alla lista degli obiettivi locali.
2. Sceglie un obiettivo locale basato sulla conoscenza locale e globale del modello e delle preferenze degli occupanti.
3. Si muove verso l'obiettivo locale utilizzando la generazione del percorso e perseguendolo, e ripete quindi questi passaggi fino al raggiungimento dell'obiettivo di ricerca finale.

Per raggiungere un obiettivo locale, Pathfinder pianifica un percorso utilizzando l'algoritmo di ricerca A\* [Hart et al., 1968] e la mesh di navigazione triangolata. Tale percorso è rappresentato come una serie di punti sui bordi delle mesh, che da A\* vanno fino all'obiettivo dell'occupante. La *Figura 5.4* mostra il percorso di un occupante in una semplice stanza rettangolare: l'occupante è in piedi nell'angolo in basso a sinistra e progetta di uscire dall'angolo in basso a destra, ma un ostacolo gli impedisce di camminare dritto fino all'uscita. Il percorso pianificato dall'occupante è rappresentato da una linea scura ed i punti di riferimento (*waypoints*) sono indicati da cerchi. Viene generato un punto di riferimento per ogni lato della mesh di navigazione, rappresentata da linee sottili che formano triangoli all'interno dell'area rettangolare.

Per smussare questo percorso frastagliato, Pathfinder utilizza una variazione della tecnica nota come *corda tesa - string pulling* [Johnson, 2006]. Con questa tecnica, i punti del percorso vengono allineati ed esso si piega solo in corrispondenza degli ostacoli, ma lasciando comunque un idoneo raggio per il passaggio dell'occupante. Pathfinder rimuove quindi i punti di riferimento del percorso intermedi, che si trovano tra altri due lungo una linea retta.

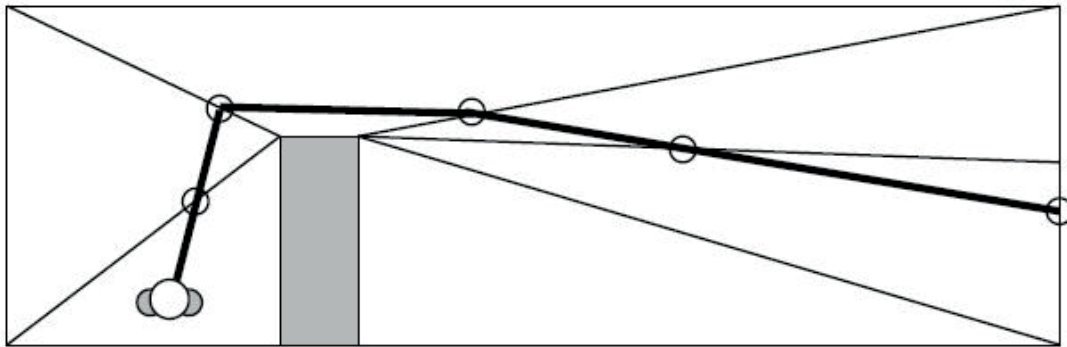


Figura 5.4 - Percorso pianificato di un occupante, in cui vengono mostrati i punti sui bordi delle mesh.

Pathfinder fornisce inoltre un sistema di priorità, che utilizza *livelli di priorità* discreti assegnati a ciascun occupante. Quando un occupante ne incontra un altro con il medesimo livello di priorità, si comporta normalmente, procedendo lungo la propria curva di ricerca. Se l'altro occupante ha un livello di priorità inferiore, i due occupanti possono scontrarsi con distanza di sicurezza pari a zero, procedendo nel loro percorso di ricerca. Se al contrario, l'occupante ha un livello di priorità superiore, il comportamento di ricerca si interrompe e subentra quello di separazione: l'occupante con livello di priorità inferiore si allontana, consentendo all'altro, con livello di priorità superiore, di proseguire il proprio percorso di ricerca.

I livelli di priorità dell'occupante sono completamente relativi e valori più alti indicano una priorità più alta. Per esempio, se tre occupanti soddisfano le priorità assegnate di 4, 6 e 12, si comporteranno come se le loro priorità fossero rispettivamente 0, 1 e 2. Ciò consente agli occupanti con priorità inferiore di allontanarsi da quelli con priorità superiore. Questo sarebbe utile quando si simulano i primi soccorritori che devono essere in grado di muoversi facilmente attraverso una folla di occupanti. Un occupante ha inoltre la precedenza se: gli altri occupanti hanno un livello di priorità minore; gli altri occupanti hanno lo stesso livello di priorità ma minori possibilità di raggiungere per primi l'incrocio con l'occupante considerato.

Nelle situazioni di affollamento gli occupanti non possono fare a meno di scontrarsi con le pareti o con altri occupanti. In queste situazioni è necessaria un'ulteriore *gestione delle collisioni* per evitare che la simulazione di esodo venga invalidata. Le collisioni possono essere o tra occupanti o tra un occupante e il confine di una mesh di navigazione (per esempio un muro). Se la gestione delle collisioni è attivata, l'occupante si ferma non appena si scontra con una parete o con un altro occupante per un tempo dato. Se la gestione delle collisioni è disattivata, l'occupante si ferma soltanto in caso di scontro con una parete.

## 5. *I software di modellazione dell'esodo*

In Steering Mode, il limitatore di flusso degli occupanti attraverso una porta, può essere attivato sia mediante il parametro di flusso delle porte di accesso, sia mediante il parametro di flusso delle singole porte. Tale limitatore funziona in modo simile a quello in SFPE Mode. Le principali differenze sono:

- In Steering Mode il limite di flusso può essere specificato solo come valore fisso e non può basarsi sulla densità delle stanze, come nella in SFPE Mode.
- Il flusso effettivo raggiunto in Steering Mode è spesso inferiore al limite specificato.
- Gli occupanti che attraversano una porta a flusso limitato in Steering Mode possono riscontrare un leggero rallentamento sulla soglia, anche se non devono fermarsi alla porta per rispettare il limite di flusso. Questo accade perchè ogni occupante deve mettersi in coda, e quindi fermarsi completamente, davanti alla porta prima di attraversarne la soglia, in modo che la logica del limite di flusso proceda correttamente. L'occupante passa immediatamente attraverso la porta, ma deve rallentare, perdendo così in parte il suo ritmo. Tale rallentamento risultadirettamente proporzionale all'arco di tempo in cui si svolge la simulazione di esodo, è quindi maggiore per lunghe simulazioni.

La visualizzazione dei risultati 3D è disponibile sia durante il calcolo (per visualizzare lo stato corrente) sia immediatamente dopo il completamento. In questo modo l'utente può visualizzare interattivamente i movimenti degli occupanti, andare avanti e indietro nel tempo, visualizzare i percorsi e selezionare le persone da guardare. Il file di output di riepilogo include i tempi di uscita minimi, massimi e medi e i tempi di ingresso e di uscita attraverso stanze e porte, che consentono quindi di valutare rapidamente anche gli eventuali punti di congestione. Con i dati relativi al fumo e al fuoco importati dai risultati FDS, Pathfinder può inoltre mostrare quali sono le aree ad alto rischio, monitorando gli agenti inquinanti (FED). Il fumo e il fuoco sono visivamente resi in 3D contemporaneamente all'evacuazione degli occupanti. Tutte queste informazioni, compreso il movimento dei singoli occupanti, vengono esportate in un file CSV.

Pathfinder è destinato all'utilizzo da parte di persone competenti nel campo della modellazione dell'esodo, può avere o meno capacità predittive se applicato ad un insieme specifico di circostanze fattuali. La mancanza di previsioni accurate da parte del modello potrebbe portare a conclusioni errate, per cui tutti i risultati devono essere preventivamente valutati da un utente informato.



Come precedentemente anticipato, esistono due modalità di utilizzo di Pathfinder, a seconda delle quali varia il modo in cui l'occupante segue i punti di riferimento, una volta che il percorso è stato generato.

### 1. SFPE Mode

Questa modalità implementa le tecniche di modellazione dell'esodo basate sul flusso, presentate nel manuale *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [Nelson and Mowrer, 2002]* e nella guida *SFPE Engineering Guide: Human Behavior in Fire [SFPE, 2003]*.

I parametri usati in questa Modalità sono i seguenti:

- Densità massima di una stanza ( $D_{max} > 0.0$  e di default è pari a  $3.55 \text{ pers/m}^2$ ) – tale parametro controlla quanti occupanti sono autorizzati ad entrare in una determinata stanza tramite porte e scale. Attraverso la densità della stanza, Pathfinder determina la velocità di movimento degli occupanti e la portata della porta attraverso cui si ha il deflusso di essi.
- Strato limite (*Boundary Layer* –  $BL \geq 0.0$ ) – tale valore controlla la larghezza effettiva delle porte (*Width* –  $W$ ) nella simulazione, da cui dipende la velocità con cui gli occupanti possono defluire attraverso di esse. La larghezza effettiva della porta è:  $W - 2BL$ .
- Tassi di flusso delle porte ad alta densità, usano un flusso specifico calcolato (on/off, di default = on) – questo parametro controlla il calcolo del flusso specifico di una porta rispetto alla densità. Se è settato su *on*, il flusso specifico attraverso le porte è calcolato in base alla densità degli occupanti nelle stanze adiacenti.
- Tassi di flusso delle porte ad alta densità, usano sempre il flusso specifico massimo (on/off, di default = off) – anche questo parametro controlla il calcolo del flusso specifico di una porta rispetto alla densità. Se è settato su *on*, le porte utilizzano il flusso specifico massimo.
- Velocità di movimento di un occupante ( $v$ ) – dipende da: velocità massima ( $v_{max}$ ) dell'occupante, specificata nell'interfaccia utente; tipo di terreno da percorrere, costanti e modificatori di velocità ad esso associate; densità degli occupanti nella stanza attuale.
- Velocità di base dell'occupante ( $v_b$ ) – è definita in funzione di densità, tipo di terreno e una curva di frazione di velocità basata sul diagramma fondamentale SFPE. Non tiene conto di costanti e modificatori di velocità associati al terreno. La velocità base si calcola come:

$$v_b = v_{max} \times v_f(D) \times v_{ft}$$

5. *I software di modellazione dell'esodo*

$v_{max}$  è la velocità massima dell'occupante, inserita nell'interfaccia utente come velocità;

$v_f(D)$  è una frazione della velocità in funzione della densità degli occupanti nella stanza corrente ( $D$ ):  $v_f(D) = 1$  se  $D < 0.55$  pers/m<sup>2</sup>;  $v_f(D) = \max [v_{fmin} ; \frac{1}{0.85} \times (1 - 0.266 D)]$ ;

$v_{fmin}$  è una frazione della velocità minima definita nell'interfaccia utente (di default è pari a 0.15);

$v_{ft}$  è una frazione della velocità che dipende dal tipo di terreno attraversato dall'occupante:  $v_{ft} = \frac{k}{1.4}$  ( $k$  è una costante che dipende dal tipo di terreno)

Per un terreno livellato (stanze) e per le rampe,  $k = 1.40$  m/s. Per le scale invece, la costante  $k$  dipende dalla pendenza dei gradini, calcolata come Alzata/Pedata, e viene definita nel manuale SFPE come illustrato nella *Tabella 5.3*:

Alzata (pollici)	Alzata (cm)	Pedata (pollici)	Pedata (cm)	k
7.5	19.05	10.0	25.4	1.00
7.0	17.78	11.0	27.94	1.08
6.5	16.51	12.0	30.48	1.16
6.5	16.51	13.0	33.02	1.23

*Tabella 5.3 - Valori di k a seconda della pendenza dei gradini di una scala, come definito nel manuale SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [Nelson and Mowrer, 2002]*

Pathfinder utilizza queste informazioni per determinare i valori di  $k$  per qualsiasi scala a seconda della sua pendenza, costruendo una funzione lineare a tratti a partire dai dati noti. Per pendenze superiori a 0.75 (il massimo della tabella),  $k$  non è inferiore a 0.034 in modo che anche le scale molto ripide non causino rallentamenti agli occupanti; per pendenze inferiori a 0.5 (il minimo della tabella)  $k$  viene interpolato considerando  $k = 1.4$  in corrispondenza di una pendenza pari a 0 (sebbene non realistica perchè corrisponderebbe ad una scala nulla).

- Densità ( $D$ ) – è considerata uniforme in una singola stanza ed è calcolata come:

$$D = \frac{n_{pers}}{A_{room} - A_{blayer}}$$

$n_{pers}$  è il numero degli occupanti della stanza;

$A_{room}$  è l'area della stanza;

$A_{blayer}$  è l'area dello strato limite, calcolata moltiplicando la lunghezza totale dei bordi limite della stanza per lo strato limite, come impostato nella scheda di com-

portamento della finestra di parametri di simulazione.

- Modificatori di velocità e costanti – ai componenti di uscita, cioè stanze, scale e rampe, possono essere assegnati tali parametri nell'interfaccia utente, in modo da simulare al meglio gli effetti ambientali come fumo o geometria di navigazione specializzata (per esempio scale mobili o marciapiedi mobili). Di default tutti i componenti di uscita hanno un modificatore di velocità pari a 1. Quando un occupante entra in un componente di uscita a cui è assegnato un modificatore di velocità, la sua velocità viene calcolata come:  $v = k_v \times v_b$

$k_v$  è il modificatore di velocità assegnato al componente;

$v_b$  è la velocità di base dell'occupante nel componente.

Se il componente ha una costante di velocità ( $v_c$ ) invece di un modificatore di velocità, la velocità dell'occupante dipende dal parametro connesso al suo profilo, *Walk on Escalators*, e dal valore della costante di velocità. Se il parametro *Walk on Escalators* è attivato o il valore della costante di velocità è 0, la velocità dell'occupante è:  $v = v_c + v_b$ ; altrimenti, la velocità dell'occupante è:  $v = v_c$ .

In SFPE Mode di Pathfinder, il flusso degli occupanti attraverso una porta è specificato dalle linee guida SFPE: quando un occupante passa attraverso una porta, il simulatore calcola un tempo di ritardo in base al flusso specifico di essa. Questo tempo, assegnato alla porta stessa, deve trascorrere prima che un altro occupante possa passarvi attraverso. Ogni porta può avere un flusso specifico diverso a seconda della direzione che gli occupanti stanno percorrendo per attraversarla e del tipo di terreno collegato ad essa. Il flusso specifico per una particolare direzione attraverso una porta è:

$$F_s = (1 - 0.266 \times D) \times k \times D$$

$k$ , costante di velocità di evacuazione, dipende dal terreno della stanza precedente;

$D$  è la densità massima degli occupanti, tra quelle delle stanze collegate alla porta. Il valore di  $D$  rientra nell'intervallo [1.9; 3.0] pers/m<sup>2</sup>, in modo che possa garantire sia che basse densità non rallentino il flusso, sia che alte densità non riducano il flusso a zero. La densità viene determinata in questo modo se si considera il tasso di flusso della porta ad alta densità, calcolato usando un flusso specifico. Se invece per calcolare il tasso di flusso viene usato il flusso specifico massimo, la densità viene imposta pari a 1.88 pers/m<sup>2</sup>.

Il tempo impiegato da  $n$  occupanti per attraversare una porta con larghezza effettiva

$W_e$  è: 
$$T = \frac{n-1}{F_s}$$

( $n$  è ridotto di 1 perchè il primo occupante che attraversa una porta non deve attendere alcun ritardo).

## 5. I software di modellazione dell'esodo

In SFPE Mode le eventuali collisioni tra occupanti e pareti, vengono gestite in due passaggi: il primo prima che si verifichi il movimento dell'occupante, il secondo durante il movimento. Nella fase di pre-movimento, la velocità di spostamento viene regolata in modo da costringere l'occupante a scorrere lungo le pareti vicine. Nella fase di movimento invece l'occupante si ferma semplicemente alla prima collisione.

## 2. Steering Mode

In questa modalità Pathfinder controlla il modo in cui un occupante segue la propria curva di ricerca, attraverso una combinazione di meccanismi di guida e di gestione delle collisioni. Tali meccanismi consentono infatti all'occupante di deviare dal proprio percorso, mantenendo comunque la giusta direzione verso l'obiettivo prefissato.

I parametri usati in questa Modalità sono i seguenti:

- Velocità –  $V_{max}$  è la velocità massima modificata di un occupante lungo il proprio percorso e dipende dal terreno, dalla velocità massima specificata  $v_{max}$  e dalla distanza rispetto agli altri occupanti circostanti, attraverso cui si stima la densità di una stanza.  $V_{max}$  corrisponde quindi alla velocità  $v$  calcolata in SFPE Mode, e una volta calcolata viene utilizzata dal sistema di guida per calcolare il vettore velocità desiderato.

$v_f(D)$  e  $v_{ft}$ , usati per calcolare  $V_{max}$ , possono sia essere lasciati con il valore predefinito di SFPE Mode, sia essere definiti dall'utente nel profilo dell'occupante come funzioni lineari a tratti.  $v_f(D)$  risulta in funzione della densità degli occupanti, mentre  $v_{ft}$  dipende dalla pendenza della scala o della rampa, a seconda del tipo di terreno. La pendenza di una scala si calcola attraverso il rapporto Alzata/Pedata (dati inseriti nell'interfaccia utente), quella di una rampa è data invece dalla normale del triangolo che rappresenta la sezione della rampa, non può essere immessa direttamente dall'utente ma si calcola come: 
$$slope = \frac{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}}{n_z}$$

$n_x$ ,  $n_y$  e  $n_z$  sono i componenti della normale del triangolo considerato.

A differenza di SFPE Mode, in Steering Mode possono essere definite diverse funzioni per  $v_f(D)$  e  $v_{ft}$ , a seconda che l'occupante salga o scenda la scala o la rampa considerata.

- Accelerazione – è suddivisa in più componenti a seconda del vettore velocità desiderato, calcolate dal sistema di guida e combinate per determinare l'accelerazione finale:

$a_{fmax} = \frac{v_{max}}{t_{accel}}$  è l'accelerazione tangenziale diretta ( $t_{accel}$  è il tempo di accelerazione);

$a_{bmax} = 2 \times a_{fmax}$  è l'accelerazione tangenziale inversa;

$a_{rmax} = 1,5 \times a_{fmax}$  è l'accelerazione radiale.

- Densità degli occupanti – è stimata utilizzando la distanza di un occupante rispetto agli altri vicini e la densità spaziale media laterale e longitudinale (Figura 5.5).

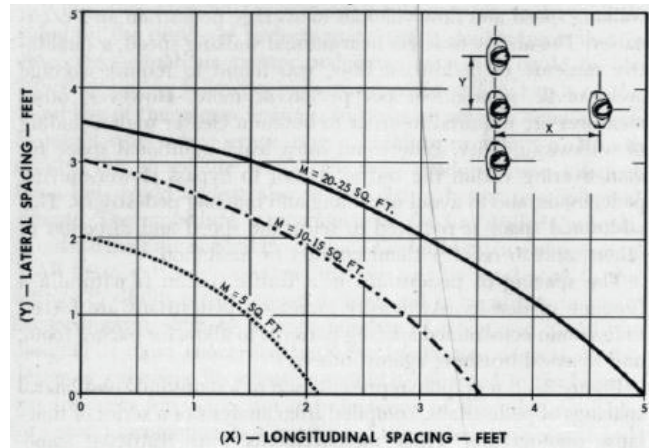


Figura 5.5 - Distanza media longitudinale e laterale di pedoni in un flusso di traffico [Fruin, 1987 - cap.3]

Le curve che rappresentano la densità nella Figura 5.5, sono considerate come parti del contorno di un'ellisse. Quindi per calcolare la densità per un occupante, si considera un sistema di coordinate locali avente origine coincidente alla posizione dell'occupante stesso e l'asse X allineato con la sua velocità corrente. Di conseguenza anche la posizione di ogni altro occupante vicino viene trasposta in questo sistema di coordinate locali. Se la coordinata locale dell'occupante vicino ha un valore  $x < 0$ , questo viene ignorato in quanto non influenza la velocità dell'occupante considerato. Se la coordinata ha invece un valore  $x \geq 0$ , la densità viene dedotta in base ai contorni delle curve o per interpolazione tra esse. Il massimo di queste densità viene così utilizzato come densità per l'occupante.

- Guida – il sistema di guida muove gli occupanti in modo che seguano approssimativamente la propria curva di ricerca e possano rispondere ad un ambiente in evoluzione. Pathfinder definisce diversi comportamenti di guida: ricerca, inattività separata, ricerca separata, ricerca separata di una parete, l'evitare pareti, l'evitare altri occupanti, passaggio per corsie o curve.

Quindi, a seconda del comportamento corrente, un occupante può trovarsi in uno di questi due stati:

- a. Ricerca – l'occupante sta cercando di seguire un percorso per raggiungere una certa destinazione.
- b. Inattività – l'occupante è in attesa che trascorra un determinato periodo di tempo.

5. *I software di modellazione dell'esodo*

La *ricerca* indirizza l'occupante a percorrere una curva di ricerca.

L'*inattività separata* allontana gli occupanti per mantenere la distanza desiderata tra di essi, viene utilizzata quando gli occupanti si trovano in stato di riposo.

L'*evitare pareti* è un comportamento che rileva pareti e, in modo da evitare collisioni con esse, dirige l'occupante prevedendo i suoi movimenti mediante la proiezione di un cilindro davanti ad esso nella direzione che sta percorrendo.

L'*evitare altri occupanti* è un comportamento che, per evitare collisioni tra gli occupanti, crea un elenco di tutti gli occupanti presenti all'interno di un'area di forma e dimensione controllate dalla velocità di essi. Anche in questo caso le collisioni possono essere evitate proiettando cilindri davanti agli occupanti per prevederne il movimento nella direzione che stanno percorrendo.

La *ricerca separata* è finalizzata a massimizzare la velocità degli occupanti, calcolata mediante la curva velocità/densità e la relazione di Fruin distanza/densità.

La *ricerca separata di una parete* è un comportamento che guida gli occupanti in modo tale che essi mantengano una distanza dalle pareti pari allo strato limite.

Il *passaggio* guida gli occupanti in modo che preferiscano camminare dietro ad altri occupanti che si muovono più velocemente. Gli occupanti seguono corsie di passaggio qualora incontrino altri occupanti in controcorrente rispetto a loro, mentre seguono curve quando si muovono in gruppo, in modo da non tagliare il percorso ad altri e sfruttare al meglio ampi corridoi. Questo ultimo tipo di comportamento è simile all'evitare altri occupanti e alla ricerca separata, ma risulta ottimizzato in quanto tratta le dimensioni e le posizioni degli occupanti vicini in modo diverso nel calcolo delle intersezioni tra i percorsi degli occupanti. Le dimensioni di un occupante vicino vengono infatti ampliate del 50% e la sua posizione viene spostata di una distanza pari al 150% del raggio dell'occupante lungo la direzione che sta percorrendo.

## 5.4 CPI win® FSE - EVAC: un modello basato sul comportamento

CPI win® FSE è un software che, attraverso l'applicazione dei principi della Fire Safety Engineering, permette di studiare la genesi del *fenomeno incendio* e di simulare sviluppo, propagazione ed effetti di esso su persone, strutture e beni, secondo gli indirizzi del D.M. 3 Agosto 2015, utilizzando come motore di calcolo FDS+EVAC. Consente inoltre di studiare soluzioni innovative legate ai principi della sicurezza antincendio, attraverso la simulazione dell'evacuazione delle persone verso luoghi sicuri, tenendo conto del contesto strutturale, ambientale e del comportamento degli individui coinvolti. Questo software permette anche di studiare e verificare la corretta progettazione delle vie di esodo e la correttezza del piano di sicurezza previsto per una specifica attività.

I metodi FSE consentono di progettare e verificare le soluzioni alternative per varie strategie antincendio ai sensi del D.M. 03/08/2015 e sono particolarmente utili nell'ottenimento di deroghe, nella valutazione del livello di rischio dovuto ad un incendio e nella progettazione di conseguenti misure compensative, al fine di soddisfare gli obiettivi di prevenzione incendi.

L'applicazione dei principi dell'ingegneria della sicurezza antincendio dà la possibilità al progettista di definire soluzioni idonee al raggiungimento di obiettivi progettuali mediante analisi di tipo quantitativo, rese facili in questo caso dal post processore del software CPI win® FSE, che è in grado di trasformare tutti i risultati della simulazione ottenuta in diagrammi e curve facilmente interpretabili (Figura 5.6), semplificando così la lettura dei dati di interesse (andamento delle temperature, livello di visibilità, percentuali di ossigeno, tempo necessario per l'evacuazione delle persone, ecc..).

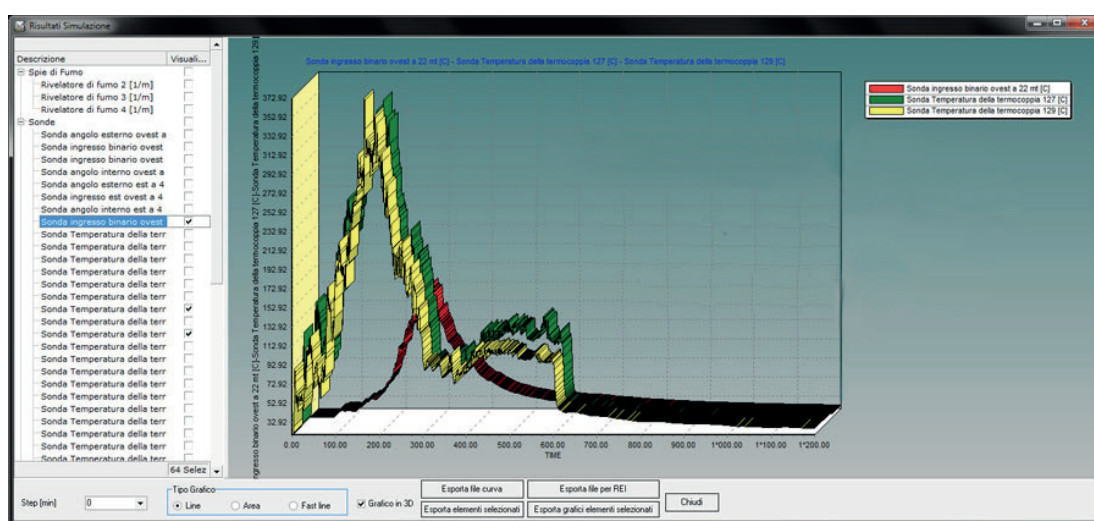


Figura 5.6 - Grafico generato da CPI win® FSE, derivante dall'elaborazione automatica dei dati rilevati da sonde e dispositivi

## 5. I software di modellazione dell'esodo

Il software consente di riprodurre il layout ambientale (muri, porte, finestre, arredi vari, affollamento previsto, ecc.), partendo da un semplice file CAD e mediante la definizione delle caratteristiche degli oggetti, delle sostanze inserite e dei parametri richiesti dai modelli *FDS* (Fire Dynamics Simulator) ed *EVAC* (Evacuation), per esempio stratigrafie pareti, poteri calorifici, curve HRR, temperature di attivazione dispositivi, numero e tipo degli individui presenti, velocità di percorrenza, tempo di pre-evacuazione, ecc.. È, infatti, il primo prodotto software in Europa che consente di utilizzare in modo semplice ed intuitivo *FDS*, dell'ente statunitense NIST, congiuntamente al programma *EVAC* del VTT (Technical Research Centre of Finland).

Dopo aver impostato i percorsi di esodo e definito i relativi obiettivi, è possibile visualizzare, tramite tabelle, i tempi di decadimento in rapporto a quelli indicati fra gli obiettivi stessi. È inoltre possibile ottenere, in qualsiasi punto, le curve tempo-temperatura, per la verifica analitica della resistenza al fuoco sulla base delle curve naturali e non di quelle standard, più penalizzanti dal punto di vista del carico; ne consegue così una possibilità di risparmio ai fini dell'eventuale compartimentazione.

Definiti gli scenari di calcolo da analizzare, *CPI win® FSE* genera un filmato di simulazione dell'evento calcolato (*Figura 5.7*), evidenziando in modo dinamico tutti i parametri caratteristici, e produce una relazione per impostare una corretta pratica FSE, che integra l'analisi del rischio con la descrizione del processo e dell'attività in esame, in modo da ottenere una documentazione tecnica in linea con tutte le indicazioni normative.

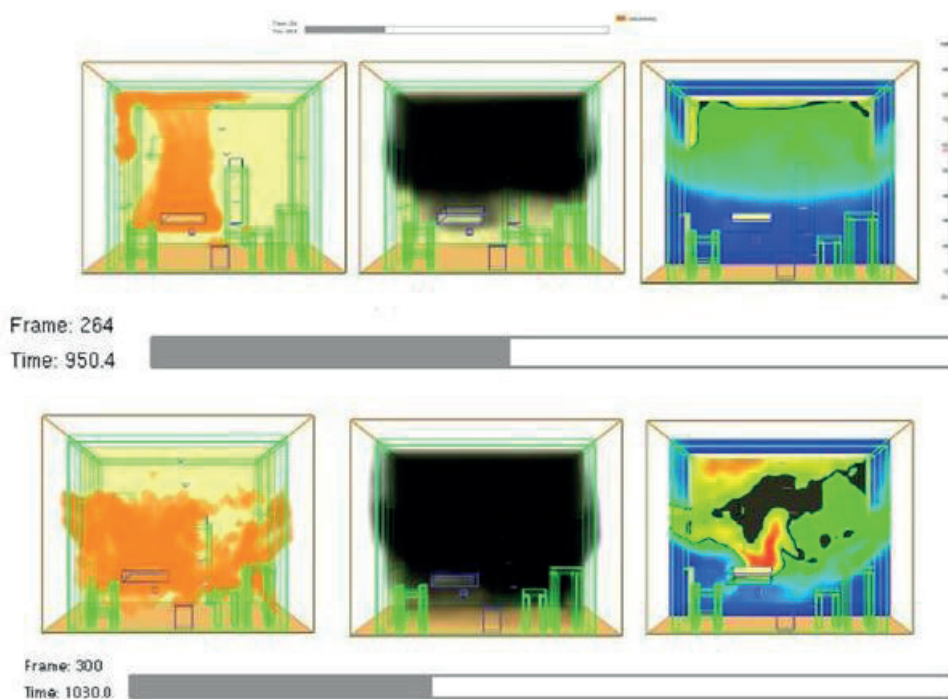


Figura 5.7 - Visualizzazione degli effetti del fumo in un ambiente in caso di flashover



Le peculiarità del software CPI win® FSE sono:

- L'uso di algoritmi LES per la trattazione della turbolenza e di veloci risolutori di flusso;
- La presenza del programma *Smokeview* per il post processing dei risultati;
- Il formato estremamente semplice degli input che rende l'apprendimento e l'utilizzo del software molto agevole;
- La sua libertà di utilizzo.

Una difficoltà intrinsecamente associata alle simulazioni di evacuazione è sempre stata quella del disaccoppiamento tra l'incendio e l'esodo, anche se alcuni software hanno previsto sin da subito una certa interazione, includendo semplici modelli a zone al loro interno o accettando i risultati di tali modelli in maniera semiautomatica. FDS+Evac consente invece la simulazione simultanea dei processi di incendio e di evacuazione, ma può anche essere utilizzato per simulare solo il processo dell'evacuazione senza considerare gli effetti del fuoco.

Il software è costituito da due moduli:

1. **EVAC** (Evacuation) – Il modulo permette di specificare in maniera dettagliata i tempi di intervento delle due fasi del processo di evacuazione da un ambiente: la fase di percezione del pericolo e quella di percorrenza, considerando anche il tempo perduto per effettuare le code.

Il motore di calcolo sviluppa la simulazione tenendo conto dei vari fattori che influenzano il *processo di decisione degli evacuanti*, tra cui la familiarità delle uscite considerate e la visibilità di esse, in funzione sia delle condizioni letali sia di quelle non letali di disturbo dell'evacuante (es. effetto di oscuramento del fumo, ostacoli, temperatura, ecc..). Per la corretta interpretazione di quanto ipotizzato e simulato, il post-processore fornisce i valori fondamentali e necessari, ovvero il tempo per l'esodo delle persone da un determinato ambiente, considerando o meno gli effetti dell'incendio, qualora presente.

In FDS+EVAC, ogni evacuante è seguito da un'equazione di moto. Questo approccio permette ad ogni individuo di avere proprietà personali e proprie strategie di fuga, cioè è trattato come un *agente autonomo*. Sugli agenti agiscono poi delle forze, costituite da forze fisiche, come le forze di contatto e la forza di gravità, e da forze psicologiche esercitate dall'ambiente e da altri agenti (*Figura 5.8*).

Il modello base dell'algoritmo di movimento implementato da EVAC è il modello di forza sociale presentato da Helbing e Molnár e da Helbing et al., con i cambiamenti introdotti da Langston et al. per includere una migliore descrizione della forma del corpo umano e considerare i gradi di libertà della rotazione. EVAC usa dunque le leggi

5. *I software di modellazione dell'esodo*

della meccanica per seguire le traiettorie degli evacuanti nella simulazione virtuale. Ogni agente segue la propria equazione di moto:

$$m_i \frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} = f_i(t) + \xi_i(t)$$

$x_i(t)$  è la posizione dell'agente  $i$  al tempo  $t$ ;

$f_i(t)$  è la forza esercitata sull'agente al suo contorno, ha diverse componenti che descrivono le interazioni evacuante-evacuante, evacuante-muri ed evacuante-ambiente (per esempio le forze di repulsione tra esso ed il fuoco);

$m_i$  è la massa;

$\xi_i(t)$  è una piccola forza casuale fluttuante.

La velocità dell'agente,  $v_i(t)$  è data dal rapporto  $dx_i/dt$ .

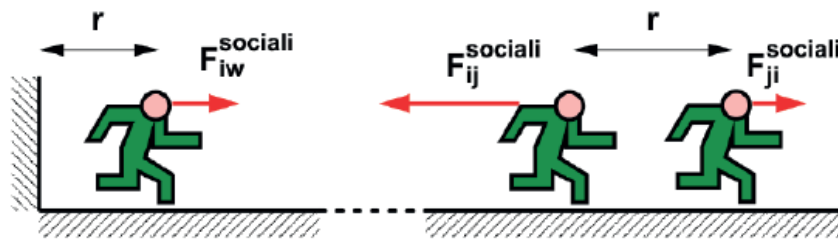


Figura 5.8 - Il concetto delle forze sociali

Ogni agente individua il proprio percorso verso l'uscita in funzione del campo di flusso che avrebbe un fluido virtuale, bidimensionale e incompressibile, per il campo di potenziale generato dalle medesime condizioni al contorno (Figura 5.9). Il risolutore di flusso FDS è utilizzato da EVAC per calcolare un'approssimazione di questo campo di moto, attribuendo al fluido virtuale elevata viscosità e ridotta velocità in modo da non avere vortici nella soluzione.



Figura 5.9 - Il campo di moto che guida gli evacuanti

Secondo il modello proposto da Langston gli evacuanti sono modellati sulla combinazione di tre cerchi elastici solidali che si muovono su un piano bidimensionale. Questo aspetto rappresenta l'evoluzione del primitivo modello ad un solo cerchio. I tre cerchi, infatti, descrivono la forma del corpo umano in maniera molto più realistica permettendo inoltre di considerare gli ulteriori gradi del movimento dovuti alla rotazione.

Riguardo le caratteristiche fisiche del singolo agente invece, il software fornisce cinque categorie di individui, con dimensioni e velocità generate da distribuzioni uniformi: adulto, uomo, donna, bambino e anziano (Tabella 5.4). Nella Tabella 5.4 compaiono le dimensioni  $R_d$ ,  $R_t$  e  $R_s$ , mostrate in Figura 5.10, mentre  $ds = R_d - R_s$  rappresenta la rientranza della spalla. Questi valori di default possono essere modificati a piacimento, per esempio un individuo disabile può essere simulato variando la velocità e le dimensioni del corpo.

CPIwin FSE® permette anche di definire la familiarità delle uscite, attraverso un parametro che rappresenta la probabilità che una porta di uscita sia conosciuta.

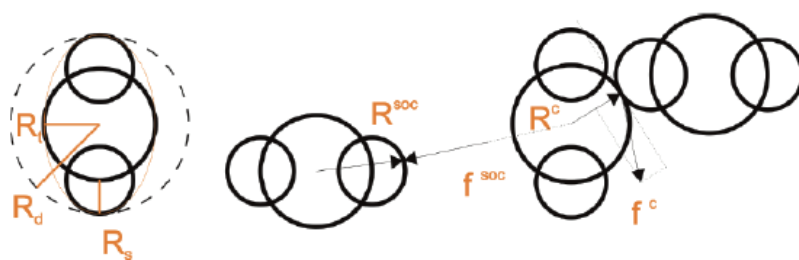


Figura 5.10 - Rappresentazione delle figure umane: evoluzione del corpo ellisse

Tipo di corpo	$R_d$ (m)	$R_t / R_d$	$R_s / R_d$	$ds / R_d$	Velocità (m/s)
Adulto	$0.255 \pm 0.035$	0.5882	0.3725	0.6275	$1.25 \pm 0.30$
Uomo	$0.270 \pm 0.020$	0.5926	0.3704	0.6296	$1.35 \pm 0.20$
Donna	$0.240 \pm 0.020$	0.5833	0.3750	0.6250	$1.15 \pm 0.20$
Bambino	$0.210 \pm 0.015$	0.5714	0.3333	0.6667	$0.90 \pm 0.30$
Anziano	$0.250 \pm 0.020$	0.6000	0.3600	0.6400	$0.80 \pm 0.30$

Tabella 5.4 - Categorizzazione degli individui che possono essere coinvolti in una situazione di emergenza e relative caratteristiche

## 5. *I software di modellazione dell'esodo*

Per quanto riguarda le caratteristiche comportamentali, il software permette di definire tre diverse tipologie di agenti intervenendo sulla velocità di esodo libero e sulla direzionalità dello stesso:

- Tipo 1 – rappresenta gli agenti con un **comportamento attivo**, cioè quelli che osservano l'ambiente per individuare il percorso di uscita più immediato, considerando tutte le uscite allo stesso modo, indipendentemente da quali siano familiari e quali no.
- Tipo 2 – rappresenta gli agenti con **comportamento conservativo** (di default), i quali si dirigono verso le uscite familiari nonostante ce ne siano altre più vicine che permetterebbero loro di evacuare più velocemente.
- Tipo 3 – rappresenta gli agenti con **comportamento gregario**, cioè quelli che non essendo riusciti ad ottenere informazioni su come uscire dal locale in cui si trovano, nè avendo disponibili uscite a loro familiari, individuano l'agente a loro più vicino che si sta dirigendo verso una qualunque uscita e lo seguono. Questa tipologia di agenti corrisponde di base ad anziane e bambini, i quali sono incapaci di prendere decisioni autonomamente e tendono a seguire il loro gruppo famiglia.

Nel modello di calcolo EVAC, ogni evacuante osserva la posizione degli altri individui e seleziona il proprio percorso d'uscita valutando quello apparentemente più veloce. La selezione dell'uscita è modellata come un problema di ottimizzazione, per il quale ogni evacuante tenta di selezionare l'uscita che minimizza il proprio tempo di evacuazione. Le tipologie di aperture disponibili all'interno del software si suddividono in: Uscite di Emergenza; Uscite dal dominio di calcolo; Entrate verso il dominio di calcolo; Uscite generiche.

Il tempo di evacuazione che ogni evacuante tenta di ottimizzare consiste nella somma del tempo di cammino e del tempo in coda. Il tempo di cammino è valutato semplicemente dividendo la distanza per la velocità di cammino, mentre il tempo valutato per la coda è una funzione della posizione e delle azioni degli altri evacuanti. Nella realtà di un'evacuazione, si presume che un individuo cambi il percorso inizialmente scelto soltanto in presenza di un'alternativa che appare chiaramente migliore. Questo comportamento è simulato dall'algoritmo attraverso un parametro che viene sottratto al tempo stimato per l'imbocco dell'uscita scelta.

Esistono però altri fattori che influenzano il processo di decisione degli evacuanti: il fuoco, la familiarità delle uscite considerate e la visibilità delle singole uscite. Secondo questi fattori, le uscite sono divise in sette gruppi in modo che ogni uscita appartenga ad un determinato gruppo. I gruppi sono dati da un ordine di preferenza.

La familiarità di ogni uscita per ogni gruppo di evacuanti può essere determinata dall'utente nel file di input. La visibilità di un'uscita per ogni agente è invece deter-

minata prendendo in considerazione l'effetto di intasamento del fumo e gli ostacoli.

L'algoritmo di selezione delle uscite consiste così di due fasi: prima le uscite sono classificate in gruppi di preferenza, e successivamente viene scelta, tra le uscite preferite quella che minimizza il tempo di evacuazione (esempio nella *Tabella 5.5*).

Scale di preferenza	Visibile	Familiare	Presenza di condizioni di disturbo
1	si	si	no
2	no	si	no
3	si	no	no
4	si	si	si
5	no	si	si
6	si	no	si
no	no	no	no
no	no	no	si

Tabella 5.5 - Fattori che influenzano la selezione delle uscite di emergenza

Le ultime due righe della Tabella non hanno preferenza perché un evacuante non può essere a conoscenza di un'uscita poco familiare ed invisibile.

Secondo la letteratura socio-psicologica la familiarità di un percorso è un fattore essenziale nel processo di decisione. Questo perché si considera che fattori ignoti riferiti a percorsi ignoti possano aumentare la minaccia.

Usando FDS come piattaforma di calcolo, EVAC ha facile accesso a tutte le proprietà dell'incendio, come la temperatura dei gas, la densità dei fumi e dei gas, e i livelli di radiazione termica. Il *fuoco* influenza le condizioni di evacuazione: esso può incapacitare gli umani ed in alcuni casi bloccare i percorsi d'uscita principali. Contemporaneamente gli evacuanti possono influenzare il fuoco, aprendo porte e finestre ed attuando vari dispositivi di protezione.

FDS+EVAC permette di considerare esclusivamente l'effetto del *fumo* sul movimento e l'influenza di alcuni gas tossici sull'organismo, ma non l'effetto del calore o l'effetto inverso delle azioni degli individui sul fuoco. Il fumo riduce la velocità di evacuazione a causa dell'abbassamento della visibilità e del suo effetto asfissiante ed irritante.

L'interazione tra incendio ed evacuanti è monodirezionale. Un evacuante incapacitato è modellato come un agente che non esercita nessuna forza sociale sugli altri agenti e la cui velocità di evacuazione è posta uguale a zero. La dimensione di un agente incapacitato non varia, in altre parole esso rimane sui propri piedi (limite notevole del software).

5. *I software di modellazione dell'esodo*

2. **FDS (Fire Dynamics Simulator)** – Il modulo consente l'applicazione dei principi di FSE per la simulazione e l'analisi del fenomeno incendio. È costituito da un pre-processore che consente l'input dei dati e dei parametri fondamentali richiesti dal motore di calcolo FDS del NIST e riconosciuto a livello internazionale. Lanciato il modulo e creato il video della simulazione (*smokeview*), il programma attiva un post-processore in grado di semplificare (tramite curve e diagrammi) la lettura e l'interpretazione dei risultati.

Il pre-processore consente l'input dei dati tramite un semplice CAD (.dwg o .dxf), utilizzando linee e blocchi e definendone le proprietà (griglie di calcolo, muri, finestre, sonde, sprinkler, materiale di innesco, arredamento, ecc.), per creare l'intero layout ambientale. Eseguito il disegno, è possibile definire uno o più scenari di simulazione per poi attivare il motore di calcolo FDS, che genera il video della simulazione di sviluppo e propagazione sia dell'incendio sia dei prodotti generati dalla combustione (immagine tratta da una simulazione in *Figura 5.11*).

Per la corretta interpretazione di quanto ipotizzato e simulato, il post-processore fornisce i valori fondamentali e necessari: dall'andamento delle temperature, al livello di visibilità, alle percentuali di ossigeno, fino all'ottenimento della relativa curva tempo-temperatura (curva di incendio reale) da applicare alle strutture per calcolare analiticamente la resistenza al fuoco delle stesse (*R*).

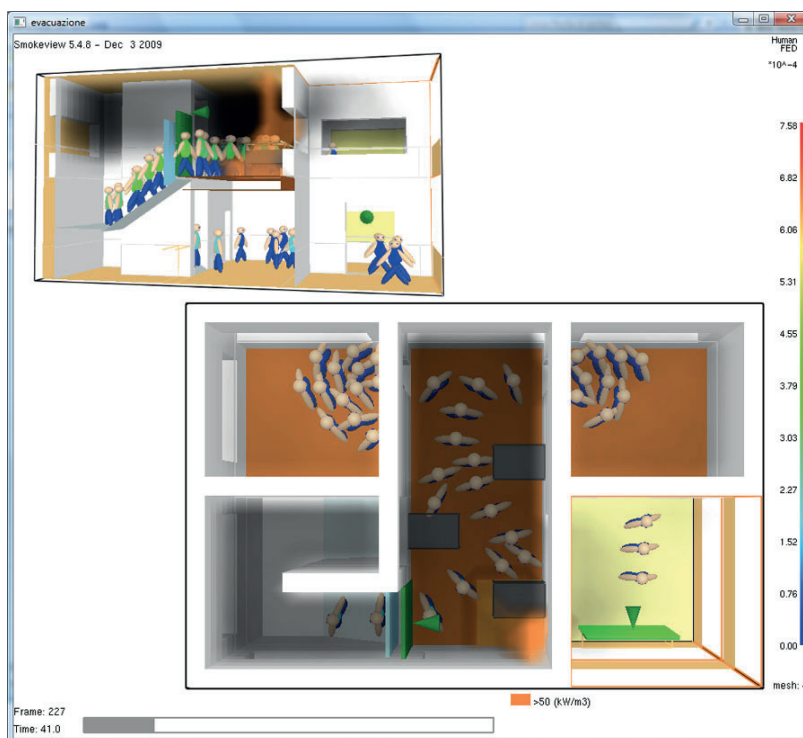


Figura 5.11 - Simulazione dell'evacuazione di alunni da una scuola in caso di incendio

CPI win® FSE-EVAC è il primo software in Italia ed in Europa che consente di simulare l'evacuazione delle persone da un edificio verso un luogo sicuro, sia in caso di incendio sia in caso di allarme generico, secondo i principi dell'Ingegneria della Sicurezza Antincendio.

FDS+Evac permette la simulazione contemporanea dell'evacuazione e dell'incendio. La parte del software che si occupa dell'evacuazione usa il fumo e le concentrazioni dei prodotti della combustione per determinare le caratteristiche del movimento degli "agenti". Sono utilizzate le concentrazioni di CO, CN, NOx, CO2 ed O2 per calcolare valore del FED (Fractional Effective Dose) utilizzato per determinare quando gli esseri umani sono incapaci ad effettuare le operazioni di evacuazione in modo autonomo. La densità di fumo viene utilizzata per rallentare le velocità di camminamento degli esseri umani e interessante modalità di selezione delle uscite da parte degli stessi. La procedura di selezione delle uscite degli agenti usa la densità di fumo per calcolare la visibilità delle porte di uscita e per categorizzare le stesse nei gruppi di preferenza, utilizzati per la determinazione dei criteri di scelta.

Il motore di calcolo utilizzato tiene conto dei fattori che influenzano il processo di decisione degli evacuanti: si tratta di fattori legati al fuoco, alla familiarità delle uscite considerate ed alla visibilità delle singole uscite. CPI win® FSE-EVAC applica interamente i modelli di calcolo FDS (Fire Dynamics Simulator) + EVAC dell'ente statunitense NIST (National Institute of Standards and Technology).

Una importante caratteristica del modello è la possibilità di implementare con facilità differenti comportamenti per diverse categorie di agenti. Il codice permette di intervenire sulla velocità di esodo libero e sulla direzionalità dello stesso, in modo da simulare diverse situazioni

Quando si disegna un ambiente, il software richiede che sia specificata l'area occupata da agenti. Tale zona viene chiamata griglia di distribuzione e, per poter definire meglio il modello di evacuazione all'interno di un'attività, occorre indicare il numero e la tipologia (uomo, donna, anziano, bambino) di occupanti presenti, considerando che ad ogni categoria corrisponde una diversa velocità di movimento

CPI win® FSE-EVAC permette di poter calcolare in maniera dettagliata i tempi di intervento di ogni singola fase del processo di evacuazione da un ambiente, ovvero la fase di percezione del pericolo e quella di percorrenza, considerando anche il tempo perduto per effettuare le code.

Mediante il post-processore si possono ottenere i valori fondamentali e necessari ad una corretta interpretazione di quanto ipotizzato e simulato. È poi possibile visualizzare la simulazione attraverso *SmokeView*, uno strumento che permette di vedere le simulazioni effettuate con il motore di calcolo FDS del NIST.





## **PARTE II**



## Il caso studio

*Il caso studio considerato per il confronto tra approccio prescrittivo e prestazionale e l'applicazione dei modelli di evacuazione sviluppati attraverso software, è la Scuola Elementari-Medie Don Lorenzo Milani, situata in Via Andrea Costa, 76 a Cusercoli, Civitella di Romagna (FC). La scuola, risalente agli anni '70 del secolo scorso, è intitolata a Don Milani, un presbitero, insegnante, scrittore ed educatore italiano.*

### 6.1 Inquadramento generale

La Scuola Elementari-Medie Don Lorenzo Milani, situata in Via Andrea Costa, 76 a Cusercoli, è situata al centro del paese, in un lotto verde e parzialmente scosceso (Figura 6.1). È l'unica scuola del paese: al piano terra sono presenti le tre classi della scuola media, mentre al primo piano sono disposte le cinque classi elementari.



Figura 6.1 - Inquadramento dell'area di pertinenza del caso studio

## 6. *Il caso studio*

L'edificio in questione, come si evince anche dalle differenti coperture, è costituito da due nuclei: il primo realizzato in muratura risale ai primi anni '50 del XX secolo; mentre il secondo, con struttura portante costituita da pilastri in cemento armato, è stato accostato a Nord-Est del primo nucleo in un secondo tempo, all'inizio degli anni '70 del Novecento. La scuola presenta i prospetti principali orientati a Nord-Ovest e a Sud-Est, e nella sua area di pertinenza è presente anche un corpo secondario distaccato e posto a Sud di essa, il quale ospita la palestra (come si evince dalla *Figura 6.1*).

Dai documenti catastali reperiti presso il Comune di Civitella di Romagna (*Figura 6.2 e Figura 6.3*), si evince l'assetto della scuola in esame. Nelle planimetrie sono indicate le originarie funzioni di ogni ambiente: la cucina ed il refettorio indicati nella pianta del seminterrato, sono stati sostituiti oggi da locali tecnici e depositi ad accesso limitato per questioni di sicurezza; le aule presenti ai piani terra e primo, sono in parte aule didattiche, in parte aule destinate a laboratori o attività ricreative, ma non rispecchiano propriamente la disposizione indicata nelle planimetrie catastali.

Relativamente alle aule didattiche, attualmente ne sono previste 3 al piano terra e 5 al primo piano, corrispondenti quindi ad un affollamento di 78 alunni al piano terra e 130 alunni al primo piano (considerando in ogni aula 25 alunni e un docente). Considerando poi un 20% in più riferito al personale di servizio, l'affollamento totale è pari a **250 persone** all'interno dell'edificio.

Ad ogni modo, nel presente testo, le aule vengono considerate come se fossero tutte didattiche, in modo che, qualora le aule destinate ai laboratori venissero convertite in ulteriori aule didattiche, la scuola risulterebbe comunque a norma per quanto concerne la sicurezza antincendio. L'affollamento considerato è quindi pari a **376 persone** all'interno dell'edificio (corrispondenti a 26 occupanti per 14 aule più un 20% di personale di servizio).

Per quanto riguarda gli aspetti inerenti alla sicurezza antincendio, dal sopralluogo è emerso che è già presente nella scuola un sistema di sicurezza antincendio, costituito da idranti, pulsante di emergenza, lampade luminose, ecc.. come in parte si evince dalle fotografie in *Figura 6.11, 6.12, 6.13, 6.15, 6.16*.

Relativamente alle uscite di sicurezza, attualmente ce ne sono una al piano interrato (accessibile solo da personale autorizzato), due al piano terra ed una al primo piano. Tali uscite non risultano idonee in numero, secondo la normativa vigente, pertanto la scuola è stata sottoposta ad un adeguamento a normativa.

Le *Figure 6.4-6.16* rappresentano il rilievo fotografico, interno ed esterno, effettuato in loco.

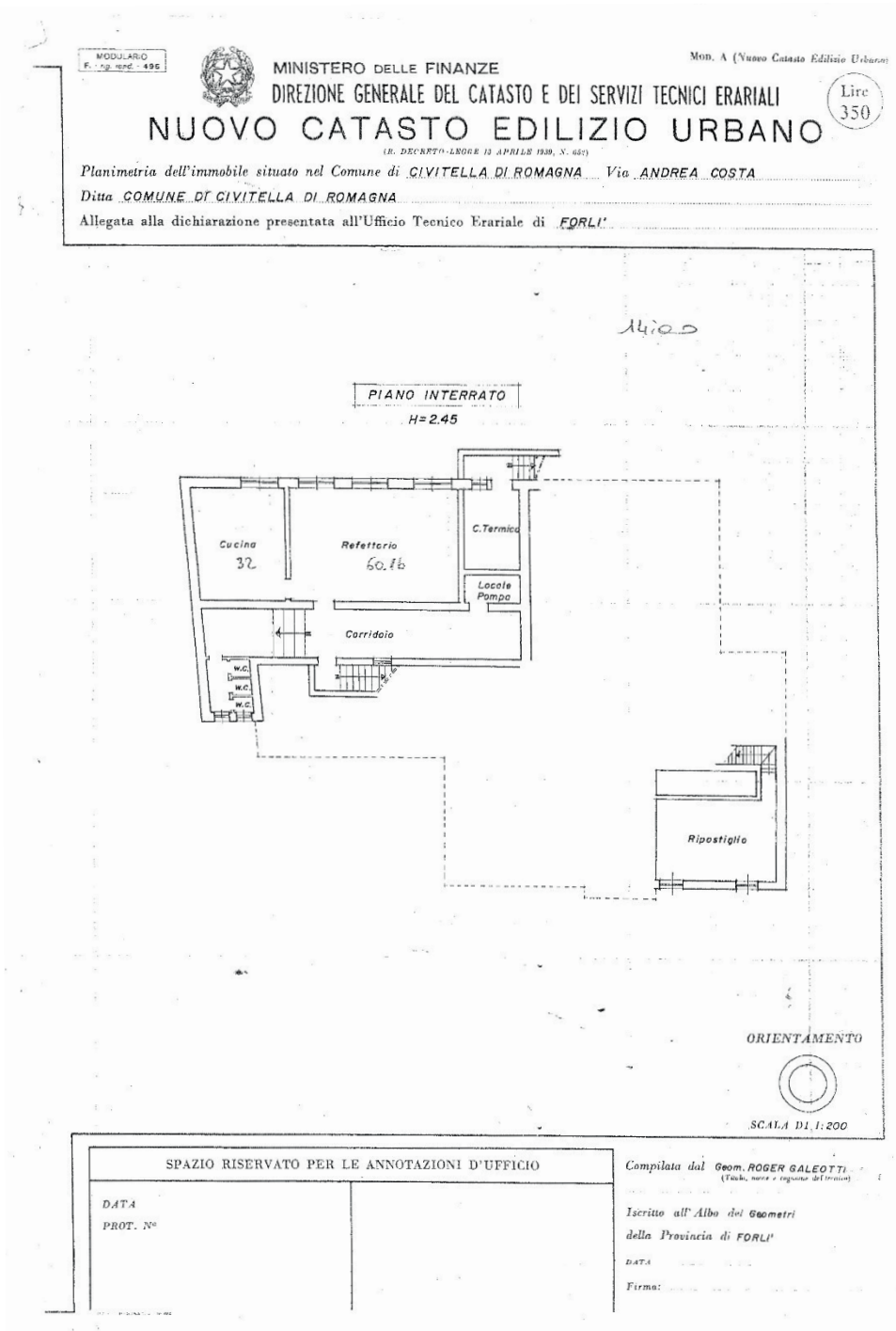


Figura 6.2 - Documento catastale con pianta del piano seminterrato della scuola

6. Il caso studio

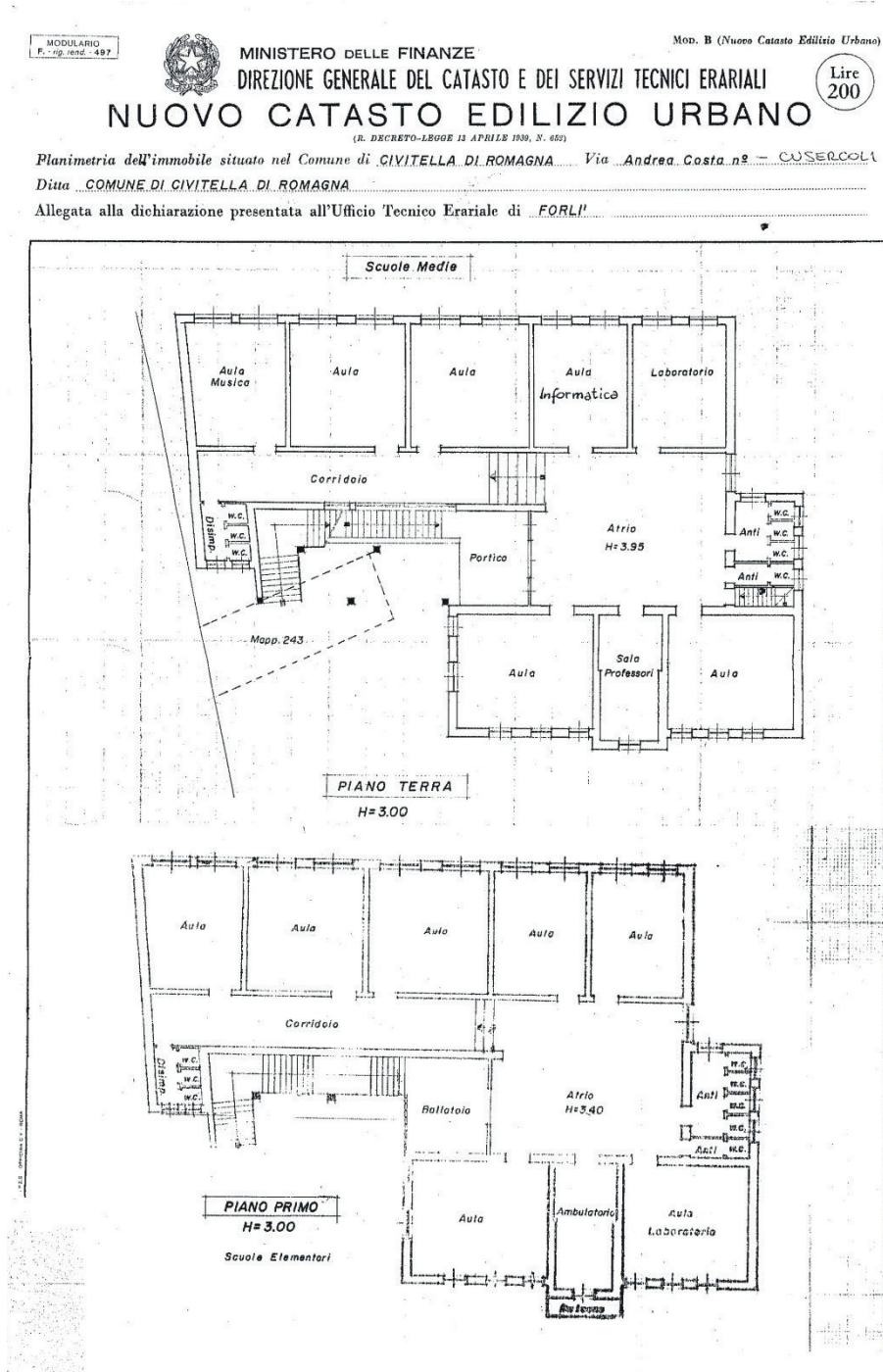


Figura 6.3 - Documento catastale con pianta dei piani terra e primo della scuola



Figura 6.4 - Vista esterna lato Nord



Figura 6.5 - Vista esterna: prospetto Nord-Ovest



Figura 6.6 - Vista esterna lato Ovest: nucleo principale dell'edificio

6. *Il caso studio*



*Figura 6.7, Figura 6.8 - Vista esterna lato Nord-Ovest: dettaglio dell'ingresso*



*Figura 6.9 - Vista esterna lato Sud-Ovest*





Figura 6.10 - Vista esterna: prospetto Sud-Est



Figura 6.11 - Vista esterna lato Sud-Est: dettaglio della porta sul retro di collegamento ai vani tecnici

6. *Il caso studio*



*Figura 6.12 - Dettaglio di una delle due uscite di sicurezza presenti al piano terra*



*Figura 6.13 - Dettaglio dell'unica uscita di sicurezza presente al primo piano*



Figura 6.14 - Vista interna di un'aula tipo al piano terra



Figura 6.15, Figura 6.16 - Dettaglio di alcuni presidi antincendio disposti per la scuola

## 6.2 Il DM 26/08/1992

**A**nalizzando le planimetrie e confrontandole con i requisiti richiesti dalla normativa DM 26/08/1992, è risultato necessario realizzare una seconda uscita di sicurezza per l'esodo dal primo piano inserendo una scala metallica di sicurezza esterna, in quanto la sola via di fuga presente non era soddisfacente date le caratteristiche dell'edificio e dell'affollamento presente. Altri interventi necessari secondo la normativa di riferimento, sono: realizzazione di una rete di idranti per entrambi i piani; alcuni adeguamenti impiantistici, tra cui quello dell'impianto di rivelazione, segnalazione ed allarme incendi; lavori di compartimentazione ed installazione di alcune porte tagliafuoco.

Di seguito un estratto della relazione tecnica relativa alla normativa *DM 26/08/1992 - Norme di prevenzione incendi per l'edilizia scolastica*, scritta dopo la messa a norma dell'edificio:

### **ART. 1 – GENERALITÀ**

- *Campo di applicazione*

Sono soggetti alle presenti disposizioni allo scopo di tutelare l'incolumità delle persone e salvaguardare i beni contro il rischio di incendio, gli edifici e i locali adibiti a scuole, di qualsiasi tipo, ordine e grado, di nuova costruzione o agli edifici esistenti in caso di ristrutturazioni che comportino modifiche sostanziali, i cui progetti siano presentati agli organi competenti per le approvazioni previste dalle vigenti disposizioni, dopo l'entrata in vigore del presente decreto.

Si intendono modifiche sostanziali lavori che comportino il rifacimento di oltre il 50% dei solai o il rifacimento strutturale delle scale o l'aumento di altezza.

Per gli edifici esistenti si applicano le disposizioni di cui al successivo art. 13.

- *Classificazione*

Le scuole vengono suddivise, in relazione alle presenze effettive contemporaneamente in essere prevedibili di alunni e di personale docente e non docente (*Tabella 3.3*), in particolare la scuola in esame è riconducibile a:

*tipo 2*: scuole con numero di presenze contemporanee da 301 a 500 persone.

## ART. 2 – CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE

- *Ubicazione*

La scuola oggetto della presente relazione non è ubicata in prossimità di attività che comportino gravi rischi di incendio e/o di esplosione. È collocata in un edificio indipendente costruito per tale specifica destinazione ed isolato da altri.

- *Accesso all'area*

Per consentire l'intervento dei mezzi di soccorso dei Vigili del fuoco, l'accesso all'area ove sorge l'edificio, situato lungo via Andrea Costa, ha i seguenti requisiti minimi:

- larghezza: 3.50 m;
- altezza libera: 4 m;
- raggio di volta: 13 m;
- pendenza: non superiore al 10%;
- resistenza al carico: almeno 20 tonnellate (8 sull'asse anteriore e 12 sull'asse posteriore: passo 4 m).

L'edificio risulta quindi facilmente accessibile ai mezzi di soccorso, e l'ubicazione del suo accesso consente l'accostamento all'edificio delle autoscale dei Vigili del Fuoco per l'eventuale accesso al primo piano. L'edificio non ha comunque altezza superiore a 12 m.

## ART. 3 – COMPORTAMENTO AL FUOCO

- *Resistenza al fuoco delle strutture*

I requisiti di resistenza al fuoco degli elementi strutturali sono valutati secondo le prescrizioni e le modalità di prova stabilite dal D.M. 16/2/2007 e dal D.M. 9/3/2007, prescindendo dal tipo di materiale impiegato nella realizzazione degli elementi medesimi (calcestruzzo, laterizi, acciaio, legno massiccio, legno lamellare, elementi compositi).

Le strutture sono comunque realizzate in modo da garantire una resistenza al fuoco di almeno R60 (strutture portanti) e REI 60 (strutture separanti) per tale edificio di altezza inferiore a 24 m.

6. *Il caso studio*

- *Reazione al fuoco dei materiali*

La classificazione di reazione al fuoco dei materiali presenti nella scuola di interesse, fa riferimento al D.M. 10/3/2005 e D.M. 15/3/2005 e prevede le seguenti limitazioni:

- a) negli atri, nei corridoi, nei disimpegni, nelle scale, nelle rampe e nei passaggi in genere, è consentito l'impiego di materiali di classe 1 in ragione del 50% massimo della loro superficie totale (pavimenti + pareti + soffitti + proiezione orizzontale delle scale). Per le restanti parti sono impiegati materiali di classe 0 (non combustibile);
- b) in tutti gli altri ambienti è consentito che le pavimentazioni compresi i relativi rivestimenti siano di classe 2 e che gli altri materiali di rivestimento siano di classe 1;
- c) i materiali di rivestimento combustibili, ammessi nelle varie classi di reazione al fuoco, sono posti in opera in aderenza agli elementi costruttivi, di classe 0, escludendo spazi vuoti o intercapedini;
- d) i materiali suscettibili di prendere fuoco su entrambe le facce (tendaggi, ecc.) sono di classe di reazione al fuoco non superiore a 1.

#### **ART. 4 – SEZIONAMENTI**

- *Compartimentazione*

L'edificio è costituito da un unico compartimento su più piani, di superficie non eccedente i 6000 mq (dal momento che tale edificio ha altezza inferiore a 12 m). Non necessita quindi di ulteriore compartimentazione.

- *Scale*

All'interno dell'attività sono presenti n.6 scale al servizio dell'esodo verticale. Nella fattispecie possiedono le seguenti caratteristiche:

- 1) Scala principale di accesso al primo piano: ha larghezza superiore a 1.20 m, è costituita da tre rampe rettilinee che non presentano restringimenti, con 26 gradini in tutto (11-10-5), a pianta rettangolare con alzata e pedata costanti, rispettivamente non superiore a 17 cm e non inferiore a 30 cm. Il vano scala in questione si trova in parte all'aperto e in parte al chiuso, quindi soddisfa il requisito minimo di superficie netta di areazione permanente in sommità pari a 1 mq;
- 2) Scala principale di accesso al piano interrato: ha larghezza superiore a 1.20

m, è costituita da un'unica rampa rettilinea che non presenta restringimenti, con 16 gradini a pianta rettangolare con alzata e pedata costanti, rispettivamente non superiore a 17 cm e non inferiore a 30 cm. Il vano scala in questione si trova all'aperto, quindi soddisfa il requisito minimo di superficie netta di areazione permanente in sommità pari a 1 mq;

4) Scala posteriore di accesso alla centrale termica: ha larghezza inferiore a 1.20 m (1.10 m), è costituita da un'unica rampa rettilinea che non presenta restringimenti, con 9 gradini a pianta rettangolare con alzata e pedata costanti, rispettivamente non superiore a 17 cm e non inferiore a 30 cm. Il vano scala in questione si trova all'aperto, quindi soddisfa il requisito minimo di superficie netta di areazione permanente in sommità pari a 1 mq. Essa è a servizio di un locale ad accesso riservato agli autorizzati;

5) Scala interna di accesso al ripostiglio: ha larghezza inferiore a 1.20 m (0.90 m), è costituita da un'unica rampa rettilinea che non presenta restringimenti, con 10 gradini a pianta rettangolare con alzata e pedata costanti, rispettivamente non superiore a 17 cm e non inferiore a 30 cm. Il vano scala in questione si trova all'interno dell'edificio ma, grazie ad una finestra, soddisfa il requisito minimo di superficie netta di areazione permanente in sommità pari a 1 mq. Essa è a servizio di un locale ad accesso riservato agli autorizzati;

6) Scala esterna di emergenza per l'esodo dal primo piano: ha larghezza superiore a 1.20 m, è costituita da quattro rampe rettilinee che non presentano restringimenti, con 29 gradini in tutto (10-6-10-3), a pianta rettangolare con alzata e pedata costanti, rispettivamente non superiore a 17 cm e non inferiore a 30 cm. Il vano scala in questione si trova all'aperto, quindi soddisfa il requisito minimo di superficie netta di areazione permanente in sommità pari a 1 mq.

Le caratteristiche di resistenza al fuoco dei vani scala sono congrue con quanto previsto all'art. 3.

## **ART. 5 – MISURE PER L'EVACUAZIONE IN CASO DI EMERGENZA**

- *Affollamento*

Il massimo affollamento ipotizzabile è fissato in:

- n. 14 aule: 26 persone/aula per un totale di 364 persone;
- aree destinate a servizi: 10 persone effettivamente presenti +20% per un totale di 12 persone.

6. *Il caso studio*

- *Capacità di deflusso*

La capacità di deflusso per tale edificio scolastico non è superiore a 60 per ogni piano.

- Piano terra: affollamento massimo 188 persone

$$\text{N}^\circ \text{ moduli} = 188 / 60 = 3,13 = 4 \text{ moduli (verificato)}$$

- Piano primo: affollamento massimo 188 persone

$$\text{N}^\circ \text{ moduli} = 188 / 60 = 3,13 = 4 \text{ moduli (verificato*)}$$

*[\*] Con una sola uscita di emergenza (= 2 moduli) il requisito non sarebbe stato soddisfatto.*

- Piano interrato: affollamento massimo 10 persone

$$\text{N}^\circ \text{ moduli} = 10 / 60 = 0,16 = 2 \text{ moduli (verificato)}$$

Le scale di servizio, in quanto ad accesso limitato, non vengono verificate con la capacità di deflusso caratteristica.

- *Sistema di via di uscita*

La scuola è provvista di un sistema organizzato di vie di uscita dimensionato in base al massimo affollamento ipotizzabile in funzione della capacità di deflusso, ed è dotata di almeno 2 uscite verso luogo sicuro, per il piano terra ed il primo piano, mentre i locali interrati ad accesso limitato sono serviti da una sola via di esodo.

- *Larghezza delle vie di uscita*

La larghezza delle vie di uscita è multipla del modulo di uscita e non inferiore a due moduli (1.20 m). La misurazione della larghezza delle singole uscite è stata eseguita nel punto più stretto della luce. Anche le porte dei locali frequentati dagli studenti hanno, singolarmente, larghezza non inferiore a 1.20 m.

- *Lunghezza delle vie di uscita*

La lunghezza delle vie di uscita non è superiore a 60 metri, misurati dal luogo sicuro alla porta più vicina allo stesso di ogni locale frequentato dagli studenti o dal personale docente e non docente.

- *Larghezza totale delle uscite di ogni piano*

La larghezza totale delle uscite di ogni piano è determinata dal rapporto tra il massimo affollamento ipotizzabile e la capacità di deflusso.



- *Numero delle uscite*

Il numero delle uscite dai singoli piani dell'edificio non è inferiore a due e sono poste in punti ragionevolmente contrapposti, per il piano terra e il primo piano, mentre i locali interrati ad accesso limitato sono serviti da una sola via di esodo.

I locali ad uso collettivo sono dotati, oltre che della normale porta di accesso, anche almeno di una uscita di larghezza non inferiore a due moduli, apribile nel senso del deflusso, con sistema a semplice spinta, che adduce in luogo sicuro.

Le aule didattiche sono servite da una porta ogni 50 persone presenti; le porte hanno larghezza di almeno 1.20 m e si aprono nel senso dell'esodo dato che il numero massimo di persone presenti nell'aula è superiore a 25.

Le porte che si aprono verso corridoi interni di deflusso sono realizzate in modo da non ridurre la larghezza utile dei corridoi stessi.

#### **ART. 7 – IMPIANTI ELETTRICI**

- Generalità

Gli impianti elettrici del complesso scolastico sono realizzati in conformità alla normativa vigente.

La scuola, ad ogni piano, è munita di interruttore generale, posto in posizione segnalata, che permette di togliere tensione all'impianto elettrico dell'attività; tale interruttore è munito di comando di sgancio a distanza, posto nelle vicinanze dell'ingresso, in posizione presidiata.

- *Impianto elettrico di sicurezza*

La scuola è dotata di impianto di sicurezza alimentato da apposita sorgente, distinta da quella ordinaria. L'impianto elettrico di sicurezza alimenta le seguenti utilizzazioni, strettamente connesse con la sicurezza delle persone:

- a) illuminazione di sicurezza, compresa quella indicante i passaggi, le uscite ed i percorsi delle vie di esodo che garantisce un livello di illuminazione non inferiore a 5 lux (l'illuminazione di sicurezza è installata anche nelle aule, limitatamente alla segnalazione dei vani di uscita dalle stesse);
- b) impianto di diffusione sonora e impianto di allarme.

Nessun'altra apparecchiatura è collegata all'impianto elettrico di sicurezza.

6. *Il caso studio*

L'alimentazione dell'impianto di sicurezza si inserisce anche con comando a mano posto in posizione conosciuta dal personale.

L'autonomia della sorgente di sicurezza è non inferiore a 30 minuti.

#### **ART. 8 – SISTEMI DI ALLARME**

- *Generalità*

La scuola è provvista di un sistema di allarme in grado di diffondere avvisi acustici in grado di avvertire gli alunni ed il personale presenti in caso di pericolo, in aggiunta sono presenti segnali ottici e messaggi visivi. Il comando del sistema di allarme è posto in un locale costantemente presidiato durante il funzionamento della scuola. Le procedure di diffusione dei segnali di allarme sono regolamentate nel piano di emergenza.

- *Tipo di impianto*

Il sistema di allarme per la scuola oggetto della presente relazione, di tipo 2, è a targhe ottico acustiche collegate all'impianto di rilevazione di fumo e calore. Il sistema di allarme è inoltre costituito dallo stesso impianto a campanelli usato normalmente per la scuola, ma viene convenuto appositamente un particolare suono.

#### **ART. 9 – MEZZI ED IMPIANTI FISSI DI PROTEZIONE ED ESTINZIONE DEGLI INCENDI**

- *Generalità*

La scuola è dotata di idonei mezzi antincendio come di seguito precisato.

- *Rete idranti*

Per gli impianti di protezione attiva contro l'incendio, si applica il D.M. 20/12/2012 *Regola tecnica di prevenzione incendi per gli impianti di protezione attiva contro l'incendio installati nelle attività soggette ai controlli di prevenzione incendi*. Le disposizioni del decreto si applicano agli impianti esistenti alla data di entrata in vigore (4/4/2013) del decreto, nel caso essi siano oggetto di interventi comportanti la loro modifica sostanziale, così come ivi definita.

La presente scuola di tipo 2 possiede un livello di pericolosità secondo la norma UNI 10779, pari a 1, è richiesta la sola protezione interna e, secondo la norma UNI 12845, l'alimentazione idrica deve essere di tipo singolo. L'alimen-

tazione idrica all'impianto, di tipo singola, deriva dal pubblico acquedotto localizzato lungo via Andrea Costa nelle immediate vicinanze della scuola.

- *Estintori*

La scuola è dotata di un adeguato numero di estintori portatili, omologati e distribuiti in ragione di almeno un estintore per ogni 200 m<sup>2</sup> di pavimento o frazione di detta superficie, con un minimo di due estintori per piano.

Gli estintori portatili hanno carica minima pari a 6 kg e capacità estinguente non inferiore a 13A 89B, C.

In prossimità dei quadri elettrici sono previsti estintori da 2kg a CO2 capacità estinguente 34 B.

- *Impianti di rilevazione e/o di estinzione degli incendi*

In tutti i locali è installato un impianto di rivelazione automatica d'incendio. È assente l'impianto di estinzione automatica.

...

#### **ART. 13 – NORME TRANSITORIE**

Per tale scuola, preesistente alla data di entrata in vigore del DM 18/12/1975, entro cinque anni dall'entrata in vigore del DM 26/08/1992, devono essere attuate le prescrizioni contenute negli articoli seguenti: 2.4, 3.1, 5, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 7, 8, 9, 10, 12.

### 6.3 Il DM 03/08/2015 e il DM 07/08/2017 - Soluzione conforme

La scuola è costituita da un unico compartimento, come si può dedurre dal capitolo S.3 del DM 03/08/2015, nel quale viene definita la compartimentazione con la finalità di limitare la propagazione dell'incendio e dei suoi effetti verso altre attività o all'interno della stessa attività.

Di seguito un estratto della relazione tecnica sviluppata considerando come riferimento le normative *RTO DM 03/08/2015* e *RTV per le scuole DM 07/08/2017*, scritta dopo la messa a norma dell'edificio:

#### **0. PREMESSA**

- *0.1 Descrizione dell'attività*

L'edificio oggetto della presente relazione è adibito a Scuola media statale ed è situato in Via Andrea Costa, 76 a Cusercoli (FC). L'attività principale si inquadra come att. 67.2.C del DPR 151/2011 (*Tabella 3.2*) ossia Scuole di ogni ordine, grado e tipo, collegi, accademie con oltre 300 persone presenti.

*Progettazione antincendio per le attività:*

Per le attività normate, secondo le indicazioni della Regola Tecnica Orizzontale e della specifica Regola Tecnica Verticale, la valutazione del rischio di incendio è implicitamente effettuata dal normatore, attraverso la definizione, nella Regola Tecnica Verticale, dei profili di rischio e dei livelli di prestazione caratteristici dell'attività. Pertanto, la valutazione del rischio di incendio da parte del progettista è limitata ai restanti aspetti peculiari e specifici dell'attività oggetto di Regola Tecnica Verticale.

I livelli di prestazione da garantire per ciascuna misura antincendio sono determinati, nella Regola Tecnica Verticale, in funzione di parametri oggettivi (es. numero degli occupanti, quota dei piani, quantità di sostanze e miscele pericolose, ...). In mancanza, sono attribuiti secondo i criteri di cui al paragrafo G.2.5.3 del Codice.

Nelle Regole Tecniche Verticali possono essere descritte eventuali soluzioni progettuali complementari o sostitutive di quelle conformi dettagliate nella sezione *Strategia antincendio*, oppure semplici prescrizioni aggiuntive, specifiche per la tipologia di attività.

- 0.2 Classificazione dell'attività'

La presente relazione descrive le misure di prevenzione incendi adottate per la Scuola Media Statale Don Lorenzo Milani situata in Via Andrea Costa, 76 a Cusercoli (FC).

La scuola si sviluppa su:

- piano interrato adibito a deposito e locali tecnici ad accesso limitato;
- piano terra adibito ad aule scolastiche e bagni, che ospita anche la sala professori ed è connesso internamente ad una porzione del piano interrato adibita a ripostiglio, accessibile al solo personale autorizzato;
- piano primo adibito ad altre aule scolastiche e bagni.

La struttura principale, su tre piani appunto, ha un'altezza complessiva di circa 12 m, è costituita da due piani completamente fuori terra destinati alle attività scolastiche, e un piano quasi totalmente interrato destinato a locali di servizio quali centrale termica (inferiore a 116 kW) e depositi (inferiori a 1000 mq e 5000 kg di materiale combustibile), entrambi non soggetti a prevenzione incendi.

La superficie complessiva dei piani adibiti a scuola è 1126m<sup>2</sup>.

Ai fini della presente Regola Tecnica Verticale (*Tabella 3.4*), l'attività scolastica è classificata come segue:

a) in relazione al numero degli occupanti n:

**OB:**  $300 < n < 500$  occupanti

b) in relazione alla massima quota dei piani h:

**HA:**  $h \leq 12$  m

Le aree presenti nell'attività oggetto di questa relazione tecnica, sono classificate come segue:

TA: locali destinati ad attività didattica e spazi comuni;

TM: depositi o archivi di superficie lorda maggiore di 25 m<sup>2</sup> e carico di incendio specifico  $q_f > 600$  MJ/m<sup>2</sup>;

TT: locali in cui siano presenti quantità significative di apparecchiature elettriche ed elettroniche, locali tecnici rilevanti ai fini della sicurezza antincendio (per esempio la centrale termica).

6. Il caso studio

• 0.3 Identificazione e descrizione del rischio di incendio

Definizione dei profili di rischio (Sezione G.3 della RTO)

Al fine di identificare e descrivere il rischio incendio dell'attività si definiscono le seguenti tipologie di profilo di rischio:

- $R_{vita}$
- $R_{beni}$
- $R_{ambiente}$

Il profilo  $R_{vita}$  è attribuito per ciascun compartimento, mentre  $R_{beni}$  ed  $R_{ambiente}$  sono definiti per l'intera attività.

**Profilo di rischio  $R_{vita}$  - Compartimento unico**

Gli occupanti all'interno dell'attività sono in stato di veglia ed hanno familiarità con l'edificio, tipologia tipica delle scuole.

Caratteristiche prevalenti degli occupanti $\delta_{occ}$		Esempi
<b>A</b>	Gli occupanti sono in stato di veglia ed hanno familiarità con l'edificio	Ufficio non aperto al pubblico, scuola, autorimessa privata, attività produttive in genere, depositi, capannoni industriali
<b>B</b>	Gli occupanti sono in stato di veglia e non hanno familiarità con l'edificio	Attività commerciale, autorimessa pubblica, attività espositiva e di pubblico spettacolo, centro congressi, ufficio aperto al pubblico, ristorante, studio medico, ambulatorio medico, centro sportivo
<b>C [1]</b>	Gli occupanti possono essere addormentati:	
<b>Ci</b>	• in attività individuale di lunga durata	Civile abitazione
<b>Cii</b>	• in attività gestita di lunga durata	Dormitorio, residence, studentato, residenza per persone autosufficienti
<b>Ciii</b>	• in attività gestita di breve durata	Albergo, rifugio alpino
<b>D</b>	Gli occupanti ricevono cure mediche	Degenza ospedaliera, terapia intensiva, sala operatoria, residenza per persone non autosufficienti e con assistenza sanitaria
<b>E</b>	Occupanti in transito	Stazione ferroviaria, aeroporto, stazione metropolitana

[1] Quando nel presente documento si usa C la relativa indicazione è valida per Ci, Cii, Ciii

Tabella G.3-1: Caratteristiche prevalenti degli occupanti

$\delta_a$	Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio $t_a$ [s]	Esempi
<b>1</b>	600 Lenta	Materiali poco combustibili distribuiti in modo discontinuo o inseriti in contenitori non combustibili.
<b>2</b>	300 Media	Scatole di cartone impilate; pallets di legno; libri ordinati su scaffale; mobilio in legno; automobili; materiali classificati per reazione al fuoco (capitolo S.1)
<b>3</b>	150 Rapida	Materiali plastici impilati; prodotti tessili sintetici; apparecchiature elettroniche; materiali combustibili non classificati per reazione al fuoco.
<b>4</b>	75 Ultra-rapida	Liquidi infiammabili; materiali plastici cellulari o espansi e schiume combustibili non classificati per la reazione al fuoco.

Tabella G.3-2: Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio

Figura 6.17 - Tabelle G.3-1 e G.3-2 estratte dalla RTO

Il materiale presente è in quantità contenuta e disposto in modo discontinuo, generalmente di tipologia poco combustibile. A favore di sicurezza viene valutato comunque una velocità di crescita media anziché lenta.

Dalle tabelle in *Figura 6.17* risulta quindi:  $\delta_{occ} = A$  e  $\delta_{\alpha} = 2$ .

Tipologie di destinazione d'uso	R <sub>vita</sub>	Tipologie di destinazione d'uso	R <sub>vita</sub>
Palestra scolastica	A1	Ufficio aperto al pubblico, centro sportivo, sala conferenze aperta al pubblico, discoteca, museo, teatro, cinema, locale di trattenimento, area lettura di biblioteca, attività commerciale al dettaglio, attività espositiva, autosalone	B2-B3
Autorimessa privata	A2		
Ufficio non aperto al pubblico, sala mensa, aula scolastica, sala riunioni aziendale, archivio, deposito librario, attività commerciale all'ingrosso	A2-A3	Civile abitazione	Ci2-Ci3
Laboratorio scolastico, sala server	A3	Dormitorio, residence, studentato, residenza per persone autosufficienti	Cii2-Cii3
Attività produttive, attività artigianali, impianti di processo, laboratorio di ricerca, magazzino, officina meccanica	A1-A4	Rifugio alpino	Ciii1-Ciii2
Depositi sostanze o miscele pericolose	A4	Camera d'albergo	Ciii2-Ciii3
Galleria d'arte, sala d'attesa, ristorante, studio medico, ambulatorio medico	B1-B2	Degenza ospedaliera, terapia intensiva, sala operatoria, residenza per persone non autosufficienti e con assistenza sanitaria	D2
Autorimessa pubblica	B2	Stazione ferroviaria, aeroporto, stazione metropolitana	E2

Tabella G.3-5: Profilo di rischio R<sub>vita</sub> per alcune tipologie di destinazione d'uso

Figura 6.18 - Tabella G.3-5 estratta dalla RTO

Dalla tabella in *Figura 6.18* risulta infine:  $R_{vita} = A2$ .

### Profilo di rischio R<sub>beni</sub>

La presente attività non è vincolata per arte o storia (compresi i beni contenuti) e non risulta essere strategica.

Dalla tabella in *Figura 6.19* segue che per l'intera attività:  $R_{beni} = 1$ .

		Opera da costruzione vincolata	
		No	Sì
Opera da costruzione strategica	No	R <sub>beni</sub> = 1	R <sub>beni</sub> = 2
	Sì	R <sub>beni</sub> = 3	R <sub>beni</sub> = 4

Tabella G.3-6: Determinazione di R<sub>beni</sub>

Figura 6.19 - Tabella G.3-6 estratta dalla RTO

### Profilo di rischio R<sub>ambiente</sub>

Il rischio ambientale si ritiene mitigato dall'applicazione di tutte le misure antincendio connesse ai profili di rischio R<sub>vita</sub> e R<sub>beni</sub>, che rendono quest'ultimo non significativo.

6. *Il caso studio*

*Riepilogo valutazione del rischio*

Compartimento	R <sub>vita</sub>	R <sub>beni</sub>	R <sub>ambiente</sub>	class. n° occupanti	class. massima quota
1 - scuola	A2	1	trascurabile	OB	HA

Tabella 6.1 - Riepilogo dei profili di rischio determinati per la scuola sulla base della RTO

**1. ESODO (Sezione S.4 della RTO)**

Sarà attuato un esodo di tipo simultaneo.

A seguito della valutazione R<sub>vita</sub> e i criteri di attribuzione della tabella in *Figura 6.20*, si definisce per unico compartimento il livello di prestazione di esodo come segue:

Livello di prestazione I: Esodo degli occupanti verso luogo sicuro

Si segue quindi la soluzione conforme per il livello di prestazione I, progettando le vie d'esodo nel rispetto di quanto previsto dal paragrafo S.4.5 della RTO e successivi.

- *Caratteristiche generali del sistema d'esodo*

Livello di prestazione	Descrizione
I	Esodo degli occupanti verso luogo sicuro
II	Protezione degli occupanti sul posto

Tabella S.4-1: Livelli di prestazione per l'esodo

Livello di prestazione	Criteri di attribuzione
I	Tutte le attività
II	Compartimenti per i quali non sia possibile garantire il livello di prestazione I (es. a causa della dimensione del compartimento, ubicazione, tipologia degli occupanti o dell'attività ...)

Tabella S.4-2: Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione

Figura 6.20 - Tabelle S.4-1 e S.4-2 estratte dalla RTO

*Luogo sicuro temporaneo*

Ogni luogo sicuro temporaneo deve essere idoneo a contenere gli occupanti che lo impiegano durante l'esodo. La superficie lorda del luogo sicuro temporaneo è calcolata tenendo in considerazione le superfici minime per occupan-



te presenti nella tabella di *Figura 6.21*.

Si considera *luogo sicuro temporaneo* per un'attività, almeno un compartimento adiacente a quelli da cui avviene l'esodo od uno spazio scoperto. Dal luogo sicuro temporaneo gli occupanti devono poter raggiungere in ogni condizione d'incendio un luogo sicuro.

#### *Vie d'esodo*

Tipologia	Superficie netta minima per occupante
Occupante deambulante	0,70 m <sup>2</sup> /persona
Occupante non deambulante	2,25 m <sup>2</sup> /persona
Le superfici lorde devono includere gli spazi di manovra necessari per l'utilizzo di eventuali ausili per il movimento (es. letto, sedia a ruote, ...).	

*Tabella S.4-14: Superficie minima per occupante*

*Figura 6.21 - Tabella S.4-14 estratta dalla RTO*

- L'altezza minima delle vie d'esodo non è inferiore a 2 m.
- Il sistema d'esodo è concepito tenendo conto che, in caso di emergenza, gli occupanti tendono solitamente ad uscire percorrendo in senso inverso la via che hanno impiegato per entrare.
- Tutte le superfici di calpestio delle vie d'esodo sono non sdruciolevoli.
- Il fumo ed il calore dell'incendio smaltiti o evacuati dall'attività non interferiscono con il sistema delle vie d'esodo.

Le vie d'esodo principali sono due e sono classificabili, una come via d'esodo esterna e una come via d'esodo aperta (cioè via d'esodo generica non protetta o a prova di fumo o esterna).

#### *Via d'esodo esterna*

La scala d'esodo esterna è completamente esterna all'attività. Inoltre, durante l'esodo degli occupanti, non è soggetta ad irraggiamento dovuto all'incendio superiore a 2,5 kW/m<sup>2</sup> (Capitolo S.3 della RTO) e non è investita dagli effluenti dell'incendio.

In prossimità è generalmente ammessa la presenza di impianti tecnologici e di servizio ausiliari al funzionamento dell'attività, nel rispetto dei vincoli imposti nei Capitoli S.10 e V.1 della RTO (es. ascensori, montacarichi, montalettighe, scale mobili, marciapiedi mobili, impianti elettrici civili, impianti antincendio, ecc..)

6. *Il caso studio*

Si ritengono soddisfatte le condizioni del comma 1 in quanto la scala d'esodo soddisfa il seguente criterio:

- la parete esterna dell'edificio su cui è collocata la via di esodo esterna, compresi gli infissi, possiede caratteristiche di resistenza al fuoco non inferiori a EI 30 per una larghezza pari alla proiezione della via d'esodo incrementata di 1,8 m per ogni lato.

La scala d'esodo esterna conduce in luogo sicuro direttamente.

Ai fini delle prestazioni, una scala esterna è considerata almeno equivalente ad una scala a prova di fumo.

*Scale d'esodo*

Le scale d'esodo sono dotate di corrimano laterale e devono consentire l'esodo senza inciampo degli occupanti. A tal fine:

- i gradini hanno alzata e pedata costanti;
- sono interrotte da pianerottoli di sosta.

*Porte lungo le vie d'esodo*

- Le porte installate lungo le vie d'esodo sono facilmente identificabili ed apribili da parte di tutti gli occupanti.
- L'apertura delle porte non ostacola il deflusso degli occupanti lungo le vie d'esodo.
- Le porte si aprono su aree facilmente praticabili, di profondità almeno pari alla larghezza complessiva del varco.
- Le porte possiedono i requisiti di cui alla tabella in *Figura 6.22*, in funzione delle caratteristiche del locale e del numero di occupanti che impiegano ciascuna porta.

Caratteristiche locale	Caratteristiche porta		
	Occupanti serviti	Verso di apertura	Dispositivo di apertura
Locale non aperto al pubblico	9 < n ≤ 25 occupanti	Nel verso dell'esodo	UNI EN 179
	n > 25 occupanti		UNI EN 1125
Locale aperto al pubblico	n < 10 occupanti		UNI EN 179
	n ≥ 10 occupanti		UNI EN 1125
Area a rischio specifico	n > 5 occupanti		UNI EN 1125
Altri casi	Secondo risultanze dell'analisi del rischio		

*Tabella S.4-3: Caratteristiche delle porte lungo le vie d'esodo*

*Figura 6.22 - Tabella S.4-3 estratta dalla RTO*

### *Uscite finali*

Le uscite finali verso luogo sicuro hanno le seguenti caratteristiche:

- sono posizionate in modo da garantire l'evacuazione rapida degli occupanti verso luogo sicuro;
- sono sempre disponibili, anche durante un incendio in attività limitrofe.

Le uscite finali sono contrassegnate sul lato verso luogo sicuro con cartello UNI EN ISO 7010-M001 o equivalente, riportante il messaggio *Uscita di emergenza, lasciare libero il passaggio*.

### *Segnaletica d'esodo ed orientamento*

Il sistema d'esodo (cio. vie d'esodo, luoghi sicuri, spazi calmi, ecc..) è facilmente riconosciuto ed impiegato dagli occupanti grazie ad apposita segnaletica di sicurezza. Ciò può essere conseguito anche con ulteriori indicatori ambientali quali:

- accesso visivo e tattile alle informazioni;
- grado di differenziazione architettonica;
- uso di segnaletica per la corretta identificazione direzionale, tipo UNI EN ISO 7010 o equivalente;
- ordinata configurazione geometrica dell'edificio, anche in relazione ad allestimenti mobili o temporanei.

La segnaletica d'esodo è adeguata alla complessità dell'attività e consente l'orientamento degli occupanti (wayfinding).

A tal fine:

- sono installate in ogni piano dell'attività apposite planimetrie semplificate, correttamente orientate, in cui sia indicata la posizione del lettore (es. "Voi siete qui") ed il layout del sistema d'esodo (es. vie d'esodo, spazi calmi, luoghi sicuri, ...). A tal proposito possono essere applicate le indicazioni contenute nella norma ISO 23601 *Safety identification - Escape and evacuation plan sign*.
- sono applicate le indicazioni supplementari contenute nella norma ISO 16069 *Graphical symbols - Safety signs - Safety way guidance systems (SWGS)*.

### *Illuminazione di sicurezza*

É installato un impianto di illuminazione di sicurezza lungo tutto il sistema delle vie d'esodo fino a luogo sicuro, ove l'illuminazione naturale e artificiale

6. *Il caso studio*

presente risulti anche occasionalmente insufficiente a garantire l'esodo degli occupanti.

L'impianto di illuminazione di sicurezza assicura un livello di illuminamento sufficiente a garantire l'esodo degli occupanti, conformemente alle indicazioni della norma UNI EN 1838 o equivalente.

- *Dati di ingresso della progettazione antincendio*

La progettazione del sistema d'esodo dipende da dati di ingresso per ogni compartimento (in questo caso unico) specificati nei paragrafi S.4.6.1 e S.4.6.2 della RTO.

*Profilo di rischio  $R_{vita}$  di riferimento*

Ciascun componente del sistema d'esodo è dimensionato in funzione del profilo di rischio  $R_{vita}$  del compartimento servito.

*Affollamento*

Il massimo affollamento previsto all'interno dell'edificio scolastico è, come risulta dalla allegata dichiarazione del titolare dell'attività:

- n. 14 aule: 26 persone/aula per un totale di 364 persone.
- aree destinate a servizi: 10 persone effettivamente presenti + 20% per un totale di 12 persone;

**TOTALE PRESENZE: 376 occupanti**

I dati di input per la progettazione antincendio, valutati nel singolo compartimento sono quindi definiti come in *Tabella 6.2*:

Compartimento	$R_{vita}$	affollamento * [persone]	vie di esodo indipendenti minime** [n°]	vie di esodo presenti [n°]	verificato
1 - scuola	A2	376	2	2	SI

\*L'affollamento è dichiarato dal responsabile dell'attività.

\*\*Il numero di vie di uscita minime indipendenti, sono calcolate in accordo alla tabella in *Figura 6.23*.

*Tabella 6.2 - Riepilogo: dati di ingresso per la progettazione antincendio*

$R_{vita}$	Affollamento	Numero minimo
Qualsiasi	$\leq 50$ occupanti	1 [1]
A1, A2, Ci1, Ci2, Ci3	$\leq 100$ occupanti	
Qualsiasi	$\leq 500$ occupanti	2
	$\leq 1000$ occupanti	3
	$> 1000$ occupanti	4

[1] Sia comunque rispettata la massima lunghezza del *corridoio cieco* di cui al paragrafo S.4.8.2

Tabella S.4-8: Numero minimo di uscite da compartimento, piano, soppalco, locale

Figura 6.23 - Tabella S.4-8 estratta dalla RTO

## Lunghezze d'esodo e dei corridoi ciechi

$R_{vita}$	Max lunghezza d'esodo $L_{es}$ [m]	Max lunghezza corrid. cieco $L_{cc}$ [m]	$R_{vita}$	Max lunghezza d'esodo $L_{es}$ [m]	Max lunghezza corrid. cieco $L_{cc}$ [m]
A1	70	30	<b>B1, E1</b>	60	25
A2	60	25	<b>B2, E2</b>	50	20
A3	45	20	<b>B3, E3</b>	40	15
A4	30	15	<b>C1</b>	40	20
D1	30	15	<b>C2</b>	30	15
D2	20	10	<b>C3</b>	20	10

I valori delle massime lunghezze d'esodo e dei corridoi ciechi di riferimento possono essere incrementati in relazione a *misure antincendio aggiuntive* secondo la metodologia di cui al paragrafo S.4.10.

Tabella S.4-10: Massime lunghezze d'esodo e di corridoio cieco di riferimento

Figura 6.24 - Tabella S.4-10 estratta dalla RTO

La lunghezza di ciascun percorso d'esodo e corridoio cieco dell'attività non deve superare i valori massimi della tabella in *Figura 6.24* in funzione del profilo di rischio  $R_{vita}$  di riferimento, come mostrato nella *Tabella 6.3*:

Compartimento	$R_{vita}$	$L_{es}$ [m]	$L_{cc}$ [m]	$L_{es}$ max [m]	$L_{cc}$ max [m]	verificato
1 – scuola	A2	47	24,9	60	25	SI

Tabella 6.3 - Confronto tra lunghezze d'esodo e dei corridoi ciechi presenti e quelle massime ammissibili

## Corridoi ciechi

In accordo al Capitolo G.1.9 della RTO, per *lunghezza d'esodo* si intende la distanza che ciascun occupante deve percorrere lungo una via d'esodo dal luogo in cui si trova fino ad un luogo sicuro temporaneo o ad un luogo sicuro.

6. Il caso studio

La lunghezza d'esodo è valutata con il **metodo del filo teso** senza tenere conto degli arredi mobili, con la precisazione che qualora ciascuna via d'esodo attraversi più luoghi sicuri temporanei fino a giungere al luogo sicuro di destinazione, si considera la distanza effettiva percorsa per raggiungere il primo dei luoghi sicuri temporanei attraversati dalla via d'esodo. A tal proposito sono riportati esempi in *Figura 6.25*.

Infatti nell'esempio di via d'esodo ABCD, si considera come lunghezza d'esodo il solo tratto ABC in quanto entrando nella scala protetta, si entra in un luogo sicuro temporaneo. È altresì vero che nello stesso tratto, il corridoio cieco è il tratto AB, in quanto l'occupante arrivato in B, trova due vie di esodo verticali indipendenti a disposizione.

Da ciò si può dedurre che nell'attività il corridoio cieco è presente nei locali:

- aule ed alcuni corridoi

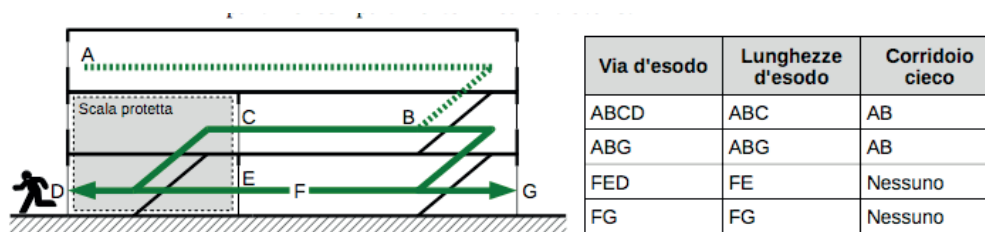


Illustrazione G.1-4: Esempi di lunghezza d'esodo e corridoio cieco, in sezione.

Figura 6.25 - Illustrazione G.1-4 estratta dalla RTO

- *Calcolo della larghezza minima delle vie d'esodo orizzontali*

La larghezza minima delle vie d'esodo orizzontali  $L_o$  (per esempio corridoi, porte, uscite, ecc.), che consente il regolare esodo degli occupanti che la impiegano, è calcolata come segue:

$$L_o = L_u \times n_o$$

$L_o$  = larghezza minima delle vie d'esodo orizzontali [mm]

$L_u$  = larghezza unitaria per le vie d'esodo orizzontali determinata dalla tabella in *Figura 6.26*, in funzione del profilo di rischio  $R_{vita}$  di riferimento [mm/persona]

$n_o$  = numero totale degli occupanti che impiegano tale via d'esodo orizzontale.

$R_{vita}$	Larghezza unitaria [mm/persona]	$R_{vita}$	Larghezza unitaria [mm/persona]
A1	3,40	B1, C1, E1	3,60
A2	3,80	B2, C2, D1, E2	4,10
A3	4,60	B3, C3, D2, E3	6,20
A4	12,30	-	-

Tabella S.4-11: Larghezze unitarie per vie d'esodo orizzontali

Figura 6.26 - Tabella S.4-11 estratta dalla RTO

Compartimento	$R_{vita}$	Larghezza unitaria [mm/persona]	Affollamento [persone]	Larghezza		verificato
				richiesta* [mm]	presente [mm]	
I piano – scuola	A2	3,8	188	714,4	4200	SI
Piano terra – scuola	A2	3,8	188	714,4	4520	SI

Tabella 6.4 - Confronto tra larghezze d'esodo orizzontali richieste da normative ed effettivamente presenti

La larghezza  $L_0$  rispetta comunque i seguenti criteri per le larghezze minime di ciascun percorso:

- la larghezza (per esempio di porte, di uscite, di corridoi, ecc..) non è inferiore a 900 mm, per consentire l'esodo anche ad occupanti che impiegano ausili per il movimento;
- è presente larghezza non inferiore a 800 mm per le porte di locali con affollamento non superiore a 10 persone (per esempio singoli uffici, camere d'albergo, locali di abitazione, appartamenti, servizi igienici, ecc..);
- è presente larghezza non inferiore a 600 mm da locali ove vi sia esclusiva presenza occasionale e di breve durata di personale addetto (per esempio locali impianti, ecc..)

#### Verifica di ridondanza delle vie d'esodo orizzontali

Nei locali che hanno più di una via d'esodo orizzontale, si suppone che l'incendio possa renderne una indisponibile.

Ai fini della verifica di ridondanza, si rende indisponibile una via d'esodo oriz-

6. *Il caso studio*

zontale alla volta e si verifica che le restanti vie d'esodo indipendenti da questa abbiano larghezza complessiva sufficiente a garantire l'esodo degli occupanti.

Le vie d'esodo a prova di fumo o esterne sono considerate sempre disponibili e non sono sottoposte a verifica di ridondanza.

Nella verifica di ridondanza non è necessario procedere ad ulteriore verifica delle lunghezze d'esodo e dei corridoi ciechi.

Compartimento	R <sub>vita</sub>	Larghezza			verificato
		richiesta* [mm]	presente [mm]	con una indisponibile [mm]	
I piano – scuola	A2	714,4	4200	2000	SI
Piano terra – scuola	A2	714,4	4520	2000	SI

Tabella 6.5 - Confronto tra larghezze d'esodo orizzontali richieste da normative ed effettivamente presenti se una si manifesta non disponibile

- *Numero minimo di vie d'esodo verticali indipendenti*

Il numero minimo di vie d'esodo verticali dell'attività è determinato in relazione ai vincoli imposti dal paragrafo S.4.8.1 della RTO per il numero minimo di vie d'esodo.

Nell'attività in esame sono presenti due vie d'esodo verticali.

*Calcolo della larghezza minima delle vie d'esodo verticali*

In funzione della procedura d'esodo adottata (paragrafo S.4.2 della RTO), la larghezza minima della via d'esodo verticale  $L_v$ , che consente il regolare esodo degli occupanti che la impiegano, è calcolata come specificato nei paragrafi S.4.8.6.1 e S.4.8.6.2.

La larghezza  $L_v$  può essere suddivisa in più percorsi. Sono comunque rispettati i seguenti criteri per le larghezze minime di ciascun percorso:

- la larghezza non è inferiore a 1200 mm;
- è ammessa larghezza non inferiore a 600 mm da locali ove vi sia esclusiva presenza occasionale e di breve durata di personale addetto (per esempio i locali impianti);



– la larghezza della via d'esodo verticale non è inferiore alla massima larghezza di ciascuna delle porte di accesso alla stessa.

#### Calcolo in caso di esodo simultaneo

Nell'attività si applica la procedura d'**esodo simultaneo**, quindi le vie d'esodo verticali sono in grado di consentire l'evacuazione contemporanea di tutti gli occupanti in evacuazione dal piano primo.

La larghezza  $L_v$  è calcolata come segue:

$$L_v = L_u \times n_v$$

$L_v$  = larghezza minima della via d'esodo verticale [mm]

$L_u$  = larghezza unitaria determinata da tabella in *Figura 6.27* in funzione del profilo di rischio  $R_{vita}$  di riferimento (secondo paragrafo S.4.6.1) e del numero totale dei piani serviti dalla via d'esodo verticale [mm/persona]

$n_v$  = numero totale degli occupanti che impiegano tale via d'esodo verticale, provenienti da tutti i piani serviti.

$R_{vita}$	Numero totale dei piani serviti dalla via d'esodo verticale									
	1	2 [F]	3	4	5	6	7	8	9	> 9
A1	4,00	3,60	3,25	3,00	2,75	2,55	2,40	2,25	2,10	2,00
B1, C1, E1	4,25	3,80	3,40	3,10	2,85	2,65	2,45	2,30	2,15	2,05
A2	4,55	4,00	3,60	3,25	3,00	2,75	2,55	2,40	2,25	2,10
B2, C2, D1, E2	4,90	4,30	3,80	3,45	3,15	2,90	2,65	2,50	2,30	2,15
A3	5,50	4,75	4,20	3,75	3,35	3,10	2,85	2,60	2,45	2,30
B3, C3, D2, E3	7,30	6,40	5,70	5,15	4,70	4,30	4,00	3,70	3,45	3,25
A4	14,60	11,40	9,35	7,95	6,90	6,10	5,45	4,95	4,50	4,15

I valori delle larghezze unitarie *devono* essere incrementati secondo le indicazioni della tabella S.4-13 in relazione all'alzata ed alla pedata dei gradini, alla tipologia di scala.  
[F] Impiegato anche nell'esodo *per fasi*

Tabella S 4-12: Larghezza unitaria per vie di esodo verticali in mm/persona

Figura 6.27 - Tabella S.4-12 estratta dalla RTO

Compartimento	$R_{vita}$	Larghezza unitaria [mm/persona/]	Affollamento [persone]	Larghezza		verificato
				richiesta* [mm]	presente [mm]	
I piano – scuola	A2	4,55	188	855,4	4200	SI

Tabella 6.6 - Confronto tra larghezze d'esodo verticali richieste da normative ed effettivamente presenti

6. *Il caso studio*

*Verifica della ridondanza delle vie d'esodo verticali*

Nell'edificio che ha più di una via d'esodo verticale, si suppone che l'incendio possa renderne una indisponibile.

Ai fini della verifica di ridondanza, si rende indisponibile una via d'esodo verticale alla volta e si verifica che le restanti vie d'esodo indipendenti da questa abbiano larghezza complessiva sufficiente a garantire l'esodo degli occupanti.

Le vie d'esodo a prova di fumo o esterne sono considerate sempre disponibili e non devono essere sottoposte a verifica di ridondanza.

Nella verifica di ridondanza non è necessario procedere ad ulteriore verifica delle lunghezze d'esodo e dei corridoi ciechi.

Compartimento	R <sub>vita</sub>	Larghezza			verificato
		L <sub>v</sub> max* [mm]	L <sub>v</sub> presente [mm]	con una indisponibile [mm]	
I piano – scuola	A2	855,4	4200	2000	SI

Tabella 6.7 - Confronto tra larghezze d'esodo verticali richieste da normative ed effettivamente presenti se una si manifesta non disponibile

- *Esodo in presenza di occupanti con disabilità*

Ai piani interrato e primo, nei locali dell'attività è prevista la presenza occasionale di occupanti che non abbiano sufficienti abilità per raggiungere autonomamente un luogo sicuro tramite vie d'esodo verticali.

Al piano terra invece sono presenti sia locali ove è prevista la presenza occasionale di occupanti che non abbiano sufficienti abilità per raggiungere autonomamente un luogo sicuro tramite vie d'esodo verticali, sia locali ove è prevista la presenza non occasionale di tali occupanti: per essi vi è quindi la possibilità di raggiungere autonomamente un luogo sicuro tramite vie d'esodo orizzontali.

## 2. STRATEGIA ANTINCENDIO (Sezione V.7.4 della RTV)

- *Resistenza al fuoco*

La classe di resistenza al fuoco non può essere inferiore a quanto previsto nella tabella riportata in *Figura 6.28*.

Compartimenti	Classificazione dell'Attività				
	HA	HB	HC	HD	HE
Fuori terra	30		60		90
Interrati			60		90

*Tabella V.7-1: Classe minima di resistenza al fuoco*

*Figura 6.28 - Tabella V.7-1 estratta dalla RTV - Scuole*

Se ne deduce che per l'attività oggetto della presente relazione, classificata come HA in base all'altezza tra i piani, è richiesta una resistenza al fuoco delle strutture pari ad almeno R30.

## 6.4 Il DM 03/08/2015 e il DM 07/08/2017 - Soluzione alternativa

**A**llo stato di fatto la scuola in esame presenta un'unica via di esodo verticale dal primo piano, non risultando quindi conforme al minimo previsto dalla normativa (DM 03/08/2015) per quanto riguarda la soluzione conforme descritta nel capitolo S.4. Si procede quindi all'applicazione della soluzione alternativa descritta nel capitolo M.3 del Codice, con lo scopo di verificare che con la sola scala presente si rispettino i requisiti minimi di sicurezza richiesti.

Di seguito è riportato un estratto della relazione tecnica sviluppata considerando come riferimento le normative *RTO DM 03/08/2015* e *RTV per le scuole DM 07/08/2017*, scritta dopo la messa a norma dell'edificio:

### 1. ANALISI PRELIMINARE

- *1.1 Definizione del progetto*

Allo scopo della progettazione antincendio identifichiamo e documentiamo i seguenti aspetti:

- destinazione d'uso dell'attività: l'edificio in oggetto è di tipo scolastico;
- finalità della progettazione antincendio prestazionale: garantire l'esodo degli occupanti in caso di incendio attraverso la scala esistente, unica via di esodo;
- eventuali vincoli progettuali derivanti da previsioni normative o da esigenze peculiari dell'attività: le vie di esodo verticali risultano di numero inferiore alle 2 richieste dalla soluzione conforme, nonché anche la lunghezza massima del corridoio cieco;
- pericoli di incendio connessi con la destinazione d'uso prevista: i pericoli principali derivano dai locali di servizio e dalle aule didattiche;
- condizioni al contorno per l'individuazione dei dati necessari per la valutazione degli effetti che si potrebbero produrre: tutti i locali sono coperti da segnalazione automatica di incendio, l'intero edificio è munito di allarme;
- caratteristiche degli occupanti in relazione alla tipologia di edificio ed alla destinazione d'uso prevista: gli occupanti sono in numero non trascurabile (376), in stato di veglia e hanno familiarità con l'edificio.

- *1.2 Identificazione degli obiettivi di sicurezza antincendio*

Dopo aver stabilito lo scopo del progetto, in particolare la destinazione e le modalità di impiego dell'attività, si specificano gli obiettivi di sicurezza antincendio in relazione alle specifiche esigenze dell'attività in esame ed alle finalità della progettazione:

– Esodo completo degli occupanti: tutti gli occupanti devono poter abbandonare l'edificio in caso di incendio.

- **1.3 Definizione delle soglie di prestazione**

Gli obiettivi antincendio devono essere tradotti in soglie di prestazione (*performance criteria*). Tali soglie sono di tipo sia qualitativo sia quantitativo, e rispetto ad esse si può svolgere una valutazione oggettiva di sicurezza antincendio.

*Sicurezza degli occupanti lungo le vie di esodo*

Ai fini della progettazione per la salvaguardia della vita, si stabiliscono delle soglie di prestazione (*Figura 6.29*): si tratta di soglie impiegate per definire l'incapacitazione degli occupanti esposti al fuoco ed ai suoi prodotti. Per definizione, gli occupanti raggiungono l'incapacitazione quando diventano inabili a mettersi al sicuro autonomamente, e cioè quando vengono superati i parametri presenti nella *Tabella 6.8* (con  $Z = 1,8$  metri: altezza della sonda).

Modello	Prestazione	Soglia di prestazione	Riferimento
Oscuramento della visibilità da fumo	Visibilità minima di pannelli riflettenti, non retroilluminati, valutata ad altezza 1,80 m dal piano di calpestio	Occupanti: 10 m Occupanti in locali di superficie lorda < 100m <sup>2</sup> : 5 m	ISO 13571-2012.
		Soccorritori: 5 m Soccorritori in locali di superficie lorda < 100m <sup>2</sup> : 2,5 m	[1]
Gas tossici	FED, <i>fractional effective dose</i> e FEC, <i>fractional effective concentration</i> per esposizione a gas tossici e gas irritanti, valutata ad altezza 1,80 m dal piano di calpestio	Occupanti: 0,1	ISO 13571-2012, limitando a 1,1% gli occupanti incapacitati al raggiungimento della soglia
		Soccorritori: nessuna valutazione	--
Calore	Temperatura massima di esposizione	Occupanti: 60°C	ISO 13571-2012
		Soccorritori: 80°C	[1]
Calore	Irraggiamento termico massimo da tutte le sorgenti (incendio, effluenti dell'incendio, struttura) di esposizione degli occupanti	Occupanti: 2,5 kW/m <sup>2</sup>	ISO 13571-2012, per esposizioni maggiori di 30 minuti, senza modifica significativa dei tempi di esodo (2,5 kW/m <sup>2</sup> ).
		Soccorritori: 3 kW/m <sup>2</sup>	[1]

[1] Ai fini di questa tabella, per *soccorritori* si intendono i componenti delle squadre aziendali opportunamente protetti ed addestrati alla lotta antincendio, all'uso dei dispositivi di protezione delle vie aeree, ad operare in condizioni di scarsa visibilità. Ulteriori indicazioni possono essere desunte ad esempio da documenti dell'Australian Fire Authorities Council (AFAC) per *hazardous conditions*.

**Tabella M.3-2: Esempio di soglie di prestazione impiegate con il metodo di calcolo avanzato**

Figura 6.29 - Tabella M.3-2 estratta dalla RTO

6. *Il caso studio*

Visibilità	Temperatura	Irraggiamento	FED
10 m	60 °C	2,5 kW/m <sup>2</sup>	0,1

Tabella 6.8 - Valori limite dei parametri che determinano la soglia di incapacitazione degli occupanti

- **1.4 Individuazione degli scenari di incendio di progetto**

Gli scenari di incendio rappresentano la schematizzazione degli eventi che possono ragionevolmente verificarsi nell'attività in relazione alle caratteristiche del focolare, dell'edificio e degli occupanti. La procedura di identificazione, selezione e quantificazione degli scenari di incendio di progetto è descritta nel capitolo M.2 della RTO.

## 2. SCENARI DI INCENDIO PER LA PROGETTAZIONE PRESTAZIONALE

Questa parte, costituita da: identificazione dei possibili scenari d'incendio, individuazione degli scenari d'incendio di progetto; è stata trattata dallo studio *FSE Progetti* e per completezza è stata esposta nell'*Appendice* del presente testo.

## 3. PROGETTAZIONE PRESTAZIONALE PER LA SALVAGUARDIA DELLA VITA

La progettazione di un sistema d'esodo deve assicurare agli occupanti la possibilità di raggiungere un luogo sicuro in sicurezza. Questo è dunque il primo criterio da impiegare per la maggior parte degli occupanti dell'attività.

Esistono situazioni ove il criterio non è applicabile, in particolare per gli occupanti che si trovano nel compartimento di primo innesco dell'incendio (nel caso in esame la scuola è costituita da un unico compartimento).

Per quanto riguarda ciò, la norma introduce il **Criterio ASET > RSET** (Figura 6.30).

La progettazione prestazionale del sistema di vie d'esodo consiste sostanzialmente nel calcolo e nel confronto tra due intervalli di tempo così definiti:

- **ASET** = tempo disponibile per l'esodo (Available Safe Escape Time);
- **RSET** = tempo richiesto per l'esodo (Required Safe Escape Time).

Si considera efficace il sistema d'esodo se  $ASET > RSET$ , se cioè il tempo in cui permangono condizioni ambientali non incapacitanti per gli occupanti è superiore al tempo necessario perché essi possano raggiungere un luogo sicuro, non soggetto a condizioni ambientali sfavorevoli dovute all'incendio.

La differenza tra ASET ed RSET rappresenta il *margin* di sicurezza della progettazione prestazionale per la salvaguardia della vita:

$$\Delta t_{\text{marg}} = \text{ASET} - \text{RSET}$$

Nel confronto tra diverse soluzioni progettuali, il professionista antincendio rende massimo il margine di sicurezza  $\Delta t_{\text{marg}}$  in relazione alle ipotesi assunte, al fine di considerare l'incertezza nel calcolo dei tempi di ASET ed RSET.

A meno di specifiche valutazioni si assume  $\Delta t_{\text{marg}} \geq 100\% \text{ RSET}$ . In caso di specifiche valutazioni sull'affidabilità dei dati di input impiegati nella progettazione prestazionale, è consentito assumere  $\Delta t_{\text{marg}} \geq 10\% \text{ RSET}$ .

In ogni caso, il valore di  $\Delta t_{\text{marg}}$  non dovrà mai essere inferiore a 30 secondi.

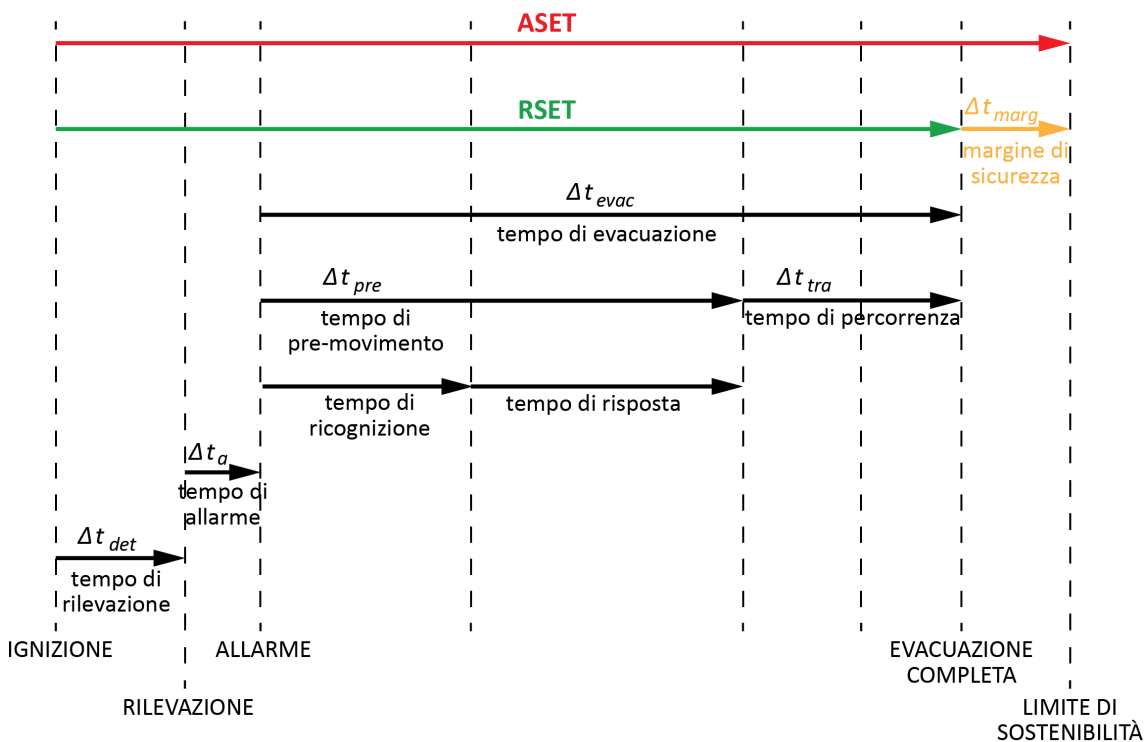


Figura 6.30 - Criterio  $\text{ASET} > \text{RSET}$  ed individuazione del margine di sicurezza.

- 3.1 Definizione di ASET

ASET, cioè il tempo a disposizione degli occupanti per mettersi in salvo, dipende strettamente dalle interazioni nel sistema incendio-edificio-occupanti: l'incendio si innesca, si propaga e diffonde nell'edificio i suoi prodotti, fumi e calore. L'edificio resiste all'incendio per mezzo delle misure di protezione attiva e passiva: impianti antincendio, compartimentazioni, sistemi di controllo di

## 6. *Il caso studio*

fumo e calore. Gli occupanti sono esposti agli effetti dell'incendio in relazione alla attività che svolgono, alla loro posizione iniziale, al loro percorso nell'edificio ed alla condizione fisica e psicologica.

Ciascun occupante possiede un proprio valore di ASET. Tale complessità viene risolta dal professionista antincendio con considerazioni statistiche e con modelli di calcolo numerici.

- *3.2 Metodo di calcolo avanzato per ASET*

Il calcolo di ASET richiede la stima delle concentrazioni di prodotti tossici, delle temperature e delle densità del fumo negli ambienti a seguito dell'incendio e la loro variazione nel tempo, in quanto gli occupanti possono muoversi nel fumo, che nei casi complessi può essere ragionevolmente elaborata solo con modelli di calcolo fluidodinamici. Sono infatti la tipologia dell'incendio e dell'attività che determinano complessivamente l'andamento di tali variabili con il tempo.

La norma *ISO 13571* è il riferimento più autorevole per il calcolo ASET. ASET globale è definito come il più piccolo tra gli ASET calcolati secondo quattro modelli:

- modello dei gas tossici;
- modello dei gas irritanti;
- modello del calore;
- modello dell'oscuramento della visibilità da fumo.

Si calcola quindi esaminando i parametri presenti nella *Tabella 6.8* (con  $Z = 1,8$  metri: altezza della sonda) [\*].

[\*] *Attività svolta dallo studio FSE PROGETTI - Appendice.*

- *3.3 Definizione di RSET*

RSET, cioè il tempo impiegato dagli occupanti per mettersi in salvo, è calcolato tra l'innesco dell'incendio ed il momento in cui gli occupanti dell'edificio raggiungono un luogo sicuro. Esso dipende dalle interazioni del sistema incendio-edificio-occupanti: la fuga degli occupanti è fortemente condizionata dalle geometrie dell'edificio ed è rallentata dagli effetti dell'incendio.

Il documento di riferimento per il calcolo di RSET è la *ISO/TR 16738*.

RSET è determinato da varie componenti: il tempo di rivelazione (detection)  $\Delta t_{det}$ , il tempo di allarme generale (alarm)  $\Delta t_a$ , il tempo di pre-movimento



(pre-travel activity time, PTAT)  $\Delta t_{pre}$ , il tempo di movimento (travel)  $\Delta t_{tra}$ :

$$RSET = \Delta t_{det} + \Delta t_a + \Delta t_{pre} + \Delta t_{tra}$$

Al fine del calcolo di RSET il professionista antincendio deve sviluppare lo scenario comportamentale di progetto più appropriato per il caso specifico, perché l'attività di pre-movimento e le velocità dell'esodo dipendono dalla tipologia di popolazione considerata e dalle modalità d'impiego dell'edificio.

#### *Tempo di rivelazione*

Il tempo  $\Delta t_{det}$  è determinato in funzione della tipologia di sistema di rilevazione e della capacità delle persone di rilevare o segnalare un incendio. È il tempo che intercorre tra l'inizio del processo di combustione e la sua rivelazione tramite un sistema automatico o manuale. Viene calcolato analiticamente o con apposita modellazione numerica degli scenari di incendio e del sistema di rivelazione.

#### *Tempo di allarme generale*

Il tempo  $\Delta t_a$  è quello che intercorre tra la rilevazione dell'incendio e la diffusione dell'informazione agli occupanti, cioè il tempo dell'allarme generale.

Tale tempo sarà dunque:

- pari a zero, quando la rilevazione attiva direttamente l'allarme generale dell'edificio;
- pari al ritardo valutato dal professionista antincendio, se la rilevazione allerta una centrale di gestione dell'emergenza che verifica l'evento ed attiva poi l'allarme manuale. Tale ritardo può essere valutato utilizzando le indicazioni presenti nel manuale operativo PD 7974-6:2004 – *The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings – Part 6: Human factors: Life safety strategies - Occupant evacuation, behaviour and condition*, che propone una classificazione degli edifici in base al sistema di allarme presente:
  - Livello A1: sistema automatico di rivelazione che attiva un immediato allarme in tutto l'edificio. In questo caso  $\Delta t_a$  risulta effettivamente uguale a 0. Se viene utilizzato un sistema di segnalazione verbale la durata del messaggio dovrà essere aggiunta al tempo di allarme.
  - Livello A2: il sistema di rivelazione è collegato ad un pre-allarme indirizzato in un luogo presidiato, che può quindi attivare l'allarme generale. In questo caso si può verificare un certo ritardo nell'attivazione del sistema e  $\Delta t_a$  può essere stimato tra 2 e 5 minuti. Anche in questo caso se viene utilizzato un

6. *Il caso studio*

sistema di segnalazione verbale, la durata del messaggio dovrà essere aggiunta al tempo di allarme.

- Livello A3: non è presente alcun sistema di rivelazione e di allarme e, pertanto, il valore di  $\Delta t_a$  non risulta stimabile a priori.

Negli edifici grandi e complessi si deve tenere conto della modalità di allarme che può essere diversificata, ad esempio, nel caso di un'evacuazione per fasi multiple.

*Tempo di attività pre-movimento*

Il tempo  $\Delta t_{pre}$  è l'oggetto della valutazione più complessa, perché si tratta del tempo necessario agli occupanti per svolgere una serie di attività che precedono il movimento vero e proprio verso il luogo sicuro. È quindi il tempo che intercorre dal momento in cui viene percepito l'allarme, al momento in cui la prima persona comincia a muoversi verso l'uscita. La letteratura indica che questa fase occupa spesso la maggior parte del tempo totale dell'esodo.

Il tempo  $\Delta t_{pre}$  è composto da un tempo di riconoscimento (recognition) e da uno di risposta (response).

Parametri di descrizione dell'attività tratto da ISO TR 16738	Tempi di attività di pre-movimento ISO TR 16738	
	$\Delta t_{pre} (1st)$ primi occupanti in fuga	$\Delta t_{pre} (99th)$ ultimi occupanti in fuga
<b>Esempio 1: albergo di media complessità</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• occupanti: <i>Ciii, sleeping and unfamiliar</i>;</li> <li>• sistema di allarme: rivelazione automatica ed allarme generale mediato dall'intervento di verifica dei dipendenti;</li> <li>• complessità geometrica edificio: <i>edificio multipiano e layout semplice</i>;</li> <li>• gestione della sicurezza: <i>ordinaria</i>.</li> </ul>	20'	40'
<b>Esempio 2: grande attività produttiva</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• occupanti: <i>A, awake and familiar</i>;</li> <li>• sistema di allarme: rivelazione automatica ed allarme generale mediato dall'intervento di verifica dei dipendenti;</li> <li>• complessità geometrica edificio: <i>edificio multipiano e layout complesso</i>;</li> <li>• gestione della sicurezza: <i>ordinaria</i>.</li> </ul>	1' 30"	3' 30"
<b>Esempio 3: residenza sanitaria assistenziale</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• occupanti: <i>D, sleeping and unfamiliar</i>;</li> <li>• sistema di allarme: rivelazione automatica ed allarme generale mediato dall'intervento di verifica dei dipendenti;</li> <li>• complessità geometrica edificio: <i>edificio multipiano e layout semplice</i>;</li> <li>• gestione della sicurezza: <i>ordinaria</i>;</li> <li>• presenza di addetti in quantità sufficiente a gestire l'evacuazione dei diversamente abili.</li> </ul>	5'	10'

Tabella M.3-1: Esempi di valutazione del tempo di pre-movimento, tratto da ISO TR 16738

Figura 6.31 - Tabella M.3-1 estratta dalla RTO

Durante il tempo di riconoscimento gli occupanti continuano le attività che stavano svolgendo prima dell'allarme generale, finché riconoscono l'esigenza di rispondere all'allarme.

Nel tempo di risposta gli occupanti cessano le loro attività normali e si dedicano ad attività legate allo sviluppo dell'emergenza, quali: raccolta di informazioni sull'evento, arresto e messa in sicurezza delle apparecchiature, raggruppamento del proprio gruppo (lavorativo o familiare), lotta all'incendio, ricerca e determinazione della via di esodo appropriata (wayfinding) ed altre attività, a volte anche errate ed inappropriate.

A seconda dello scenario comportamentale di progetto, questi tempi possono durare anche alcune decine di minuti. Nella tabella in *Figura 6.31* sono riportati alcuni esempi di valutazione tratti dalla *ISO/TR 16738*.

Il professionista antincendio può impiegare valori diversi da quelli indicati in letteratura purché adeguatamente giustificati, anche in riferimento a prove di evacuazione riportate nel registro dei controlli.

#### *Tempo di movimento*

Il tempo  $\Delta t_{tra}$  è il tempo di evacuazione, cioè il tempo impiegato dagli occupanti per raggiungere un luogo sicuro, a partire dal termine delle attività di pre-movimento appena descritte.

Il  $\Delta t_{tra}$  è calcolato in riferimento ad alcune variabili:

- la distanza degli occupanti o di gruppi di essi dalle vie di esodo;
- le velocità di esodo, che dipendono dalla tipologia degli occupanti e dalle loro interazioni con l'ambiente costruito e gli effetti dell'incendio. E' dimostrato che la presenza di fumi e calore rallenta notevolmente la velocità di esodo in funzione delle condizioni di visibilità;
- la portata delle vie d'esodo, dovuta a geometria, dimensioni, dislivelli ed ostacoli.

Nella realtà, quando gli occupanti di edifici decisamente affollati fuggono lungo le vie di esodo, si formano lunghe file nei restringimenti, inoltre secondo lo sviluppo degli scenari di incendio di progetto presi in esame, alcuni percorsi possono diventare impercorribili o bloccati. Il calcolo del  $\Delta t_{tra}$  deve tenere conto di questi fenomeni.

Attualmente si impiegano comunemente due famiglie di modelli per il calcolo del tempo di movimento: *modelli idraulici* e *modelli agent-based*.

6. *Il caso studio*

I modelli idraulici predicono con ragionevole precisione alcuni aspetti del movimento degli occupanti (per esempio i flussi attraverso le uscite), ma non includono fattori importanti del comportamento umano, come la familiarità con l'edificio, le interazioni persona-persona e l'effetto del fumo sul movimento.

I modelli agent-based (per esempio *macroscopic/microscopic, coarse network/fine network/continuous models*, ecc..) studiano invece i sistemi complessi partendo dallo studio delle interazioni tra le singole unità. Tali modelli sono oggetto di intensa ricerca scientifica e di sperimentazioni.

#### 4. ANALISI QUANTITATIVA

- 4.1 *Ipotesi assunte nella modellazione*

##### *Modellazioni avanzate di esodo*

La simulazione di esodo è condotta con metodologia avanzata mediante l'utilizzo di *modelli fluidodinamici* con software **Pathfinder 2018.2.0417 x64** in *Modalità SFPE*. L'edificio è caratterizzato da occupanti in stato di veglia e che hanno familiarità con l'edificio. La simulazione di esodo, prevede l'evacuazione degli occupanti del primo piano solo attraverso la scala esterna preesistente.

Le *Figure 6.32* e *6.33* riportano due schermate tratte dal software: si può notare come in ogni aula siano stati predisposti 25 alunni ed un docente, mentre ad ogni piano sia stata inserita la figura del bidello. Ogni persona è qui rappresentata da un cilindro colorato.

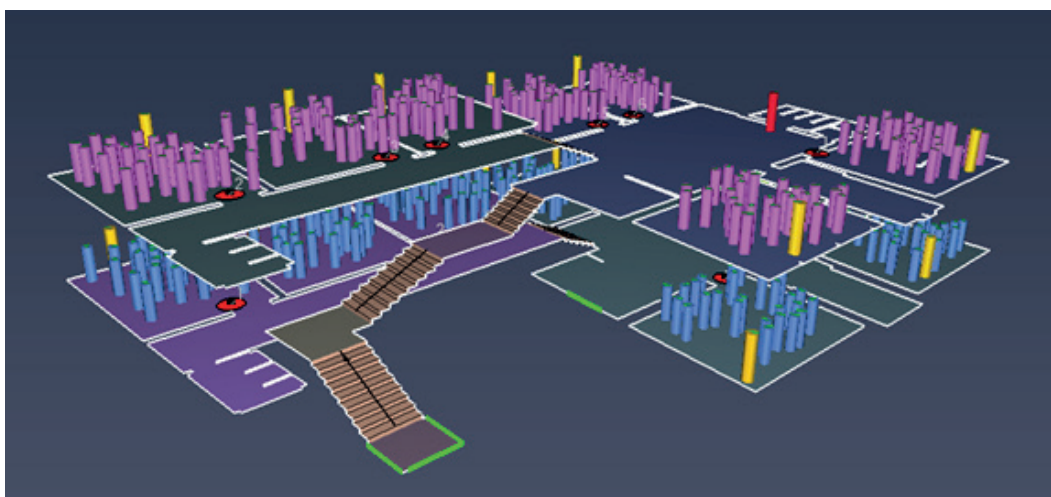


Figura 6.32 - *Disposizione degli occupanti all'interno della scuola, modellata con Pathfinder. Vista Nord*

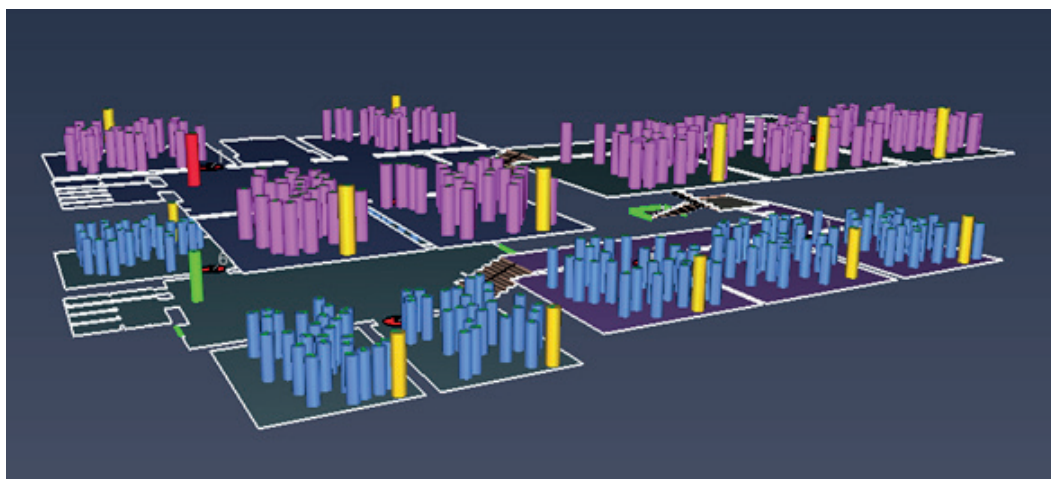


Figura 6.33 - Disposizione degli occupanti all'interno della scuola, modellata con Pathfinder. Vista Sud

#### Calcolo RSET

Il documento di riferimento per il calcolo di RSET è la *ISO/DTR 16738*. Si determinano quindi le componenti presenti nella formula:

$$RSET = \Delta t_{det} + \Delta t_a + \Delta t_{pre} + \Delta t_{tra}$$

- Tempo di rivelazione: nell'attività è presente l'impianto di rivelazione automatica, quindi si avrà:  $\Delta t_{de} = 60$  secondi.
- Tempo di allarme generale: il tempo  $\Delta t_a$ , che intercorre tra la rilevazione dell'incendio e la diffusione dell'informazione agli occupanti, nell'edificio si annulla in quanto è previsto che si attivi automaticamente l'allarme generale a seguito della rivelazione.  $\Delta t_a = 0$  secondi.
- Tempo di attività pre-movimento: il tempo  $\Delta t_{pre}$ , necessario agli occupanti per svolgere una serie di attività che precedono il movimento vero e proprio verso il luogo sicuro, rappresenta spesso la maggior parte del tempo totale dell'esodo.

Il comportamento degli occupanti, in questa fase è rappresentabile in funzione dei seguenti tre parametri fondamentali (tratti dalla norma *ISO/TR 16738*):

- Qualità del sistema di allarme (da A1 ad A3):

Livello A1 – sistema d'allarme: rilevazione automatica in tutto l'edificio, con attivazione dell'allarme generale istantaneo;

Livello A2 – sistema d'allarme a due passaggi: rilevazione automatica in tutto l'edificio che genera un segnale di pre-allarme che deve essere con-

6. *Il caso studio*

validato manualmente da un addetto;

Livello A3 – sistema d'allarme: rilevazione automatica locale con allarme nella sola area soggetta ad incendio, oppure senza rilevazione automatica, ma con attivazione manuale dell'allarme generale.

- Complessità dell'edificio (da B1 a B3):

Livello B1 (ad esempio un semplice supermercato): rappresenta un semplice edificio al piano terra di forma rettangolare, con un layout semplice, buon accesso visivo, progettato con distanze d'esodo brevi, e un buon livello di prestazione in termini di sfollamento direttamente all'esterno dell'edificio;

Livello B2 (ad esempio un blocco di uffici a più piani): rappresenta un semplice edificio a più uscite (e solitamente a più piani) con molte caratteristiche prescrittivamente ben progettate e semplici layout interni;

Livello B3 (ad esempio un edificio grande e complesso): comprende grandi edifici complessi con integrata una serie di edifici esistenti sullo stesso sito (caso tipico di edifici storici come hotel o grandi magazzini, ma anche grandi complessi moderni quali centri ricreativi, centri commerciali e aeroporti). Caratteristiche importanti sono la complessa disposizione interna che rende agli occupanti difficoltoso il wayfinding durante l'evacuazione. La gestione dell'evacuazione presenta pertanto problemi particolari.

- Qualità della gestione dell'emergenza in caso di incendio (da M1 a M3):

Livello M1 – gli occupanti tipici (personale o residenti) sono addestrati ad un alto livello di gestione della sicurezza antincendio e ad un ben sviluppato piano di emergenza con l'esecuzione di esercitazioni regolari. Per lo stato di *sveglio e non familiare* deve esserci un alto rapporto di personale qualificato per numero di visitatori, e deve essere presente un controllo di accesso all'edificio. Il sistema e le procedure sono soggette a certificazione indipendente, tra cui una revisione regolare con evacuazioni monitorate per le quali il rendimento deve corrispondere alle prestazioni assunte in fase di progettazione. Videocassette di sicurezza da eventuali incidenti o allarmi indesiderati devono essere messi a disposizione. Se utilizzato dal pubblico, dovrebbe essere previsto un sistema di allarme vocale;

Livello M2 – simile al livello M1, ma con un più basso rapporto personale qualificato per numero di visitatori, ed il controllo di accesso all'edificio può non essere sempre garantito. Non ci può essere alcuna verifica indipendente. Le caratteristiche dell'edificio possono essere di livello B2 o B3 ed il livello di allarme A2. I tempi di evacuazione saranno più conservativi

rispetto a un sistema di livello M1;

Livello M3 – rappresenta i servizi standard di gestione della sicurezza antincendio. Non vi è alcuna verifica indipendente. L'edificio può essere di livello B3 ed avere un sistema di allarme di livello A3. Questo non è adatto per un progetto di ingegneria prestazionale a meno che non vengano adottate altre misure per garantire la sicurezza, quali restrizioni del carico d'incendio, elevati livelli di protezione passiva e/o di sistemi attivi.

Nel grafico tratto dal manuale operativo PD 7974-6 e riportato in Figura 6.34, si può notare come a seconda dei livelli di gestione della sicurezza (M1, M2, M3), vari la curva di distribuzione degli occupanti nel tempo (asse delle ascisse).

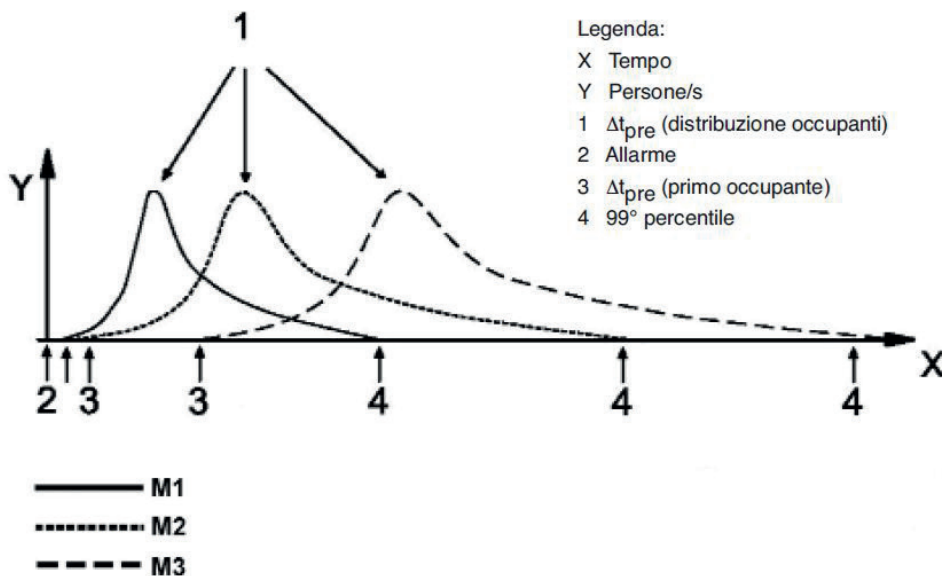


Figura 6.34 - Distribuzione dei tempi di pre-movimento per diversi livelli di gestione della sicurezza (da PD 7974-6:2004)

Table E.2 – Suggested pre-travel activity times for different design behavioural scenario categories

Scenario category and modifier levels (see Annex D)	First occupants	Occupant distribution
	$\Delta t_{pre}$ (1st percentile)	$\Delta t_{pre}$ (99th percentile)
<b>A: awake and familiar:</b> M1 B1 – B2 A1 – A2 <sup>a</sup> M2 B1 – B2 A1 – A2 M3 B1 – B2 A1 – A3 For B3, add 0.5 for wayfinding M1 would normally require voice alarm/PA if unfamiliar visitors likely to be present	0.5 1 >15	1.5 3 >30

Figura 6.35 - Porzione della Tabella E.2 estratta dalla ISO/DTR 16738, riguardante gli occupanti svegli e che hanno familiarità con l'edificio

6. *Il caso studio*

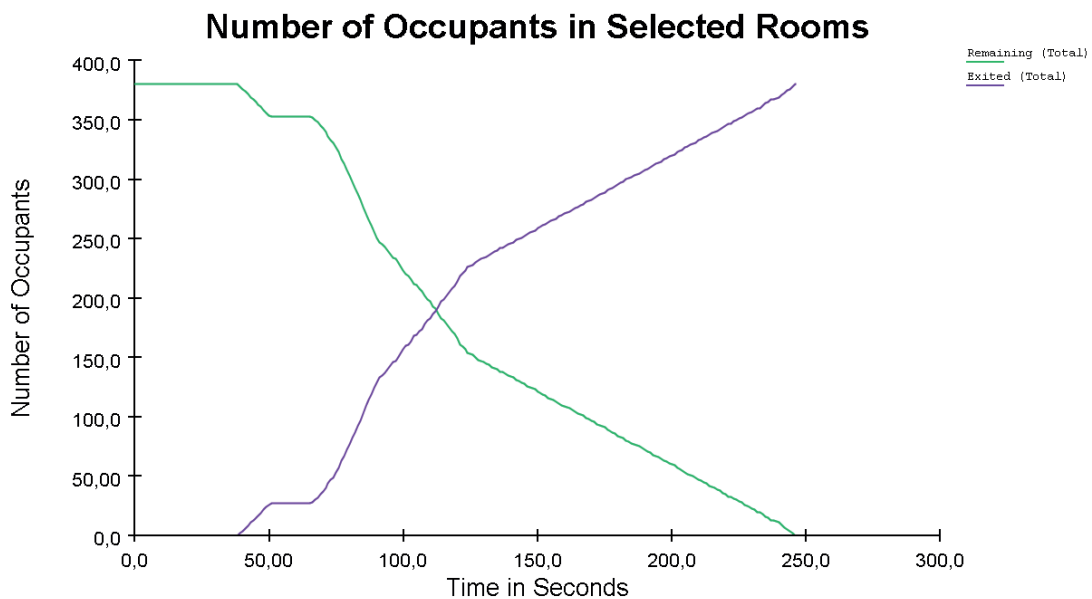
Nell'edificio oggetto della presente relazione, si individuano i seguenti livelli:

**A1 – B2 – M2**

Analizzando quindi la tabella in *Figura 6.35*, si deduce che il tempo di pre-movimento è da considerarsi pari a:  $\Delta t_{pre} = 180$  secondi.

– Tempo di movimento: il tempo  $\Delta t_{tra}$ , impiegato dagli occupanti per raggiungere un luogo sicuro, si calcola modellando l'edificio in 3D in scala reale all'interno del software Pathfinder, che opera mediante un modello idraulico, ed inserendo il reale affollamento (sia in termini di numero che di disposizione degli occupanti) all'interno dell'edificio (*Figure 6.37, 6.38, 6.39*).

Ai fini della determinazione dei tempi di percorrenza, attraverso la simulazione fluidodinamica, si può ottenere un grafico che mette in relazione il tempo in secondi con il numero di occupanti che si sono già messi in salvo (linea viola), oppure che devono ancora evacuare l'edificio (linea verde) - *Figura 6.36*.



*Figura 6.36 - Grafico che mostra i risultati fluidodinamici ottenuti con Pathfinder*

Dal grafico in *Figura 6.36*, risulta che il tempo di movimento affinché tutti gli occupanti evacuino l'edificio, è pari a:  $\Delta t_{tra} = 180$  secondi.

Sostituendo quindi i dati ottenuti nella formula di RSET:

$$RSET = \Delta t_{det} + \Delta t_a + \Delta t_{pre} + \Delta t_{tra}$$



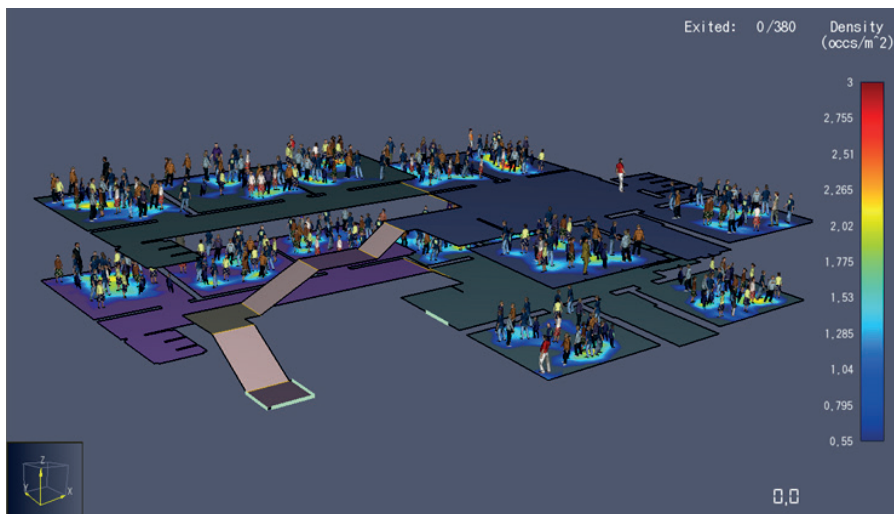


Figura 6.37 - Simulazione dell'esodo con Pathfinder - secondo: 0,0 (fase iniziale)

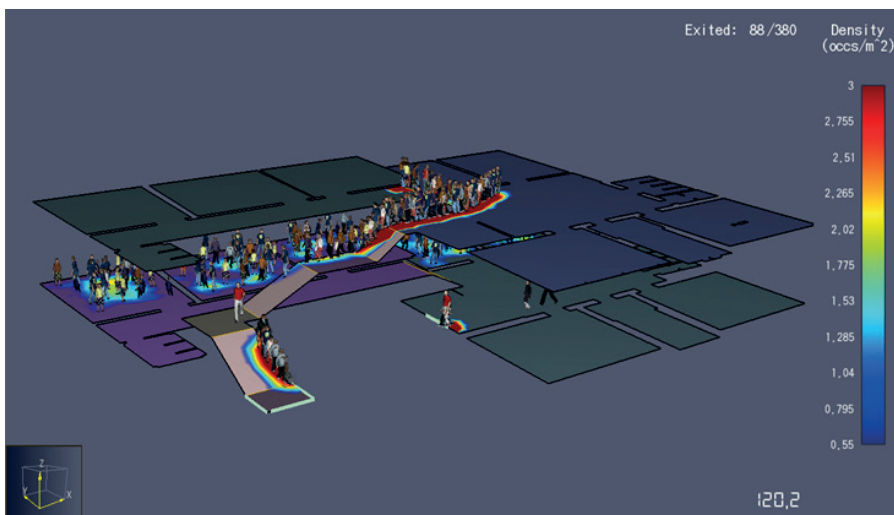


Figura 6.38 - Simulazione dell'esodo con Pathfinder - secondo: 120,2 (fase intermedia)

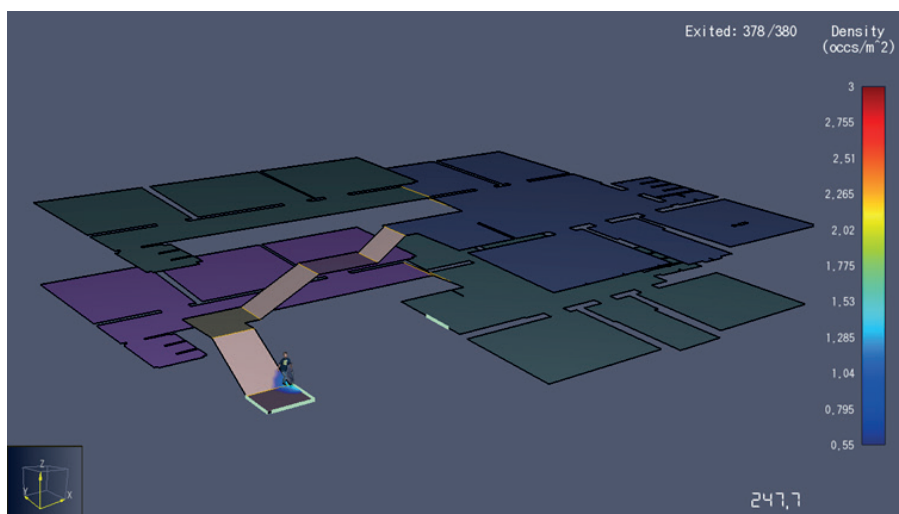


Figura 6.39 - Simulazione dell'esodo con Pathfinder - secondo: 247,7 (fase finale)

6. *Il caso studio*

si ottiene:

$$RSET = 60 \text{ sec} + 0 \text{ sec} + 180 \text{ sec} + 250 \text{ sec} = 490 \text{ sec} \sim 8 \text{ min}$$

- *4.2 Verifica di esodo*

Per lo scenario di progetto considerato nella modellazione mediante Pathfinder, ed a seguito delle valutazioni fatte in termini di ASET e RSET, la verifica prestazionale per l'esodo completo degli occupanti si riconduce a:

$$\mathbf{ASET (1000 \text{ sec} [*]) > RSET (490 \text{ sec}) \quad \mathbf{VERIFICATO}}$$

con  $\Delta t_{\text{marg}} = 510 \text{ secondi} = 104\%$ .

*[\*] Attività svolta dallo studio FSE PROGETTI - Appendice.*

## 6.5 Elaborati tecnici

In allegato sono riportati gli elaborati eseguiti dopo aver effettuato il rilievo geometrico (Tavole 1-3), e quelli riferiti alle normative applicate: DM 1992 (Tavole 4, 5) e DM 2015 (Tavole 6, 7).

Nelle planimetrie si evince come inserendo la scala antincendio esterna per adeguare l'edificio a normativa, i percorsi di esodo dal primo piano diventino più brevi, consentendo infatti agli occupanti di dividersi tra le due uscite per evacuare. In particolare si può inoltre vedere come nelle Tavole 6 e 7 i percorsi di esodo siano calcolati con il metodo del filo teso, introdotto dal DM 2015, e risultino ancora più brevi rispetto alla Tavola 4, in cui sono calcolati col metodo tradizionale.

I simboli utilizzati nelle planimetrie, riferiti alle misure di sicurezza antincendio, sono schematizzati nella Figura 6.40, tratta dal capitolo G.1 del Nuovo Codice di Prevenzione Incendi (DM 2015).

Le Tavole 1-3 sono state eseguite successivamente al rilievo geometrico ed alla restituzione CAD, si riferiscono pertanto allo stato di fatto.

Le Tavole 4, 6, 7, contengono le planimetrie e sono state realizzate come tavole tecniche per i VVFF, seguendo ognuna le prescrizioni di una normativa differente. Vi sono quindi indicati i percorsi di esodo mettendo in evidenza il loro andamento (verso l'alto, verso il basso o orizzontali); gli estintori portatili; gli idranti a muro presenti in ogni piano del fabbricato, i pulsanti di allarme, vicini alle vie di fuga; i rilevatori di incendio presenti in ogni stanza; l'illuminazione di emergenza, posta al di sopra di ogni porta per indicare al meglio i percorsi e le vie d'uscita; i segnali d'allarme incendio; la classe di resistenza al fuoco della struttura portante.

6. Il caso studio






















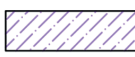
Tipologia	Simbolo	Descrizione
Elementi costruttivi e relative aperture		Porta resistente al fuoco. Per tali porte la sporgenza indica il verso di apertura
Distanziamenti		Distanza di separazione
Vie d'esodo		Porzione della via di esodo verso l'alto
		Porzione della via di esodo orizzontale
		Porzione della via di esodo verso il basso
Estintori		Estintore portatile
		Estintore carrellato
Sistemi idrici antincendio		Naspo
		Idrante a muro
		Idrante sottosuolo
		Idrante a colonna soprassuolo
		Attacco di mandata per autopompa
Sistemi di segnalazione		Pulsante di allarme
		Rilevatore di incendio (o rilevatore)
		Illuminazione i emergenza
		Segnale allarme incendio
		Magnete porta EI
Impianti fissi di estinzione		Erogatore di impianto ad attivazione automatica
		Erogatore di impianto ad attivazione manuale
Sistemi idrici antincendio		Idrante pubblico soprassuolo
Resistenza al fuoco		R-REI 60
Reazione al fuoco		Classe reazione al fuoco 1

Figura 6.40 - Tabelle G.1-2 e G.1-3 estratte dalla RTO: simboli grafici relativi alle prescrizioni antincendio

## 6.6 Modellazione dell'esodo con Pathfinder

Pathfinder si basa sull'idea di creare uno spazio su cui gli occupanti possano camminare. Ogni componente di navigazione disegnato in Pathfinder è una porzione di superficie percorribile, che può spaziare dai pavimenti, alle porte, alle scale. Gli ostacoli sono rappresentati come fori nel pavimento.

Importando un file DWG o DWF, è possibile disegnare la mesh di navigazione di partenza più velocemente che partendo da un file vuoto.

Quindi si importa il file, si seleziona l'unità di misura in cui è stato disegnato e si va avanti con le impostazioni predefinite di importazione (Figura 6.41).

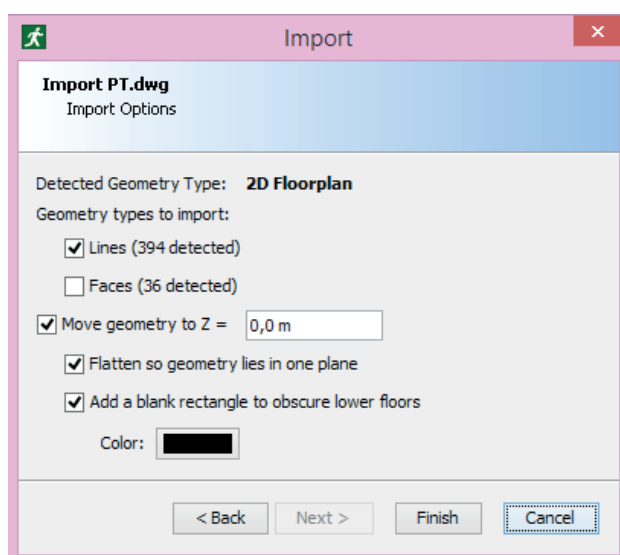


Figura 6.41 - Impostazioni di importazione per file DWG

Il DWG importato viene posizionato di default al piano corrispondente alla quota  $Z = 0,0$  m. Per aggiungere ulteriori piani si procede attraverso il comando *Add floor*, si imposta la quota Z del nuovo piano e si importa il DWG corrispondente come in precedenza.

Per ogni piano, attraverso il comando *Extract floor*, semplicemente cliccando in qualsiasi punto del DWG importato, è possibile creare una mesh di navigazione sul pavimento importato in modo da poter creare stanze, porte e occupanti (Figura 6.42).

Per creare porte sulla geometria importata in modo che le stanze siano collegate e gli occupanti possano prendere decisioni su dove andare, si utilizza il comando *Add door*. Una volta disegnata una porta, se ne possono impostare le proprietà (Figura 6.43).

## 6. Il caso studio

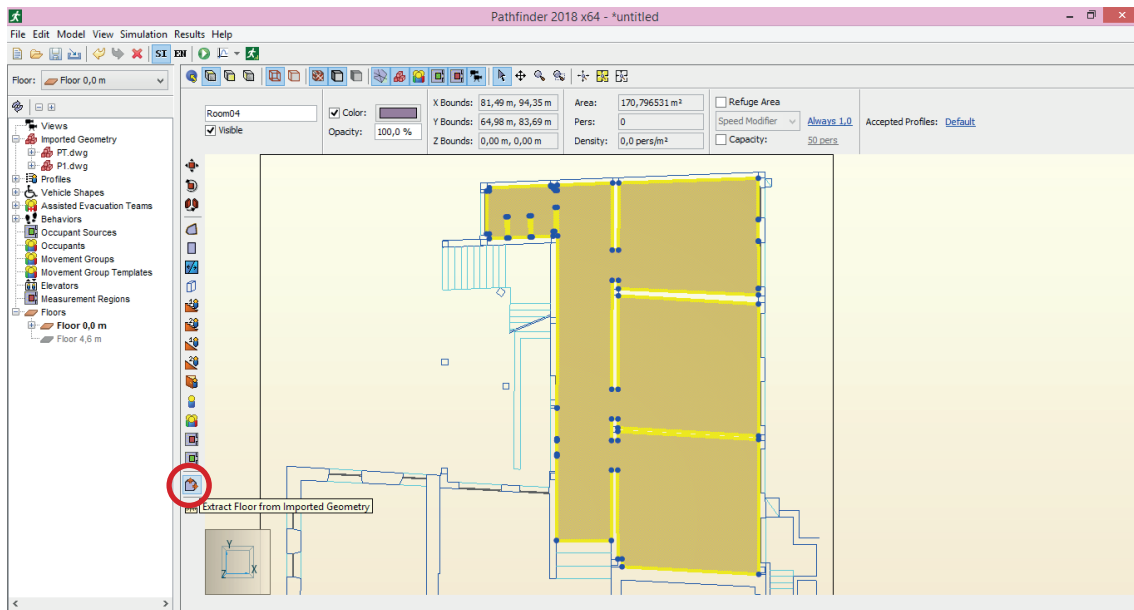


Figura 6.42 - Estrazione delle stanze a partire dalla geometria importata (DWG)

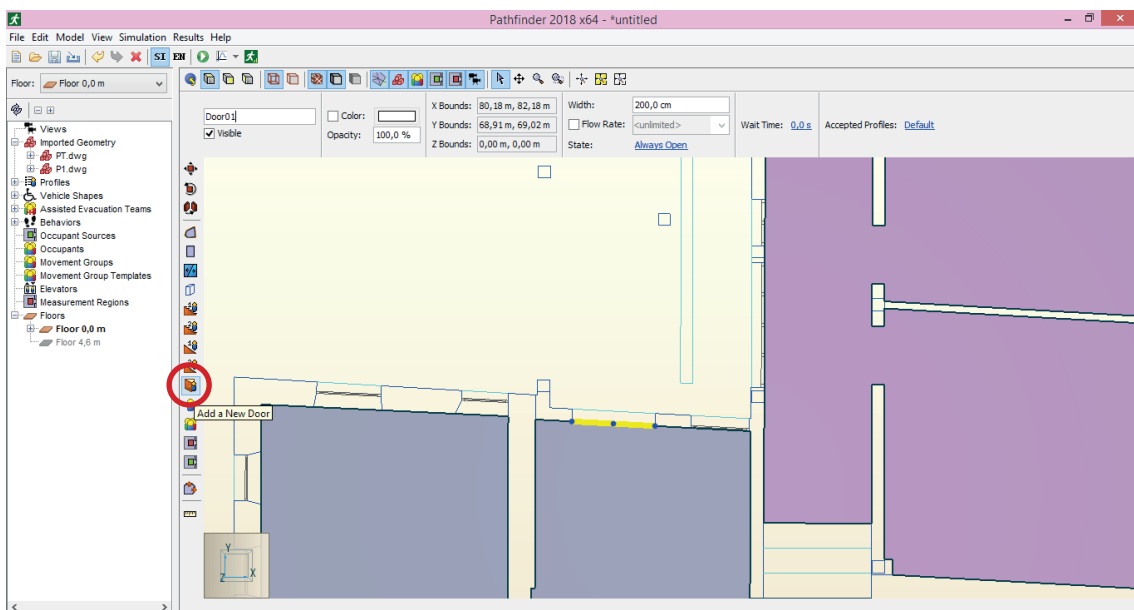


Figura 6.43 - Disposizione delle porte di uscita

Nel caso in esame, sia al piano terra che al primo piano è presente un dislivello. Questo può essere creato modificando la quota Z di riferimento del gruppo di stanze sovrapposte. Tra le due porzioni di piano si può quindi inserire una scala (o una rampa) o indicando il solo punto di partenza, o specificando il punto di partenza ed il punto di arrivo (Figura 6.44).

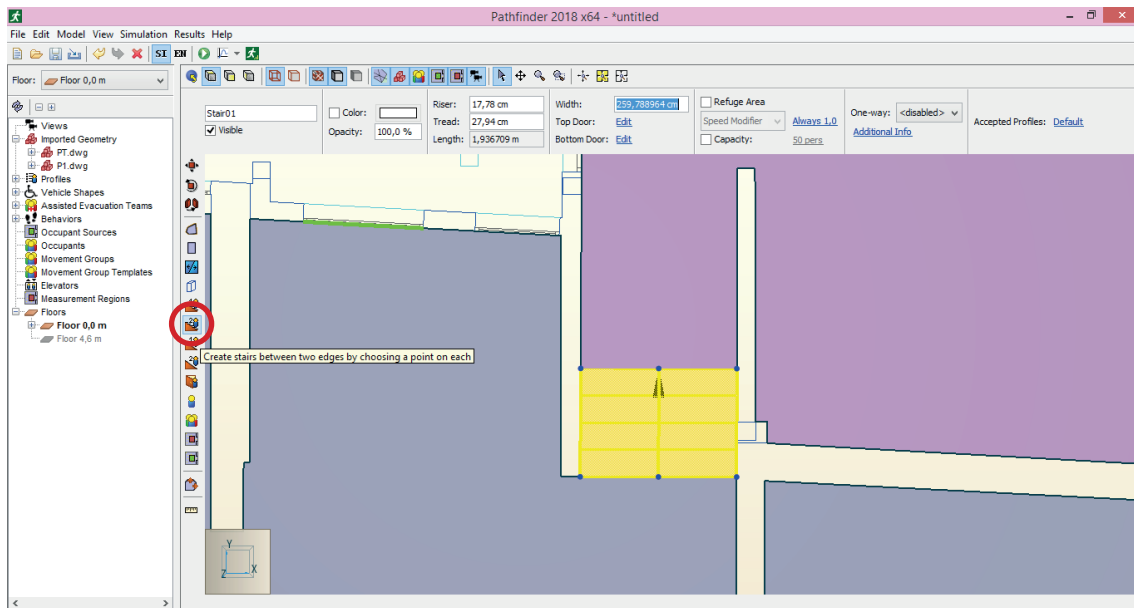


Figura 6.44 - Realizzazione di una scala attraverso l'individuazione dei pianerottoli di arrivo e partenza

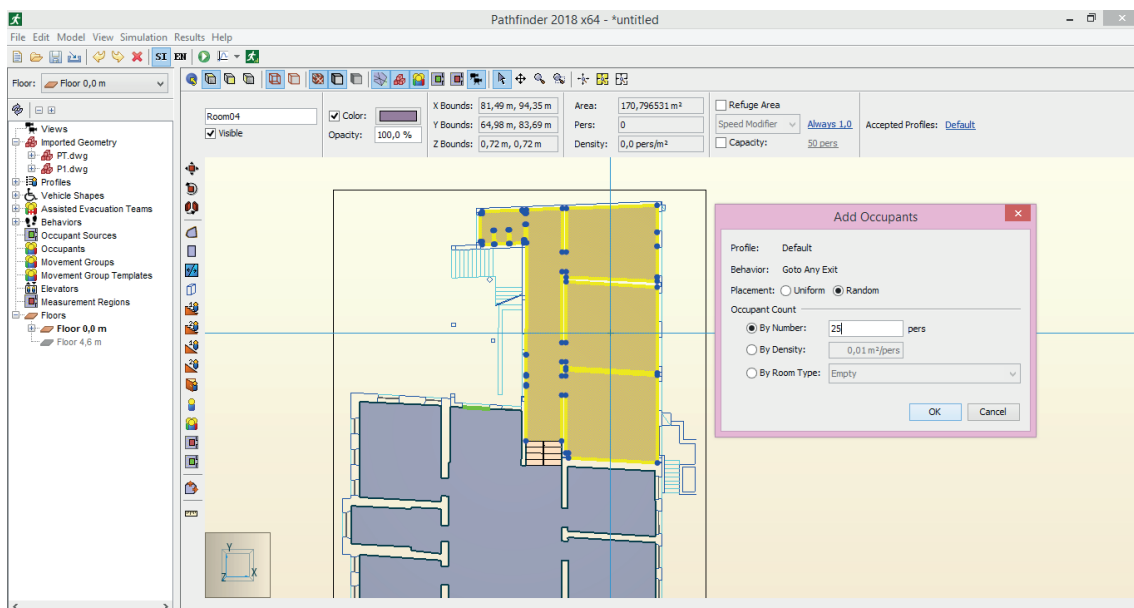


Figura 6.45 - Inserimento degli occupanti

A questo punto mediante il comando *Add an occupant* si può inserire un occupante singolo (nel caso in esame per esempio i docenti ed il personale di servizio), oppure mediante il comando *Add occupants* (Figura 6.45) si può inserire un gruppo di occupanti, indicandone il numero (nel caso in esame gli alunni nelle aule).

## 6. Il caso studio

È poi possibile personalizzare il modo in cui gli occupanti interagiscono con il modello in modo da avere una maggiore personalizzazione e precisione nei vari scenari. Si può, per esempio, impostare un colore diverso per gli occupanti in base al piano in cui si trovano e/o alla tipologia (Figura 6.46).

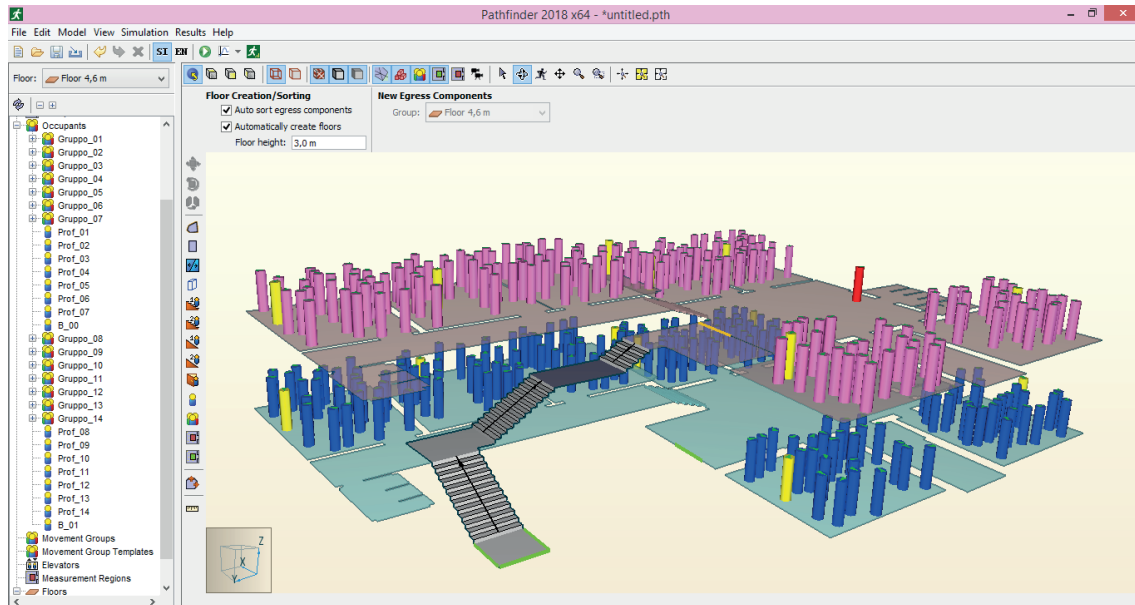


Figura 6.46 - Differenziazione degli occupanti in base alla posizione ed al ruolo all'interno dell'edificio

Per fare in modo che ogni occupante abbia caratteristiche diverse, è possibile modificare il profilo di ognuno attraverso la finestra *Edit profiles*: si creano quindi profili tipo e per ognuno si specifica la velocità di movimento, la forma (cilindrica o poligonale), il diametro delle spalle, l'altezza, e se il loro diametro può essere ridotto in caso di congestione (Figure 6.47, 6.48, 6.49). Selezionando *3D Model*, all'interno della stessa finestra, si può accedere ad una libreria di profili tipo da assegnare agli occupanti, per una visualizzazione quanto più possibile realistica. In Figura 6.50 si vede come per la tipologia Bambini, siano state selezionate figure appropriate.

Ad ogni profilo di occupante determinato, si può assegnare un livello di priorità. Tali livelli sono relativi, Ad esempio, se tre occupanti soddisfano le priorità assegnate di 4, 6 e 12, si comporteranno come se le loro priorità fossero rispettivamente 0, 1 e 2. Ciò consente agli occupanti con priorità inferiore di dare la precedenza a quelli con priorità superiore.

Nel caso in esame è stata assegnata una priorità pari a 2 agli alunni, pari a 1 ai docenti e pari a 0 al personale di servizio.



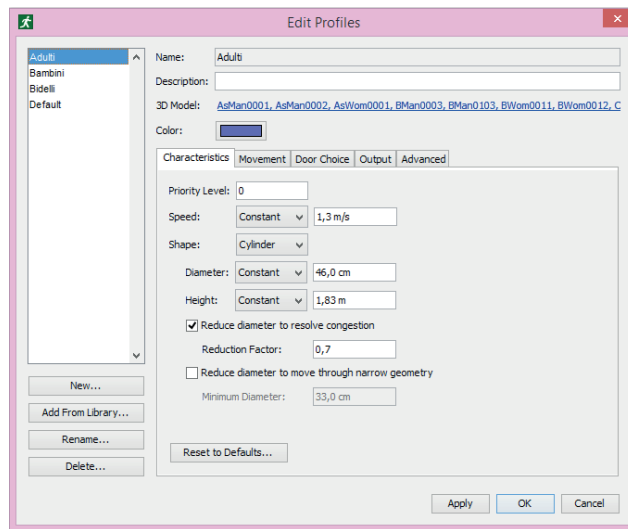


Figura 6.47 - Caratterizzazione degli adulti all'interno dell'attività

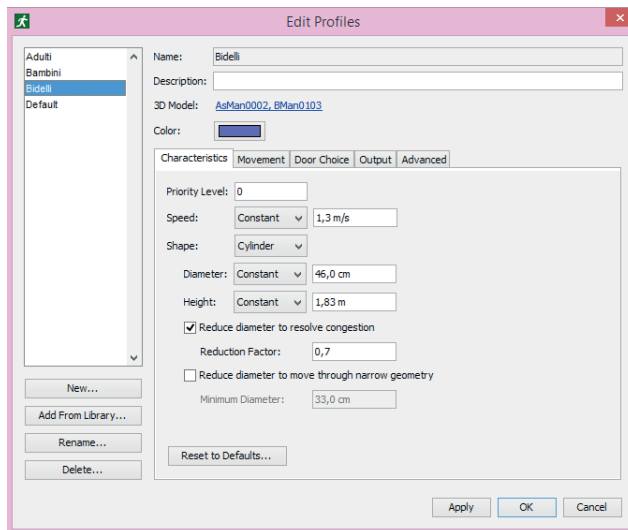


Figura 6.48 - Caratterizzazione dei bidelli all'interno dell'attività

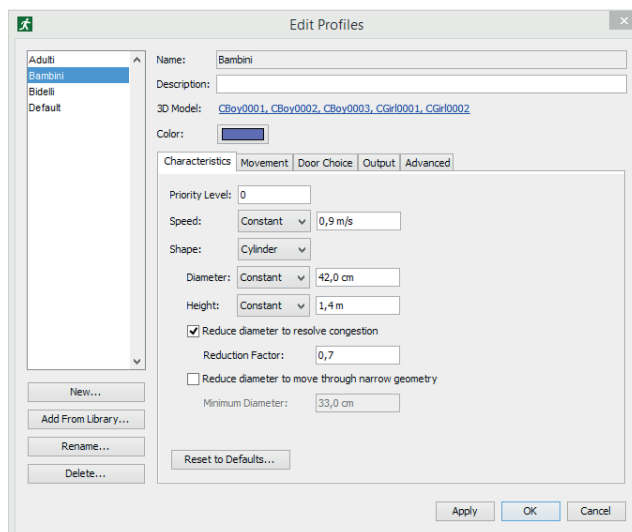


Figura 6.49 - Caratterizzazione dei bambini all'interno dell'attività

## 6. Il caso studio

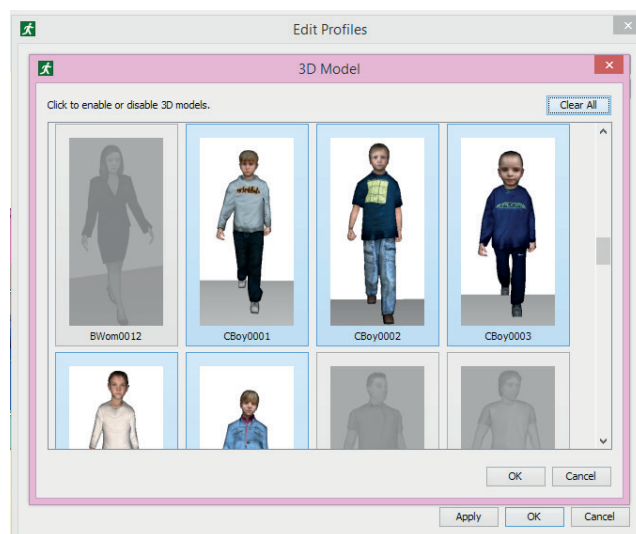


Figura 6.50 - Scelta dei modelli 3D relativi ai profili dei bambini

Per ogni profilo tipo, inoltre è possibile imporre che utilizzi una specifica via di esodo piuttosto che un'altra, che ignori i sensi unici delle porte (per esempio i soccorritori) o che richieda assistenza nel movimento (per esempio anziani o infermi), come mostrato in Figura 6.51. È anche possibile condizionare la scelta di una porta di uscita da parte degli occupanti, modificando i seguenti parametri (Figura 6.52):

- Current Room Travel Time – valori alti corrispondono ad un maggiore tempo di percorrenza all'interno della stanza in cui si trova un occupante.
- Current Room Queue Time – valori alti corrispondono ad un maggiore tempo di percorrenza dovuto all'attesa per la formazione di code in uscita dalla stanza ove si trova l'occupante.
- Global Travel Time – valori alti corrispondono ad un maggiore tempo di percorrenza globale della via di esodo, a prescindere dalla presenza di altri occupanti.
- Elevator Wait Time – si può fissare un tempo per cui l'occupante è disposto ad aspettare l'ascensore, trascorso questo tempo, l'occupante preferirà utilizzare le scale.
- Current Door Preference – se questo valore è settato su 100%, gli occupanti, dopo aver scelto una porta di uscita, non cambiano idea; se è settato su 0%, gli occupanti cambiano liberamente la propria scelta della porta che avevano selezionato per uscire.
- Current Room Distance Penalty – quando l'occupante percorre la distanza settata all'interno della stanza in cui si trova, la durata del suo viaggio viene aumentata esponenzialmente. Per questo un occupante preferisce percorsi più brevi a percorsi più veloci. Se il valore del parametro è settato su 0 metri, questa funzione viene disattivata.

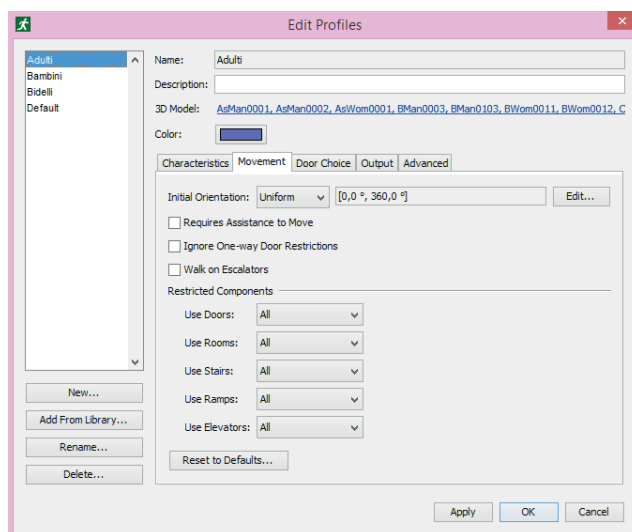


Figura 6.51 - Definizione dei parametri relativi al movimento degli occupanti

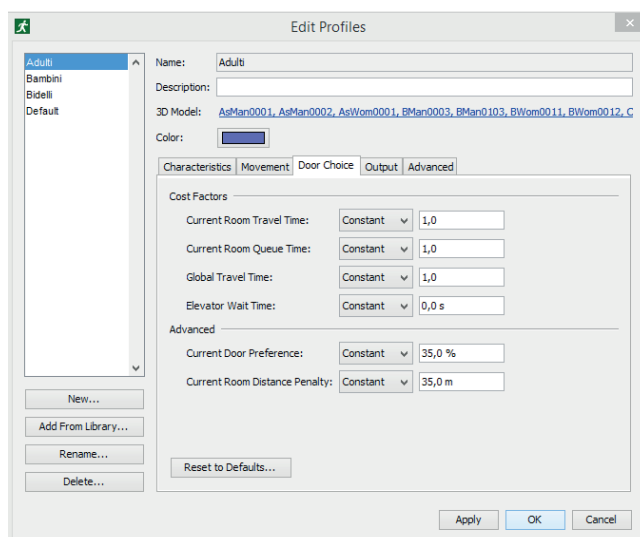


Figura 6.52 - Definizione dei parametri relativi alla scelta delle porte di uscita

Nel caso in esame sono stati lasciati i valori di default, come mostrato in Figura 6.52. È stato però sperimentato come cambiando il valore del parametro Current Door Preference, vari il tempo totale di evacuazione:

- Valore di default: 35% → Tempo totale: 242 secondi;
- Valore minimo (totale libertà di scelta): 0% → Tempo totale: 241 secondi;
- Valore massimo (scelta predefinita): 100% → Tempo totale: 243 secondi.

In questo caso la differenza non è apprezzabile dal momento che al primo piano è prevista una sola uscita di sicurezza, quindi la scelta di una porta piuttosto che un'altra riguarda solo il piano terra, i cui occupanti riescono comunque ad evacuare l'edificio in tempi nettamente inferiori agli occupanti del primo piano.

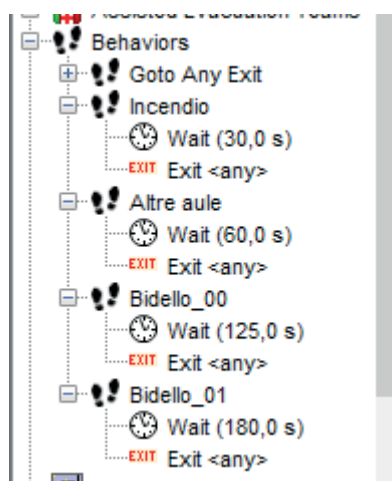
## 6. *Il caso studio*

Per ogni occupante o gruppo di occupanti, si possono impostare dei comportamenti, cioè una sequenza di azioni che vengono compiute durante la simulazione. Possono essere aggiunte azioni che possono far attendere gli occupanti, o farli viaggiare verso una destinazione, per esempio una stanza, un punto od un'uscita. Di default è previsto il comportamento *Goto Any Exit*, in quale fa semplicemente muovere l'occupante dalla sua posizione di partenza a qualsiasi uscita presente nel modello per la via più veloce.

I comportamenti si creano mediante il comando *Add a Behavior*, e possono basarsi su uno dei comportamenti predefiniti dal software. Innanzitutto bisogna specificare un ritardo iniziale che fa attendere l'occupante nella posizione iniziale prima di passare all'azione successiva (tale ritardo può essere anche pari a 0). Quindi, per ogni comportamento si aggiungono le azioni corrispondenti, che si svolgono sempre nell'ordine mostrato nella vista di navigazione. Tali azioni sono scelte tra le seguenti:

- *Goto Waypoint* – specifica che un occupante deve andare verso un punto specifico della mesh di navigazione.
- *Goto Rooms* – specifica che un occupante deve selezionare una stanza da un insieme, e andare verso di essa.
- *Goto Elevators* – specifica che un occupante deve utilizzare gli ascensori di evacuazione.
- *Wait* – indica a un occupante di attendere nella posizione corrente per un determinato periodo di tempo.
- *Wait Until* – indica a un occupante di ritardare il proprio movimento fino a quando non trascorre un determinato periodo di tempo nella simulazione.
- *Assist Occupants* – incarica l'occupante di unirsi a una squadra di evacuazione assistita e di iniziare ad assistere gli occupanti che richiedono assistenza.
- *Wait For Assistance* – indica che l'occupante deve attendere l'assistenza da parte di altri occupanti.
- *Detach from Assistants* – distacca un occupante dai suoi assistenti, permettendo loro di continuare ad aiutare altri occupanti bisognosi.
- *Goto Refuge Rooms* – incarica l'occupante di recarsi in una delle stanze indicate come aree di rifugio.
- *Goto Exits* – specifica che un occupante deve prendere la strada più veloce verso una serie di uscite.
- *Change Behavior* – incarica l'occupante di cambiare comportamento, verso uno nuovo scelto casualmente da una distribuzione di comportamenti.

Nel caso in esame sono stati assegnati i comportamenti in *Figura 6.53*. Gli occupanti dell'aula in cui è stato previsto l'incendio (vedi *Appendice - Figura A.1*), sono i primi ad evacuare l'edificio, dopo un tempo di attesa di 30 secondi. Gli occupanti di tutte le altre aule invece attendono arbitrariamente un minuto prima di iniziare l'evacuazione, i bidelli infine attendono che tutti gli occupanti del piano si siano avviati verso l'uscita di sicurezza, per evacuare l'edificio a loro volta.



*Figura 6.53 - Definizione dei comportamenti a seconda di tipologia e gruppi di occupanti*



*Figura 6.54 - Dimostrazione di come i docenti lascino uscire per primi gli alunni dall'aula*

Si può notare inoltre come durante l'evacuazione, i docenti di ogni aula diano la precedenza ai propri alunni per mettersi in salvo (*Figura 6.54*), essendo stata assegnata precedentemente agli alunni una priorità maggiore.

6. *Il caso studio*

Impostati tutti i parametri di cui sopra, i risultati della simulazione possono essere generati sia come grafico cartesiano, sia come filmato 3D.

I grafici, possono indicare o il numero degli occupanti in ogni stanza (ancora presenti o già usciti - *Figura 6.55*), oppure la portata delle porte selezionate (per il piano terra - *Figura 6.56*; per il primo piano - *Figura 6.57*).

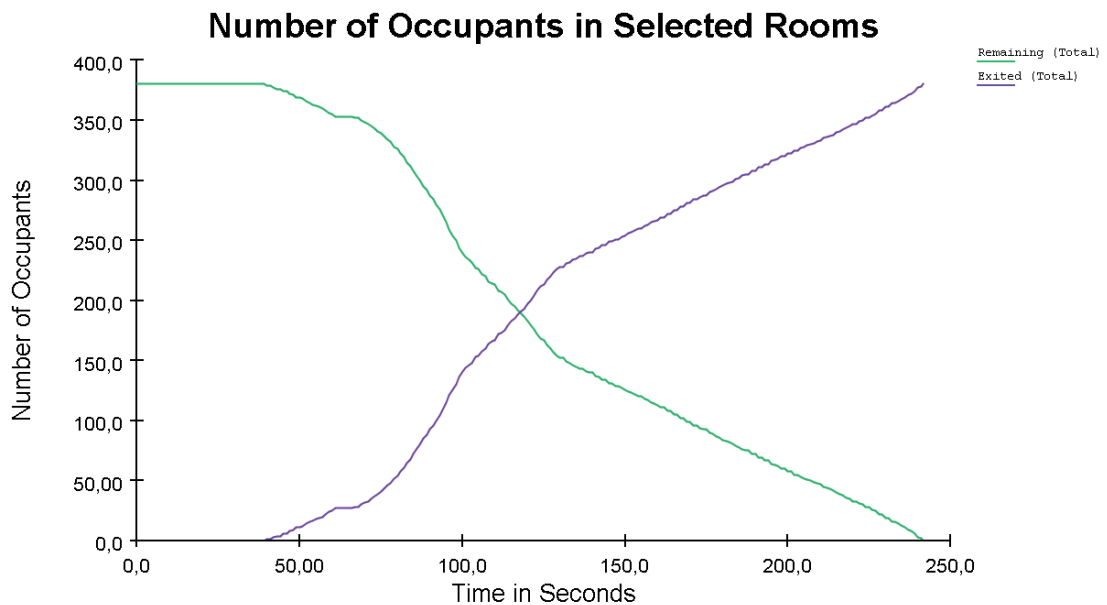


Figura 6.55 - Grafico che indica quanti occupanti sono già evacuati (linea viola) e quanti devono ancora evacuare (linea verde) in un dato tempo

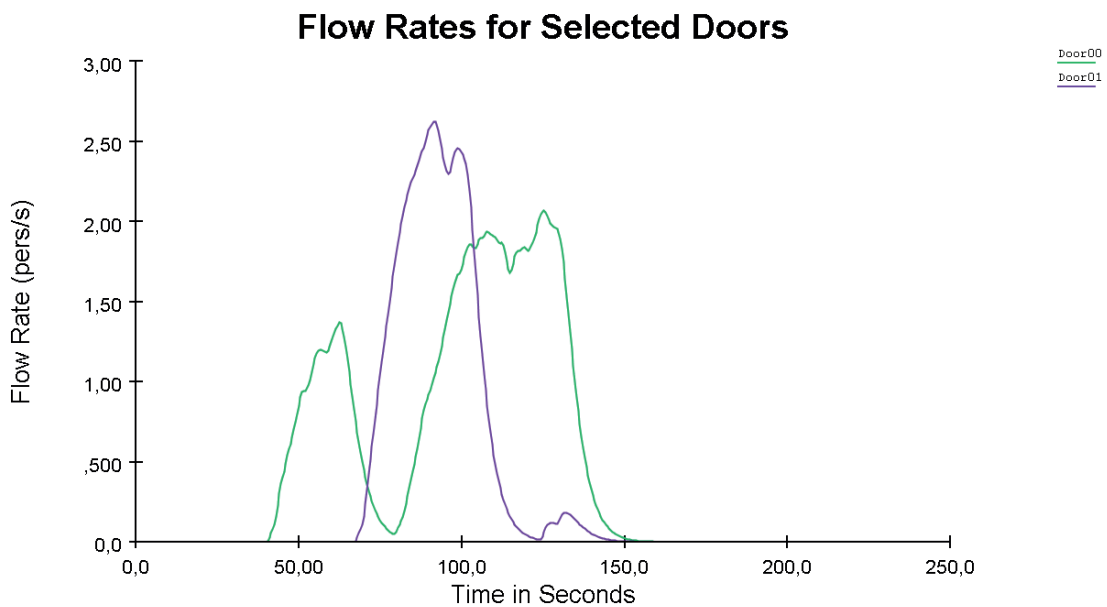


Figura 6.56 - Grafico che indica il flusso attraverso le porte di uscite del piano terra in un dato tempo (linea verde = porta principale; linea viola = porta secondaria)

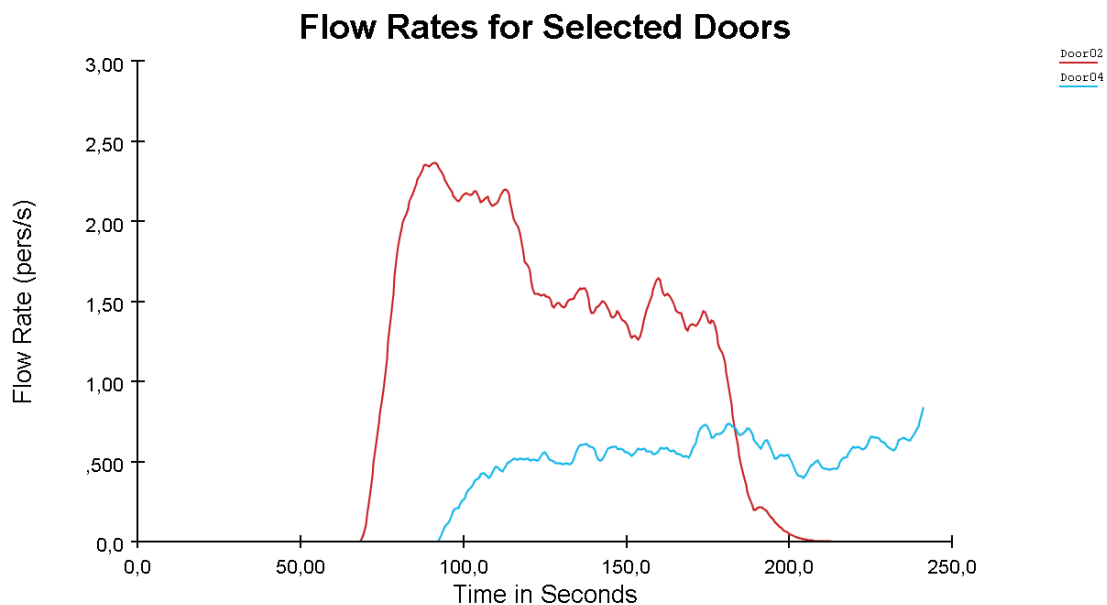


Figura 6.57 - Grafico che indica il flusso attraverso le porte di uscite del primo piano in un dato tempo (linea rossa = porta di accesso alla scala; linea azzurra = ultimo gradino verso l'esterno)

Nella visualizzazione 3D è possibile impostare diverse rappresentazioni degli occupanti (realistici - *Figura 6.58*, generici, cilindrici, a dischi piani - *Figura 6.59*); diverse tipologie di viste (per esempio: individuazione delle zone ad alta densità - *Figura 6.60*, individuazione dei tempi di uscita, individuazione del livello di servizio in funzione della formazione di code - *Figura 6.61*, individuazione delle diverse velocità degli occupanti). È inoltre possibile visualizzare sul terreno i percorsi seguiti dagli occupanti (*Figura 6.62*).

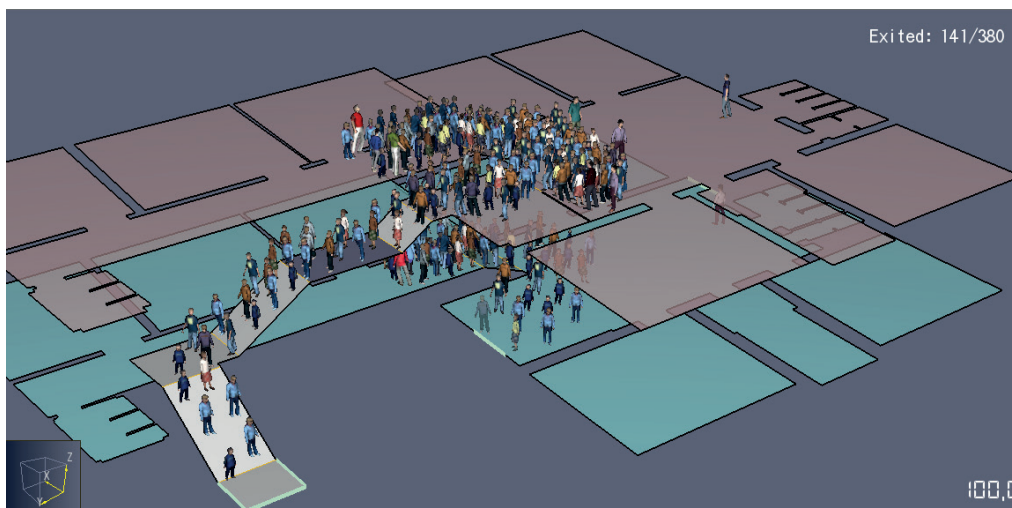


Figura 6.58 - Rappresentazione realistica degli occupanti nella simulazione di esodo

6. Il caso studio

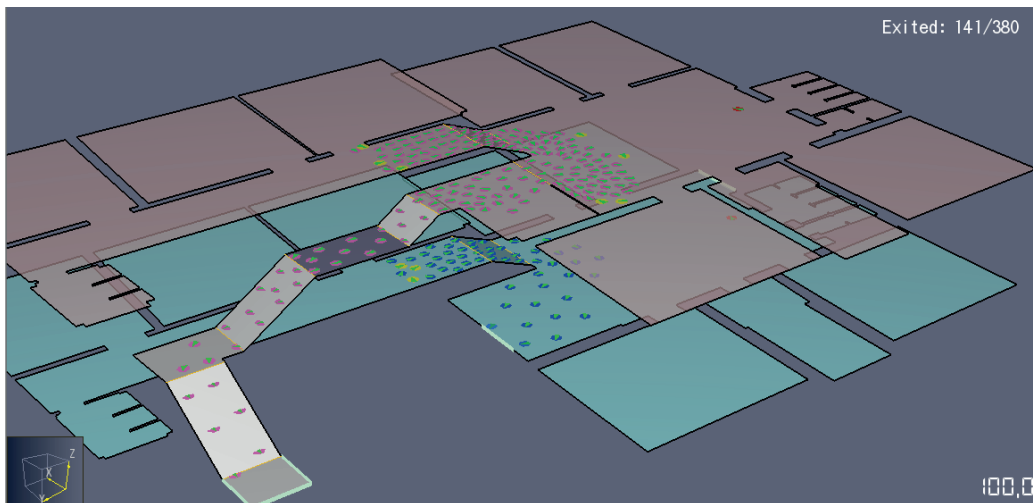


Figura 6.59 - Rappresentazione degli occupanti come dischi piani nella simulazione di esodo

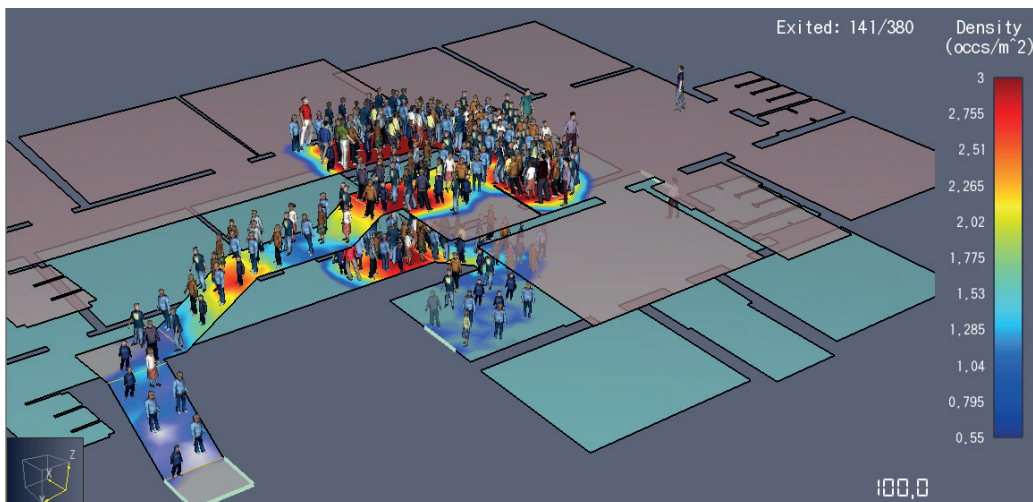


Figura 6.60 - Simulazione di esodo con individuazione delle zone ad alta densità

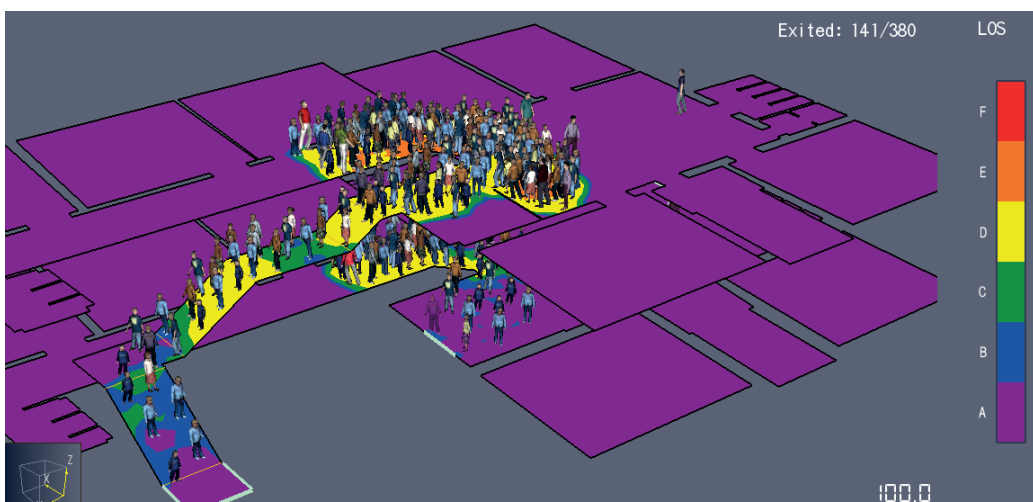


Figura 6.61 - Simulazione di esodo con individuazione del livello di servizio riferito alle code



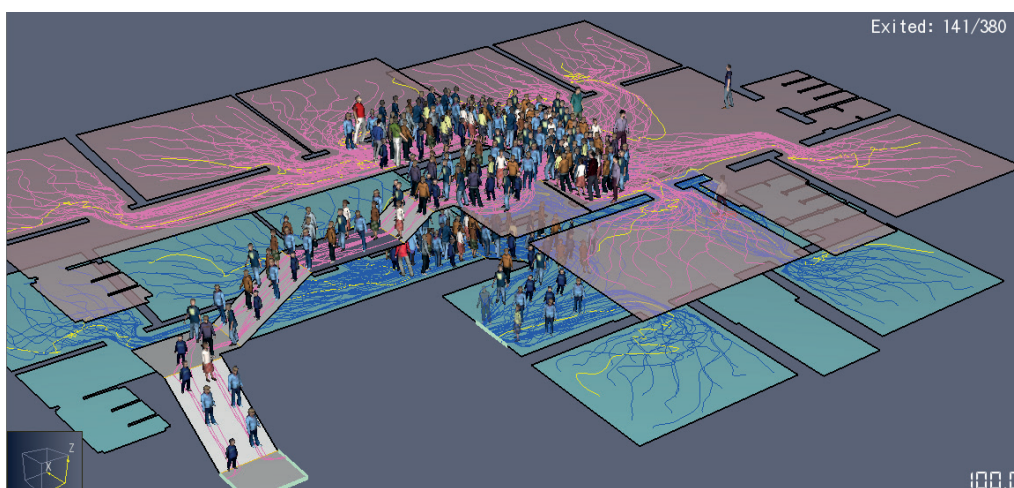


Figura 6.62 - Visualizzazione dei percorsi degli occupanti nella simulazione di esodo

Si può notare dalla *Figura 6.59*, come la rappresentazione degli occupanti mediante dischi piani sia utile a visualizzare nella pratica l'*effetto arco* teorizzato al *capitolo 4.3* del presente testo.

La simulazione con Pathfinder, per quanto riguarda i comportamenti degli occupanti, può essere effettuata impostando una delle due modalità di utilizzo del software, cioè *Steering Mode* e *SFPE Mode* (illustrate nel *capitolo 5.3* del presente testo), accessibili dal menù *Simulation Parameters*.

Nelle schermate riportate in tutte le *Figure* precedenti, si è utilizzata la *Steering Mode*, che è la modalità più affine al reale comportamento delle persone in situazioni di emergenza; ma la simulazione può essere effettuata anche in *SFPE Mode* (*Figura 6.63*).

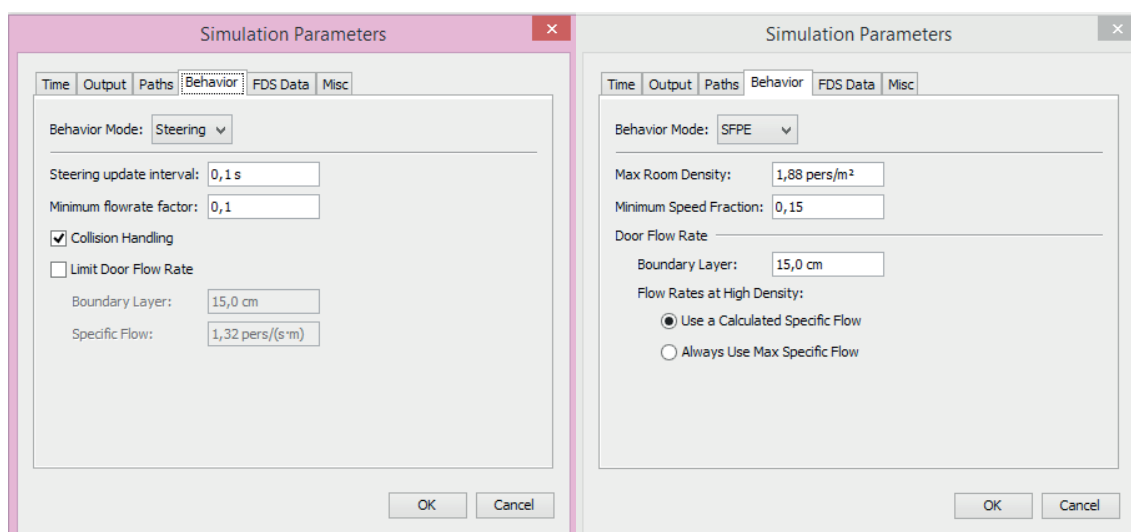


Figura 6.63 - Passaggio da *Steering Mode* a *SFPE Mode*

## 6. *Il caso studio*

Il risultato finale di Steering Mode, rispetto a quello di SFPE Mode, dipende maggiormente dalla prevenzione delle collisioni e dall'interazione degli occupanti e spesso fornisce risposte più simili ai dati sperimentali (per esempio, riporta spesso tempi di evacuazione più rapidi). Le code delle porte non sono esplicitamente usate anche se si formano naturalmente.

Steering Mode supporta le seguenti opzioni:

- **Steering update interval** – specifica la frequenza di aggiornamento dei tempi di guida, potrebbe anche essere considerato il tempo di risposta cognitiva di ogni occupante. Più alto è questo numero, più veloce sarà la simulazione, ma minore sarà la capacità decisionale di ogni occupante.
- **Minimum Flowrate factor** – viene utilizzato quando gli agenti decidono quali porte utilizzare quando ci sono code alle porte. Il fattore viene moltiplicato per la portata nominale della porta per determinare una portata minima osservata. Un fattore diverso da zero fa sì che una porta appaia sempre in movimento anche se non lo è. Questo aiuta ad evitare che gli occupanti possano passare da una porta ad un'altra quando le portate sono molto basse; tuttavia, può anche far sì che gli occupanti rimangano in coda nella stessa porta anche se non possono più fluire.
- **Collision Handling** – controlla se gli occupanti si evitano a vicenda e possono entrare in collisione tra loro.
- **Limit Door Flow Rate** – quando impostato, questo parametro impone una portata massima alle porte a meno che non siano esplicitamente spente. La portata per ogni porta viene calcolata in base allo strato limite ed al flusso specifico, analogamente a SFPE Mode. La differenza tra le due modalità è che Steering Mode non consente di basare le portate sulla densità delle stanze.

SFPE Mode, come precedentemente detto, utilizza l'insieme di ipotesi presentate in *Engineering Guide to Human Behavior in Fire* (SFPE, 2003) e può dare risposte estremamente simili ai calcoli manuali lì presentati, a seconda delle ipotesi selezionate. Nelle simulazioni SFPE, il meccanismo che controlla il movimento di simulazione è la coda davanti alla porta.

SFPE Mode supporta le seguenti opzioni:

- **Max Room Density** – controlla la densità alla quale le porte non ammettono più gli occupanti in una stanza. Più basso è il valore, più i tempi di evacuazione sono rapidi. L'utilizzo di valori alti (3.6-3.8 pers/m<sup>2</sup>) possono al contrario causare tempi di evacuazione lenti. Valori superiori a 3.8 pers/m<sup>2</sup>, possono causare l'arresto della simulazione a causa del calcolo della velocità dipendente dalla densità.
- **Door Flow Rate → Boundary Layer** – questo valore viene sottratto da entrambi i lati

di una porta per calcolare la larghezza effettiva di essa, controllando l'equazione della portata. Ad esempio, se in una porta di 1 metro di larghezza, si considerano 12 cm da ogni lato di larghezza inutilizzata, l'apertura si riduce a 70 cm e proporzionalmente il flusso si riduce a:  $F_s = 1,32 \text{ pers/s-m} \times 0,7 \text{ m} = 0,924 \text{ pers/s}$ .

- Door Flow Rate → Flow Rates at High Density – questo valore controlla come viene calcolato il flusso specifico per le porte. Il flusso specifico è una misura degli occupanti per unità di tempo per unità di larghezza effettiva. Per ogni porta, il flusso specifico viene moltiplicato per la larghezza effettiva della porta per calcolare la portata degli occupanti per unità di tempo. Il flusso specifico considerato può essere: calcolato in funzione della densità dell'ambiente circostante la porta; massimo, permettendo così di fluire attraverso la porta alla densità ottimale.
- Minimum Speed Fraction – questo valore può essere utilizzato per impostare un limite inferiore alla velocità dell'occupante. L'impostazione di questo valore troppo basso può causare un aumento significativo dei tempi di evacuazione in caso di elevato carico iniziale dei locali o se la densità massima del locale è impostata su valori molto elevati.

Effettuando la simulazione con Pathfinder in SFPE Mode, si verifica un leggero aumento dei tempi di esodo, da 242 secondi a 246. Si riscontrano inoltre differenze negli output finali, sia per quanto riguarda i grafici che indicano il numero degli occupanti in evacuazione (*Figura 6.64*) e la portata delle porte selezionate (*Figure 6.65, 6.66*), sia per quanto riguarda la visualizzazione 3D degli occupanti.

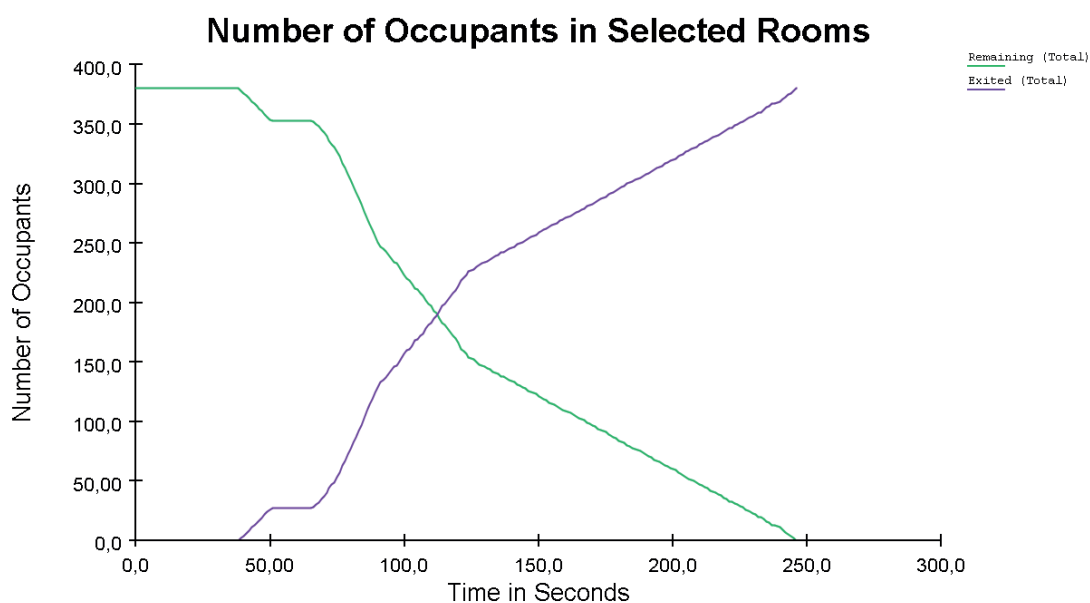


Figura 6.64 - Grafico che indica quanti occupanti sono già evacuati (linea viola) e quanti devono ancora evacuare (linea verde) in un dato tempo - SFPE Mode

6. Il caso studio

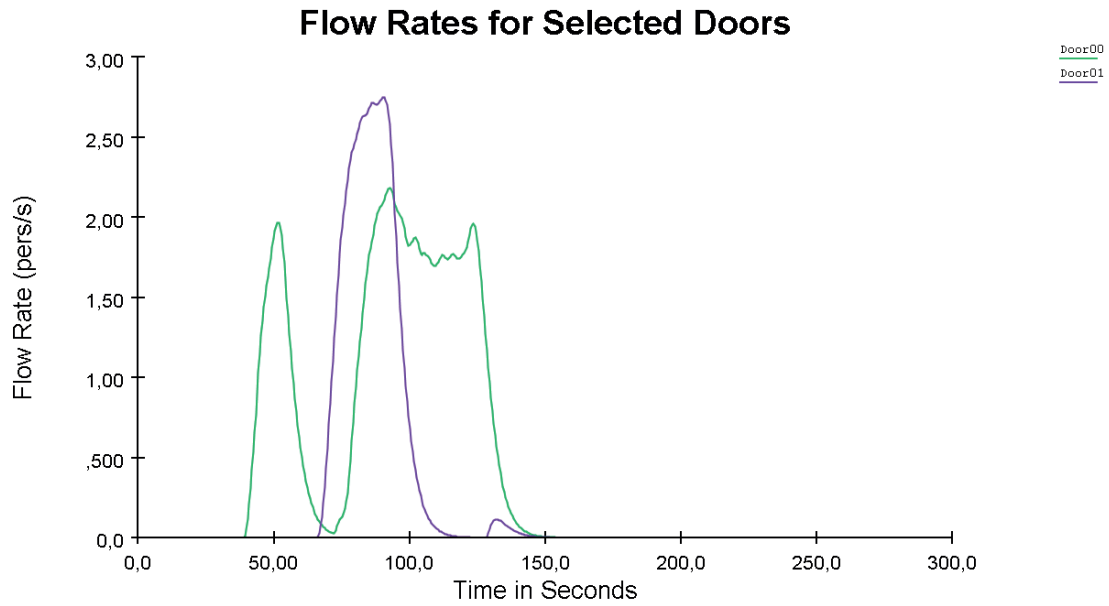


Figura 6.65 - Grafico che indica il flusso attraverso le porte di uscite del piano terra in un dato tempo (linea verde = porta principale; linea viola = porta secondaria) - SFPE Mode

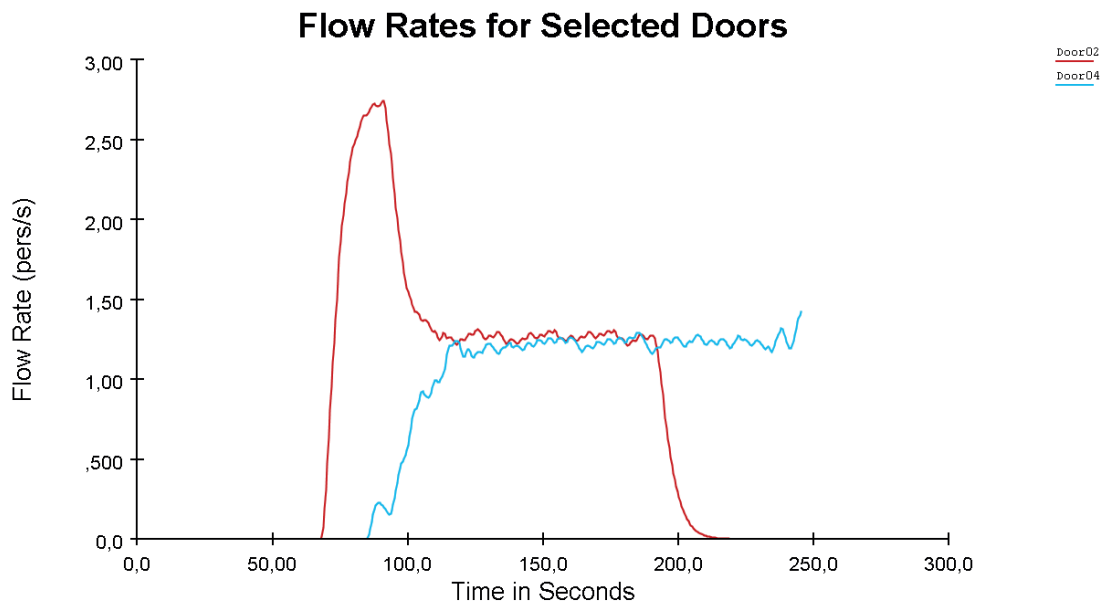


Figura 6.66 - Grafico che indica il flusso attraverso le porte di uscite del primo piano in un dato tempo (linea rossa = porta di accesso alla scala; linea azzurra = ultimo gradino verso l'esterno) - SFPE Mode

Questa modalità infatti non impedisce agli occupanti di sovrapporsi qualora si formino delle code in prossimità delle uscite (Figura 6.67). Anche i percorsi seguiti da essi nel loro moto di esodo variano, risultano infatti più geometrici e meno realistici, essendo calcolati col metodo del filo teso, come teorizzato in SFPE Handbook (Figura 6.68).

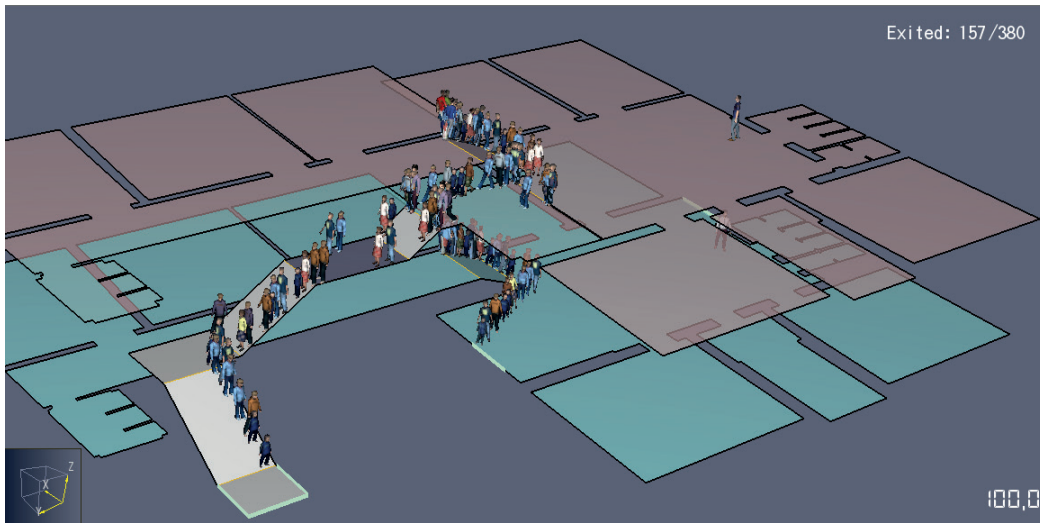


Figura 6.67 - Simulazione di esodo in SFPE Mode - sovrapposizione degli occupanti in coda

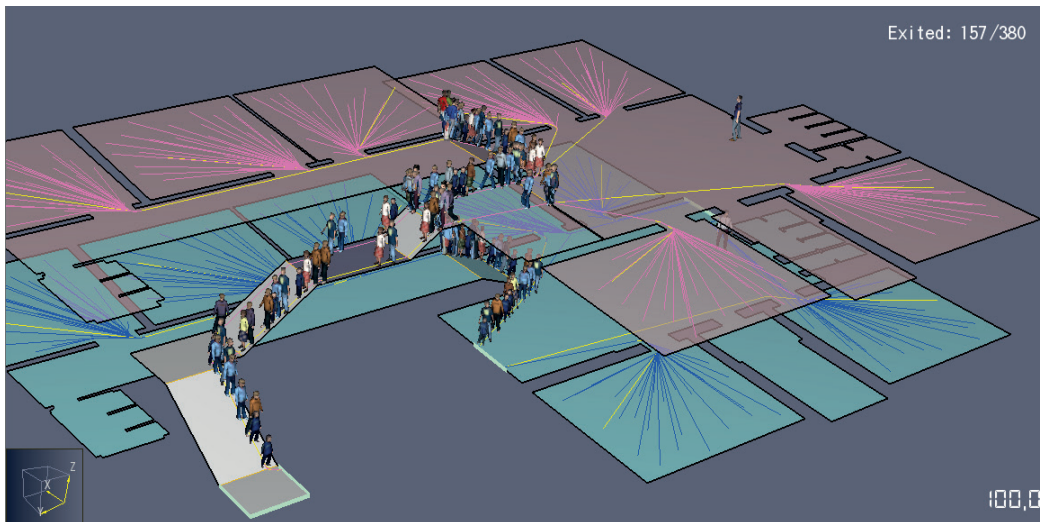


Figura 6.68 - Simulazione di esodo in SFPE Mode - rappresentazione dei percorsi mediante il filo teso

Per la verifica del criterio  $ASET > RSET$ , si considera il valore più alto ottenuto tra le due modalità di utilizzo del software per  $\Delta t_{tra}$ , ulteriormente approssimato per eccesso a 250 secondi a favore di sicurezza (capitolo 6.4).

## 6.7 Modellazione dell'esodo con CPI win® FSE - EVAC

L'utilizzabilità di molti degli attuali modelli di evacuazione è limitata perché non tengono conto delle proprietà individuali e dei processi decisionali degli esseri umani, della dinamica delle grandi folle e dell'interazione tra fuoco e persone.

CPI win® FSE - EVAC è un modello di evacuazione integrato nel Fire Dynamic Simulator 2, 3 (FDS). FDS+Evac segue ogni persona con un'equazione di movimento. Questo approccio permette ad ogni persona di avere le proprie proprietà personali e strategie di fuga, cioè le persone sono trattate come agenti autonomi. In FDS+Evac si ha un accesso diretto e facile a tutte le proprietà relative al fuoco, come la temperatura del gas, la densità dei fumi e dei gas e i livelli di radiazione in ogni punto della griglia di calcolo. Queste quantità possono essere utilizzate per modellare il comportamento di evacuazione delle persone.

CPI win® FSE - EVAC a partire da una griglia corrispondente al solaio di riferimento, consente di determinare quali sono le pareti e più in generale gli ostacoli che direzionano il percorso di esodo degli occupanti.

Attraverso il comando *Gestione Livelli*, è possibile premettere le quote dei piani dell'edificio in esame. Per ogni piano, corrispondente ad un diverso livello, è possibile aggiungere una piantina sia come file CAD (in metri), sia come immagine. Attraverso le proprietà del livello, si può attivare la funzione *Abilita snap delle piantine*, così da riuscire a disegnare pareti, rampe, porte ed ogni altro oggetto in modo facilitato a partire dai punti notevoli del disegno CAD preesistente (Figura 6.69).

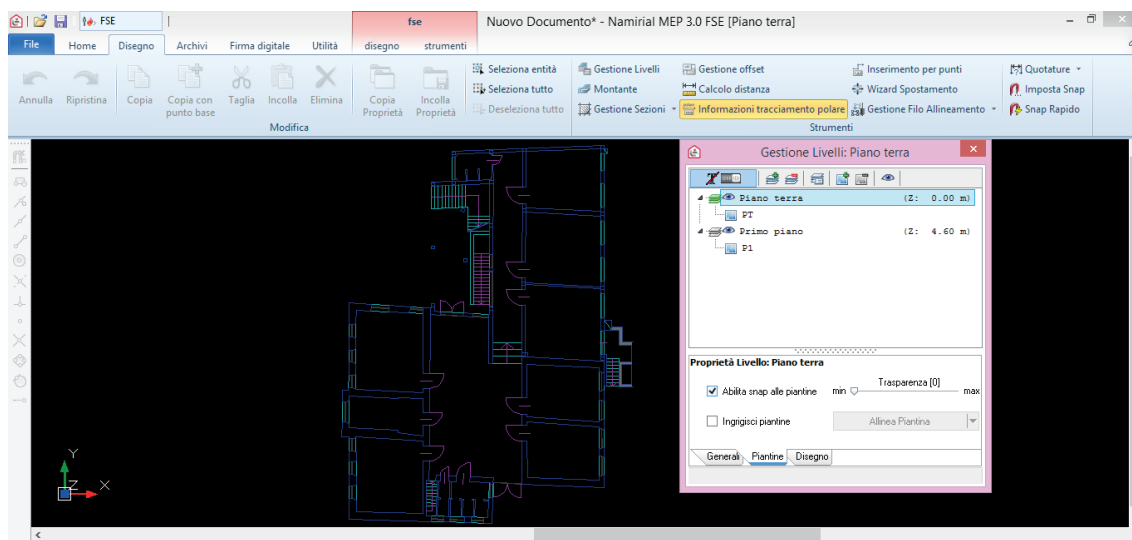


Figura 6.69 - Importazione delle planimetrie e suddivisione dei piani in livelli

Per ogni livello, è necessario inserire una griglia, sulla quale gli occupanti si muoveranno (Figura 6.70). Determinata la griglia, attraverso il comando *Pareti*, si disegnano le pareti dell'edificio, preimpostandone lo spessore (Figura 6.71). Nel caso in esame, lo schema dell'edificio è stato semplificato per praticità.

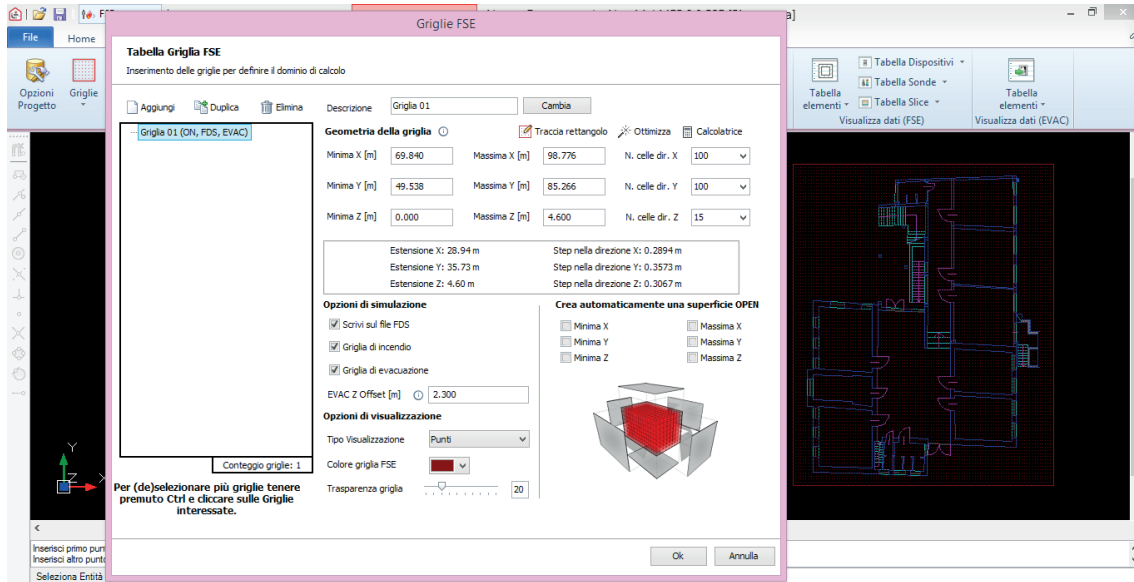


Figura 6.70 - Predisposizione della griglia di base

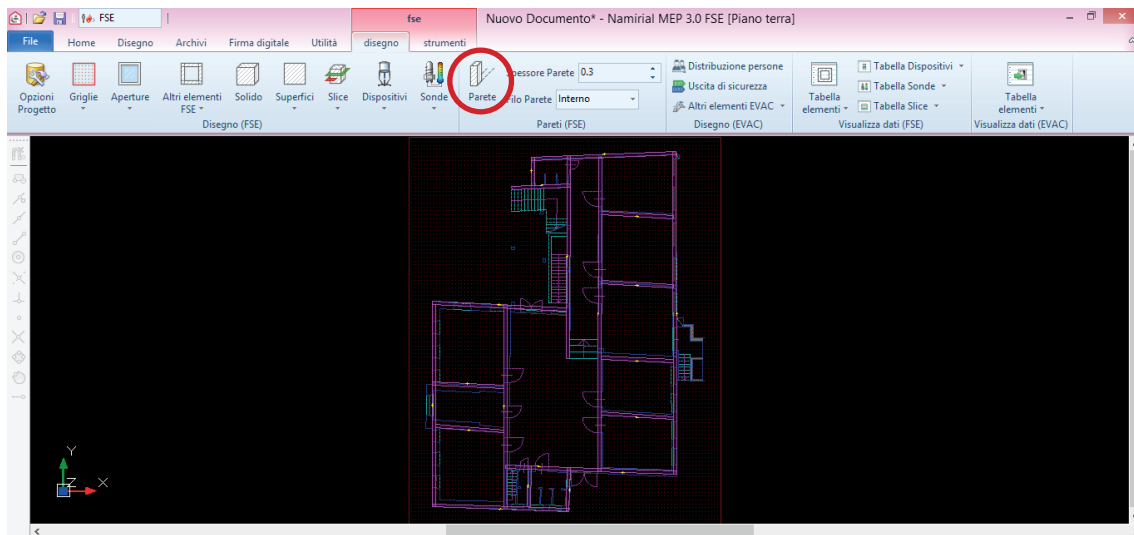


Figura 6.71 - Schema semplificato delle pareti dell'edificio in esame

Per creare porte sulle pareti disegnate, in modo che le stanze siano collegate e gli occupanti possano prendere decisioni su dove andare, si utilizza il comando *Aperture - porta*. Una volta disegnata una porta, se ne possono impostare le proprietà (Figura 6.72).

## 6. Il caso studio

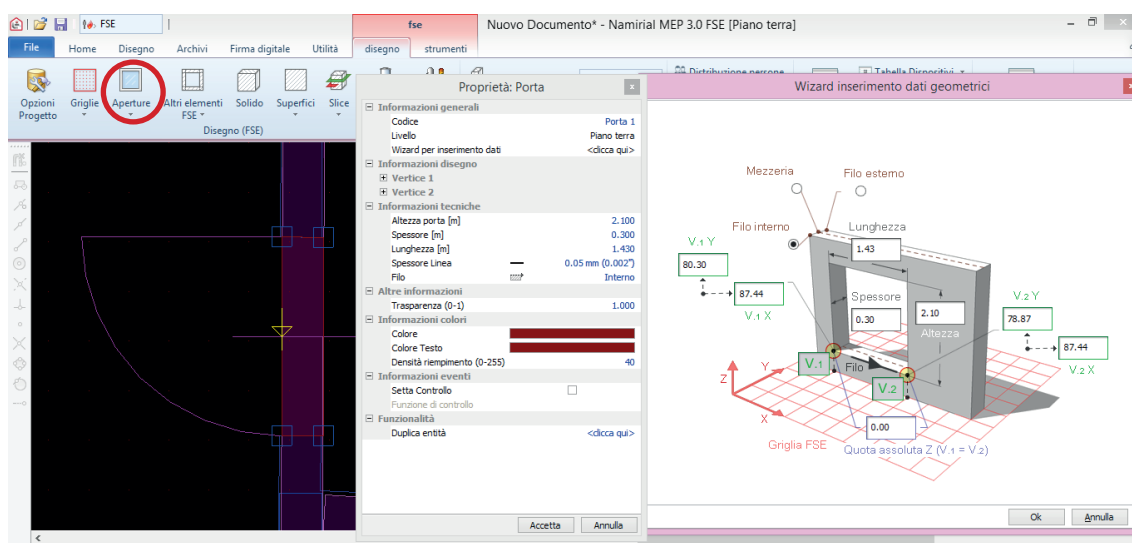


Figura 6.72 - Definizione di una porta che separa due ambienti, e delle sue proprietà

Il software prevede inoltre una distinzione tra porte che separano le stanze e porte di uscita di sicurezza (Figura 6.73), uscite dalle quali gli occupanti nella simulazione spariscono trovandosi ormai in salvo.

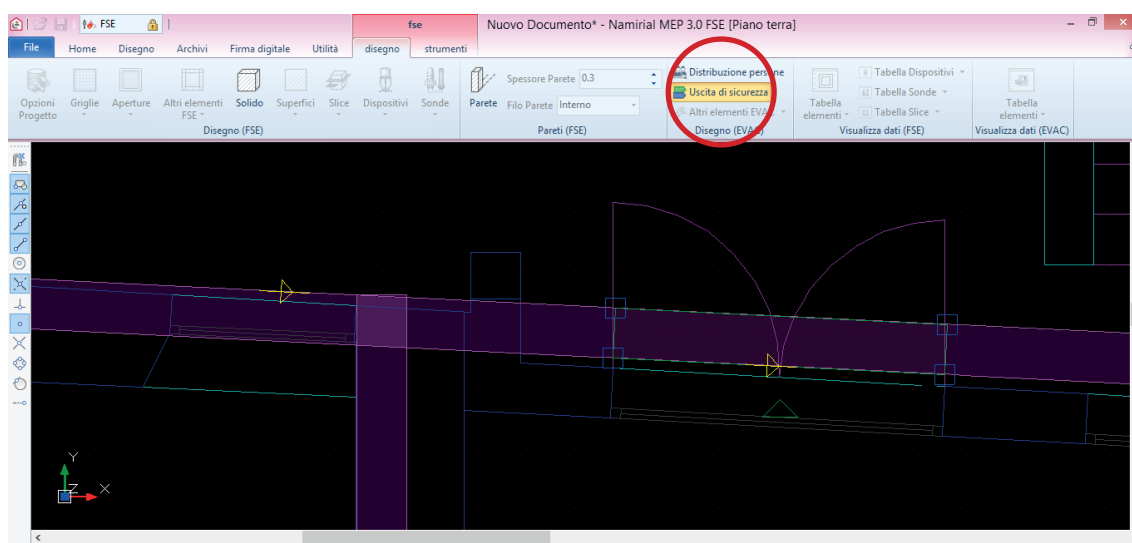


Figura 6.73 - Inserimento di un'uscita di sicurezza

Nel caso in esame, sia al piano terra che al primo piano è presente un dislivello. Questo può essere creato realizzando una griglia corrispondente alla porzione sopraelevata, impostandone la quota Z ed inserendo tra le due griglie una rampa, di cui si possono determinare le proprietà (tra cui la quota di partenza e quella di arrivo), come mostrato in Figura 6.74.



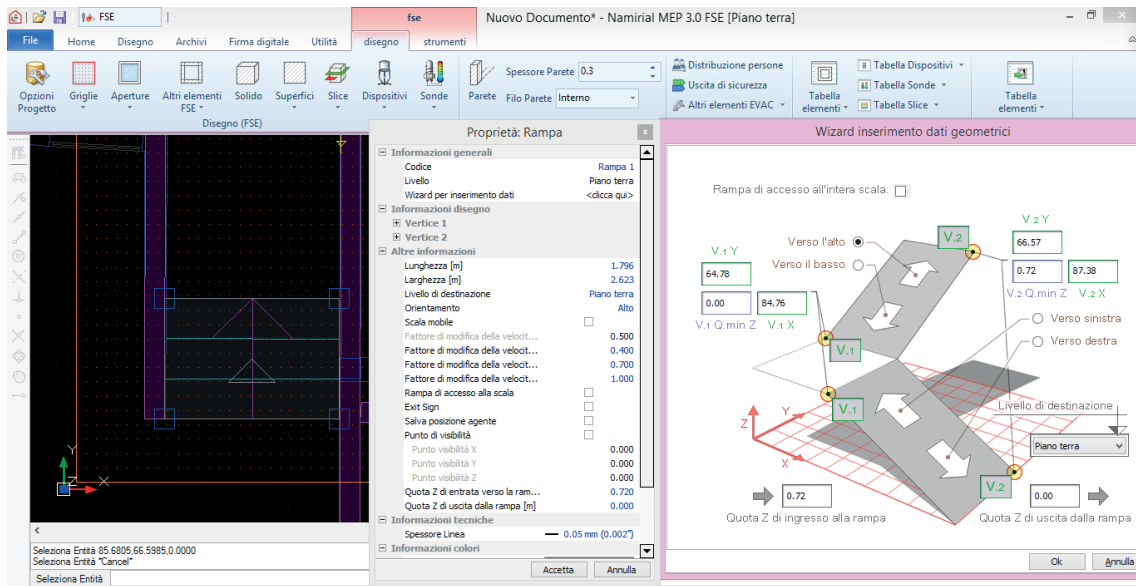


Figura 6.74 - Definizione di una rampa e delle sue proprietà

Per ogni elemento disegnato, si può aprire la relativa *Tabella elementi*. In Figura 6.75 è riportata una parte della tabella relativa alle pareti, elencate e suddivise in base al piano di appartenenza. Attraverso questa tabella è possibile definire alcune proprietà, come per esempio: quota di partenza, altezza, spessore, materiale di ogni superficie, se permette la presenza di porte, se deve essere considerata nella simulazione di evacuazione, se la si vuol vedere in trasparenza nella vista Smokeview (output), ecc..

Dati pareti																					
	Codice	V1 X [m]	V1 Y [m]	V2 X [m]	V2 Y [m]	Quota min Z [m]	Spessore	Filo	Tipo Superficie	Mat Sup Singola	Mat Sup Min X	Mat Sup Max X	Mat Sup Min Y	Mat Sup Max Y	Mat Sup Min Z	Mat Sup Max Z	Altezza [m]	Seta Controllo	Controllo	Permette Buchi	Ev
Livello: 1° Livello																					
Parete 1	81.49	80.50	81.49	83.53	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 10	84.69	54.51	79.13	54.72	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 11	87.69	64.81	94.23	64.50	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 12	87.71	71.73	94.26	71.95	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 13	81.19	83.23	84.33	83.69	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 14	84.52	83.59	84.46	64.78	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 15	87.73	78.14	84.33	77.75	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 16	80.99	54.35	80.89	51.05	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 17	72.36	58.33	78.85	57.87	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 18	72.06	68.78	84.48	69.20	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 2	87.68	58.60	94.20	59.18	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 20	78.92	68.46	78.80	51.00	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 21	87.45	83.75	87.36	54.11	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 22	72.33	62.13	78.87	61.85	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 23	71.75	58.31	71.76	62.44	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 24	94.32	83.99	94.18	53.85	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 3	71.45	62.14	72.33	62.13	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 4	84.59	54.53	84.33	50.65	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 49	84.83	80.94	79.39	80.74	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 5	72.06	58.61	71.75	58.61	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 6	72.36	51.03	72.36	58.61	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 7	84.34	50.95	72.07	51.33	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 8	72.33	62.43	72.36	69.78	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 9	84.68	54.21	94.48	53.85	0.00	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Livello: 2° Livello																					
Parete 25	84.76	64.98	84.82	83.59	4.68	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 26	87.73	78.14	84.28	77.75	4.68	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 27	81.18	83.53	81.19	80.50	4.68	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 28	87.68	58.60	94.20	59.18	4.68	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 29	72.06	68.78	72.03	62.43	4.68	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 30	71.45	62.14	78.87	61.85	4.68	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 31	81.19	83.23	84.61	83.70	4.68	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Parete 32	72.06	68.78	72.06	61.85	4.68	0.30	Interno	Singola	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	INERTE	4.68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Figura 6.75 - Tabella di definizione delle pareti in cui vengono riepilogate e confrontate tutte le proprietà

## 6. Il caso studio

A questo punto mediante il comando *Distribuzione persone*, si seleziona un'area e vi si indica quante persone e di che tipo, tra quelli predeterminati, sono presenti (Figura 6.76). Per ogni tipologia di occupante, attraverso l'archivio EVAC, è possibile visualizzare i parametri predefiniti dal software, cambiarli ed eventualmente creare nuovi profili (Figure 6.77, 6.78).

Nel caso in esame sono stati utilizzati i profili predefiniti per Adulti (docenti e personale di servizio) e Bambini (alunni), e per entrambi si è scelto di lasciare i valori dei parametri predeterminati nell'archivio. Dalle Figure 6.77 e 6.78, si può notare come tra i parametri, in particolare, sia possibile modificare il comportamento degli agenti. Le possibilità sono:

- Se non ha una porta visibile/conosciuta segue gli utenti che hanno trovato una porta;
- Mantiene la prima scelta (se non ha una porta visibile/conosciuta segue gli altri agenti);
- Si blocca se non trova/vede una porta, segue gli altri agenti se questi conoscono una porta;
- Si blocca se non trova/vede la prima porta scelta, segue gli altri se abbastanza vicino.

Il software prevede di default la prima opzione di comportamento, che è quella che lascia gli occupanti più liberi nella scelta della via di esodo, in quanto non prefissa loro di scegliere per forza la via più familiare, nè di fermarsi qualora non sappiano dove andare. Verosimilmente infatti in una situazione di emergenza, gli occupanti tendono a seguire la folla, anche se non sono loro stessi a vedere l'uscita di sicurezza.

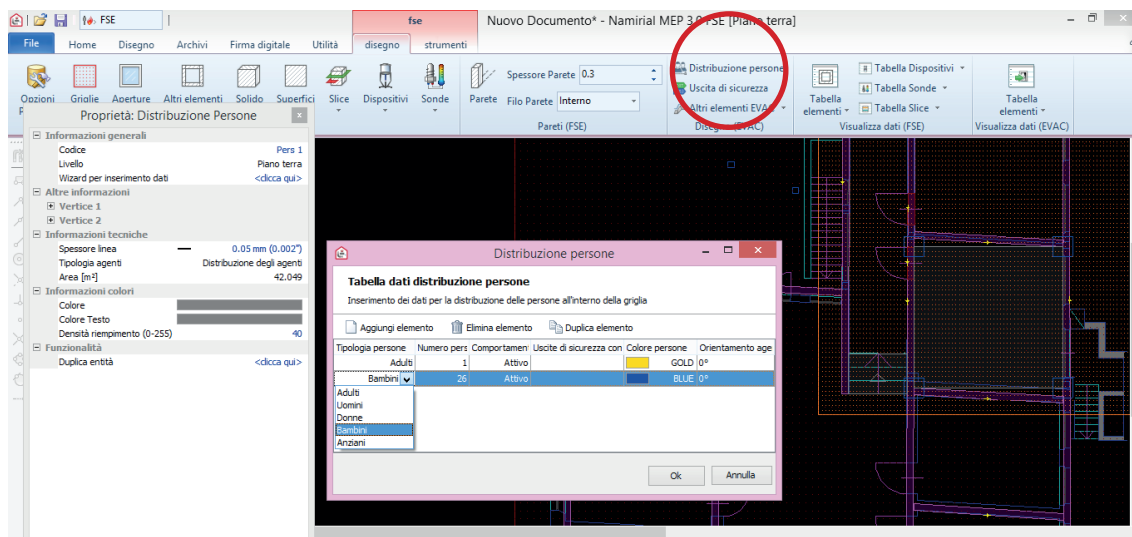


Figura 6.76 - Introduzione degli occupanti negli ambienti e definizione dei loro profili

**Agente | Adulti**

Tipo di Persona (Default) **Adulti** Fonte di provenienza

Comportamento agente **Se non ha una porta visibile/conosciuta segue gli altri agenti che hanno trovato una porta**

**Parametri di Pre-Evacuazione**  
 Distribuzione **Costante**  
 Valore X  X Min  X Max   
 a   $\beta$  ( $\mu$ )

**Parametri di dimensioni corporee**  
 Distribuzione **Uniforme**  
 Valore X  X Min  X Max   
 a   $\beta$  ( $\mu$ )

**Parametri di tempo di rilevazione**  
 Distribuzione **Costante**  
 Valore X  X Min  X Max   
 a   $\beta$  ( $\mu$ )

**Parametri della velocità**  
 Distribuzione **Uniforme**  
 Valore X  X Min  X Max   
 a   $\beta$  ( $\mu$ )

**Parametri di tempo di rilassamento**  
 Distribuzione **Uniforme**  
 Valore X  X Min  X Max   
 a   $\beta$  ( $\mu$ )

Parametro Forza Sociale Ai   
 Parametro Forza Sociale Bi   
 Parametro Forza Sociale  $\lambda$    
 Parametro Forza di Contatto Ki   
 Parametro Forza di Contatto ki   
 Diametro del Dorso [m]   
 Diametro della spalla [m]   
 Tempo di Rilassamento [s]   
 Momento di Inerzia   
 Massimo numero di agenti in una maglia di evac

Scrivi FED in file output  
 Scrivi velocità evacuazione in file output  
 Scrivi Forze di Contatto in file output  
 Scrivi Forze Totali (Contatto + Social) in file output

Utilizza colori standard in Smokeview

Colore Persona   
 Colore Persona deceduta

Fattore di modifica della velocità di un agente in salita su un piano inclinato (scala)   
 Fattore di modifica della velocità di un agente in discesa su un piano inclinato (scala)   
 Fattore di modifica della velocità di un agente in piano su un piano inclinato (pianerottolo)

Figura 6.77 - Proprietà di default del profilo: Adulti

**Agente | Bambini**

Tipo di Persona (Default) **Bambini** Fonte di provenienza

Comportamento agente **Se non ha una porta visibile/conosciuta segue gli altri agenti che hanno trovato una porta**

**Parametri di Pre-Evacuazione**  
 Distribuzione **Costante**  
 Valore X  X Min  X Max   
 a   $\beta$  ( $\mu$ )

**Parametri di dimensioni corporee**  
 Distribuzione **Uniforme**  
 Valore X  X Min  X Max   
 a   $\beta$  ( $\mu$ )

**Parametri di tempo di rilevazione**  
 Distribuzione **Costante**  
 Valore X  X Min  X Max   
 a   $\beta$  ( $\mu$ )

**Parametri della velocità**  
 Distribuzione **Uniforme**  
 Valore X  X Min  X Max   
 a   $\beta$  ( $\mu$ )

**Parametri di tempo di rilassamento**  
 Distribuzione **Uniforme**  
 Valore X  X Min  X Max   
 a   $\beta$  ( $\mu$ )

Parametro Forza Sociale Ai   
 Parametro Forza Sociale Bi   
 Parametro Forza Sociale  $\lambda$    
 Parametro Forza di Contatto Ki   
 Parametro Forza di Contatto ki   
 Diametro del Dorso [m]   
 Diametro della spalla [m]   
 Tempo di Rilassamento [s]   
 Momento di Inerzia   
 Massimo numero di agenti in una maglia di evac

Scrivi FED in file output  
 Scrivi velocità evacuazione in file output  
 Scrivi Forze di Contatto in file output  
 Scrivi Forze Totali (Contatto + Social) in file output

Utilizza colori standard in Smokeview

Colore Persona   
 Colore Persona deceduta

Fattore di modifica della velocità di un agente in salita su un piano inclinato (scala)   
 Fattore di modifica della velocità di un agente in discesa su un piano inclinato (scala)   
 Fattore di modifica della velocità di un agente in piano su un piano inclinato (pianerottolo)

Figura 6.78 - Proprietà di default del profilo: Bambini

6. Il caso studio

A questo punto si può procedere lanciando il calcolo EVAC attraverso il rispettivo comando, nella sezione strumenti del software (Figura 6.79). In questa sezione è possibile lanciare anche il calcolo FDS o FDS+EVAC e visualizzare i rispettivi risultati.

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe

New XB:      76.7492      79.4937      80.3041      80.3041      4.6800      5.6800
WARNING: Exit Exit 7 XB adjusted to mesh Griglia 2
Old XB:      76.8770      76.8770      78.2120      80.7330      0.0000      1.0000
New XB:      76.7492      76.7492      78.3129      80.7023      0.0000      1.0000
WARNING: Door DOOR_Rampa 3 XB adjusted to mesh Griglia 1
Old XB:      82.5060      84.4930      70.0160      70.0160      4.6800      7.0200
New XB:      82.5431      84.3727      69.9501      69.9501      4.6800      7.0200
WARNING: Entr ENTR_Rampa 3 XB adjusted to mesh Griglia 2
Old XB:      82.5060      84.4930      70.4140      70.4140      0.0000      1.0000
New XB:      82.5431      84.3727      70.3483      70.3483      0.0000      1.0000

OpenMP thread 0 of 1 assigned to MPI process 0 of 0
OpenMP thread 1 of 1 assigned to MPI process 0 of 0
Completed Initialization Step 1
Completed Initialization Step 2
Completed Initialization Step 3
Completed Initialization Step 4

Fire Dynamics Simulator

Current Date      : September 26, 2018  15:09:40
Version          : FDS 6.4.0
Revision         : Git-r10-48-g5996289
Revision Date    : Thu Apr 7 11:24:39 2016 -0400
Compilation Date : Thu 04/07/2016  11:28 AM

MPI Enabled; Number of MPI Processes: 1
OpenMP Enabled; Number of OpenMP Threads: 2

MPI version: 3.0
MPI library version: Intel(R) MPI Library 5.1.3 for Windows* OS

Job TITLE       : scuola.fds creato con applicativo Namirial MEP 3.0.33 per FD
$ versione 6
Job ID string   : scuola

Time Step: -249, Evacuation Initialization Time: -2.490 s
Time Step: -199, Evacuation Initialization Time: -1.990 s
Time Step: -149, Evacuation Initialization Time: -1.490 s
Time Step: -99, Evacuation Initialization Time: -0.990 s
Time Step: -49, Evacuation Initialization Time: -0.490 s
Time Step: 1, Simulation Time: 0.05 s
Time Step: 2, Simulation Time: 0.10 s
Time Step: 3, Simulation Time: 0.15 s
Time Step: 4, Simulation Time: 0.20 s
Time Step: 5, Simulation Time: 0.25 s
Time Step: 6, Simulation Time: 0.30 s
Time Step: 7, Simulation Time: 0.35 s
Time Step: 8, Simulation Time: 0.40 s
  
```

Figura 6.79 - Calcolo EVAC - Processing

I risultati derivanti dal calcolo EVAC sono: la visualizzazione Smokeview dell'eso- do e i grafici cartesiani che indicano l'andamento dell'evacuazione degli occupanti nel tempo (in generale, suddivisi per uscite di sicurezza o per griglie cioè piani) - *Figure 6.80, 6.81, 6.82*. Questi grafici possono essere visualizzati come linee o aree in modo piano o tridimensionale. Con CPI win® FSE - EVAC è inoltre possibile produrre automaticamente una relazione tecnica, con immagini, grafici ed informazioni derivanti dai calcoli eseguiti dal software.

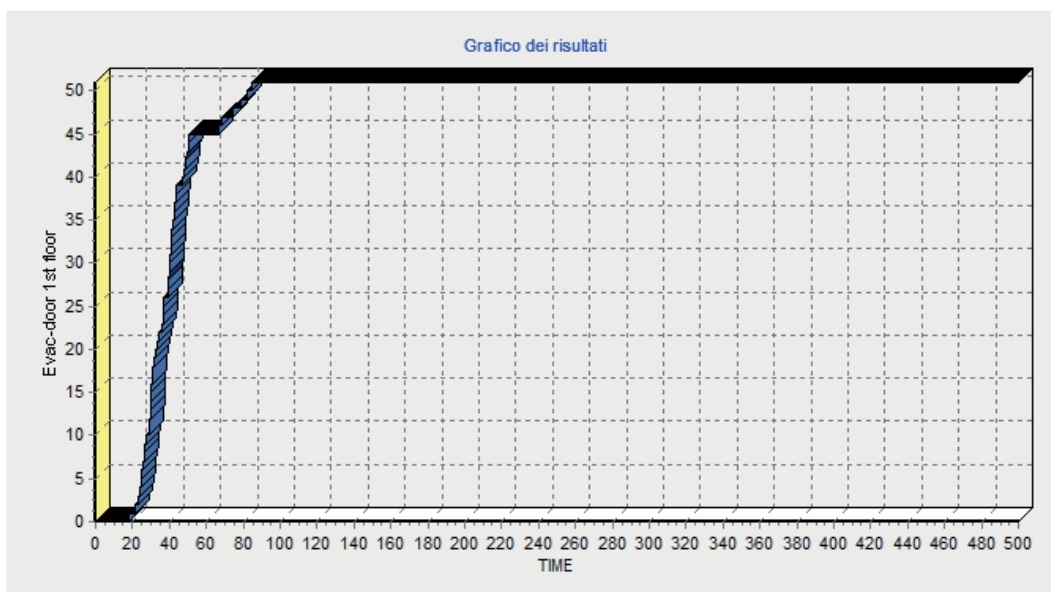


Figura 6.80 - Grafico che indica il numero di occupanti che utilizzano l'uscita principale del piano terra nel tempo

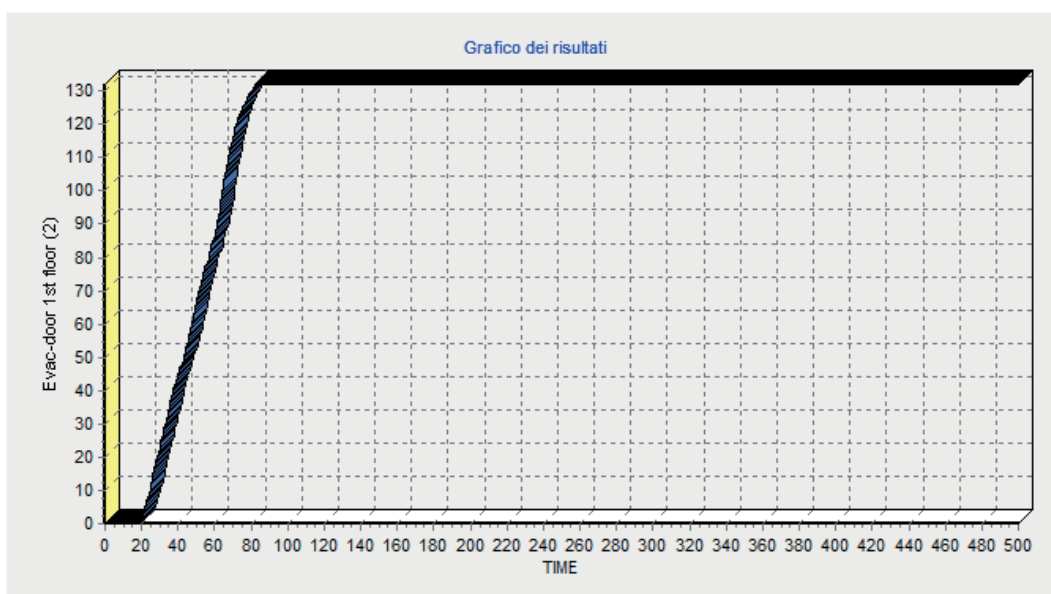


Figura 6.81 - Grafico che indica il numero di occupanti che utilizzano l'uscita secondaria del piano terra nel tempo

La vista Smokeview è l'output fondamentale che costituisce la simulazione vera e propria e permette di analizzare attentamente l'esodo degli occupanti.

## 6. Il caso studio

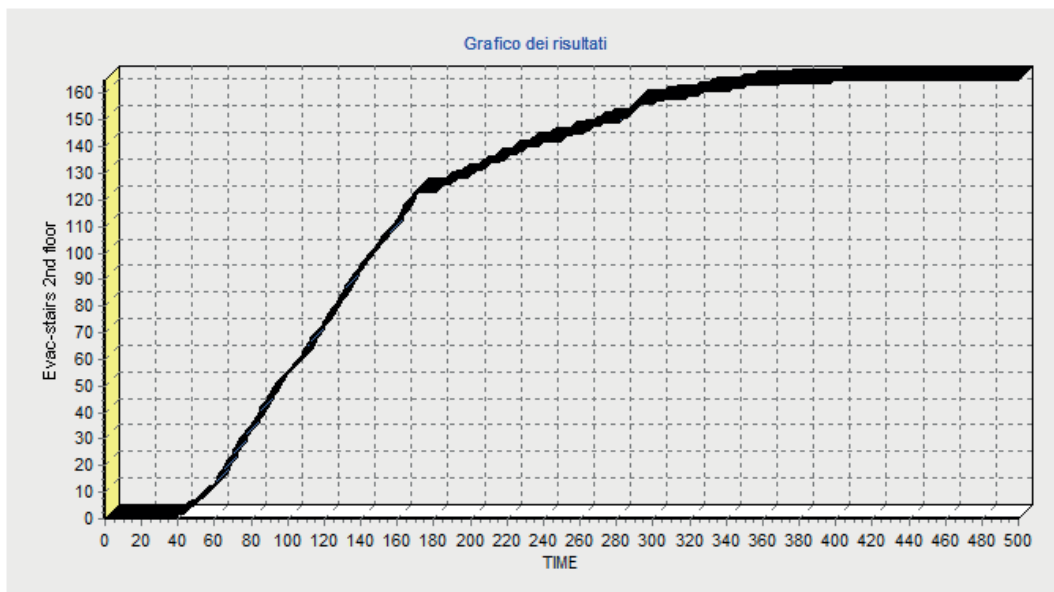


Figura 6.82 - Grafico che indica il numero di occupanti del I piano che evacuano attraverso la scala

Prima di avviare il calcolo EVAC erano stati impostati i parametri in *Figura 6.83*, tra cui risultano fondamentali il tempo di avvio del calcolo (qui 0 secondi) e il tempo di fine calcolo (qui impostato a 500 secondi). Da notare che il tempo di fine calcolo non corrisponde al tempo di fine esodo, è stato quindi impostato un valore alto in modo che il tempo di esodo vi sia compreso.

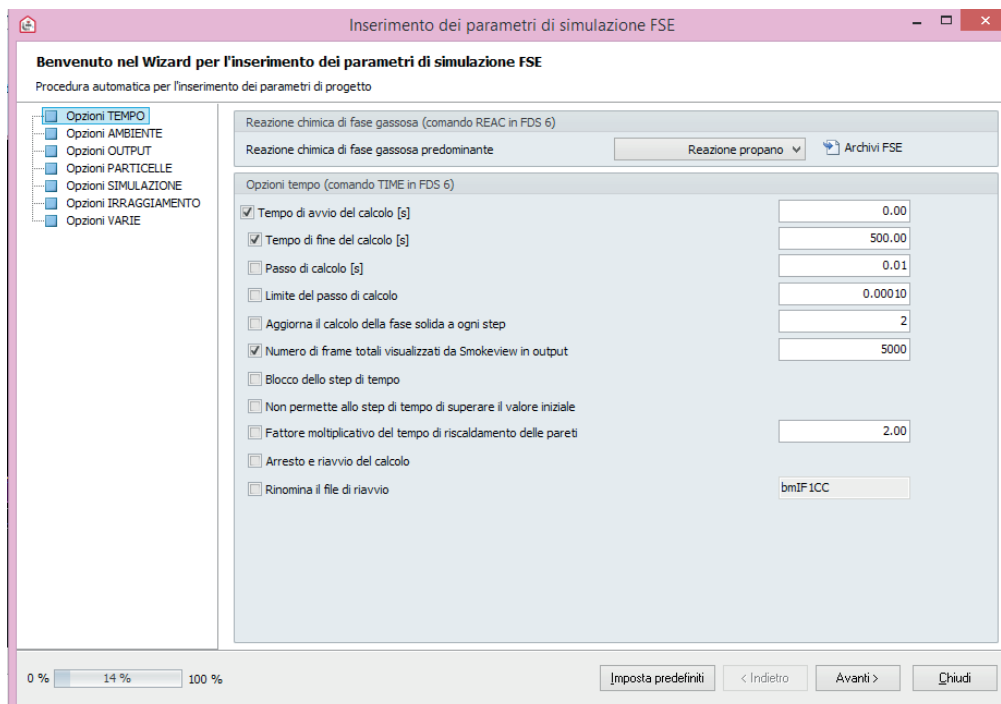


Figura 6.83 - Impostazione dei parametri di simulazione FSE, tra cui il tempo di calcolo

Non appena aperta la vista Smokeview, si procede caricando i profili degli occupanti inseriti (o tutti o per griglie, cioè piani). Il software non consente una visualizzazione realistica degli occupanti, ma solo una visualizzazione standard (Figura 6.84), come ellissoidi o come dischi piani (Figura 6.85). È però possibile, visualizzare i percorsi degli occupanti durante il loro moto di evacuazione (Figura 6.86).

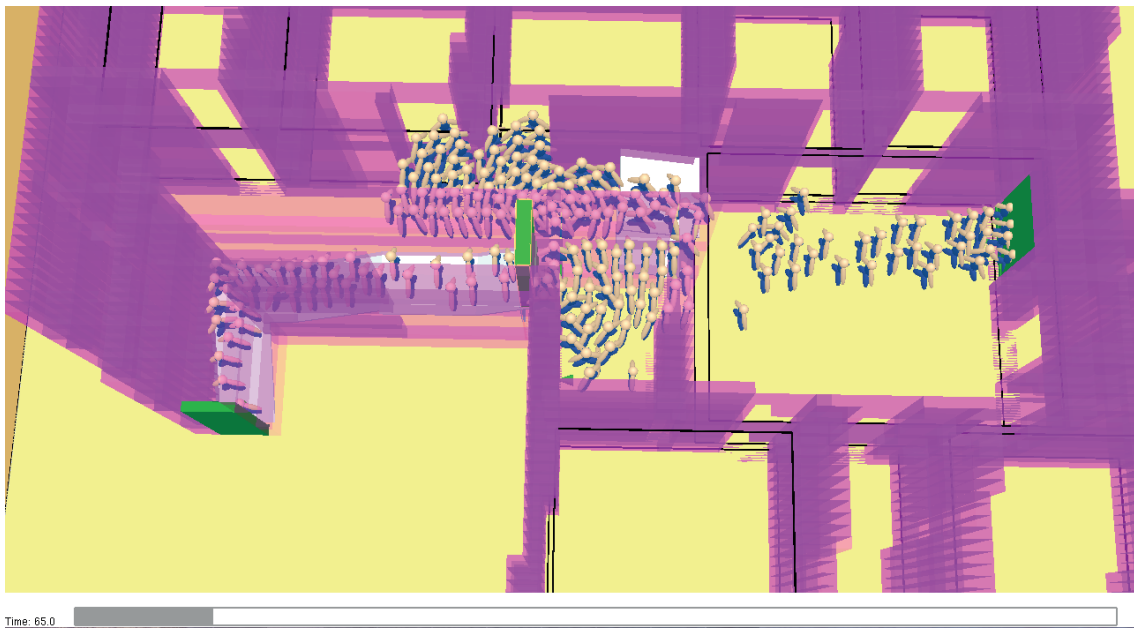


Figura 6.84 - Rappresentazione standard degli occupanti nella simulazione di esodo

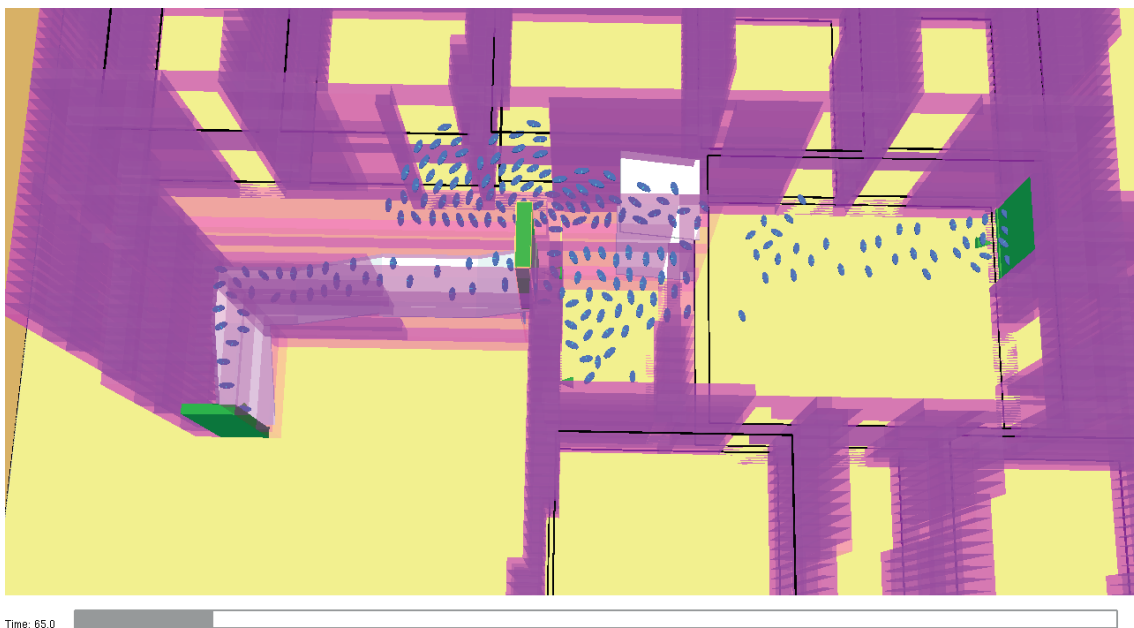


Figura 6.85 - Rappresentazione degli occupanti come dischi piani nella simulazione di esodo

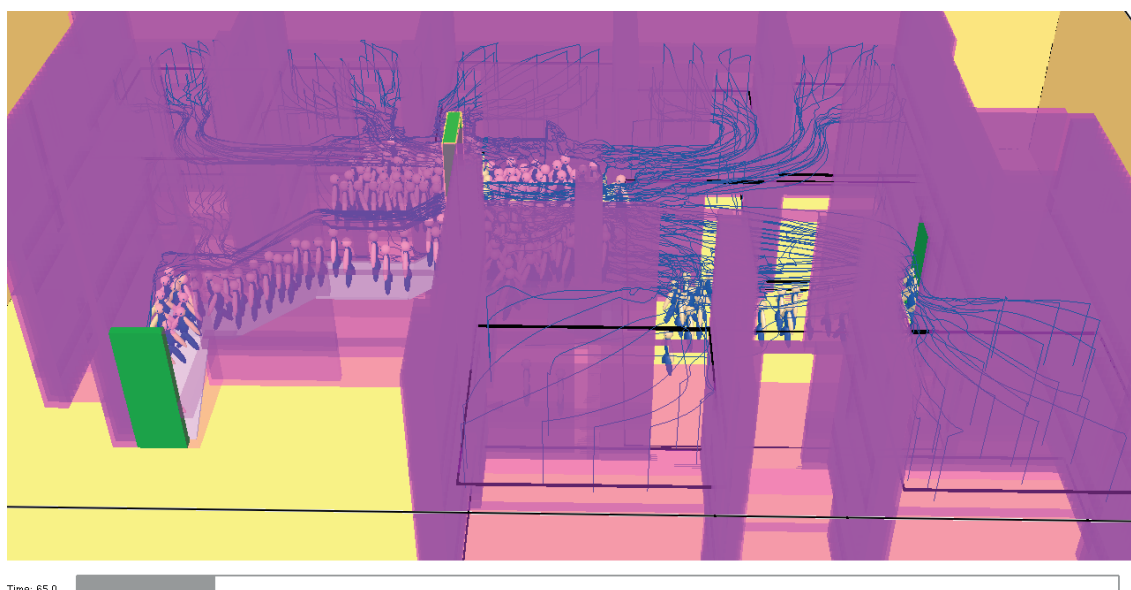


Figura 6.86 - Visualizzazione dei percorsi degli occupanti nella simulazione di esodo

Nella visualizzazione standard, dall'alto, si nota come gli occupanti siano concepiti come aventi forma ellittica approssimata da una combinazione di tre cerchi: busto e spalle. Infatti con ogni rappresentazione degli occupanti prevista dal software, è possibile visualizzare l'*effetto arco* precedentemente teorizzato.

Dalla simulazione è risultato che il tempo totale di esodo è pari a: 450 secondi. In particolare gli occupanti del piano terra completano l'esodo in circa 80 secondi, mentre la maggior parte del tempo viene impiegato dagli occupanti del primo piano che hanno a disposizione un'unica scala per evacuare l'edificio.

Inserendo quindi questo valore al posto di  $\Delta t_{tra}$  nella formula di RSET, si ottiene:

$$RSET = 60 \text{ sec} + 0 \text{ sec} + 180 \text{ sec} + 460 \text{ sec} = 700 \text{ sec} \sim 12 \text{ min}$$

$$ASET (1000 \text{ sec}) > RSET (700 \text{ sec}) \quad \text{VERIFICATO}$$

ma  $\Delta t_{marg} = 300 \text{ secondi} = 42,9\% < 100\%$  imposto dal DM 03/08/2015 (RTO).

La simulazione di esodo con CPI win® FSE - EVAC, a differenza di quella con Pathfinder, fornisce risultati sfavorevoli all'applicazione della soluzione alternativa del Nuovo Codice di Prevenzione Incendi. È stata quindi effettuata una **seconda simulazione**, inserendo la scala di emergenza esterna, al fine di validare la soluzione conforme.

Da questa simulazione è risultato un tempo di esodo pari a 240 secondi [\*], e si può notare come, in base al comportamento assegnatogli, gli occupanti del primo piano scelgano come via di esodo preferenziale la scala esterna di sicurezza piuttosto che la scala preesistente (Figura 6.87 e 6.88).



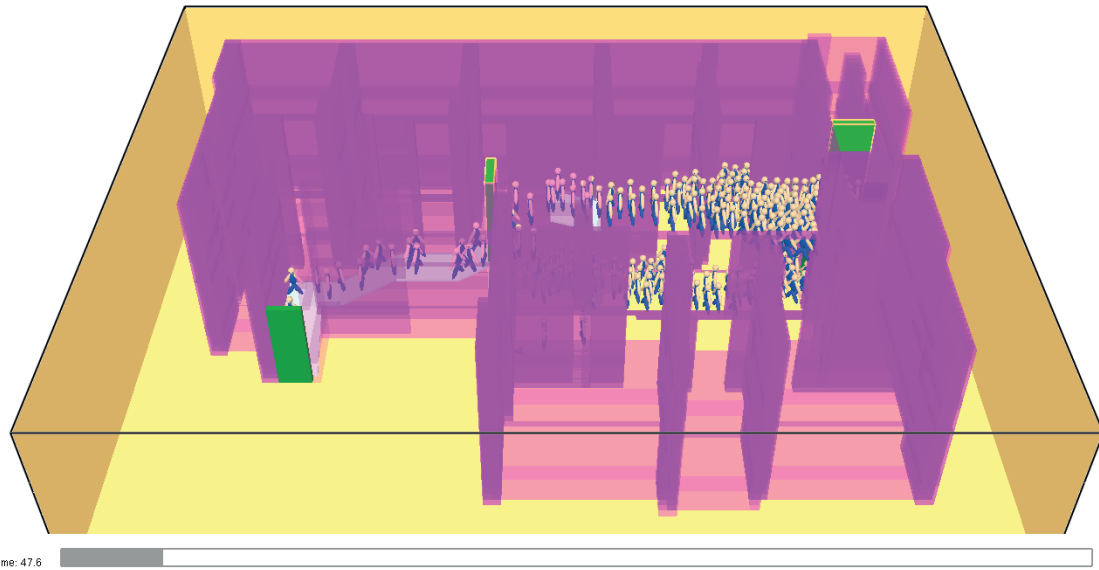


Figura 6.87 - Simulazione di esodo con due vie di uscita dal I piano: gli occupanti scelgono la scala esterna

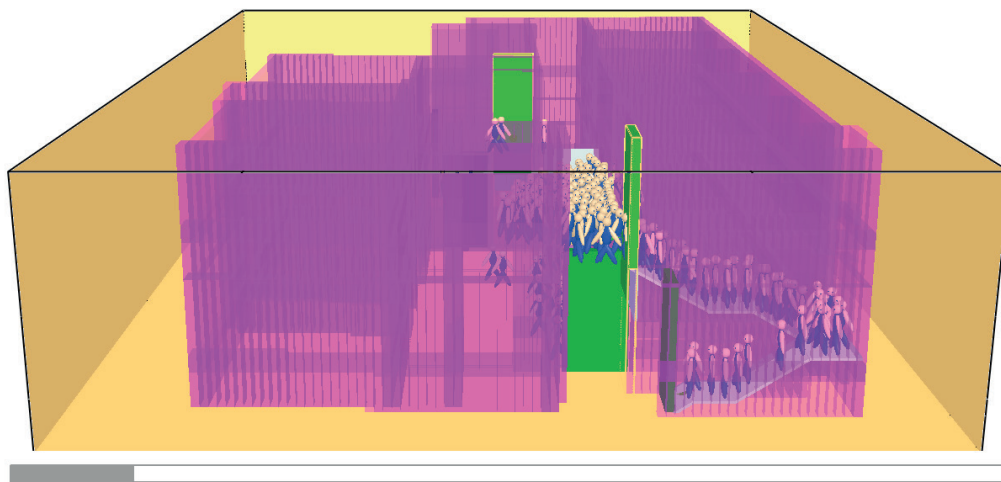


Figura 6.88 - Simulazione di esodo con due vie di uscita dal I piano: gli occupanti scelgono la scala esterna

In questo caso il calcolo di RSET e la verifica del criterio risultano:

$$RSET = 60 \text{ sec} + 0 \text{ sec} + 180 \text{ sec} + 240 \text{ sec} = 480 \text{ sec} \sim 8 \text{ min}$$

$$ASET (1000 \text{ sec}) > RSET (480 \text{ sec}) \quad \text{VERIFICATO}$$

e  $\Delta t_{\text{marg}} = 520 \text{ secondi} = 108\% \geq 100\%$ , come imposto dal DM 03/08/2015 (RTO).

[\*] 240 secondi è il valore medio ottenuto per interpolazione tra le simulazioni effettuate.

## 6.8 Confronto tra i software utilizzati: risultati ottenuti

Caratteristiche		PATHFINDER		CPI win® FSE - EVAC
		Steering Mode	SFPE Mode	
Geometria	Importazione DWG	Sì - Estrazione geometrie		Sì - Utilizzo di control points
	Solai	Sì - Mesh di navigazione		NO - Griglie FSE
	Pareti	NO - Fori nelle mesh		Sì - Disegnate con il software
	Porte	Non obbligatorie tra stanze Sì - Uscite di sicurezza		Sì - Tra stanze Sì - Uscite di sicurezza (da definire il verso di percorrenze)
	Rampe	Sì - Click sui pianerottoli		Sì - Definizione di quote e verso
Occupanti	Gruppi	Sì - Tutti hanno lo stesso profilo e si muovono insieme verso l'uscita		Sì - Possono contenere profili diversi, ognuno sceglie il proprio percorso
	Profili	Per ognuno si definiscono: velocità, diametro, altezza, eventuali restrizioni nei movimenti, propensione a cambiare la propria scelta di via di fuga		Per ognuno si definiscono: velocità, diametro min/max, forze sociali agenti, comportamento nella scelta di una via di fuga, tempi di pre-evacuazione e rilevazione
	Priorità	Sì - Per ogni gruppo o persona		NO
	Comportamenti	Sì - Definiti per ogni gruppo o persona		Sì - Definiti per ogni profilo
	Tappe lungo il percorso	Sì - Si determinano come comportamenti		NO
	Percorso scelto (default)	Più breve	Più veloce	Visibile e/o familiare, ottimizzato
Output	Grafici	Sì		Sì - Anche 3D
	Visualizzazione 3D	Sì - Occupanti come: persone reali, figure generiche, cilindri o dischi		Sì - Occupanti come: figure generiche, ellipsoidi, dischi
	Visualizzazione parametri	Sì - zone ad alta densità, tempi di uscita, livello di servizio per la formazione di code, velocità degli occupanti		NO
	Visualizzazione percorsi	Sì - Realistici	Sì - Filo teso	Sì - Realistici
	Visualizzazione code	Sì	NO - Sovrapposizione occupanti	Sì
	Velocità di calcolo	Mediamente veloce	Molto veloce	Lento

Tabella 6.9 - Confronto tra i software di modellazione dell'esodo

La **Tabella 6.9** pone a confronto le caratteristiche più significative dei due software utilizzati per la modellazione dell'esodo nel caso di studio, dedotte da quanto esposto nei precedenti *capitoli 6.6 e 6.7*.

Entrambi i software sono **disponibili al pubblico** a pagamento ma è possibile scaricare versioni di prova o chiedere licenze temporanee per scopi specifici; entrambi inoltre sono applicabili ad ogni tipo di edificio, non hanno limiti di altezza del modello e non sono specializzati in un particolare ambito.

Tra i due software la differenza più evidente è sicuramente data dalla **visualizzazione del modello**: Pathfinder già in fase di generazione del modello, consente infatti di visualizzare tridimensionalmente la geometria e gli occupanti predisposti; CPI win® FSE - EVAC invece permette di generare solo un livello alla volta del modello, e solo visualizzandolo bidimensionalmente, in pianta. In questo software infatti è possibile ottenere una vista tridimensionale solo in fase di output (Smokeview), rendendo più complessa quindi ogni minima modifica, dal momento che per visualizzarla è necessario effettuarla e riavviare il calcolo. Nella visualizzazione 3D finale inoltre, Pathfinder prevede l'inserimento di personaggi realistici predefiniti, mentre CPI win® FSE - EVAC al momento non lo consente.

Un'altra differenza fondamentale riguarda i **dati sull'incendio**: mentre Pathfinder non considera i dati sull'incendio ed elabora la simulazione come se fosse una prova di evacuazione, CPI win® FSE - EVAC può inglobare al suo interno un modello di simulazione dell'incendio. Questo software infatti, attraverso il calcolo FDS+EVAC, consente di ottenere una simulazione dell'incendio in atto e della fuga degli occupanti, mostrando come questi ultimi scelgano le vie di fuga anche in base alla visibilità data dalla presenza di fumo.

Relativamente ai **comportamenti degli occupanti**, la differenza sostanziale è data dal fatto che Pathfinder li considera in modo implicito, cioè assegna ad ogni gruppo o persona una serie di azioni da svolgere prima o durante l'evacuazione (per esempio imposizione di tempi di attesa, ritardi, tappe da effettuare lungo il percorso, ecc.); CPI win® FSE - EVAC invece può considerarli sia in modo implicito, sia condizionale, cioè definendo per ogni profilo azioni specifiche influenzate dalle condizioni ambientali. Una caratteristica peculiare di CPI win® FSE - EVAC, è che faccia ricorso a modelli probabilistici, per cui ripetendo la stessa simulazione diverse volte, si possono ottenere risultati diversi (per esempio nel caso studio il tempo di esodo può variare di qualche secondo in più o in meno).

Per quanto riguarda il modello di calcolo a cui i software fanno riferimento per la definizione dei **movimenti degli occupanti**, si sono riscontrate le seguenti differenze:

- Pathfinder in SFPE Mode utilizza il modello idraulico teorizzato in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, il quale prevede il calcolo del flusso specifico attraverso le

porte a partire da densità costanti in ogni stanza, che tengono conto dello strato limite;

- Pathfinder in Steering Mode, modalità in cui ad ogni porta può essere imposto un limite di flusso a prescindere dalle densità delle stanze che collega, controlla i movimenti degli occupanti mediante una combinazione di meccanismi di guida e di gestione delle collisioni. Questa modalità è infatti la più aderente alla realtà in quanto prescinde da calcoli di densità e flussi e consente agli occupanti di procedere verso l'obiettivo prefissato;
- CPI win® FSE - EVAC utilizza leggi della meccanica secondo cui il moto di ogni occupante dipende dalle forze che agiscono su di esso. La scelta della via di esodo dipende invece da un algoritmo che a seconda della preferenza che dipende da fattori quali visibilità e familiarità, seleziona l'uscita che minimizza il tempo di evacuazione.

Pathfinder è un software molto intuitivo grazie alla sua interfaccia user-friendly, è veloce sia nella generazione del modello, sia nella definizione degli occupanti e delle loro caratteristiche, sia nel calcolo dei risultati finali. È un software di modellazione più automatizzato, fa scelte specifiche in base agli input assegnati, e risulta quindi più semplice da utilizzare ma meno preciso.

CPI win® FSE - EVAC, è invece un software simile a quelli utilizzati per il disegno CAD. Rispetto a Pathfinder risulta più lento nel processare i dati per ottenere i risultati, e più complesso dal momento che richiede all'operatore la definizione di un ingente numero di parametri, che Pathfinder invece assume dal modello DWG importato. CPI win® FSE infatti, consente sì l'importazione dei DWG, ma non ne trae alcuna informazione, se non gli snap degli oggetti disegnati. Questo software è sicuramente più complesso, ma attraverso uno studio più approfondito, consente di ottenere un modello comportamentale più preciso e affine alla realtà.

Impostando il medesimo modello del caso di studio in entrambi i software, si sono ottenuti risultati diversi. Pathfinder infatti, nonostante siano stati definiti dei tempi di ritardo nel movimento degli occupanti, prevede un tempo di esodo complessivo pari a 250 secondi, che verifica il criterio  $ASET > RSET$  previsto dalla soluzione alternativa del DM 03/08/2015, con un ampio margine di sicurezza (104%). CPI win® FSE - EVAC invece, impostando come comportamento degli occupanti il più verosimile possibile, dà come risultato un tempo di esodo pari a 460 secondi, che verifica il criterio  $ASET > RSET$  ma con un margine di sicurezza troppo basso rispetto a quanto imposto dalla normativa (42,9%).

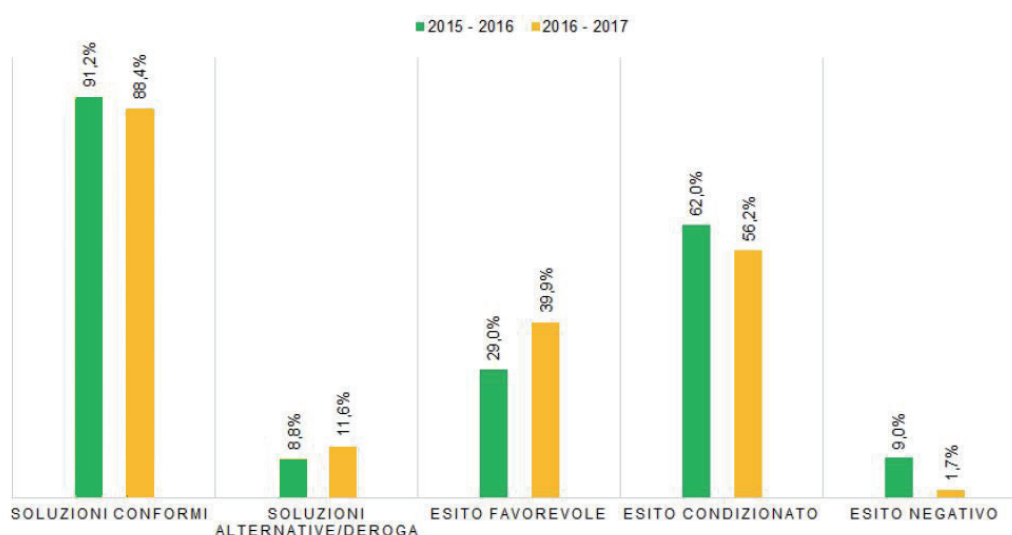
Utilizzando CPI win® FSE - EVAC quindi, non è possibile adottare la soluzione alternativa del DM 03/08/2015, ma si deve ricorrere a quella conforme. Tale soluzione risulta validata se si considera un modello che prevede due uscite dal primo piano: in questo caso il tempo di esodo complessivo è di 240 secondi e verifica così sia il criterio  $ASET > RSET$ , sia il margine di sicurezza richiesto (108%).





## Conclusioni

**D**a quando è stato pubblicato il Nuovo Codice di Prevenzione incendi, il suo utilizzo è stato monitorato costantemente dai Vigili del Fuoco. Dalle loro analisi è emerso che nel corso dei primi due anni dall'entrata in vigore del Codice (2015-2017), si è registrato un incremento del suo utilizzo, dell'esito positivo dei progetti presentati, ed inoltre, tra tutti i progetti presentati, si è riscontrato un incremento di soluzioni alternative rispetto a quelle conformi (*Figura II*).



*Figura II - Grafico che mostra l'incremento dell'utilizzo di soluzioni alternative e del loro esito positivo (Inail 2018)*

È chiaro come il Nuovo Codice sia uno strumento innovativo ed interessante, ma non sia ancora largamente utilizzato a causa della scarsità di professionisti esperti in materia. In questo biennio (2015-2017) sono state pubblicate inoltre le Regole Tecniche Verticali per alcune attività tra cui le scuole (DM 07/08/2017), ad integrazione della RTO. I dati riportano che anche per queste specifiche attività, dopo l'entrata in vigore delle rispettive RTV, si è verificato un aumento di progetti presentati con l'applicazione di tali norme.

Relativamente alla scuola oggetto di studio, i benefici che si sono riscontrati, dati dall'applicazione del Nuovo Codice rispetto alla precedente normativa per l'adeguamento antincendio della struttura, riguardano fondamentalmente:

- *Resistenza al fuoco delle strutture*: il Nuovo Codice richiede una resistenza minima delle strutture pari a R 30, mentre il DM del 1992 richiede un resistenza minima pari a R 60. Se si dovesse adeguare la scuola secondo la vecchia normativa, sarebbero quindi necessari lavori di protezione strutturale.
- *Uscite di sicurezza*: il Nuovo Codice, come soluzione conforme, prevede la realizzazione di una scala esterna antincendio che funga da seconda uscita di sicurezza dal primo piano della scuola. Nonostante parta da presupposti diversi (come il calcolo della lunghezza di esodo e dei corridoi ciechi), in questo caso il Codice dà gli stessi risultati del DM del 1992, secondo il quale devono esserci a prescindere due uscite di sicurezza da ogni piano. La soluzione alternativa del Codice, che deve essere verificata tramite software, consente invece di mantenere la sola scala esistente come via di fuga dal primo piano, comportando quindi un risparmio economico dato dalla mancata realizzazione della scala antincendio.

Per quanto riguarda la verifica della soluzione alternativa, cioè sostanzialmente del criterio  $ASET > RSET$ , sono stati utilizzati i software Pathfinder e CPI win<sup>®</sup> FSE - EVAC, entrambi già sul mercato e la cui affidabilità è stata validata dal NIST.

Il criterio  $ASET > RSET$  risulta verificato con Pathfinder, utilizzato in entrambe le modalità (SFPE e Steering Mode), con uno scarto di quattro secondi (su 250 totali considerati). CPI win<sup>®</sup> FSE - EVAC, in cui è stato imposto agli occupanti un comportamento verosimile, e cioè quello di seguire gli altri qualora non vedano loro stessi la via di fuga, fornisce invece un valore  $\Delta t_{tra}$  di RSET quasi raddoppiato, cioè pari a 460 secondi. In questo caso il criterio  $ASET > RSET$  risulta verificato ma con un margine di sicurezza del 42,9%, inferiore al 100% previsto dal DM 03/08/2015, per cui la soluzione alternativa non può essere adottata.

Utilizzando CPI win<sup>®</sup> FSE - EVAC, risulta quindi necessario ricorrere alla soluzione conforme prevista dal Codice: a validazione di ciò è stato realizzato un modello che prevede due uscite dal primo piano e che dà come tempo di esodo complessivo 240 secondi, i quali verificano il criterio  $ASET > RSET$ , e consentono di avere un adeguato margine di sicurezza (108%).

I software utilizzati appartengono a due tipologie diverse: Pathfinder è basato sul movimento, mentre CPI win<sup>®</sup> FSE - EVAC sul comportamento, è cioè un software definito agent-based. Entrambi forniscono sia risultati alfanumerici, sia realistiche simulazioni grafiche. Il fatto che la simulazione con CPI win<sup>®</sup> FSE - EVAC dia come risultato un tempo di esodo maggiore fa riflettere: questo software adotta un modello comportamentale



migliore, basandosi su comportamenti reali assegnati ai profili degli occupanti dell'edificio, e nella realtà appunto, le reali situazioni di emergenza raramente rispecchiano gli scenari ipotizzati.

Pianificare l'emergenza è necessario per contenere il più possibile le conseguenze di un dato incidente, ma progettare strategie di esodo troppo definite può risultare controproducente. Quindi, anche se la modellazione dell'esodo con Pathfinder risulta verificata nonostante sia stata stata realizzata inserendo dati a favore di sicurezza (cioè considerando più occupanti di quelli previsti e tempi di ritardo nell'inizio dell'esodo), è possibile che l'assenza di una seconda via di fuga dal secondo piano risulti un ostacolo ad un'evacuazione degli occupanti in sicurezza, come dimostrato da CPI win® FSE - EVAC.



## Appendice

*Il calcolo dell'ASET più sfavorevole per la scuola in esame, è stato effettuato dallo Studio FSE Progetti e viene qui riassunto, riportando le fasi principali dell'analisi dell'incendio ipotizzato. Per questo calcolo è stato impiegato il software Straus 7.*

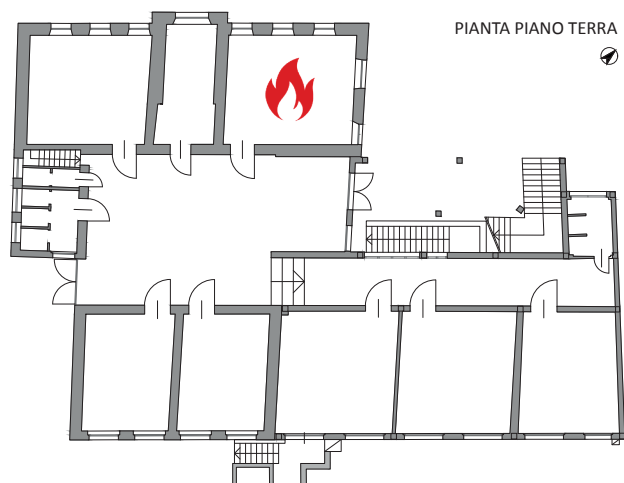
**M**ediante l'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio è possibile calcolare il valore di ASET disponibile per l'esodo mediante una modellazione fluidodinamica di incendio entro la quale vengono sviluppati gli scenari di incendio di progetto. Gli scenari di incendio rappresentano la schematizzazione degli eventi che possono ragionevolmente verificarsi nell'attività in relazione alle caratteristiche del focolare, dell'edificio e degli occupanti.

In particolare, il primo passo della procedura consiste nell'identificare di tutti i possibili *scenari di incendio* che possono svilupparsi durante la vita utile dell'attività. In relazione a ciò, si considerano tutte le condizioni di esercizio ragionevolmente prevedibili. Tra gli scenari di incendio, viene poi estratto il sottoinsieme degli *scenari d'incendio di progetto*, cioè i più gravosi tra gli scenari di incendio credibili.

Gli scenari d'incendio di progetto rappresentano per l'attività un livello di rischio d'incendio non inferiore a quello compiutamente descritto dall'insieme di tutti gli scenari d'incendio. Le soluzioni progettuali, rispettose delle *soglie di prestazione* richieste nell'ambito degli scenari d'incendio di progetto, garantiscono quindi lo stesso grado di sicurezza anche nei confronti di tutti gli altri scenari d'incendio.

La selezione degli scenari d'incendio di progetto risulta fortemente influenzata dall'obiettivo che si intende raggiungere. Ad esempio un incendio di limitate dimensioni, che però si sviluppa in prossimità delle vie di esodo di un locale ad alta densità di affollamento, può risultare più pericoloso di uno che emette una maggiore potenza termica, ma che si origina in un ambiente confinato e che si trova lontano dalle zone dove è prevista la presenza di occupanti.

Per il caso di studio di edilizia scolastica, in particolare, viene analizzato un unico scenario di incendio di progetto (*Figura III*), corrispondente alle condizioni più sfavorevoli per gli occupanti dell'edificio. Dalla *Figura III* si evince che l'incendio considerato è localizzato al piano terra, nell'aula più vicina all'uscita di sicurezza principale.



*Figura III - Planimetria del piano terra con indicazione di dove sorge l'incendio considerato*

Per lo scenario d'incendio di progetto individuato è stata eseguita un'analisi di campo fluidodinamico (CFD) volta alla determinazione degli effetti da esso prodotti. L'obiettivo primario dell'analisi, dal momento che nel presente testo si vuole dimostrare la verifica del criterio  $ASET > RSET$  affinché sia garantita la salvaguardia della vita umana, è quello di determinare il valore di ASET. Infatti ASET rappresenta l'intervallo di tempo superato il quale permangono condizioni ambientali incapacitanti per occupanti. Obiettivo secondario è invece quello di determinare le curve naturali d'incendio per le successive analisi strutturali.

In particolare, sono state posizionate in punti sensibili del dominio computazionale delle sonde che leggono le grandezze oggetto di studio in modo puntuale, mentre dalle *slice* è possibile, tramite una scala cromatica, studiare l'andamento qualitativo delle predette grandezze. Nello specifico, le grandezze in gioco sono riportate nella *Tabella I* (considerando  $z = 1,8$  metri: altezza della sonda).

Visibilità	Temperatura	Irraggiamento	FED
10 m	60 °C	2,5 kW/m <sup>2</sup>	0,1

*Tabella I - Valori limite dei parametri che determinano la soglia di incapacitazione degli occupanti*

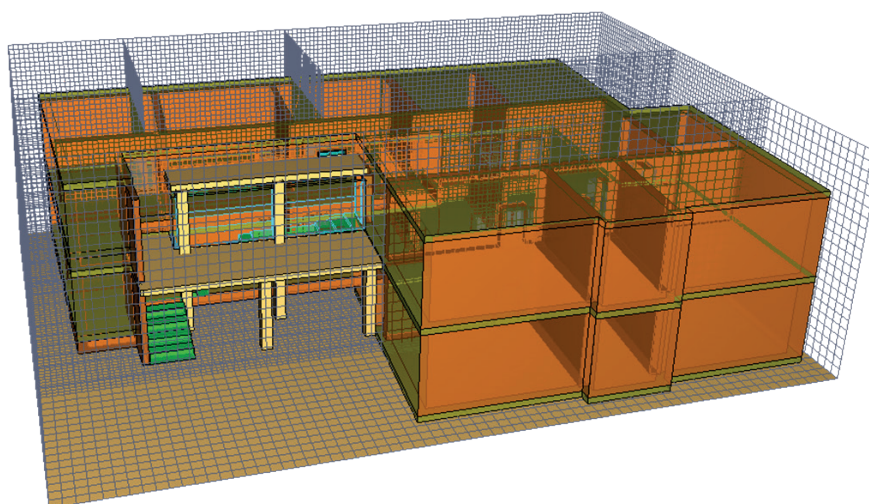


Figura IV - Vista 3D del modello FDS realizzato

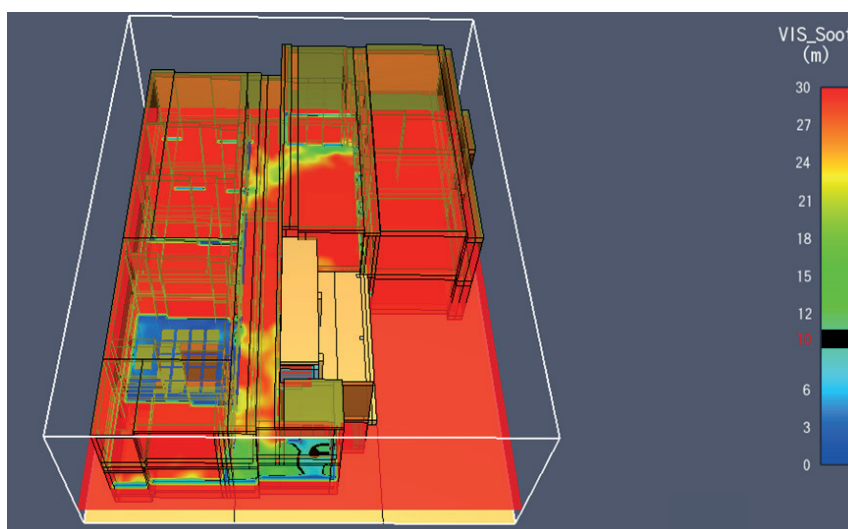


Figura V - Slice 2D che indica la visibilità

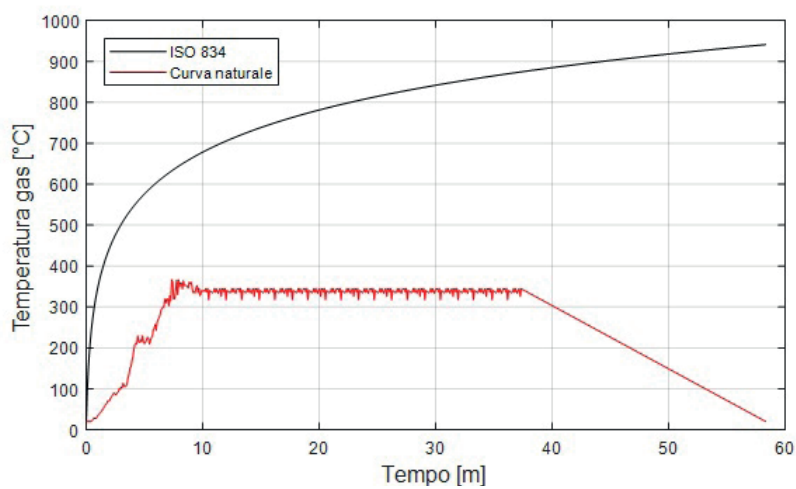


Figura VI - Confronto tra curva d'incendio naturale e curva d'incendio ISO 834

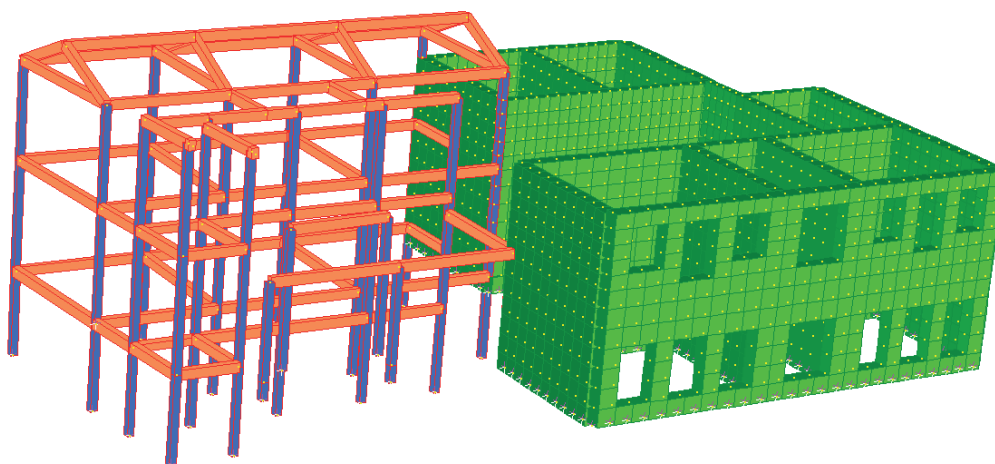
Relativamente allo scenario d'incendio di progetto considerato, si riporta una vista della *slice 2D* relativa alla visibilità, a 1.8 m da terra (*Figura V*), ed il relativo valore dell'ASET oltre il quale la densità dei fumi prodotti è tale da non garantire più una visibilità sopra i 10 m nel corridoio. Tale output viene visualizzato mediante *PyroSim*, ma calcolato con *FDS*.

Come output secondario della modellazione eseguita, si riporta anche la curva d'incendio naturale ricavata (messa a confronto con la curva di incendio prevista dalla norma ISO 834 in *Figura VI*), la quale mostra l'evoluzione, in funzione del tempo e della temperatura, dei gas di combustione nell'intorno della superficie degli elementi strutturali. Tale curva costituisce l'input termico per l'analisi strutturale della scuola in esame.

A tal proposito si è reso dunque necessaria la realizzazione di un modello numerico accurato della struttura al fine di coglierne al meglio il comportamento in caso d'incendio.

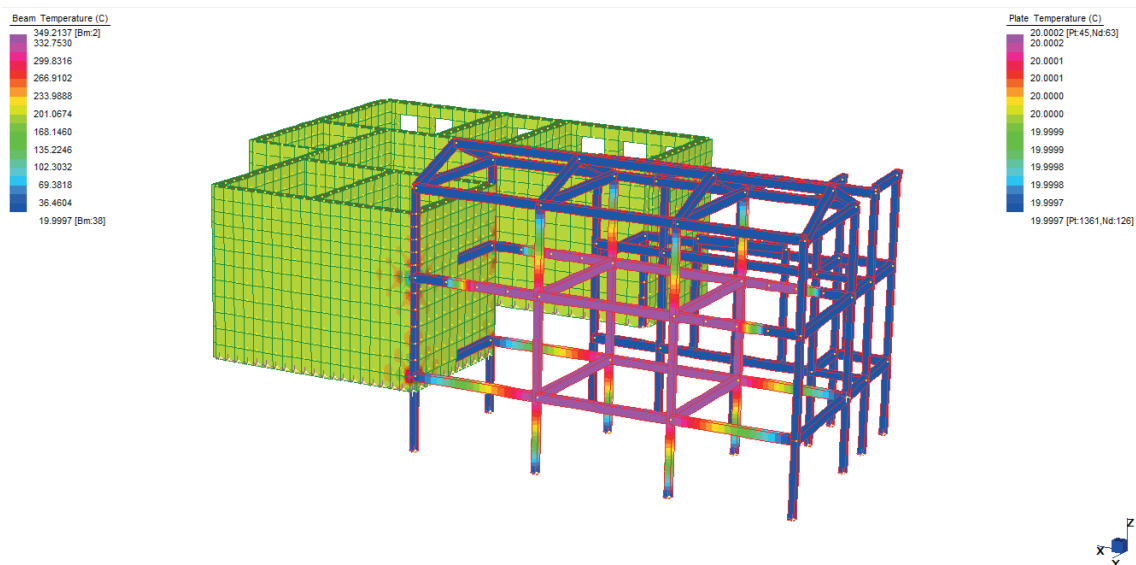
La verifica della struttura in oggetto è stata compiuta utilizzando il programma di calcolo agli elementi finiti *Straus7* (*Figura VII*). Il programma di calcolo automatico utilizzato risolve strutture spaziali schematizzate con elementi finiti in campo elastico/plastico. In particolare, il programma è un metodo grafico interattivo di modellazione strutturale tridimensionale che permette di schematizzare agli elementi finiti strutture costituite da travi, pilastri e setti.

Ad ogni singolo elemento (trave, colonna e pareti), sono state assegnate le caratteristiche geometriche della sezione, le proprietà meccaniche e termiche del materiale ed il relativo carico di competenza.



*Figura VII - Modello 3D realizzato con il software Straus7*

Si esegue quindi una *Non-Linear transient heat analysis*, impostando la combinazione di carico statico individuata precedentemente e fissando un time step sufficientemente ridotto per discretizzare al meglio l'andamento delle temperature nel tempo, trattandosi di analisi non lineare (*Figura VIII*).



*Figura VIII - Output: visualizzazione del campo termico della struttura in uno degli step dell'analisi*

A conclusione di ciò, la società di ingegneria FSE Progetti con cui è stato sviluppato il presente testo, mi ha fornito il valore di ASET dello scenario di incendio di progetto considerato, dato necessario per essere confrontato con il valore di RSET calcolato nel *capitolo 6.4* del presente testo.

Per lo scenario in esame, risulta che ASET sia pari a circa *1000 secondi*.

Allo stesso tempo, pur essendo un'estensione puntuale all'argomento trattato, si è voluto approfondire per completezza anche la resistenza al fuoco della struttura, avanzata al fine di avere un quadro più completo dei potenziali vantaggi dell'FSE nel caso studio esaminato.





## Bibliografia

BRAGADIN, M. A. (2013) - La gestione dell'emergenza: pianificazione e aspetti innovativi, *Antincendio*, vol. 3, p.93.

BUTCHER, E. G. & PARNELL A. C. (1983) - *Designing for fire safety*, Wiley and sons.

CASCARINO, A. (1986) - *Introduzione alla prevenzione incendi. Volume 1°: i principi teorici ed i modi d'azione*, Centro Stampa Affissograf, Roma.

CENTRO STUDI ED ESPERIENZE CAPANNELLE (1993) - *La ricerca antincendio nel mondo*, Centro Studi ed Esperienze Antincendi del C.N. VV.F., Roma.

CFPA-Europe - *European guideline*

CORBO, L. (2009) - *Manuale pratico di prevenzione incendi*, Gruppo 24 ore- 17 ed., Milano.

COTE, A. E. - *Chief Fire protection Handbook (Volume I&II)*, P.E. Editor

DOSSIER ESODO - Il ruolo delle vie di esodo nella Prevenzione Incendi, *Antincendio*.

GISSI, E. & LALA, R. (2015) - Necessità e genesi del nuovo esodo nel Codice di prevenzione incendi, *Antincendio*.

GISSI, E. (2015) - *Calcolo dei parametri per il dimensionamento dei sistemi d'esodo secondo soluzione conforme al Codice di prevenzione incendi*, in Codice di prevenzione incendi commentato, EPC Editore, pp.465-512.

GISSI, E. (2015) - *DM 3 Agosto 2015, strategia antincendio: esodo*.

GRANDIS, D. - *Fire Safety Engineering e codice di prevenzione (RTO): le nuove frontiere per affrontare la sicurezza antincendio*.

GUIDI, G. (2014) - *Fire Safety Engineering: dal prescrittivo al prestazionale Applicazione della FSE per lo studio del fenomeno incendio, simulazione ed evacuazione*.

HOSTIKKA, S. et al. (2007) - *Development and validation of FDS+EVAC for evacuation simulation*, Project summary report, VTT.

## Bibliografia

- HOSTIKKA, S. & KORHONEN, T. (2009) - *Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+EVAC, Technical Reference and User's Guide*, VTT.
- INAIL (2018)- *Il codice di prevenzione incendi-La progettazione antincendio: applicazioni pratiche nell'ambito del D.M. 3 agosto 2015 e s.m.i.*, Tipolitografia Inail, Milano.
- LA MALFA, A. (2006) - *Ingegneria della sicurezza antincendio*, Legislazione tecnica editrice- 4 ed.
- LORENZINI, G.& FABBRI, G. (1996) - *Genesi e prevenzione degli incendi*, Pitagora,Bologna.
- MACCHI, G. (2016) - *Prevenzione incendi: dal 1955 al 2015: sessant'anni di leggi e di norme tecniche. Ora forse c'è bisogno di altro, Antincendio.*
- MALIZIA, M. - *Fire safety engineering, approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio.*
- MARSELLA, S. - *Esodo in emergenza: metodi di calcolo e di simulazione.*
- MARTINES, C. (1997) - *Sicurezza antincendio: prevenzione e protezione: cause, sviluppi, propagazione ed effetti dell'incendio, protezione passiva e attiva, provvedimenti di prevenzione nell'edilizia, impianti di rilevazione e spegnimento, legislazione e normativa antincendio*, U. Hoepli- 2. ed., Milano.
- MAZZIOTTI, L. - *L'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio, Obiettivo Sicurezza.*
- MONACO, P. (2014) - *Corso fire safety engineering, i modelli di simulazione d'incendio.*
- MONACO, P. (2014) - *Corso fire safety engineering, esodo degli occupanti.*
- NFPA 101-National Fire Protection Association - *Life Safety Code.*
- NFPA-National Fire Protection Association (2008) - *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 4th ed.
- NIGRO, E. (2014) - *Structural Fire Safety Engineering, l'approccio ingegneristico alla sicurezza strutturale in caso di incendio.*
- NOTARO, F. (2016) - *Le nuove tecniche di prevenzione incendi: che cosa è cambiato?*
- PASQUINI, M. - *La progettazione di prevenzione incendi.*
- PRINCE, M. (2014) - *L'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio.*
- PRINCE, M. (2014) - *La valutazione delle vie di esodo.*
- PUSTORINI, S. (2006) - *Sicurezza incendio*, ETS, Pisa.
- THUNDERHEAD ENGINEERING - *Pathfinder 2018*, Technical references.
- ZANUT, S.& VILLANI, T. (2007) - *Tempi di Evacuazione e modelli automatici di simulazione del movimento delle persone, Antincendio.*

ISO 13571 – *Life-threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires.*

ISO/DTR 16738 – *Fire-safety engineering - Technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people.*

Ministero degli interni, *DM 9 marzo 1998.*

Ministero degli interni, *DM 9 maggio 2007.*

Ministero degli interni, *DM 3 agosto 2015 - Nuovo Codice di Prevenzione Incendi.*

Ministero degli interni, *DM 23 agosto 2016.*

Ministero degli interni, *DM, 7 agosto 2017.*

Ministero degli interni, *DM, 21 marzo 2018.*

[www.approccioingegneristico.it](http://www.approccioingegneristico.it)

[www.edilizianamirial.it/software-fire-safety-engineering](http://www.edilizianamirial.it/software-fire-safety-engineering)

[www.fseprogetti.it](http://www.fseprogetti.it)

[www.ingegneri.info/news/sicurezza](http://www.ingegneri.info/news/sicurezza)

[www.nist.gov](http://www.nist.gov)

[www.quotidianosicurezza.it](http://www.quotidianosicurezza.it)

[www.thunderheadeng.com/pathfinder](http://www.thunderheadeng.com/pathfinder)

[www.vigilfuoco.it](http://www.vigilfuoco.it)



## **Allegati**

TAVOLA 1 – *Piante: stato di fatto*

TAVOLA 2 – *Prospetti: stato di fatto*

TAVOLA 3 – *Sezioni: stato di fatto*

TAVOLA 4 – *Piante: DM 26/08/1992*

TAVOLA 5 – *Prospetti: DM 26/08/1992*

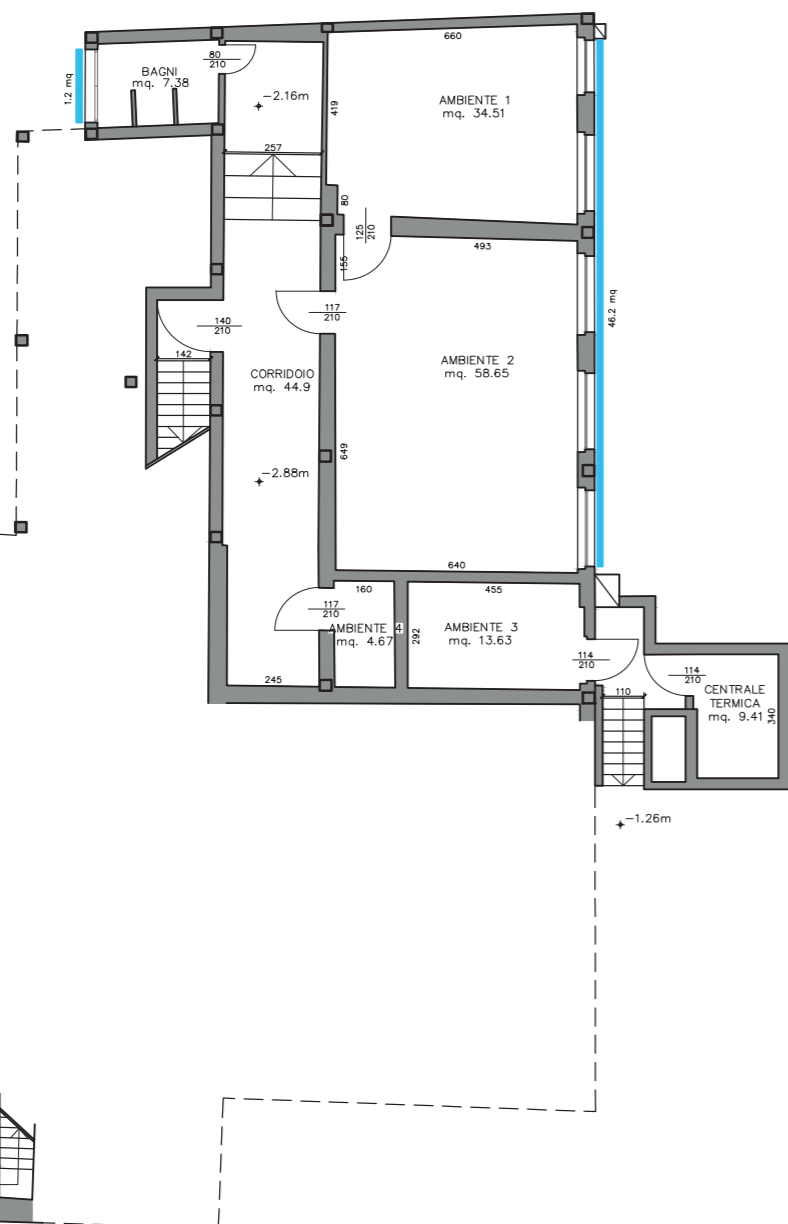
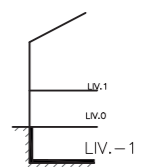
TAVOLA 6 – *Piante: DM 03/08/2015 e DM 07/08/2017 - Soluzione conforme*

TAVOLA 7 – *Piante: DM 03/08/2015 e DM 07/08/2017 - Soluzione alternativa*

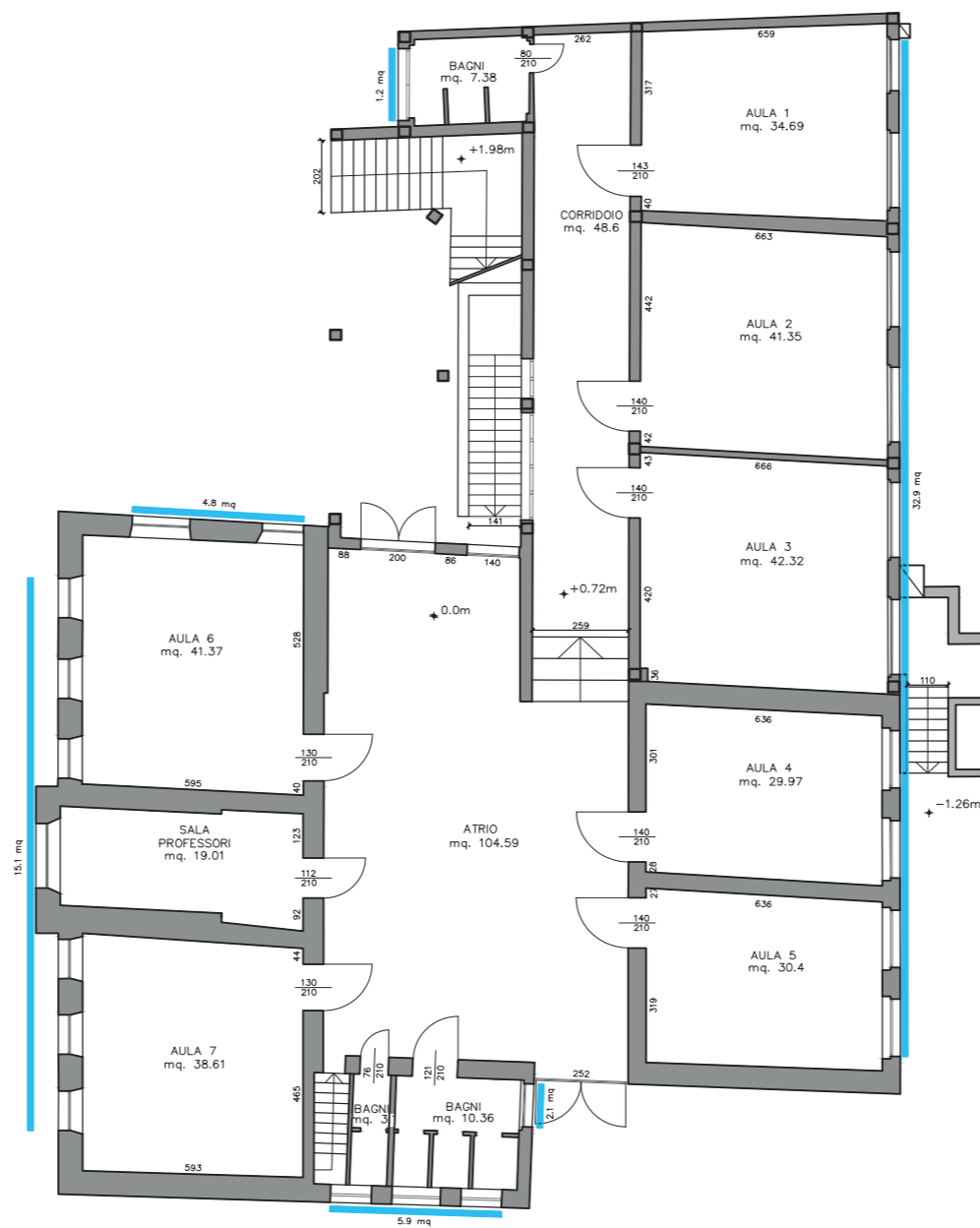
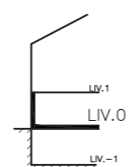
# TAVOLA 1 - Piante: stato di fatto

scala 1:200

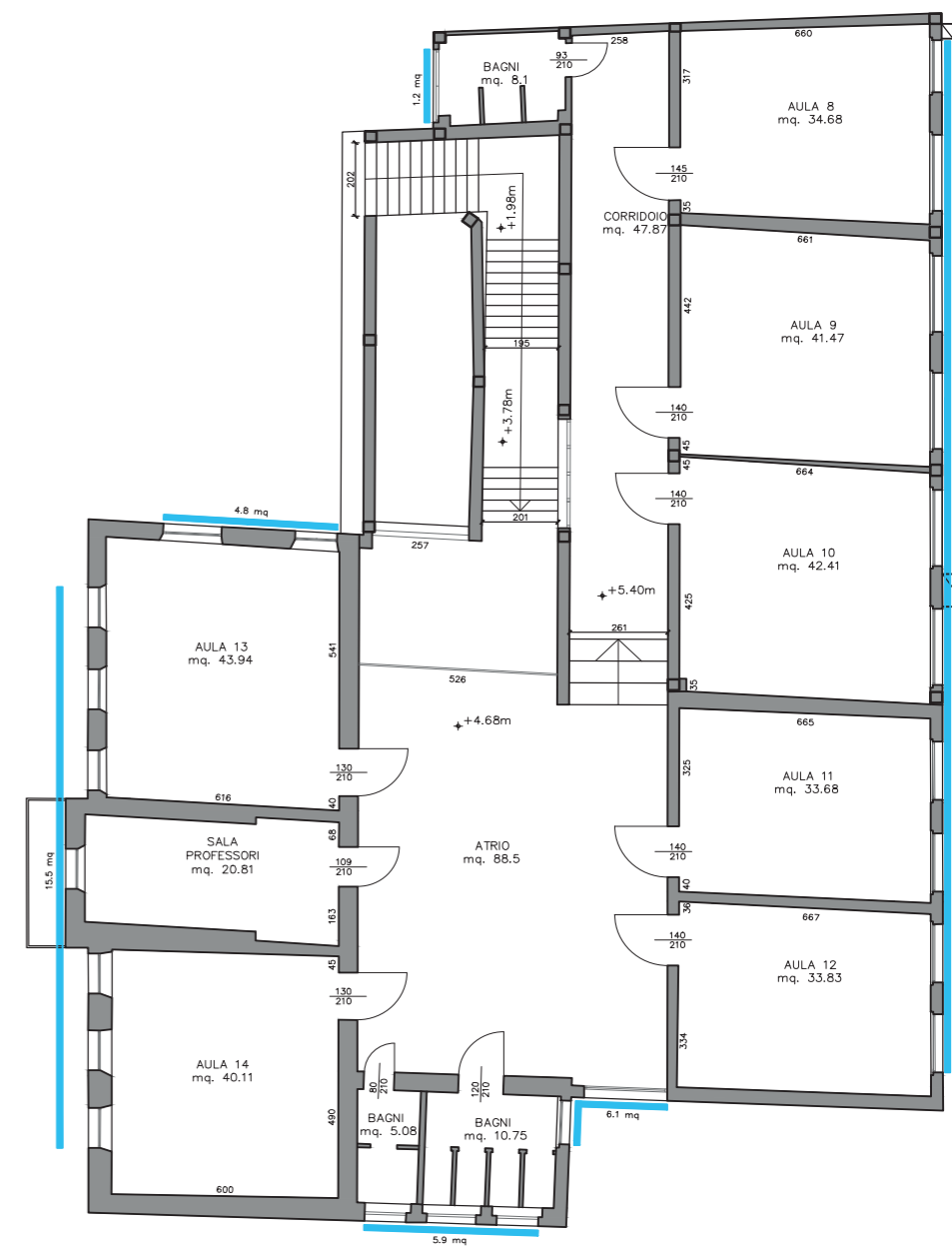
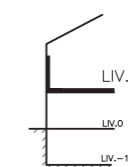
## PIANTA PIANO INTERRATO



## PIANTA PIANO TERRA

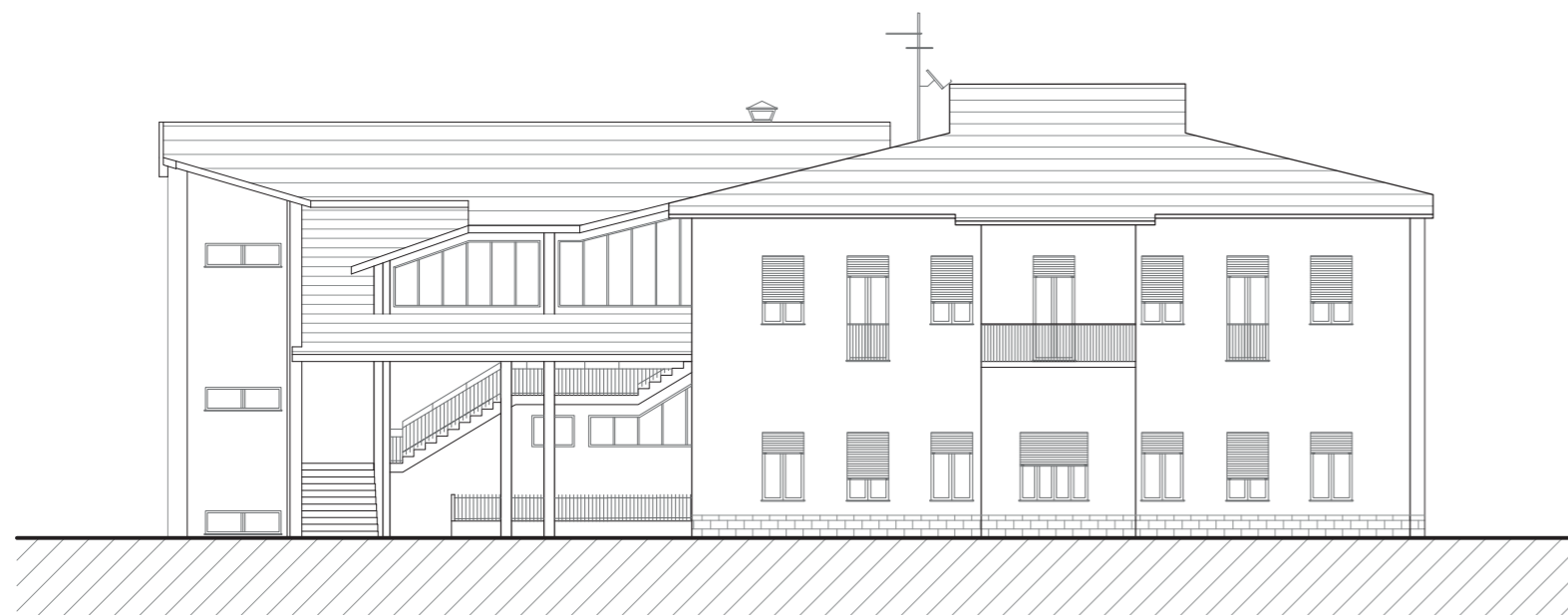
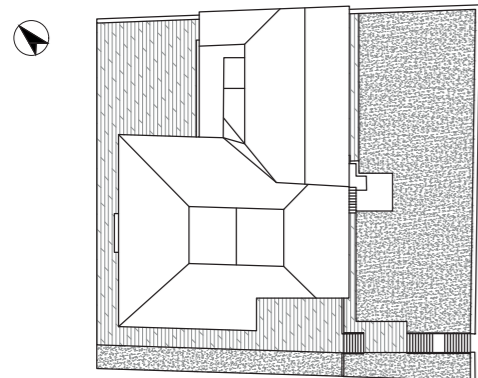


## PIANTA PRIMO PIANO



**TAVOLA 2 - Prospetti: stato di fatto**

scala 1:200



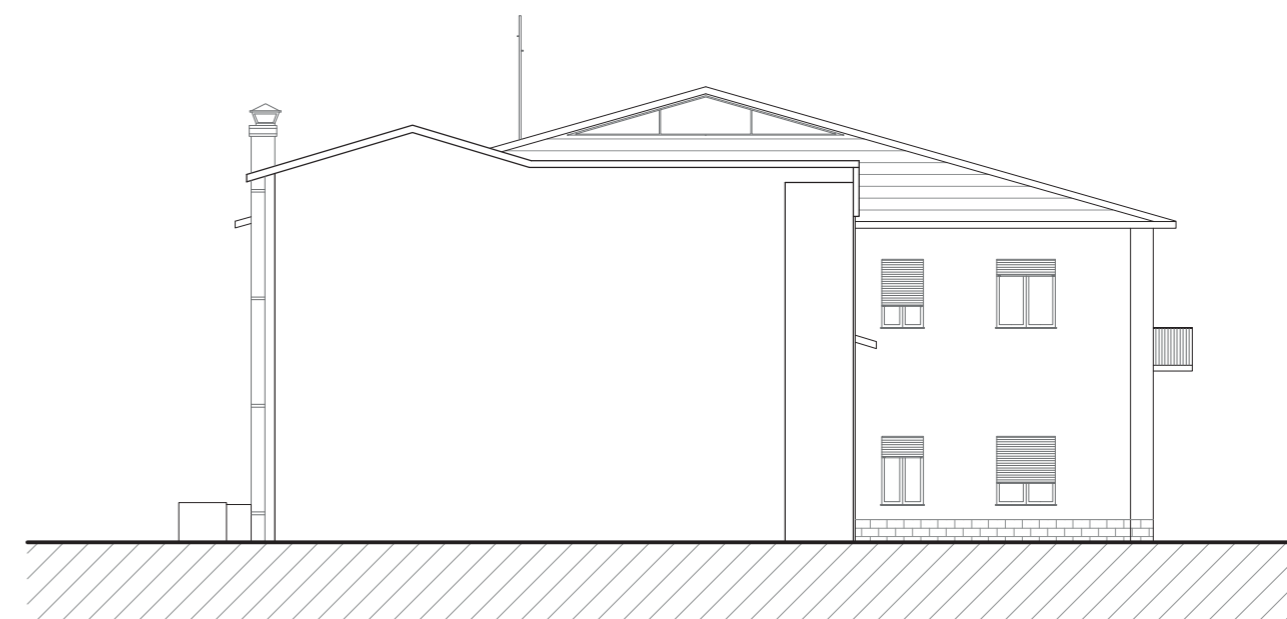
PROSPETTO NORD-OVEST



PROSPETTO SUD-OVEST



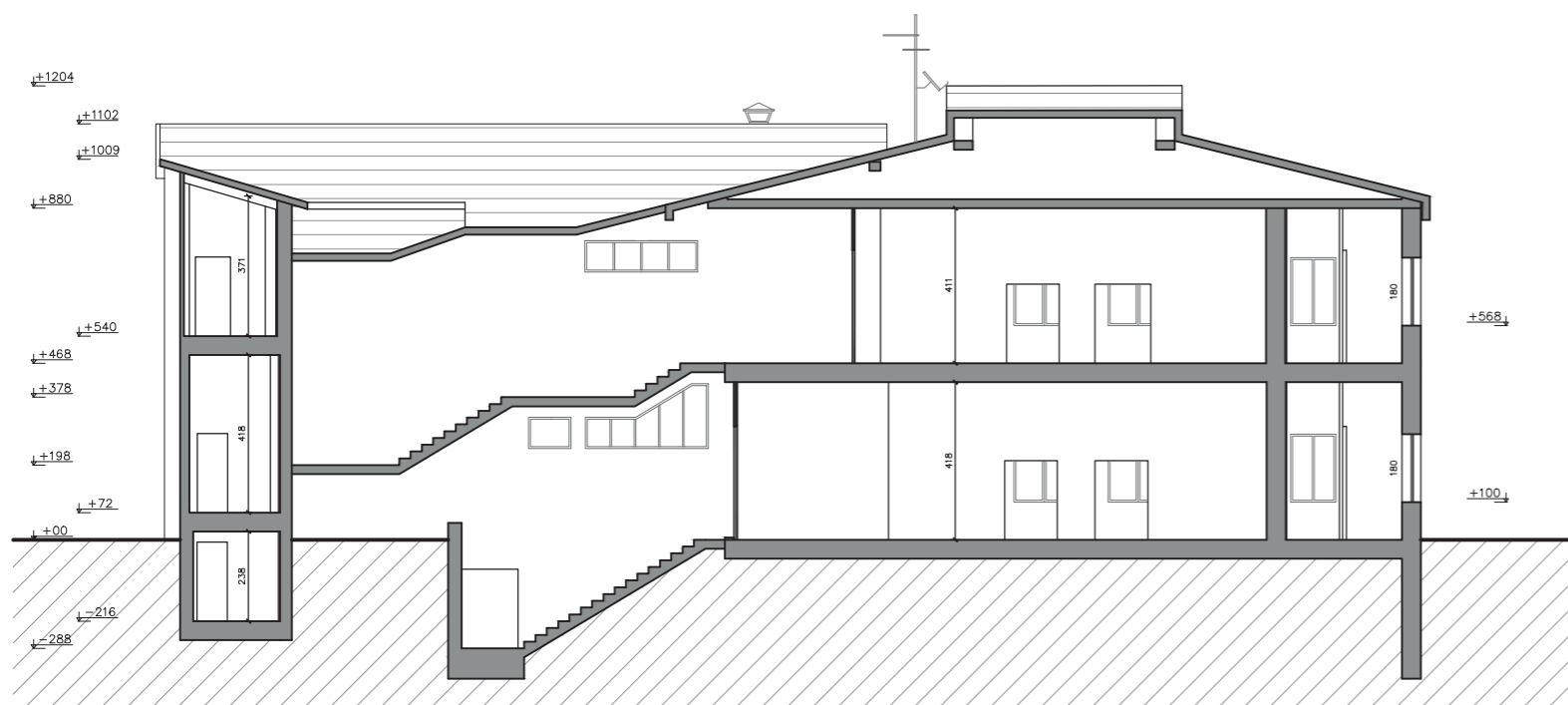
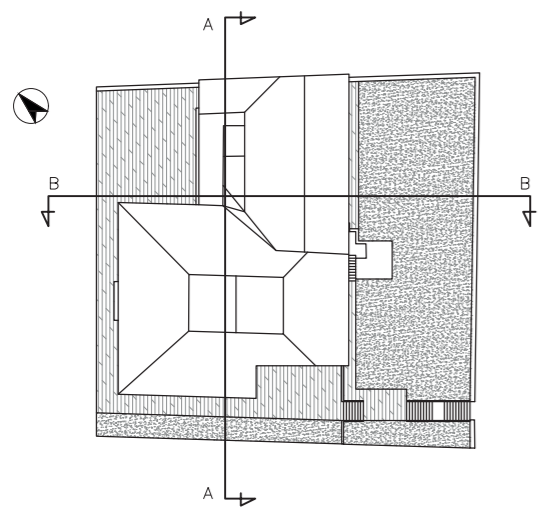
PROSPETTO SUD-EST



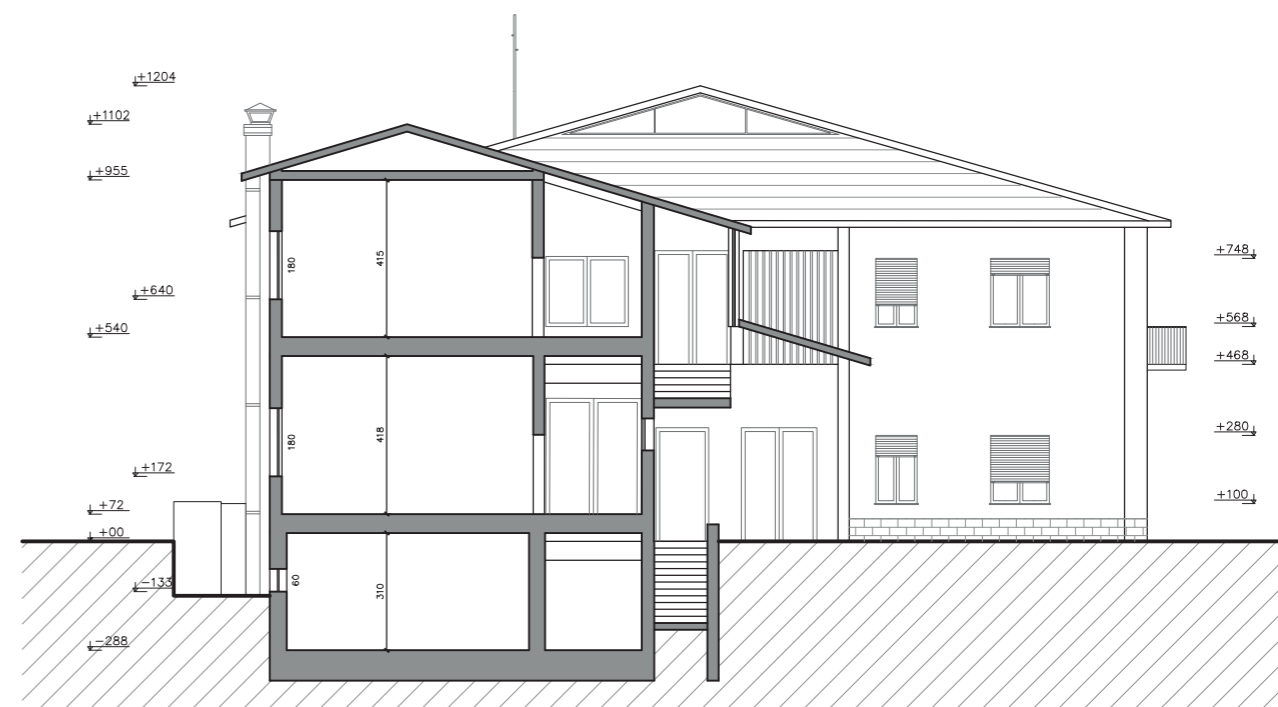
PROSPETTO NORD-EST

**TAVOLA 3 - Sezioni: stato di fatto**

scala 1:200



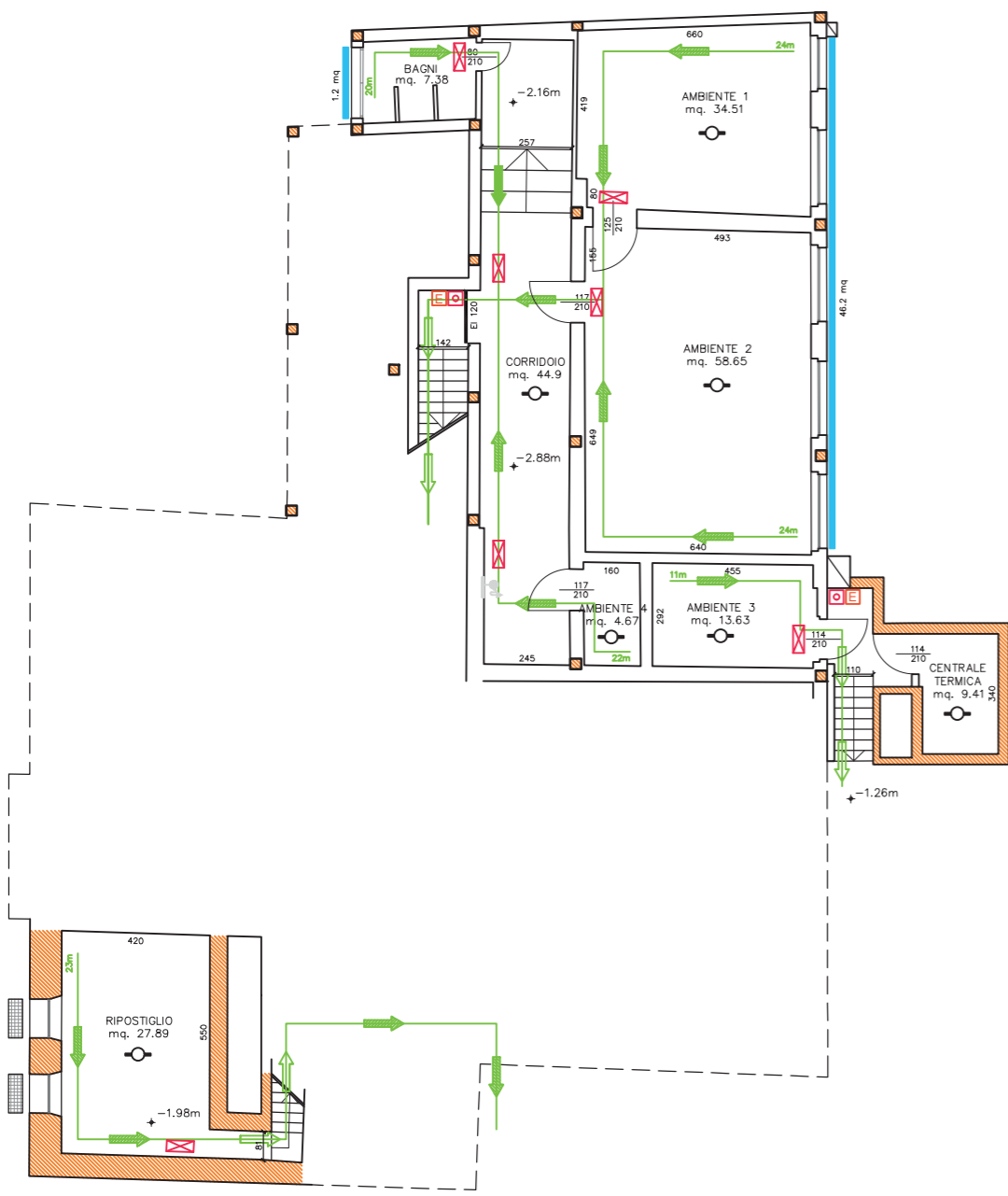
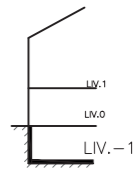
SEZIONE A-A



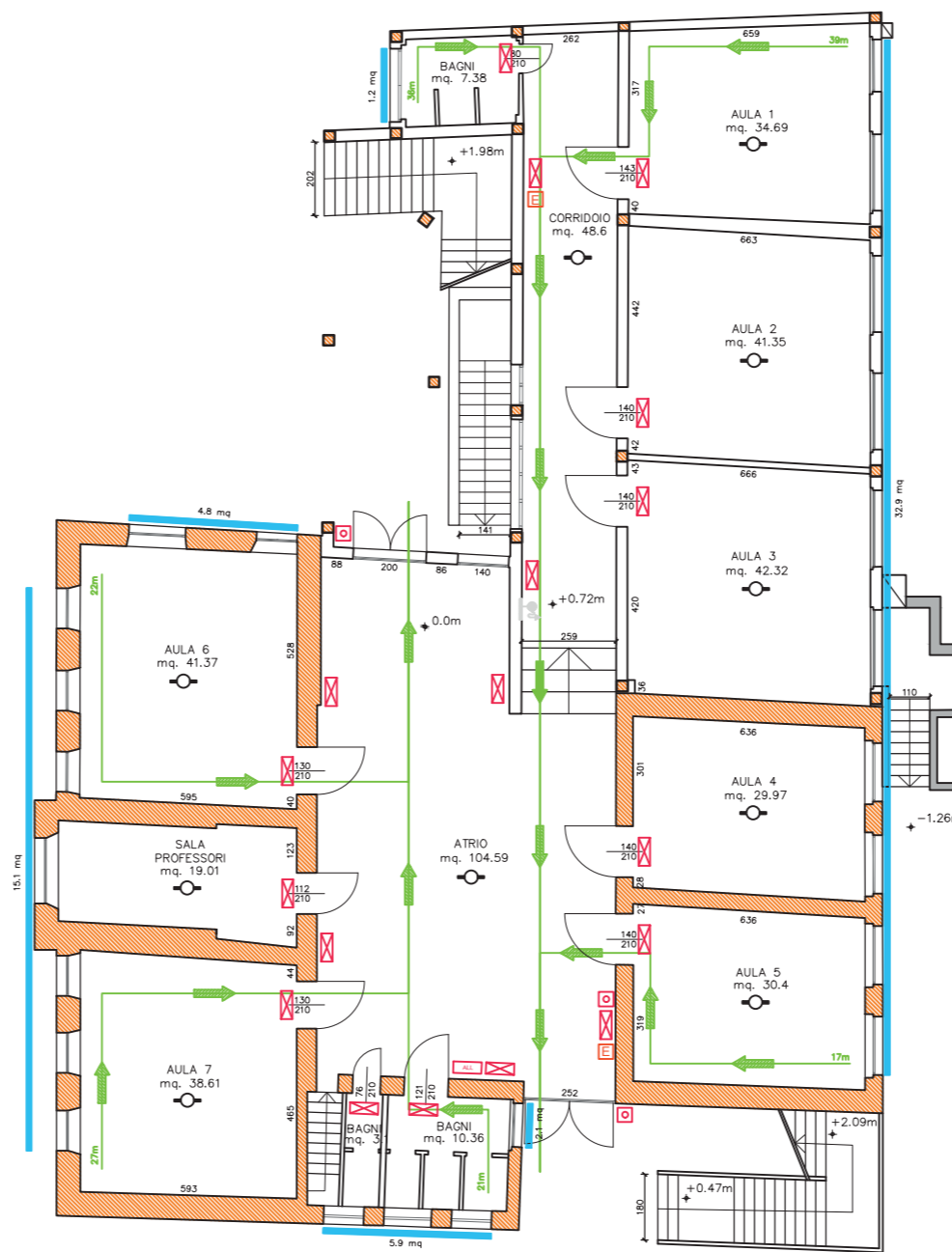
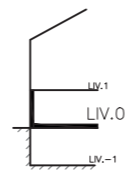
SEZIONE B-B



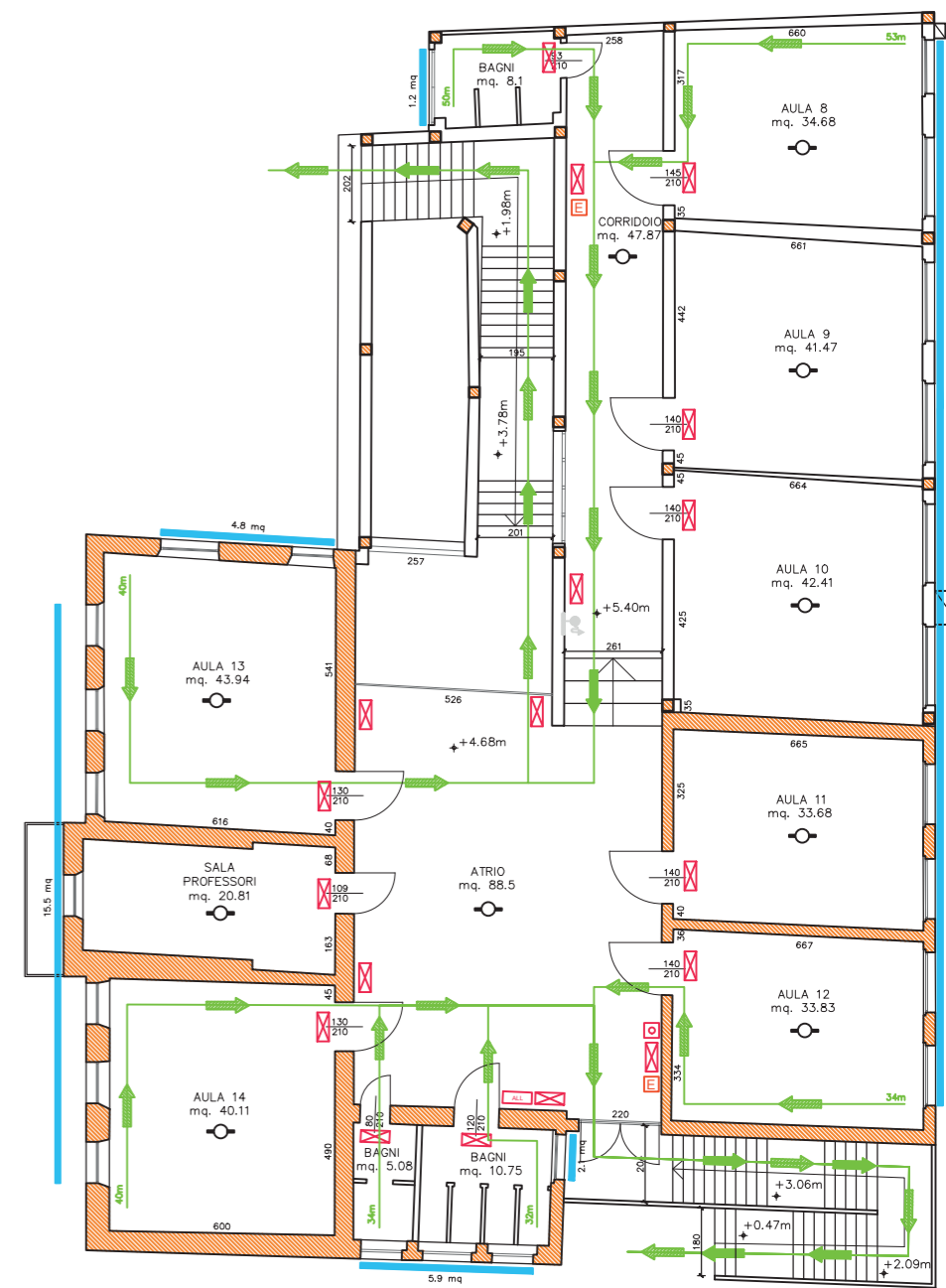
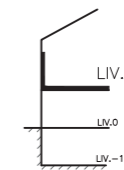
PIANTA PIANO INTERRATO

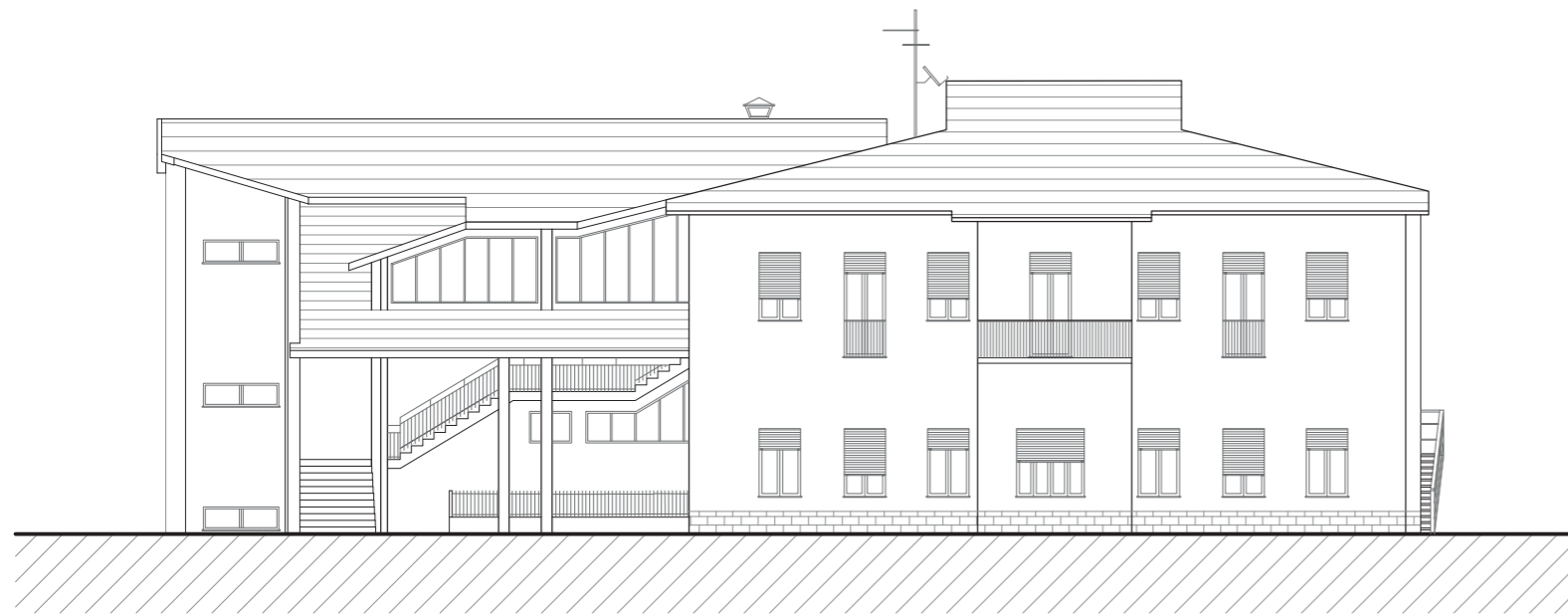
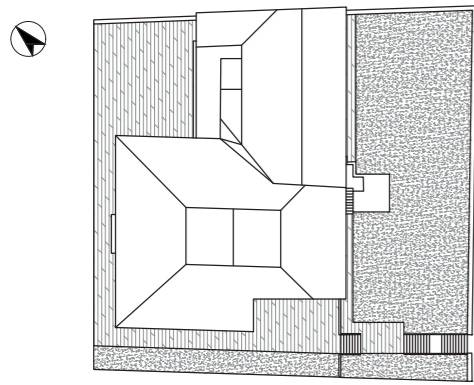


PIANTA PIANO TERRA

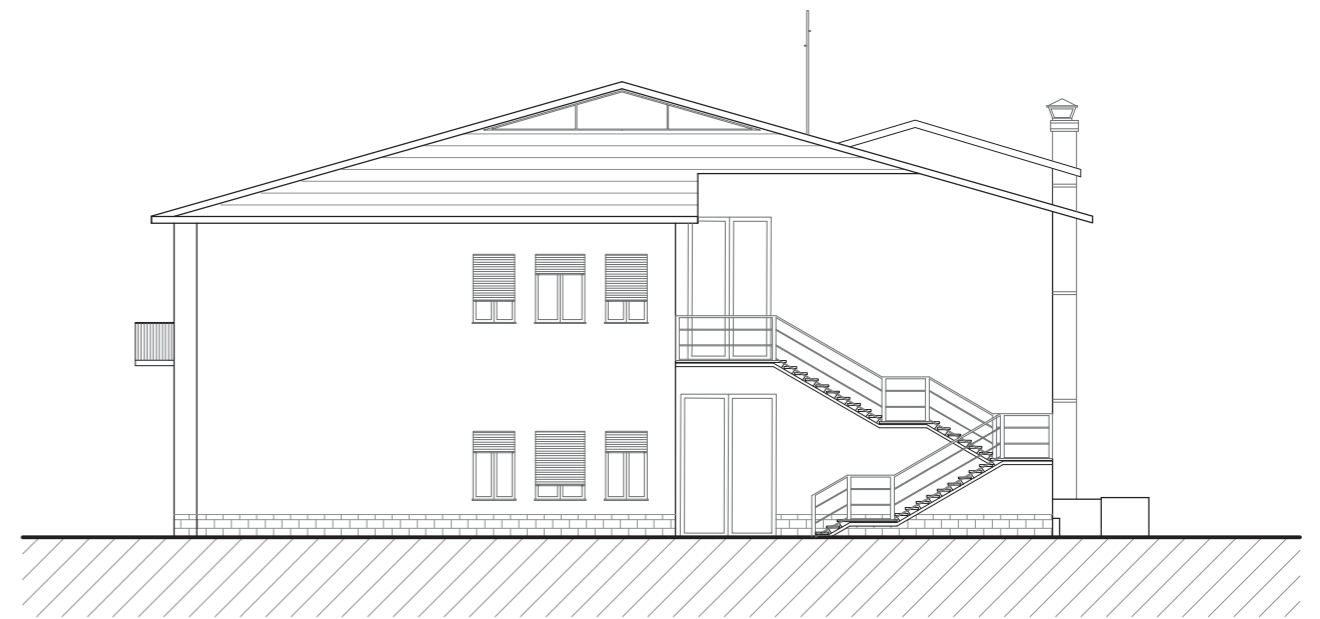


PIANTA PRIMO PIANO

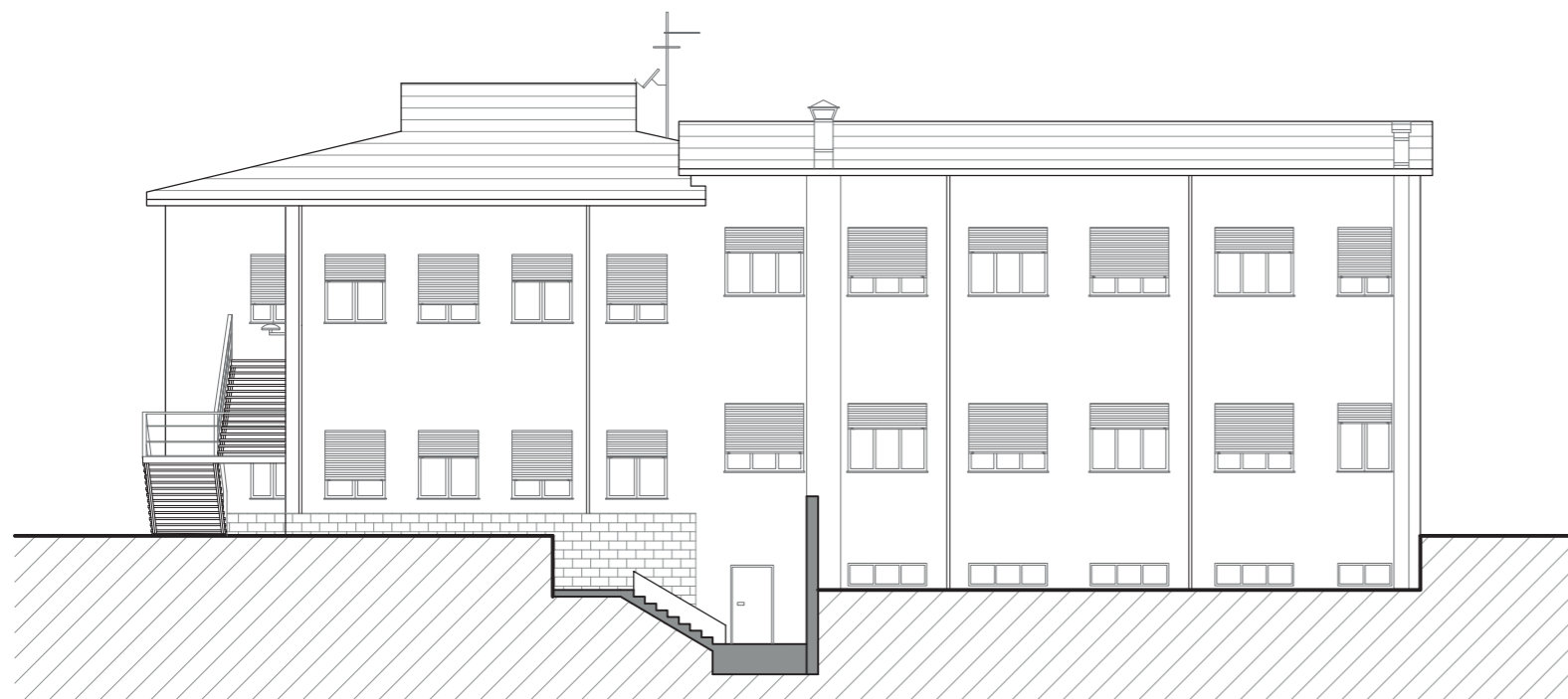




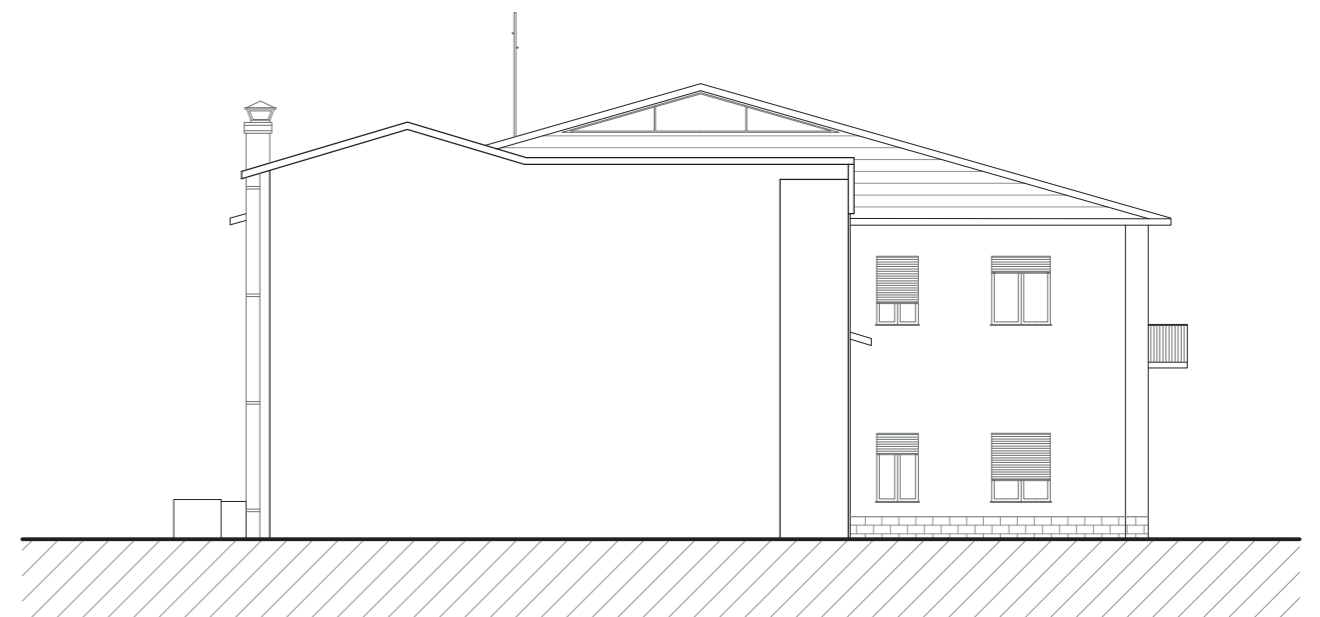
PROSPETTO NORD-OVEST



PROSPETTO SUD-OVEST



PROSPETTO SUD-EST

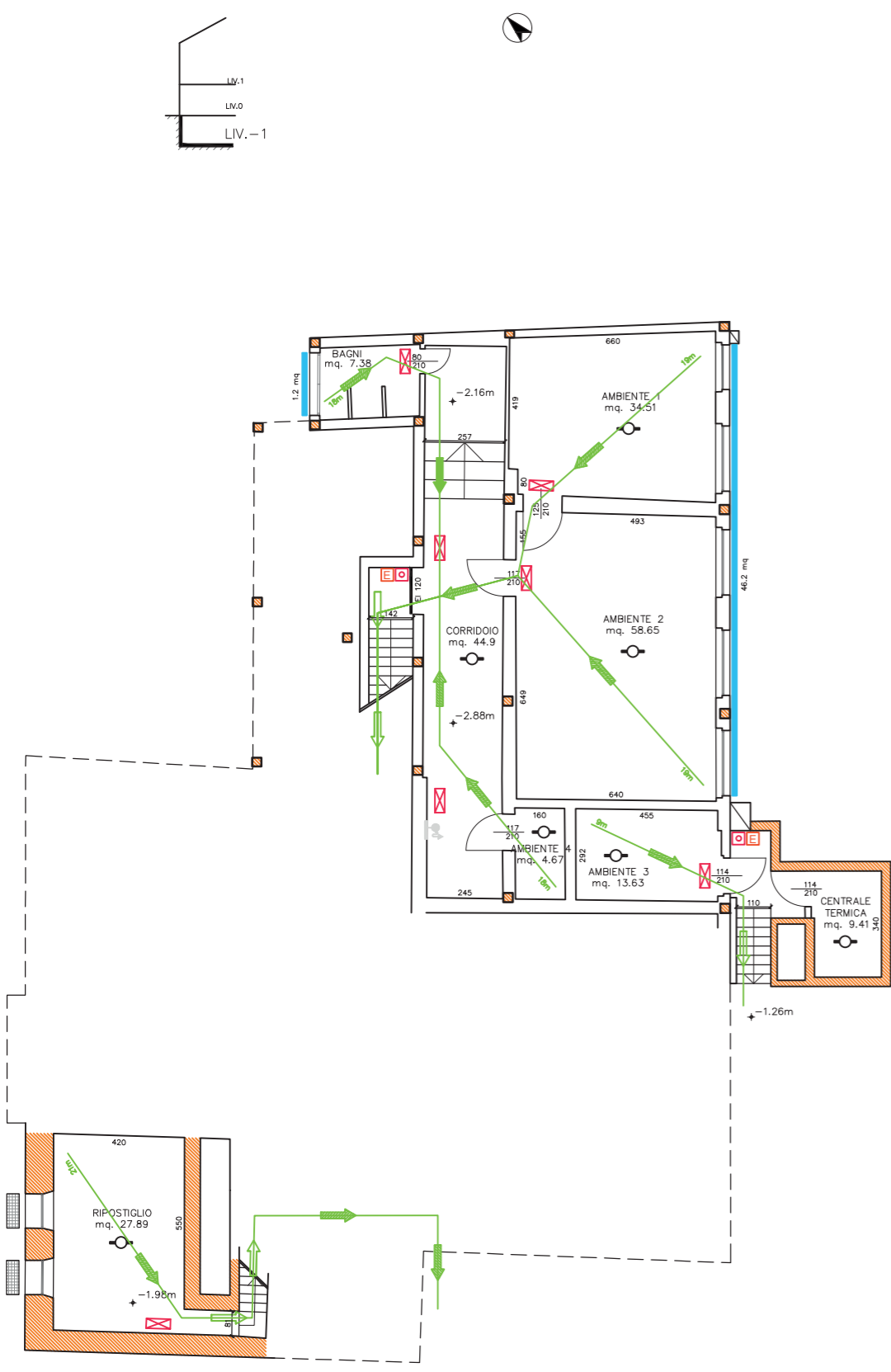
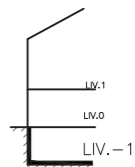


PROSPETTO NORD-EST

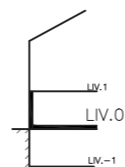
TAVOLA 6 - Piante: DM 03/08/2015  
soluzione conforme

scala 1:200

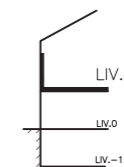
PIANTA PIANO INTERRATO



PIANTA PIANO TERRA



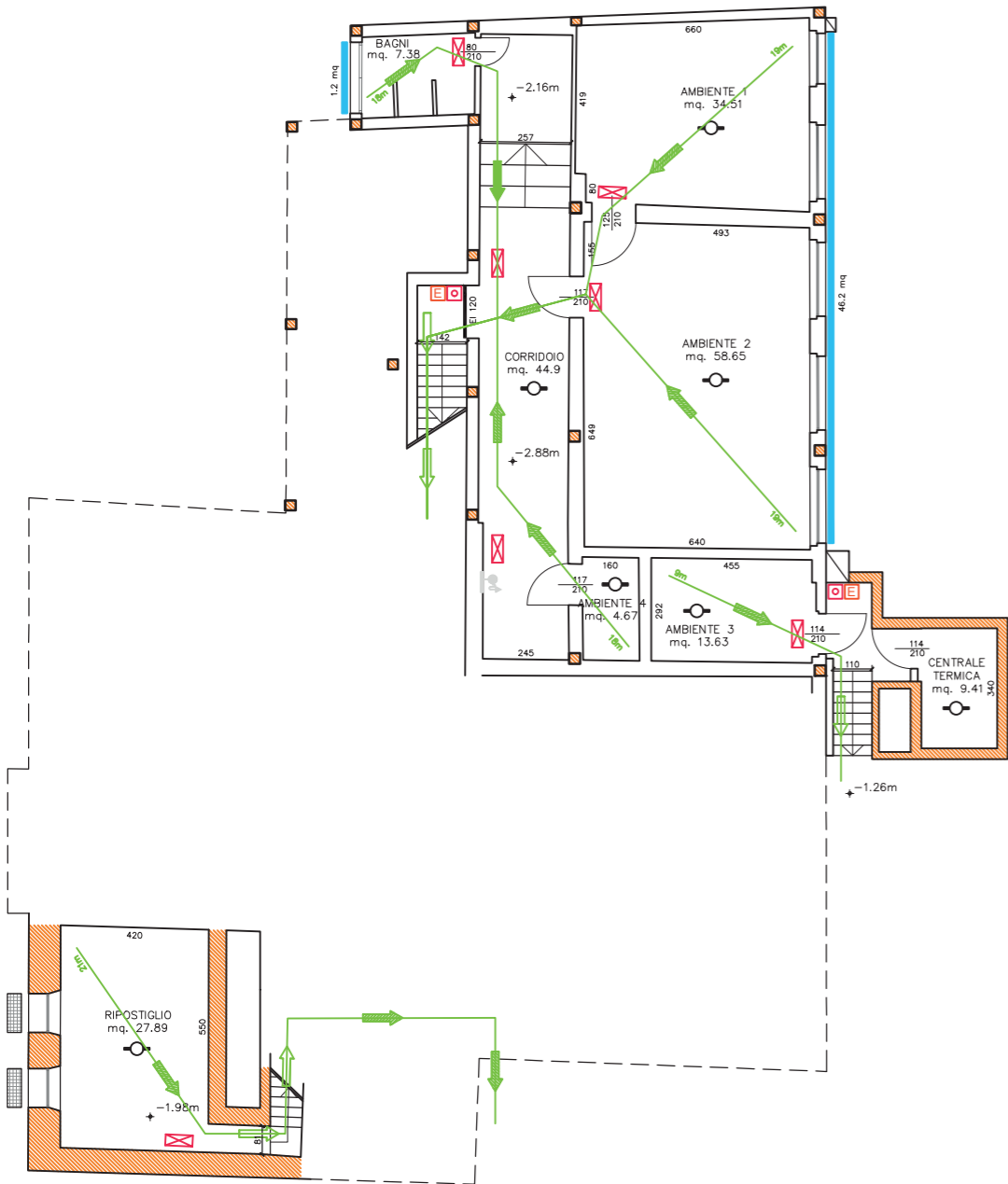
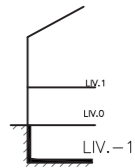
PIANTA PRIMO PIANO



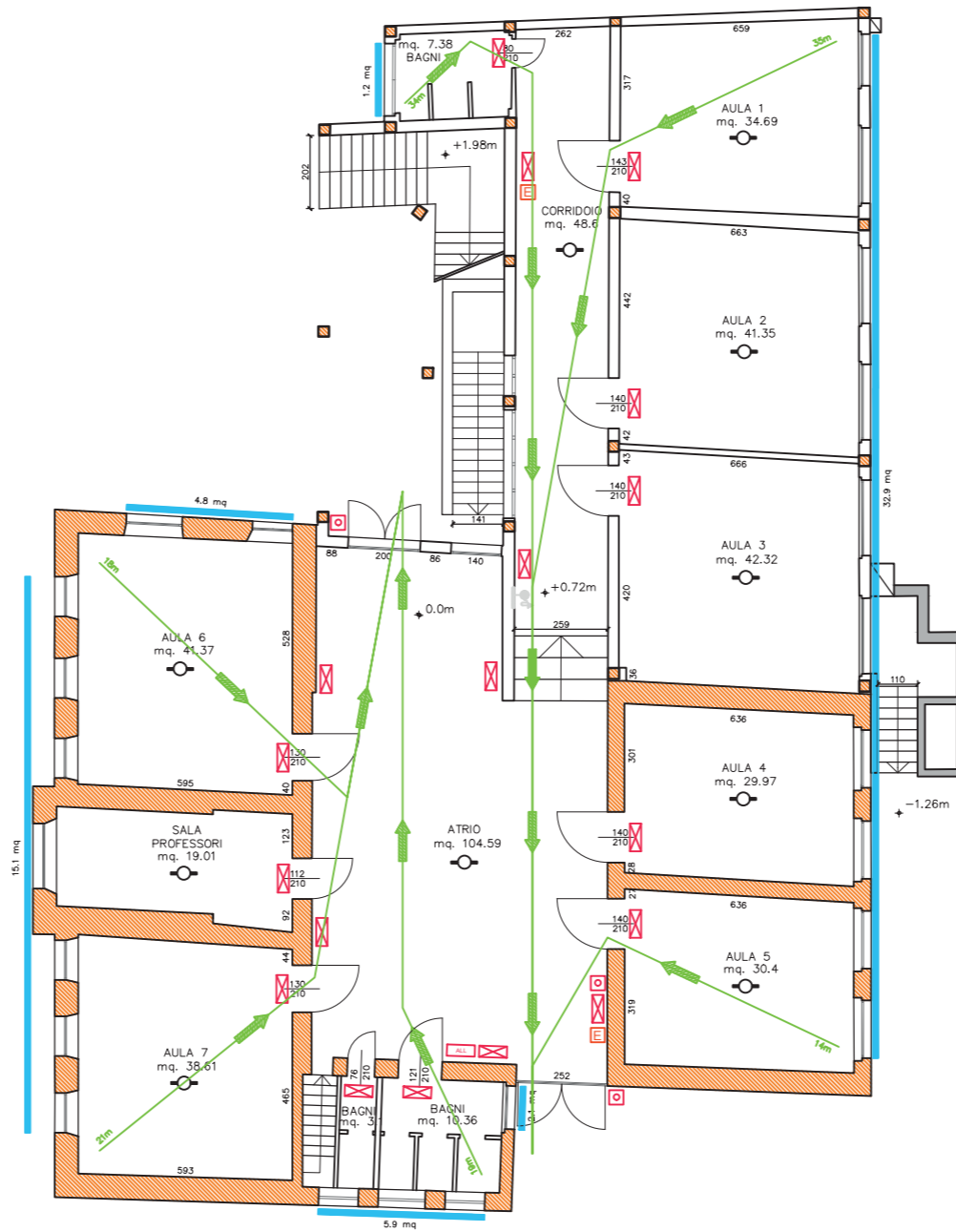
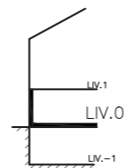
**TAVOLA 7 - Piante: DM 03/08/2015**  
**soluzione alternativa**

scala 1:200

PIANTA PIANO INTERRATO



PIANTA PIANO TERRA



PIANTA PRIMO PIANO

