

POLITECNICO DI TORINO
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile



**“STRUMENTI DI FIRE SAFETY ENGINEERING NELLA
PROGETTAZIONE ANTINCENDIO:
DAI MODELLI DI SIMULAZIONE DELL’ESODO ALLA
VIRTUAL REALITY”**

Relatore: Prof. Roberto Vancetti

Correlatore: Ing. Filippo Così

Candidato: Emiliano Cereda

Anno accademico 2018/2019

Ai nonni Remo e Rosetta.



Abstract

L'evoluzione delle tecnologie nel campo dell'ingegneria e della progettazione ha contribuito alla realizzazione di edifici caratterizzati da geometrie con gradi di complessità sempre più elevati, inoltre essendo il nostro Paese e non solo contraddistinto da una moltitudine di edifici di interesse storico, il rispetto delle regole tecniche in materia di prevenzione incendi risulta sempre più di complicata applicazione.

Il percorso di sviluppo nel settore della ricerca ha comportato numerose innovazioni nei metodi e approcci della prevenzione incendi. Quello a cui si sta assistendo è un graduale passaggio da metodi prevalentemente prescrittivi ad approcci di carattere prestazionale, in cui il progettista copre un ruolo fondamentale ed è nelle condizioni di governare la fase decisionale sulle misure antincendio da adottare al progetto e se necessario, con gli strumenti della FSE (Fire Safety Engineering) è in grado di dimostrarne l'efficienza. Aspetto fondamentale è la salvaguardia della vita, la quale viene valutata con i nuovi strumenti prestazionali mediante l'impiego di modelli di calcolo automatici. Questo elaborato focalizza la propria attenzione sulle tematiche legate all'esodo degli occupanti da un edificio in caso di incendio con un occhio di riguardo al tema dell'inclusione.

A partire da un caso studio, vengono quindi analizzati gli aspetti legati alla modellazione dello scenario all'interno dei software di simulazione di esodo. Ruolo principale è ricoperto dalle caratteristiche degli occupanti. Sebbene gli aspetti fisici e geometrici sono stati ben implementati all'interno delle equazioni di movimento, quelli comportamentali risultano più problematici da trattare, in quanto affetti da un'elevata aleatorietà. Nello studio delle dinamiche dell'esodo da un edificio quindi non è sufficiente basarsi solamente su modelli idraulici e razionali, ma è necessario tenere conto della quota irrazionale legata al comportamento ed ai fattori che lo influenzano, tramite modelli definiti "agent-based".

Un ulteriore obiettivo della ricerca è l'impiego della Virtual Reality come valore aggiunto al mondo dell'ingegneria antincendio. I vantaggi sono legati alla comprensione degli output delle simulazioni, e alla valutazione delle dinamiche di evacuazione, consentendo al soggetto una completa immersione all'interno dell'ambiente modellato.

Indice

ABSTRACT	I
INDICE	II
INDICE DELLE FIGURE	V
CAPITOLO 1 EVOLUZIONE DELLA NORMATIVA	1
1.1 SVILUPPO DEL QUADRO NORMATIVO IN MATERIA DI PREVENZIONE INCENDI	1
1.1.1 <i>Il codice di prevenzione incendi: D.M. 3/08/2015</i>	5
CAPITOLO 2 LA FIRE SAFETY ENGINEERING IN ITALIA	13
2.1 INTRODUZIONE AI CONCETTI	13
2.2 SEZIONE M DEL CODICE: METODI	15
CAPITOLO 3 IL TEMA DELL'ESODO NELLA PREVENZIONE INCENDI	19
3.1 EVOLUZIONE DEI METODI DI CALCOLO	19
3.2 L'ESODO PER LA SEZIONE S.4 DEL CODICE: STRATEGIE ANTINCENDIO	22
3.3 L'ESODO NELLA SEZIONE M	27
CAPITOLO 4 LA SIMULAZIONE DELL'ESODO	29
4.1 STORIA DEI MODELLI DI SIMULAZIONE DELL'ESODO	32
4.2 I MODELLI DI ESODO: ASPETTI GENERALI E CARATTERISTICHE	33
4.2.1 <i>Modelli fluidodinamici</i>	36
4.2.2 <i>Agent-based model</i>	36
4.2.3 <i>Social force model</i>	38
4.2.4 <i>Cellular automata model</i>	39
CAPITOLO 5 I SOFTWARE DI MODELLAZIONE DELL'ESODO	41
5.1 CLASSIFICAZIONE	42
5.2 PATHFINDER	45
CAPITOLO 6 CARATTERIZZAZIONE DEGLI OCCUPANTI	53
6.1 LE CARATTERISTICHE PRINCIPALI	54
6.2 INCLUSIONE: INDIVIDUAZIONE DEI PROFILI	55

6.2.1 Velocità.....	64
CAPITOLO 7 IL CASO STUDIO: LA EX-CASERMA – ATTIVITÀ UFFICI.....	71
7.1 INQUADRAMENTO GENERALE	72
7.2 PROGETTAZIONE DELL'ESODO SECONDO D.M. 3/08/2015	76
7.3 MODELLAZIONE DI ESODO: PATHFINDER®.....	87
7.3.1 Gestione di un modello complesso	87
7.3.2 Risultati delle simulazioni.....	104
7.3.3 Verifica della salvaguardia della vita.....	126
7.4 MODELLAZIONE DI ESODO: MASSMOTION®.....	140
7.4.1 Simulazione e risultati	148
7.5 CONFRONTO.....	149
CAPITOLO 8 IL TEMA DELL'INCLUSIONE NELLA MODELLAZIONE DELL'ESODO	153
8.1 PROFILI E PROCEDURE DI EVACUAZIONE.....	154
8.1.1 L'applicazione del metodo	155
8.1.2 La modellazione.....	156
8.1.3 La simulazione.....	159
CAPITOLO 9 LA REALTÀ VIRTUALE APPLICATA ALLA FIRE SAFETY ENGINEERING	167
9.1 REALTÀ VIRTUALE, REALTÀ AUMENTATA E REALTÀ MISTA	168
9.1.1 Introduzione	168
9.1.2 La Realtà Virtuale (VR).....	169
9.1.3 La Realtà Aumentata (AR)	169
9.1.4 La Realtà Mista (MR).....	170
9.2 STRUMENTI E TECNICHE VR	171
9.2.1 Oculus Rift	171
9.2.2 HTC Vive	172
9.2.3 Cyberith Virtualizer.....	172
9.3 APPLICAZIONI AL SETTORE DELL'INGEGNERIA	173
9.4 LA VR PER LA FIRE SAFETY ENGINEERING	173
9.4.1 Potenzialità la VR.....	174
9.4.2 Criticità.....	174
9.4.3 Strumenti e software utilizzati	175
9.5 L'APPLICAZIONE DI VR AD UN CASO STUDIO.....	176
9.5.1 Tecnologie e strumenti utilizzati	177

9.6 UNITY3D.....	178
9.6.1 Importazione del modello.....	181
9.6.2 Il movimento	182
9.6.3 Sviluppo della scena principale.....	184
9.6.4 Sviluppo delle scene di esodo.....	189
CAPITOLO 10 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	201
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	203

Indice delle figure

Figura 1. Struttura del Codice.	7
Figura 2. Metodologia di progettazione prestazionale contenuta del capitolo M1.	15
Figura 3. Caratteristiche di uno scenario.	16
Figura 4. Livelli di prestazione per l'esodo.	23
Figura 5. Schematizzazione del tempo RSET.	30
Figura 6. Rappresentazione del modello course network.	35
Figura 7. Rappresentazione del modello fine network.	36
Figura 8. Ambiente 3D e corrispondente griglia di celle.	40
Figura 9. Classificazione tratta da "A Review of Building Evacuation Models, 2 nd Edition".	45
Figura 10. Dimensioni per un occupante, tratta da [20].	50
Figura 11. Raccolta dei valori di velocità orizzontale.	69
Figura 12. Lato Nord.	75
Figura 13. Lato Sud.	75
Figura 14. Lato Est.	75
Figura 15. Lato Ovest.	75
Figura 16. Livello 03	88
Figura 17. Livello 02	88
Figura 18. Livello 01	89
Figura 19. Livello 00	89
Figura 20. Importazione del file FBX.	91
Figura 21. Risultato finale dell'importazione.	91
Figura 22. Estrazione delle stanze mediante il comando "Extract Room".	92
Figura 23. Inserimento dell'elemento "Stair".	93
Figura 24. Inserimento degli elementi "Doors".	93
Figura 25. Inserimento di un ascensore antincendio.	94
Figura 26. Risultato finale dopo l'inserimento di tutti gli elementi geometrici.	95
Figura 27. Inserimento degli occupanti.	95
Figura 28. Occupante generico	97
Figura 29. Disabile in sedia a rotelle (uso dell'ascensore antincendio non consentito).	97

Figura 30. Disabile in sedia a rotelle (uso dell'ascensore antincendio consentito).	97
Figura 31. Assistente del disabile.	98
Figura 32. Attribuzione di un Behavior ad ogni occupante.	100
Figura 33. Comportamento di un occupante in sedia a rotelle ubicato al livello 2 dell'edificio.	103
Figura 34. Comportamento di un occupante autonomo.	103
Figura 35. Avvio della simulazione.	104
Figura 36. Interfaccia grafica degli output.	105
Figura 37. Sezione al fine di visualizzare i LoS sulle scale.	106
Figura 38. Tipi di visualizzazione per gli occupanti.	107
Figura 39. Confronto dei tempi di esodo tra i 3 Scenari.	108
Figura 40. Scenario 1 – Grafico occupanti/tempo	109
Figura 41. Scenario 1 - Flusso dalle uscite	109
Figura 42. Scenario 2 – Grafico occupanti/tempo	109
Figura 43. Scenario 2 - Flusso dalle uscite	110
Figura 44. Scenario 3 – Grafico occupanti/tempo	110
Figura 45. Scenario 3- Flusso dalle uscite	110
Figura 46. Confronto dei valori di densità per la via di esodo verticale So2. Scenario 2 a sinistra e scenario 3 a destra.	119
<i>Figura 47. Rappresentazione del LoS per la scala So1</i>	124
Figura 48. Los (queuing) del vano scale No1 al piano primo [in alto] e dell'intero edificio [in basso].	125
Figura 49. Metodi di calcolo per ASET.	126
Figura 50. Auditorium	128
Figura 51. Posizionamento occupanti	129
Figura 52. Curve RHR.	130
Figura 53. Curva RHR di progetto	130
Figura 54. Visualizzazione delle isosuperfici.	131
Figura 55. Verifica della visibilità.	133
Figura 56. Esempio di .CSV esportato dal software.	134
Figura 57. Esecuzione della macro e generazione dei grafici.	134
Figura 58. Visibilità per l'ultimo occupante che utilizza US_01.	135
Figura 59. Visibilità per l'ultimo occupante che utilizza US_02.	135
Figura 60. FED per l'ultimo occupante che utilizza US_01.	135
Figura 61. FED per l'ultimo occupante che utilizza US_02.	136
Figura 62. Temperatura per l'ultimo occupante che utilizza US_01.	136
Figura 63. Temperatura per l'ultimo occupante che utilizza US_02.	136
Figura 64. Posizionamento del focolaio.	137

Figura 65. Porzione di edificio interessata dall'incendio.	138
Figura 66. Istante iniziale: la visibilità al piano terreno risulta già compromessa.	138
Figura 67. Istante in cui anche gli ultimi occupanti iniziano l'esodo.	139
Figura 68. Istante in cui anche gli ultimi occupanti dei piani superiori al terreno hanno abbandonato i locali.	139
Figura 69. Importazione del file FBX.	142
Figura 70. Generazione di pavimenti.	143
Figura 71. Esempio di creazione di "Link".	144
Figura 72. Creazione scale.	144
Figura 73. Prova di creazione di un ascensore antincendio.	144
Figura 74. Risultato finale.	145
Figura 75. Settaggio di un profilo.	146
Figura 76. Modello finale pronto per la simulazione.	148
Figura 77. Esempi di errori durante la modellazione.	149
Figura 78. Tempi di esodo	150
Figura 79. Pathfinder	151
Figura 80. MassMotion	151
Figura 81. Confronto occupanti/tempo	151
Figura 82. Suddivisione dell'edificio in settori.	156
Figura 83. Piano terra - Posizionamento occupanti.	156
Figura 84. Piano primo - Posizionamento occupanti.	157
Figura 85. Profilo del paziente in barella.	158
Figura 86. Profilo della persona con girello.	159
Figura 87. Profilo del paziente accompagnato da due assistenti.	159
Figura 88 Concetto di "virtuality continuum" in riferimento a "A taxonomy of mixed reality visual displays", P. Milgram, and F. Kishino, 1994	168
Figura 89 Oculus Rift	171
Figura 90 HTC Vive	172
Figura 91 Cyberith Virtualizer	172
Figura 92. Visualizzazione dei fumi tramite visore Oculus Rift.	175
Figura 93. Visualizzazione delle isosuperfici tramite visore Oculus Rift.	176
Figura 94. Interfaccia grafica di Unity3D	178
Figura 95. Esempio del contenuto di un "Inspector" per un arredo.	179
Figura 96. Modello BIM importato.	181
Figura 97. Prefab del "Player".	182
Figura 98. Contenuto del prefab "CameraRig".	183
Figura 99. Assegnazione di una Mesh Collider a ciascun elemento della scena.	183
Figura 100. Inserimento della Canvas all'interno del modello.	184

Figura 101. Creazione di un pulsante e associazione dello script.	186
Figura 102. Creazione del pulsante di chiusura dell'applicazione.	186
Figura 103. Esempio di settaggio di un video all'interno della Canvas.	188
Figura 104. Componenti del controller.	188
Figura 105. Risultato finale del pannello di selezione della scena.	189
Figura 106. Settaggio della Canvas.	190
Figura 107. Inserimento dello script all'interno della camera.	191
Figura 108. Creazione dell'animazione per una porta.	192
Figura 109. Assegnazione dell'animazione alla porta.	193
Figura 110. Inserimento dei fumi all'interno della scena.	194
Figura 111. Inserimento del focolaio all'interno della scena.	195
Figura 112. Inserimento dell'allarme antincendio.	195
Figura 113. Esportazione del file alembic da MassMotion.	196
Figura 114. Importazione della simulazione di esodo in Unity.	197
Figura 115. Creazione dell'applicazione.	197
Figura 116. Selezione della scena dal menu principale.	198
Figura 117. Esodo dal piano terzo.	198
Figura 118. Esodo dal piano secondo.	199
Figura 119. Test della segnaletica luminescente a pavimento.	199
Figura 120. Test della segnaletica luminescente posta perimetralmente alle porte di uscita.	199

CAPITOLO 1

EVOLUZIONE DELLA NORMATIVA

Il capitolo descrive come si è evoluta la normativa italiana in merito alla Prevenzione Incendi, fino all’emanazione del Testo Unico di Prevenzione Incendi, il D.M. 3 agosto 2015. Si presentano quindi i contenuti di quest’ultimo, evidenziandone le caratteristiche peculiari e le nuove metodologie introdotte.

1.1 Sviluppo del quadro normativo in materia di Prevenzione incendi

Come è contenuto nell’art. 2 del D.P.R del 29/07/1982 n.577, “Approvazione del regolamento concernente l’espletamento dei servizi di prevenzione e di vigilanza antincendio”: *La prevenzione incendi è la funzione di preminente interesse pubblico diretta a conseguire, secondo criteri applicativi uniformi sul territorio nazionale, gli obiettivi di sicurezza della vita umana, di incolumità delle persone e di tutela dei beni e dell’ambiente attraverso la promozione, lo studio, la predisposizione e la sperimentazione di norme, misure, provvedimenti, accorgimenti e modi di azione intesi ad evitare l’insorgenza di un incendio e degli eventi ad esso comunque connessi o a limitarne le conseguenze.*

La materia quindi entra in gioco in qualunque ambito in cui vi siano le condizioni da parte degli occupanti dell’esposizione al rischio di incendio. Inoltre la prevenzione incendi ha una grande rilevanza interdisciplinare, in quanto essa entra in gioco anche nel settore della sicurezza nei luoghi di lavoro, del controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose, dell’energia, o ancora dei prodotti da costruzione.

Se da un lato l’aspetto normativo fonda le sue radici a partire dal 1939, le procedure di prevenzione incendi hanno una storia più recente. Lo sviluppo economico ed industriale

avvenuto durante gli anni '60 ha portato alla necessità di avere a disposizione delle regolamentazioni che andassero a disciplinare e controllare le attività pericolose. Si può quindi affermare che sul contesto normativo e procedurale in Italia, come nel resto d'Europa ha avuto una notevole influenza la graduale mutazione che il mondo del lavoro ha subito in seguito al susseguirsi delle innovazioni tecnologiche e processi produttivi sempre più sofisticati. Col passare degli anni quindi le procedure ed i regolamenti hanno dovuto adattarsi ed adeguarsi a questi cambiamenti.

Di seguito si riportano le fasi più significative che hanno caratterizzato e plasmato negli anni questa disciplina.

Sebbene il concetto di "Prevenzione Incendi" appartiene ad una definizione coniata in tempi relativamente recenti (1982) essa fa riferimento a concetti risalenti al 1939. La regolamentazione nell'ambito dell'antincendio è stata introdotta nel nostro Paese con il **Regio Decreto legge** nel lontano 27 febbraio 1939. E' bene ricordare che proprio questo decreto istituisce il Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, che inizialmente era solamente concepito a livello provinciale. Esso era nato con la finalità di "tutelare la incolumità delle persone e la salvezza delle cose, mediante la prevenzione e l'estinzione degli incendi e l'apporto di servizi tecnici in genere, anche ai fini della protezione antiaerea".

Il decreto prevedeva il controllo di quei locali adibiti a depositi, industrie pericolose e pubblico spettacolo da parte dei VVF, i quali, dopo aver ispezionato l'attività emettevano la concessione della licenza di esercizio.

Con il **D.P.R. n. 547 del 27/04/1955** ("Norme per la prevenzione degli infortuni sul lavoro") riferito a tutte le attività in cui vi fossero stati addetti lavoratori subordinati. Il decreto prevedeva che per nuove costruzioni e nuovi impianti, i progetti dovessero essere sottoposti all'esame del Comando. In seguito a tale esame, a lavori ultimati, doveva essere richiesta la visita di collaudo. Quattro anni più tardi, nel 1959, il **D.P.R. n. 689 del 26/05/1959** conteneva indicazioni riguardo la determinazione delle aziende e lavorazioni soggette al controllo del Comando dei Vigili del Fuoco.

Con la **legge n.469 del 13/05/1961** si iniziano invece ad introdurre ed utilizzare terminologie che sono sopravvissute fino ad ora, si inizia a parlare di "aziende" e "lavorazioni soggette".

Successivamente, con la **legge n. 966 del 26/07/1965** istituì i primi obblighi in materia di prevenzione incendi. Sempre dalla stessa legge nasce il Certificato di Prevenzione Incendi (C.P.I.), venne quindi stilata una prima lista nella quale vennero classificate 100 attività soggette a precisi requisiti antincendio. Dal 1965 perciò si dovrà disporre di C.P.I. oltre che richiedere la visita di accertamento in merito alla rispondenza delle prescrizioni progettuali.

È uscito poi il **D.P.R. n. 577 16/02/1982**, il quale è una andava a perfezionare il precedente decreto del 1965 in riferimento alla determinazione delle attività soggette alle visite di

prevenzione incendi che diventarono 97 e vennero introdotte delle tempistiche per le visite. Decreto rimasto in vigore fino al 2015, quando venne sostituito dal D.P.R. n. 151.

Nel 1983 avvenne un evento che comportò un considerevole cambiamento nella prevenzione incendi. Il 13 febbraio di quell'anno infatti un incendio colpì il Cinema Statuto di Torino che fece perdere la vita a 64 persone. I gas tossici furono talmente rapidi nel provocare la morte che ogni sforzo fu vano. La prima reazione al catastrofico evento che colpì profondamente non solo la città ma l'intera Nazione fu quella da parte della magistratura di ricercare le cause, ma non solo, si mise in dubbio l'efficienza del sistema di controlli in vigore in quegli anni. Sebbene le attività soggette ai controlli risultavano ben identificate, tuttavia la procedura era quasi del tutto a carico dei funzionari dei Vigili del Fuoco, infatti vi era una significativa separazione di doveri fra privati e Pubblica Amministrazione. Di conseguenza quest'ultima era sottoposta ad un enorme mole di lavoro che portò ad una congestione dei controlli, riducendo l'efficienza di questi ultimi.

In riparo a queste imperfezioni, un anno dopo venne emanata la **legge n. 818 07/12/1984** (Nullaosta provvisorio per le attività soggette ai controlli di prevenzione incendi, modifica degli articoli 2 e 3 della legge 4 marzo 1982, n. 66, e norme integrative dell'ordinamento del Corpo nazionale dei vigili del fuoco). Con questa legge si regolamentava la figura del professionista "abilitato alla prevenzione incendi", figura che con l'evolversi del sistema normativo è stata sostituita dal "Professionista antincendio". Il N.O.P. (nulla osta provvisorio) veniva rilasciato per le attività prive di C.P.I in cambio della garanzia di adeguare l'attività per gli aspetti antincendio più urgenti, consentiva alle attività sorte prima del 10/12/1984 sprovviste di certificato di prevenzione incendi di proseguire l'esercizio dotandosi di un nulla osta provvisorio. La legge aveva l'obiettivo di incrementare il livello di responsabilità da parte dei professionisti. Questi infatti sarebbero stati soggetti a conseguenze di tipo amministrativo e penale; furono introdotte sanzioni penali a carico del titolare dell'attività, per omissione della richiesta di rilascio o rinnovo del C.P.I. o del N.O.P.. Le direttive in riferimento alle cosiddette "misure più urgenti ed essenziali di Prevenzione Incendi" vennero poi esplicitate qualche mese dopo con il **D.M. 08/03/1985**.

Alla fine degli anni '90, nacque il **D.P.R. n. 37 del 12/01/1998** con il fine di snellire ulteriormente l'attività amministrativa della prevenzione incendi. In particolare vennero stabilite nuove tempistiche di risposta da parte del Comando dei Vigili del Fuoco in merito all'esame di progetto. Venne anche introdotta la D.I.A. (Dichiarazione di inizio attività).

Col **D. Lgs. n.139 08/03/2006** il Corpo nazionale dei vigili del fuoco, assume il ruolo di struttura dello Stato ad ordinamento civile, incardinata nel Ministero dell'Interno Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del soccorso pubblico e della difesa civile. In questo decreto viene abrogata la legge n.818 del 1984 che aveva introdotto la definizione di professionista antincendio.

Un passo fondamentale nella normativa nazionale si ha con il **D.M. 09/05/2007** (“Direttive per l’attuazione dell’approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio”). Con esso si introduce per la prima volta in Italia il concetto di approccio ingegneristico nella prevenzione incendi. Tale decreto destabilizzò in quel periodo il mondo normativo dell’antincendio. Problemi soprattutto di carattere interpretativo in quanto con esso si gettavano le basi per una nuova metodologia fino ad allora sconosciuta alla maggior parte dei professionisti del settore. Di conseguenza furono necessarie diverse linee guida che andassero ad esplicitare alcuni procedimenti e le loro modalità di applicazione.

Con lo scopo di semplificare e snellire l’azione amministrativa è nato il **D.P.R.n.151 del 01/08/2011**. Il regolamento è caratterizzato dai seguenti cambiamenti: semplificazione delle procedure, abolizione del CPI, introduzione della SCIA e della asseverazione da parte del professionista antincendio, riclassificazione delle attività soggette al controllo, che da 97 diventano 80.

Fino ad allora le vecchie procedure avevano i seguenti limiti: non esisteva proporzionalità fra il livello di rischio di un’attività soggetta e gli adempimenti di prevenzione incendi, la verifica e controllo (esame progetto e sopralluogo di verifica) veniva eseguito indistintamente su tutte le 97 attività, inoltre il vecchio decreto del 1982 non era mai stato aggiornato. In accordo con quanto detto ad inizio capitolo, è già stato citato quanto sia importante a livello normativo il requisito di aggiornabilità e flessibilità per far in modo che si adattino sempre all’evoluzione tecnologica e sociale. Basti pensare ad attività con un livello di rischio elevato ma che non erano contenute nel vecchio decreto, come le aerostazioni o ancora le metropolitane.

Il D.P.R. 151/2011 introduce il principio di proporzionalità con il quale gli adempimenti amministrativi sono stati differenziati in funzione delle caratteristiche (dimensioni, settore in cui si opera). Con l’adozione di questo principio e con la conseguente attribuzione di livelli di rischio ad ogni tipologia di attività si è ottimizzato il lavoro dei funzionari dei VVF, i quali a partire da questo decreto hanno potuto eseguire i controlli in tempi più brevi e concentrarli su quelle attività che veramente necessitano di un sistema di prevenzione incendi più complesso. Il principio suddivide ciascuna attività in tre categorie (A,B,C) distinte in funzione delle dimensioni dell’impresa, al settore di attività, alla esistenza o meno di specifiche regole tecniche e alla tutela della pubblica incolumità. Ogni categoria possiede iter procedurali e amministrativi differenti. Con l’entrata in vigore del D.P.R. 151/2011 il Certificato di Prevenzione Incendi non è più un provvedimento finale di un procedimento amministrativo, ma ha assunto la valenza di “Attestato del Rispetto delle prescrizioni previste dalla normativa di prevenzione incendi e della sussistenza dei requisiti di sicurezza antincendio”. Introduce inoltre la SCIA (Segnalazione Certificata di Inizio Attività).

Dopo aver realizzato delle semplificazioni riguardanti i procedimenti amministrativi, nel 2015 si è voluto aggiornare e semplificare anche le norme tecniche di prevenzione incendi, con la

volontà di renderle oltre che più semplici, anche più sostenibili con lo sviluppo produttivo e sociale del nostro Paese. Così è nato con il **D.M. 03/08/2015** (“Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi”), il Codice di Prevenzione Incendi. Testo che verrà descritto al paragrafo successivo.

1.1.1 Il codice di prevenzione incendi: D.M. 3/08/2015

L'esigenza di dare ai progettisti un unico strumento attraverso il quale applicare i metodi di prevenzione incendi ha portato alla nascita del D.M. 03/08/2015. Tale decreto si pone l'obiettivo di semplificare e razionalizzare l'attuale corpo normativo relativo alla prevenzione degli incendi in accordo con la volontà di snellire le procedure e le tecniche iniziata con il D.P.R. 151 2011. Il documento si propone di sostituire le varie regole tecniche emanate negli anni precedenti e permette di applicare ad attività soggette ai controlli di prevenzione incendi un nuovo approccio metodologico, che meglio si adatta al progresso tecnologico e agli standard internazionali attuali. Il concetto sul quale è stato elaborato è quello di disporre di un testo modulare e sempre aggiornato nel tempo in funzione dell'evoluzione delle tecnologie adottate nel settore.

Il fine è quello di razionalizzare tutte le norme tecniche del settore. Da qui nasce l'idea del Codice come “testo unico”, in linea con ciò che stava avvenendo con la semplificazione amministrativa (con l'introduzione della SCIA).

Obiettivi

Il normatore, nel confezionamento del Codice è stato guidato dai seguenti punti:

- Realizzare uno strumento che fosse di facile modificabilità e adattabilità a tutte le attività;
- Evitare la sovrapposizione di prescrizioni ovvero fornire una relazione matriciale. Non creare discordanze tra le varie singole prescrizioni;
- Armonizzare alcuni standard europei. Un esempio è rappresentato dal concetto di “modulo”. Gli studi sull'*esodo* presi come riferimento nelle vecchie normative risalgono agli anni '50, obsoleti se applicati al giorno d'oggi. Dunque altra caratteristica su cui ci si è focalizzati è stata la volontà di attribuire valenza scientifica nell'aggiornamento delle norme.

Da questi punti cardine, come detto è nato il Codice, il quale si basa su 8 principi e caratteristiche fondamentali. Come è riportato in *“La progettazione antincendio: Applicazioni pratiche nell'ambito del d.m. 3 agosto 2015 e s.m.i.”* edito dall'Inail: *“Il processo*

di semplificazione e di snellimento passa attraverso la responsabilizzazione del progettista - generalità, semplicità e flessibilità -, e il rinnovamento dell'approccio metodologico, più aderente al processo tecnologico - standardizzazione ed integrazione; contenuti basati sull'evidenza -, decisamente logico, con un'attenzione alle diverse disabilità - inclusione - e non più con approcci differenziati a seconda della tipologia di attività. L'iter logico sistematico è sintetizzato nell'insieme delle RTO - generalità -, applicabili a tutte le attività e le RTV applicabili a specifica attività o ambiti di essa. La struttura organizzativa siffatta risponde ai principi di modularità e aggiornabilità dichiarati".

È interessante notare come il tema dell'inclusione diventi parte integrante della progettazione antincendio, concetto che spesso risultava privo di attenzioni e mai approfondito in modo opportuno. Basti pensare ad ambienti come teatri o cinema, nei quali possono coesistere una gamma di tipologie occupanti. Il codice invece contiene particolari disposizioni soprattutto in merito alla progettazione dell'esodo.

Struttura

Il Codice, si suddivide in una Regola Tecnica Orizzontale (RTO) ed in molteplici Regole Tecniche Verticali (RTV) specifiche per ciascuna attività ed in continuo aggiornamento.

Si articola in 4 sezioni:

G – Generalità: contenente i principi fondamentali per la progettazione della sicurezza antincendio. Essi sono applicabili indistintamente alle diverse attività. In particolare fornisce termini e definizioni, e presenta le metodologie di progettazione antincendio. Definisce inoltre i profili di rischio delle attività e come vengono determinati.

S - Strategia antincendio: contiene indicazioni per ognuna delle dieci misure antincendio (strumenti di prevenzione, protezione e gestionali per la riduzione del rischio incendio), i criteri per l'attribuzione dei livelli di prestazione (I, II, III, ecc.) e la conseguente individuazione delle soluzioni progettuali. Per ciascun livello di prestazione sono specificate soluzioni conformi, ed eventualmente, soluzioni alternative.

La sezione S a sua volta si suddivide in: reazione al fuoco, resistenza al fuoco, compartimentazione, esodo (il quale verrà trattato nei capitoli successivi), gestione della sicurezza antincendio, controllo dell'incendio, rivelazione ed allarme, controllo di fumi e calore, operatività antincendio e sicurezza degli impianti tecnologici e di servizio.

V - Regole Tecniche Verticali (RTV): contiene le regole tecniche di prevenzione incendi applicabili a specifiche attività o ad ambiti parziali di esse, le cui misure tecniche previste sono aggiuntive o integrative a quelle generali previste nella sezione S.

La sezione V è in continuo aggiornamento, saranno inserite le nuove RTV per le attività non ancora presenti.

M – Metodi: contiene la descrizione delle metodologie progettuali. È in questa sezione che viene introdotta l'ingegneria antincendio. Mediante gli strumenti della Fire Safety Engineering è possibile eseguire una valutazione quantitativa del livello di sicurezza antincendio.

Con l'introduzione dell'ultima sezione descritta, ovvero la sezione M relativa ai metodi, muta il carattere prescrittivo in una normativa "semi-prescrittiva", in quanto sono previste soluzioni multiple. Questo è un rinnovamento storico nello scenario della Prevenzione incendi, poiché la valutazione del rischio e le relative soluzioni progettuali non sono più a carico del normatore, ma è il progettista che servendosi degli strumenti della Fire Safety Engineering assume un ruolo determinante nella progettazione della sicurezza antincendio.

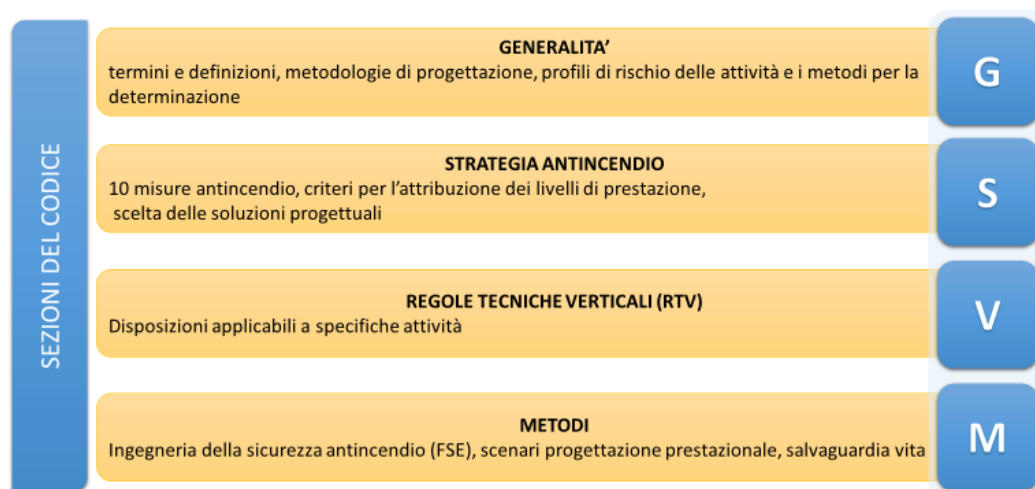


Figura 1. Struttura del Codice.

L'approccio alla sicurezza antincendio nel nostro Paese da pochi anni ha subito una notevole trasformazione di concetti e metodi. Fin dalla prima normativa in riferimento alla prevenzione incendi del 1955 (DPR 547/55) l'approccio utilizzato è stato quello *prescrittivo*, ovvero costituito da regole tecniche nelle quali sono riportate le misure da adottare al fine di ottenere la sicurezza antincendio e nel ricorso a strumenti di calcolo ordinari. Il concetto che sta alla base di tali norme riguarda la richiesta di ottenere il livello minimo di sicurezza fissato attraverso misure specificatamente prescrittive. Con l'evolversi delle conoscenze, si è creata la necessità di slegarsi da questo concetto al fine di ottenere uno strumento che si adatti ad ogni caso analizzato. In aiuto a questa esigenza viene in soccorso l'*approccio ingegneristico*, il quale, una volta stabilite le prestazioni da ottenere permette il raggiungimento di esse mediante varie applicazioni.

Questi nuovi concetti sono stati introdotti per la prima volta in Italia con il D.M. 9/05/2007 ed in seguito in modo ottimizzato nel C.P.I. 2015.

Approccio prescrittivo

Come precedentemente annunciato, questo approccio metodologico risulta essere rigido, in cui il legislatore che guida il progettista per mezzo di prescrizioni rigide e standard fissati a priori. Il progettista è tenuto ad osservare procedure e metodi di calcolo ben specificati e dettagliati aspetti costruttivi.

Se un tempo tale approccio poteva risultare efficiente dal punto di vista progettuale, poiché di facile utilizzo da parte del progettista, negli ultimi anni vi è stata un'inversione di pensiero, verso la necessità di utilizzare uno strumento che permetta una maggiore flessibilità, motivata soprattutto dal progresso tecnologico in tali ambiti.

La realizzazione di strutture sempre più distanti da quelle standard di un tempo, caratterizzate da geometrie e spazi complessi e di particolare rilevanza architettonica e costruttiva, ha reso quasi del tutto inutilizzabili le vecchie normative basate su approcci prestazionali, in quanto queste ultime non si adattano a situazioni peculiari del progetto in esame non essendo concepite per essi.

Approccio prestazionale

Il concetto che sta alla base di questa nuova metodologia è costituito dal fatto che in questo caso si vanno a definire delle prestazioni che la struttura deve essere in grado di raggiungere. Si distacca totalmente dal precedente metodo in quanto si focalizza su ciò che la struttura deve fare, piuttosto che come deve essere costruita, ovvero lavora in termini di finalità piuttosto che di mezzi.

Esso consente una valutazione quantitativa del livello di sicurezza antincendio rispetto a delle prefissate soglie prestazionali e con riferimento a scenari d'incendio precedentemente determinati dal professionista. In supporto a questo concetto il progettista dovrà fare uso di opportuni modelli di calcolo in grado di prevedere gli effetti di un determinato evento e delle rispettive misure adottate. In questo approccio risiedono numerosi vantaggi, a partire dalla elevata flessibilità e conseguente adattabilità a situazioni complesse fino ad arrivare ad un risparmio dal punto di vista economico nei materiali e nei costi di gestione.

Iter progettuale

Dopo averne descritto la struttura ed i principi che stanno alla base del Codice, si descrive ora la logica procedurale di utilizzo del testo unico.

Il procedimento metodologico è molto semplice ed è costituito da quattro fasi:

- 1) individuazione dei pericoli di incendio;
- 2) valutazione del rischio di incendio mediante i tre profili di rischio;
- 3) definizione delle misure antincendio e associazione di un livello di prestazione ad ognuna di esse;

- 4) adozione di soluzioni (conformi, alternative o in deroga) per ciascuna delle misure antincendio del Codice.

La valutazione del rischio avviene mediante l'associazione di un valore a ciascuno dei tre profili di rischio previsti dal Codice: R_{vita} , R_{beni} e $R_{ambiente}$. Per individuare i possibili pericoli di incendio, il progettista è tenuto ad indagare ad esempio sulla presenza di sostanze pericolose, impianti, particolari layout di produzione, ecc..

I tre profili sopra enunciati sono necessari al fine di guidare il progettista nell'attribuzione dei livelli di prestazione e di conseguenze le misure antincendio più idonee.

- R_{vita} : salvaguardia della vita umana;
- R_{beni} : salvaguardia dei beni economici;
- $R_{ambiente}$: tutela dell'ambiente.

Si può quindi affermare che l'approccio è di tipo semi-prestazionale, poiché la valutazione del rischio e la scelta delle misure da adottare non è svolta dal normatore, bensì è il progettista che valuta e determina quali siano le misure consone all'oggetto di studio.

Dopo aver effettuato una valutazione in merito al livello di rischio tramite i profili sopra citati il progettista deve individuare i livelli di prestazione per ogni misura antincendio prevista dal Codice in funzione degli obiettivi di sicurezza da raggiungere.

Per soddisfare le esigenze di ciascun livello di prestazione e di ciascuna misura antincendio sono consentite molteplici soluzioni. Di queste ultime il testo ne prevede tre tipologie differenti:

- soluzioni conformi;
- soluzioni alternative;
- soluzioni in deroga.

Le prime sono caratterizzate da quegli adempimenti che garantiscono immediatamente il soddisfacimento del livello di prestazione richiesto; per esse non è necessaria nessuna valutazione tecnica, ma sono di immediata applicazione e non sono oggetto di discussione.

Le soluzioni alternative sono una novità introdotta dal Codice e costituiscono quelle soluzioni per cui il progettista è chiamato a garantire il raggiungimento del livello prestazionale richiesto. La dimostrazione della loro efficacia deve essere svolta impiegando uno dei metodi ordinari previsti: utilizzo di normative o documenti tecnici di organismi europei o internazionali, applicazione di prodotti o di tecnologie innovative oppure i metodi dell'ingegneria della sicurezza antincendio seguendo le procedure contenute nella sezione M del Codice.

Le soluzioni in deroga invece entrano in gioco nel momento in cui non sia possibile l'utilizzo delle disposizioni previste per le soluzioni conformi o alternative. In questo caso il progettista dovrà avvalersi dei cosiddetti metodi avanzati di progettazione della sicurezza antincendio. Questi metodi possono essere: prove sperimentali approvate dal personale dei Vigili del fuoco,

analisi secondo un giudizio esperto oppure per mezzo dell'ingegneria della sicurezza antincendio già prevista anche per le soluzioni alternative, ma in questo caso egli non è vincolato nella scelta delle ipotesi e dei limiti secondo i contenuti della sezione M.

Confronto tra approccio prescrittivo e prestazionale

In breve si riportano in modo schematico le principali differenze tra i due approcci.

	Approccio	
	PRESCRITTIVO	PRESTAZIONALE
Valutazione del rischio	Svolta dal normatore sulla base di criteri di sicurezza di applicazione generale	Svolta dal progettista identificando: pericoli di incendio, condizioni ambientali, caratteristiche degli occupanti
Soluzioni	Conformi o in deroga	Individuate a valle degli obiettivi di sicurezza antincendio, dei livelli di prestazione richiesti, degli scenari di incendio e dell'applicazione di un adeguato modello di simulazione e verifica del raggiungimento dei livelli di prestazione
Semplicità di utilizzo	Semplice	Più complessa
Flessibilità	Rigida	Flessibile
Valutazione della sicurezza	Non quantitativa	Quantitativa
Risultati ottenuti	Più generali	Più aderenti
Costi	Non ottimizzati	Ottimizzati con la possibilità di valutare l'effetto sulla sicurezza complessiva delle singole misure previste

Tabella 1. Differenze tra approccio prescrittivo e prestazionale.

In definitiva si può affermare che l'approccio prestazionale non si occupa di verificare il rispetto di una norma nello specifico o di una probabilità di accadimento. Bensì il metodo suggerisce di definire lo scopo del progetto e gli obiettivi da conseguire, dopodiché si effettua la verifica sulla rispondenza dei requisiti stabiliti. La valutazione del livello di sicurezza è di tipo quantitativo, infatti si quantificano gli effetti causati dall'incendio e poi viene valutato il

livello di sicurezza rispetto a delle soglie prestazionali prefissate. Tali soglie riguardano parametri caratteristici come la temperatura, il grado di visibilità o l'altezza libera dai fumi. Sebbene il metodo tradizionale sia caratterizzato da un semplice utilizzo sia da parte del progettista, sia da parte dei funzionari dei Vigili del Fuoco, non è in grado di adattarsi al meglio a progetti caratterizzati da un elevato grado di complessità, perciò impongono notevoli vincoli e limitazioni per alcune opere. È da preferire in questo caso l'approccio ingegneristico che è in grado di adattarsi al meglio al progetto senza far scendere a troppi compromessi il progettista. Inoltre in riferimento ai costi, nonostante questa metodologie sia più onerosa dal punto di vista economico poiché richiede anche l'impiego di software di simulazione e progettisti preparati in tale ambito, può portare significanti risparmi sui costi degli interventi, in quanto si va a valutare l'effetto delle singole misure previste sulla sicurezza complessiva. La possibilità di quantificazione e valutazione con modelli di calcolo dell'effetto di ogni misura è un grande pregio rispetto all'approccio prescrittivo.

CAPITOLO 2

LA FIRE SAFETY ENGINEERING IN ITALIA

Questo capitolo ha lo scopo di introdurre e descrivere i concetti e i metodi legati alla *Fire Safety Engineering* contenuti nella sezione M del nuovo Testo Unico di Prevenzione Incendi, il D.M. 3 Agosto 2015. Verranno esposte ed analizzate le parti di cui la sezione “Metodi” è composta.

2.1 Introduzione ai concetti

La cosiddetta “Ingegneria della sicurezza antincendio” è una disciplina le cui caratteristiche e definizioni sono state presentate per la prima volta nel documento ISO/TR 13387 del 1999. Esistono diversi sinonimi di tale terminologia a seconda del documento in cui è trattata, se ne riportano alcuni: *approccio ingegneristico, metodo prestazionale, ingegneria della sicurezza antincendio, Fire Safety Engineering, approccio Performance Based*.

Essa si può definire come la materia che tramite metodi scientifici guida il progettista nella scelta delle misure di sicurezza più adeguate e finalizzate alla protezione delle persone, dei beni e dell'ambiente dagli effetti dell'incendio.

In particolare la normativa ISO/TR13387 fornisce il seguente enunciato per descrivere la metodologia prestazionale:

“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 percorso di sviluppo nel settore della prevenzione incendi avvenuto in un primo momento principalmente nel mondo anglosassone e poi in una fase successiva in tutti i Paesi ha indirizzato i legislatori verso metodi basati su "approcci prestazionali", dotati di una maggiore flessibilità, nonché sotto certi punti di vista, anche di una notevole ottimizzazione del progetto da parte del progettista antincendio.

L'aspetto scientifico precedentemente citato è dovuto al fatto che possono essere svolte simulazioni di incendio con metodi di calcolo, in modo da avere un'idea abbastanza precisa e reale di ciò che accade in un ambiente quando al suo interno si verifica un incendio. I risultati delle simulazioni, rappresentano uno strumento per il progettista che permette di capire esattamente, quanto tempo hanno a disposizione le persone per fuggire da un edificio e quanto la struttura sia in grado di resistere e garantire le sue funzionalità. Nell'approccio tradizionale questo calcolo è sostituito da valutazioni generali, che si adattano ad intere classi di edifici senza fare particolari distinzioni in funzione della geometria o dell'attività annessa.

In Italia si inizia a parlare di Fire Safety Engineering con l'art. 1 del **D.M. 9 maggio 2007** (*"Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio"*) in alternativa a quanto previsto dal decreto del Ministro dell'interno 4 maggio 1998, per le soluzioni in Deroga e confermato dal Codice di Prevenzione Incendi.

Esso era applicabile in alternativa alla metodologia vigente in due casi, ovvero:

- Per la richiesta di deroga, individuando delle misure di sicurezza equivalenti;
- Per determinare le migliori misure da adottare al fine dell'ottenimento del C.P.I. nel caso in cui l'attività analizzata non sia regolata da specifiche disposizioni.

Il D.M. sopra citato però non conteneva alcuna indicazione riguardo al numero di scenari da prevedere, quali modelli automatici concessi e come validarli, non conteneva alcuna informazione sui valori numerici da assumere per i livelli di prestazione ed inoltre non forniva alcuna informazione riguardo la progettazione dell'esodo. Per risolvere questa inadempienza il documento suggeriva di attingere i valori mancanti in letteratura, indicando le norme ISO/TR e British Standard di riferimento, ovvero la ISO/TR 13387 e la BS7974. La principale conseguenza dell'incompletezza del D.M. del 2009 è stata quella della del suo scarso utilizzo da parte dei progettisti.

L'apertura al largo impiego dell'approccio ingegneristico nella prevenzione incendi ed il conseguente passaggio da un approccio prescrittivo ad uno prestazionale (o semi-prestazionale) è avvenuto grazie all'entrata in vigore, nel Novembre 2015, del nuovo testo unico di prevenzione incendi: il **D.M. 3 agosto 2015**.

Nel paragrafo successivo verranno esplicitati i contenuti riguardanti il capitolo M del testo sopracitato, saranno quindi descritti i metodi di progettazione antincendio prestazionale impiegati per la tesi nei capitoli successivi.

2.2 Sezione M del codice: metodi

La sezione M, del Codice di Prevenzione Incendi ha lo scopo di esplicitare le fasi principali della metodologia fino alla trattazione degli aspetti più tecnici. La sezione si suddivide in tre parti: M1, M2, M3. Di seguito si descrivono brevemente i contenuti dei tre capitoli.

Il **capitolo M1** contiene le indicazioni da seguire riguardo l'iter procedurale da seguire al fine di stabilire le soluzioni idonee utilizzando la FSE.

Il **capitolo M2** fornisce indicazioni per l'applicazione del metodo, individua gli scenari di progetto da impiegare per l'analisi quantitativa.

Il **capitolo M3** invece contiene informazioni in riferimento alla salvaguardia della vita.

La metodologia descritta nel capitolo **M1** si suddivide in due fasi: una fase di analisi preliminare ed una seconda fase di analisi quantitativa. Nella prima si definisce l'individuazione delle condizioni più rappresentative di rischio dell'attività e i livelli di prestazione cui riferirsi in funzione agli obiettivi di sicurezza da perseguire. Nella seconda sono contenuti i calcoli degli effetti dell'incendio in base agli obiettivi stabiliti nella fase precedente, dopodiché si confrontano quindi i risultati ottenuti con i livelli di prestazione precedentemente individuati.



Figura 2. Metodologia di progettazione prestazionale contenuta del capitolo M1.

Nella prima fase, si definiscono gli scopi della progettazione, esplicitando i possibili elementi critici presenti, vincoli di progetto, condizioni al contorno, caratteristiche degli occupanti e si evidenziano le eventuali difformità rispetto le norme vigenti, infine si dovrà motivare l'impiego

della Fire Safety Engineering nella progettazione. In seguito occorre specificare gli obiettivi di sicurezza antincendio. Tali obiettivi sono necessari al fine di stabilire le soglie di prestazione e possono essere molteplici (ad esempio: evitare danni al di fuori dell'edificio, minimizzare la propagazione da un compartimento, ridurre i danni ad impianti, ecc...). Una volta definiti gli obiettivi occorre tradurli in livelli di prestazione, ovvero attribuire ad essi dei valori numerici (quantitativi). L'ultima sottofase dell'analisi preliminare consiste nell'individuazione degli scenari di progetto ed è descritta nell'apposito capitolo **M2**. Essa contiene le procedure per identificare, selezionare e quantificare gli scenari di incendio e si compone di 3 sottofasi.

Nella sottofase di "Identificazione", per definire i potenziali scenari possibili, il professionista deve prevedere tutte le condizioni di esercizio dell'attività plausibili che possono verificarsi. In tal proposito è utile costruire un albero degli eventi, ovvero uno strumento che individua ed esamina qualitativamente le varie opzioni oppure riferirsi ad indagini storiche.

Lo scenario viene descritto mediante le 3 caratteristiche fondamentali, che sono: **attività, tipo di incendio e tipologia di occupanti**.



Figura 3. Caratteristiche di uno scenario.

Nella sottofase di "Selezione" degli scenari d'incendio di progetto si effettua una scrematura degli scenari precedentemente individuati. Il criterio che si adotta in questo passo è di ridurli al numero minimo possibile facendo attenzione che gli scenari prescelti abbiano un livello di rischio non inferiore a quello di tutti gli scenari.

Nell'ultima sottofase, il professionista associa alla descrizione qualitativa precedentemente svolta, una valenza quantitativa. Si introducono quindi i parametri numerici da inserire negli input delle modellazioni. Questi dati sono riferiti alle 3 caratteristiche sopra citate (attività, incendio e occupanti). Nel primo step il professionista antincendio è chiamato ad elaborare le soluzioni progettuali in merito all'attività analizzata, esse devono essere congruenti con le finalità definite nelle fasi precedenti. Dopodiché si calcolano gli effetti dei singoli scenari per ogni soluzione elaborata.

Per calcolare e descrivere l'evoluzione dell'incendio e gli effetti su strutture, occupanti e ambiente occorre far uso di opportuni modelli di calcolo analitici o numerici. Una volta ottenuti i dati di output si verifica il rispetto delle soglie di prestazione prefissate per le

soluzioni adottate e per ciascun scenario di progetto ipotizzato. Infine si seleziona la soluzione più idonea tra quelle che hanno restituito un risultato positivo dalle verifiche.

L'ultimo capitolo della sezione M, il cap. **M3**, tratta la salvaguardia della vita e si tratta della parte che più interessa l'analisi e le metodologie utilizzate in questa tesi. In particolare affronta lo studio dell'esodo dal punto di vista dell'approccio ingegneristico. In breve si può dire che mentre le regole tecniche standard trattano l'esodo in funzione di elementi fisico-geometrici in riferimento ai moduli di uscita, la progettazione prestazionale dell'esodo invece considera gli aspetti comportamentali ed ambientali oltre quelli puramente geometrici, ovvero tiene conto della presenza o meno di fumi e degli effetti in generale dell'incendio.

Il metodo prestazionale consiste nella verifica in termini di tempo che il tempo disponibile per l'esodo (ASET) sia maggiore del tempo richiesto per l'esodo (RSET) in riferimento a tutti gli occupanti della struttura analizzata. La trattazione di queste tematiche verrà affrontata in modo più approfondito nel successivo capitolo ad esse dedicato.

CAPITOLO 3

IL TEMA DELL'ESODO NELLA PREVENZIONE INCENDI

Dopo aver parlato dell'evoluzione dei metodi di prevenzione incendi avvenuta negli ultimi anni e dell'avvento della Fire Safety Engineering nel nostro Paese, questo capitolo si propone di trattare e descrivere le tematiche legate al concetto di esodo. Verranno quindi analizzati gli aspetti peculiari della progettazione dell'evacuazione da un edificio in riferimento alle normative vigenti. Queste ultime sono attualmente in continuo aggiornamento, basti pensare all'imminente revisione del Codice di Prevenzione Incendi che a breve verrà rilasciata, in cui proprio la sezione riguardante l'esodo è tra le tematiche oggetto di aggiornamenti. L'approccio metodologico riguardo tale componente del mondo della sicurezza antincendio ha subito diverse innovazioni, complice anche il grande avanzamento tecnologico a cui si è assistito nell'ultimo decennio. Esso infatti, come si vedrà è un argomento molto impattante e sotto certi aspetti vincolante nella prevenzione incendi, nonché della sicurezza in generale. L'intensificazione della consapevolezza dell'importanza che il tema dell'esodo possiede ha perciò indotto i normatori di tutto il mondo a collocare il tema dell'esodo al centro della progettazione.

Verranno quindi analizzati i motivi e le dinamiche per i quali la corretta ed ottimizzata progettazione dell'esodo esercita un'azione determinante sull'intero progetto.

3.1 Evoluzione dei metodi di calcolo

L'evoluzione storica in riferimento dello studio dell'esodo dagli edifici ha, nel nostro Paese una storia tutto sommato recente. Infatti le prime disposizioni riguardo le norme sulla sicurezza risalgono agli anni '50 del ventesimo secolo. Se in Italia il livello di conoscenze in questo

ambito alla metà del secolo scorso risultava essere abbastanza scarsa, negli Stati Uniti, grazie agli studi svolti dalla National Fire Protection Association (NFPE) la ricerca era già in stato avanzato, in quanto la costruzione dei primi edifici alti ha creato la necessità di avere a disposizione una regolamentazione antincendio opportunamente dettagliata, che tenesse dunque in considerazione anche i tempi di esodo dalle strutture. Pertanto la base di partenza della maggior parte delle normative antincendio in Europa e nel Mondo sono state proprio le regolamentazioni statunitensi.

Con il passare degli anni e degli studi in merito, i concetti di esodo e la loro trattazione sono variati. Un primo approccio, risalente al 1913, proposto proprio dalla NFPE è stato quello di dimensionare le vie d'esodo in funzione alla rispettiva "capacità", riferita agli occupanti presenti sul piano analizzato e legata alla condizione che tali individui potessero trovare rifugio nelle vie di esodo. Ciò comporta che la larghezza delle rampe di ogni singolo piano doveva essere tale da contenere il numero di persone previsto sul piano stesso.

Da queste analisi si definì la dimensione di riferimento per la larghezza di ogni persona pari a 22 pollici (55,88 cm), basandosi sul fatto che gli occupanti dovevano rimanere in piedi ed affiancati su ogni gradino della scala. Si può osservare come questo valore sia molto vicino ai 60 cm che in seguito vennero usati per indicare il valore di un "modulo". Successivamente, dopo ulteriori valutazioni, nel 1927 la larghezza minima delle vie di esodo venne portata a 44 pollici (111,76 cm). Ciò comportò avere delle dimensioni molto impegnative rispetto le precedenti, perciò dal 1935 (*"Design and construction of building exits"*) si cercò la possibilità di adottare misure meno problematiche. Questa riduzione è stata realizzata mediante l'introduzione del **metodo di flusso**, in sostituzione a quello **capacitivo**. Questo approccio si basa sulla correlazione tra larghezza del percorso e velocità degli occupanti.

Il modello ebbe poi diverse modifiche: al momento della sua introduzione fu stabilito un flusso di 45 persone al minuto per 22 pollici di larghezza nelle scale e di 60 persone al minuto per 22 pollici di larghezza nelle vie di uscita. L'approccio si diffuse in breve in ulteriori Paesi, e ciò comportò ulteriori studi in merito. Da questi ultimi venne stabilito che in presenza di densità maggiori di 1 persona/m² la velocità di flusso decresce (fino a 26 persone/min per 22").

Dopo gli anni '50 le misure sicurezza dell'esodo in caso di incendio sono circa rimaste invariate. L'approccio seguito è sempre stato quello dell'individuazione di una larghezza minima, che in funzione della normativa e del Paese ha assunto valori differenti, ma tutti all'incirca pari a 110 cm. Per quanto concerne invece il numero di uscite minimo si sono assunti valori proporzionali all'affollamento.

Di seguito si fa un breve sunto dell'evoluzione del quadro normativo italiano ed internazionale in merito alla progettazione dell'esodo.

La prima norma tecnica risale al 1905 ed adottava un *modello a corsie*, il quale presenta ad oggi innumerevoli difetti: esso non considera il fenomeno della riduzione della larghezza

efficace delle vie di esodo introdotto nel 1971 e prevede l'impiego di regole empiriche (non ammissibile se confrontate con i metodi quantitativi $ASET > RSET$). Altro fattore penalizzante al giorno d'oggi consiste nel fatto che questo approccio non è inclusivo e non prende in considerazione quella parte di popolazione con delle disabilità. Concetto che è stato introdotto per la prima volta nell'ambito normativo italiano a cavallo tra la fine degli anni '60 e gli inizi degli anni '70. Dopodiché nel 1951 viene emanata la Circolare n.16, che normava l'esodo nei luoghi di pubblico spettacolo. Nel 1971 viene superato definitivamente il concetto di modello a corsie. Poi nel 1986 viene pubblicato "*Introduzione alla prevenzione incendi*" di A. Cascarino. L'elaborato introduceva un nuovo metodo per il calcolo dei sistemi di vie d'esodo basato su un modello matematico che analizzava il flusso delle persone attraverso varchi in un determinato tempo. Il modello è definito "**capacitivo**", il quale, a prescindere dalla tipologia delle persone e dal tasso di crescita dell'incendio si riferisce ad un tempo d'esodo di un secondo. In questi anni quindi si è assistito ad un passaggio dal modello capacitato a quello di flusso, il quale dà la possibilità ai progettisti di considerare le caratteristiche ed esigenze delle persone aventi capacità motorie differenti.

Negli anni successivi il mondo della ricerca, ha generato nuovi modelli interpretativi del fenomeno, i quali hanno portato alla rivisitazione dei metodi di calcolo e di progettazione dell'esodo.

In particolare con la graduale migrazione da parte delle normative da un approccio prescrittivo ad uno più prestazionale avvenuta nell'ultimo decennio è cambiato anche il modo di concepire il sistema d'esodo in tutte le sue sfaccettature.

Di seguito si riportano i principali approcci utilizzati nella progettazione dell'esodo, a partire dal vecchio metodo basato sui "moduli" agli approcci semi-prestazionale e prestazionale inseriti previsti dal D.M. 3 Agosto 2015.

Il vecchio concetto basato sui moduli e capacità di deflusso

Il metodo tradizionale è stato studiato e descritto da A. Cascarino ed i suoi concetti sono stati introdotti per la prima volta nell'ambito normativo italiano con la circolare n°16 del 15 febbraio 1951 "*Norme di sicurezza per la costruzione, l'esercizio e la vigilanza dei teatri, cinematografi e altri locali di spettacolo in genere*". Tale modello come già detto è ormai superato, basti pensare che si basa ancora sul vecchio modello a corsie risalente al 1905.

Il termine "capacitivo" deriva dal fatto che utilizza metodi capacitivi (di calcolo o grafici). Esso utilizza il modello di evacuazione totale, ovvero ipotizzando l'esodo contemporaneo di tutti i piani di un edificio. Il modello suddivide le fasi di esodo in tre periodi: il *primo stadio*, che è il movimento delle persone da un compartimento fino alle uscite dello stesso (es. corridoi); il *secondo stadio* è il movimento della folla dalle uscite del compartimento fino alle uscite esterne; il *terzo stadio* è l'allontanamento delle persone dalle uscite dell'edificio fino a luoghi

distanti dalla zona pericolosa. Il modello capacitivo prende come riferimento il secondo stadio al fine di dimensionare le vie di uscita.

3.2 L'esodo per la sezione S.4 del Codice: strategie antincendio

Il C.P.I. ha ripreso e riorganizzato tutti i vari aspetti della prevenzione incendi. Un argomento che invece è stato oggetto di una vera ritrattazione è stato l'esodo. Infatti la progettazione del sistema d'esodo, la cui finalità è quella di assicurare che tutti gli occupanti dell'attività siano in grado di raggiungere o permanere in un luogo sicuro, a prescindere dall'intervento dei Vigili del fuoco è stata rivista completamente seguendo i criteri più all'avanguardia in questo campo. L'innovazione in questo campo è stata il risultato di grossi passi avanti nella ricerca scientifica europea e mondiale. Il Codice elabora e riorganizza la valutazione di tutti i requisiti, con l'obiettivo di allinearsi con le regole tecniche europee attualmente in vigore. Il carattere innovativo della sezione S.4 è legata al fatto che risulta essere forse l'argomento in cui il carattere semi-prestazionale della norma comporta enormi benefici ed in cui la maggiore flessibilità si manifesta in modo evidente. Oltre alle normali procedure di esodo (simultaneo e progressivo), sono state introdotte due ulteriori possibilità: l'esodo per fasi e la protezione sul posto. In particolare il capitolo G (Generalità) descrive le procedure di esodo come segue:

- esodo simultaneo: *modalità di esodo che prevede lo spostamento contemporaneo degli occupanti fino a luogo sicuro; (esempio: edifici semplici)*
- esodo per fasi: *modalità di esodo di 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; (esempio: edifici alti, centri commerciali, ecc..)*
- esodo orizzontale progressivo: *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; (esempio: ospedali)*
- protezione sul posto: *modalità di esodo che prevede la protezione degli occupanti nel compartimento in cui si trovano. (esempio: centri commerciali, ecc..)*

La migliore adattabilità è altresì dovuta dal fatto che le distanze per l'esodo vengono determinate considerando molteplici fattori. Alcuni di essi sono: le caratteristiche degli occupanti, vengono infatti considerate sia le condizioni fisiche sia quelle comportamentali; la presenza di persone con disabilità, la familiarità con l'edificio, lo stato di veglia, le caratteristiche dell'affollamento e le relative velocità; si tiene anche conto delle caratteristiche del fabbricato, ovvero altezza, estensione, tipologia di compartimentazione, l'ubicazione delle vie di esodo e la loro dimensione; le regole tengono anche conto della tipologia di impianti di protezione attiva e attrezzature presenti.

Elemento caratterizzante il Codice di prevenzione incendi è l'obiettivo di garantire la sicurezza degli occupanti. Per ottenere ciò è prevista l'adozione di un insieme di misure antincendio calibrate in funzione del profilo di rischio dell'attività in esame.

Verranno ora descritte le peculiarità e il procedimento di progettazione dell'esodo contenuto nel testo unico.

Il Codice in riferimento all'obiettivo di permettere agli occupanti di raggiungere o permanere in luogo sicuro, prevede due livelli di prestazione, che si possono definire statico e dinamico.

- *Sistema di esodo statico*: consiste nella protezione sul posto, ovvero gli individui vengono protetti nella porzione di fabbricato in cui si trovano;
- *Sistema di esodo dinamico*: prevede l'allontanamento del luogo in cui si trovano al fine di raggiungere un luogo sicuro.

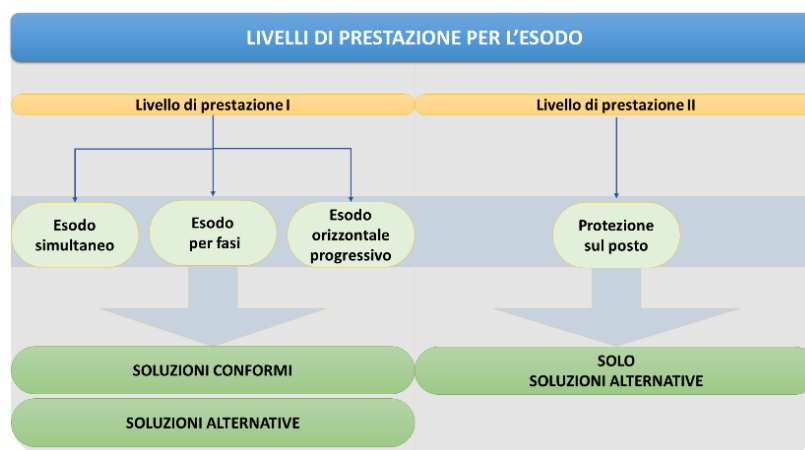


Figura 4. Livelli di prestazione per l'esodo.

Se per il secondo livello sono previste soluzioni conformi o alternative, per il primo vi sono solo soluzioni alternative. Questo poiché una soluzione conforme “preconfezionata” in questo caso risulterebbe incompleta, troppo complessa, e non generale, basti osservare all'esteso campo di applicazione della RTO. Perderebbe così la sua efficienza nel garantire i principi di sostenibilità e di generalità nella sua applicazione.

Dati di input

I dati di ingresso sono il profilo di rischio R_{vita} e il valore di **affollamento** previsto. Il profilo R_{vita} a sua volta dipende da due fattori che verranno descritti nel sotto capitolo successivo.

Profilo di rischio: R_{VITA}

Il profilo R_{vita} da prendere in considerazione come dato di ingresso nella progettazione è quello più gravoso ai fini dell'esodo tra quelli identificati per ogni compartimento presente. La loro determinazione è descritta nel capitolo G.3 "*Determinazione dei profili di rischio delle attività*".

Il profilo R_{vita} riguarda la salvaguardia della vita umana e costituisce insieme al R_{beni} e al $R_{ambiente}$ i tre profili di rischio necessari alla descrizione del rischio di incendio dell'attività con la differenza che questi ultimi vengono calcolati in riferimento all'intera attività.

Il calcolo del R_{vita} è funzione di due fattori e viene determinato tramite combinazione di essi:

- δ_{occ} : caratteristiche degli occupanti del compartimento analizzato;
- δ_{α} : velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio; essa è riferita al tempo t_{α} , impiegato dalla potenza termica per raggiungere il valore di 1 MW.

Il δ_{occ} si suddivide in 5 classi: A,B,C,D,E; tra le caratteristiche cosiddette prevalenti degli occupanti si tiene conto dello stato di veglia, della familiarità o meno con l'edificio, se sono degenti di ospedale o sono in stato di transito (ad esempio in aeroporti o stazioni).

Per quanto riguarda invece il δ_{α} , essa è suddivisa in 4 classi: 1,2,3,4. In funzione della tipologia di materiali presenti si ha quindi una velocità di crescita dell'incendio più o meno rapida. Per alcune attività soggette il Codice fornisce già dei valori minimi per questo parametro.

Affollamento

Il secondo parametro di ingresso per la progettazione dell'esodo è il valore di affollamento. Esso va calcolato per ogni compartimento e può essere determinato in vari modi, sempre in funzione della densità di affollamento. Quest'ultima può essere reperita in due modi differenti: per mezzo dei criteri citati nella tabella S.4-6 del Codice, nella quale vengono riportate o le densità di affollamento specifiche per ogni attività, oppure tramite criteri per la determinazione, come ad esempio il numero di posti a sedere per le aule scolastiche o ancora 2 persone per ogni veicolo per le autorimesse. Ulteriori indicazioni possono essere contenute nelle relative RTV di ogni attività. In alternativa il responsabile dell'attività può dichiarare affollamenti inferiori impegnandosi a far rispettare tale limite durante l'esercizio della propria attività.

Progettazione dell'esodo

Per quando riguarda la determinazione dei valori idonei di larghezza e lunghezza di esodo il Codice ha completamente rinnovato le procedure di calcolo ed i fondamenti sui quali il metodo si basa. Questo cambiamento è stato svolto con la prospettiva di ottenere uno strumento che valorizzi le scelte del progettista e le specifiche misure antincendio adottate. Infatti non si fa più riferimento al modello “a corsie” anche chiamato “a moduli” ma il Codice impiega il metodo “a misure unitarie”. Con esso la larghezza della via d’esodo è dimensionata in funzione del numero di occupanti che la impiegano ed espressa in mm/persona.

Larghezza minima delle vie d'esodo orizzontali

Per dimensionare le porte, i corridoi, le uscite si fa riferimento alla seguente formula:

$$L_O = L_U \cdot n_O \quad [\text{mm}]$$

dove:

L_O larghezza minima delle vie d'esodo orizzontali [mm]

L_U larghezza unitaria per le vie d'esodo orizzontali [mm/persona]

n_O numero totale degli occupanti che impiegano tale via d'esodo orizzontale

Se con le vecchie normative la larghezza minima da rispettare era fissata pari a 1200 mm ora si è portato tale valore a 900 mm, inoltre vi è la possibilità di individuare delle vie d’esodo indipendenti tramite la regola della “corda tesa” con angolo minimo pari a 45°.

Larghezza minima delle vie d'esodo verticali

Per quanti riguarda invece la larghezza minima per le vie d’esodo verticali il calcolo si svolge in modo differente a seconda della tipologia di procedura di esodo prevista.

In particolare nel caso di esodo simultaneo si ha:

$$L_V = L_U \cdot n_V \quad [\text{mm}]$$

dove:

L_V larghezza minima della via d'esodo verticale [mm]

L_U larghezza [mm/persona]

n_V numero totale degli occupanti che impiegano tale via d'esodo verticale, provenienti da tutti i piani serviti

Per l'esodo per fasi invece il codice indica che: *le vie d'esodo verticali devono essere in grado di consentire l'evacuazione degli occupanti dei piani durante ciascuna fase.*

Larghezza minima delle uscite finali

$$L_F = \sum_i L_{O,i} + \sum_j L_{V,j}$$

dove:

L_F larghezza minima dell'uscita finale [mm]

$L_{O,i}$ larghezza della i-esima via d'esodo orizzontale che adduce all'uscita finale [mm]

$L_{V,j}$ larghezza della j-esima via d'esodo verticale che adduce all'uscita finale [mm]

Carattere inclusivo

Il codice inoltre include nella progettazione dei sistemi d'esodo anche quelle persone con disabilità e prevede che nel caso in cui nell'attività analizzata vi sia la possibilità di presenza non occasionale di occupanti con disabilità è opportuno predisporre almeno una misura tra la predisposizione di spazi calmi e un esodo orizzontale progressivo.

Determinazione della massima lunghezza delle vie d'esodo

Le massime lunghezze consentite per le vie d'esodo e degli eventuali corridoi ciechi vengono individuate dal codice mediante la tabella S.4-10 in funzione del profilo R_{vita} .

Grazie all'introduzione delle misure antincendio aggiuntive il progettista può incrementare le lunghezze massime consentite e può ridurre le larghezze minime per l'esodo. Ciò costituisce un grande valore aggiunto alla progettazione antincendio per il professionista che può adattare al meglio le misure adottate in funzione delle caratteristiche peculiari del fabbricato.

Come già esplicitato nel Capitolo 2 le soluzioni previste dal Codice si suddividono in: conformi, alternative ed in deroga.

Sebbene il testo fornisca numerose disposizioni possibili ai fini di soddisfare gli obiettivi ed il livello di prestazione richiesto, tuttavia vi sono alcune circostanze in cui queste soluzioni non risultano ottimali, e non riescono a garantire il raggiungimento del livello necessario per cause dovute ad esempio alla complessa geometria della struttura, o ancora ai vincoli di tipo storico a cui l'edificio potrebbe essere soggetto. Per soddisfare queste necessità viene in aiuto la Fire Safety Engineering le cui procedure e metodi sono contenuti nella sezione M del Codice e verranno descritti nel capitolo successivo.

3.3 L'esodo nella sezione M

Come detto nel capitolo precedente, nel caso in cui il progettista non sia nelle condizioni di impiegare le soluzioni conformi previste dal Codice, ma debba adottare soluzioni alternative, dovrà fare riferimento alla sezione M. Nei capitoli M1, M2, M3 sono descritte le procedure, i metodi ed i limiti che devono essere osservati.

L'obiettivo alla base della progettazione prestazionale è la salvaguardia della vita (life safety). In particolare il progettista deve garantire che la totalità degli occupanti dell'attività raggiungano o permangano in un luogo sicuro in modo che durante l'esodo non vengano esposti in modo eccessivo ai prodotti dell'incendio. Inoltre un ulteriore obiettivo che può essere previsto dal progettista è quello di garantire la possibilità di operare in sicurezza alle squadre di soccorso.

Il concetto di salvaguardia della vita ripreso dal codice e le relative indicazioni sull'evacuazione dagli edifici deriva da ISO/TR 13387-1:1999. La International Organisation for Standardisation infatti contiene nella Parte 8 informazioni in riferimento al comportamento, alla posizione e le condizioni degli occupanti.

Successivamente sono state rilasciate due normative in merito alla life safety, che sono la ISO 13571:2007 (Life-threatening components of fire – Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data) e la ISO/TR 16738:2009 (Fire-safety engineering – Technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people). A loro volta, per molti dei parametri adottati, queste norme fanno riferimento alle British Standard, poiché il mondo anglosassone è stato uno dei primi a sviluppare queste tecniche. Nello specifico si fa riferimento alla BS 7974.

Sebbene la condizione migliore accada nel caso in cui il sistema d'esodo è in grado di assicurare agli occupanti di raggiungere il luogo sicuro senza nemmeno accorgersi degli sviluppi dell'incendio, tuttavia non in tutti i casi risulta realizzabile. Si introduce quindi un nuovo criterio di valutazione, basato sulla disuguaglianza $ASET > RSET$.

Con **ASET** (available safe escape time) si indica il tempo disponibile, ovvero il tempo fino a cui la struttura è in grado di garantire l'esodo degli occupanti senza alterare le condizioni ambientali in modo significativo.

Il tempo **RSET** (required safe escape time), la cui metodologia di calcolo viene esplicitata nel Capitolo 4, rappresenta invece il tempo richiesto affinché tutti gli occupanti abbiano evacuato l'edificio, ovvero il tempo necessario per l'esodo.

Viene quindi definito il margine di sicurezza t_{marg} come la differenza: $ASET - RSET$. Il D.M. 3/08/2015 prevede che il valore di tale parametro si assuma: $t_{\text{marg}} \geq 100\% \cdot RSET$. Tuttavia è ammesso che quest'ultimo parametro possa assumere altri valori, in funzione del livello odi affidabilità dei dati di input, arrivando fino ad assumere $t_{\text{marg}} \geq 10\% \cdot RSET$.

I fattori sopra descritti vengono calcolati con strumenti differenti. I valori di ASET si determinano in funzione di analisi fluidodinamiche, ovvero si indaga l'evoluzione dell'incendio ed i relativi, fattori rappresentativi quali temperatura, visibilità e concentrazione di agenti tossici. RSET viene invece determinato mediante l'utilizzo di appositi software di simulazione di esodo. L'efficacia e l'affidabilità di questi metodi sono fortemente correlate con la variabilità ed incertezza dei parametri di input richiesti dalla modellazione. Questi aspetti legati ai modelli di simulazione verranno affrontati nel capitolo successivo.

CAPITOLO 4

LA SIMULAZIONE DELL'ESODO

Il graduale abbandono della progettazione prescrittiva, e con l'affermarsi nel mondo della progettazione della filosofia del performance-based design, il progetto si focalizza sulle "prestazioni", così si è concretizzata la necessità di garantire la salvaguardia della vita, ciò ha comportato la necessità da parte dei progettisti di avere a disposizione dei modelli di evacuazione. Il *performance-based design* (PBD) si basa sul concetto che qualunque misura antincendio possa essere impiegata nel progetto purché sia adeguata al fine di permettere un adeguato livello di sicurezza. Su questi principi si basa quindi la Fire Safety Engineering il cui scopo principale è quello di garantire all'occupante di evacuare l'edificio nei tempi necessari in condizioni accettabili.

Questi tempi vengono calcolati secondo il criterio di comparazione tra i parametri ASET e RSET già descritti nel capitolo precedente. SET esprime il tempo nel quale permangono le condizioni ambientali tali da non compromettere l'esodo degli occupanti. Il calcolo di ASET può essere svolto secondo vari metodi, tra cui approcci matematici e calcoli mediante analisi fluidodinamiche computazionali tramite motori di calcolo FDS, in quanto riguardano le dinamiche di sviluppo dell'incendio e dei suoi prodotti. Esso dipende dalle interazioni tra occupanti, incendio ed ambiente. Analogamente per la determinazione di RSET possono essere adottati vari strumenti caratterizzati ognuno da un grado di complessità differente.

Il tempo richiesto per permettere l'evacuazione in sicurezza dall'edificio è formato dalla sommatoria di più fattori, ognuno dei quali associato ad una ben precisa circostanza durante le fasi dell'esodo. RSET comprende l'intervallo di tempo che si interpone tra l'innescio dell'incendio fino al momento in cui tutti gli occupanti dell'edificio hanno evacuato lo stesso raggiungendo un luogo sicuro. Il rapporto tecnico **ISO/TR 16738:2009** lo definisce come segue:

$$RSET = \Delta t_{det} + \Delta t_a + \Delta t_{pre} + \Delta t_{trav}$$

in cui:

Δt_{det} : è il tempo di rivelazione (“*detenction time*”);

Δt_a : tempo di allarme generale (“*alarm time*”);

Δt_{pre} : tempo di pre-movimento (“*pre-movement time*”);

Δt_{trav} : tempo di movimento (“*travel time*”).

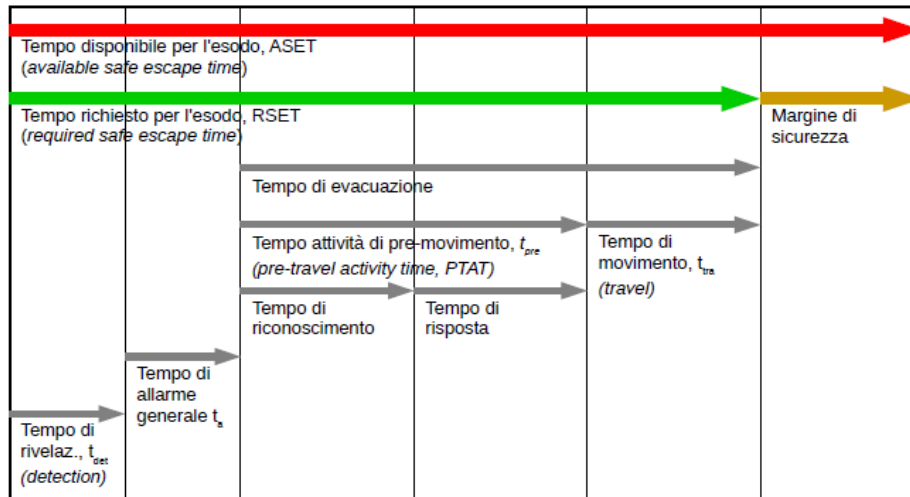


Figura 5. Schematizzazione del tempo RSET.

A influenzare il valore di RSET intervengono diversi fattori, come le caratteristiche estrinseche ed intrinseche degli occupanti, le relative capacità cognitive, sensoriali e motorie, le modalità di rivelazione incendio ed allarme, le misure di progettazione di esodo previste. Per questo motivo è necessario che il progettista sviluppi l'opportuno scenario di progetto che meglio si adatta al caso in esame.

Tempo di rivelazione

È il tempo necessario al sistema di rivelazione automatico per accorgersi dell'incendio. È fortemente influenzato dal tipo di sistema di rivelazione impiegato (se automatico, o manuale) e dal tipo di scenario di incendio. La sezione M del codice prevede un suo calcolo sia in maniera analitica che attraverso un'opportuna modellazione numerica attraverso un software validato degli scenari d'incendio e del sistema di rivelazione.

Tempo di allarme generale

È l'intervallo di tempo che intercorre tra la rivelazione dell'incendio e la diffusione dell'informazione agli occupanti. Le casistiche che possono verificarsi sono principalmente due:

- se la rivelazione attiva direttamente l'allarme;
- se la rivelazione allerta una centrale di gestione dell'emergenza che verifica l'evento ed attiva poi l'allarme manuale.

Nel primo caso il tempo di allarme generale sarà nullo, mentre nel secondo caso sarà a discrezione del progettista. Nel caso in cui si trattino edifici caratterizzati da un elevato grado di complessità occorre considerare che la modalità di allarme può essere diversificata.

Tempo di pre-movimento

È il tempo interposto tra l'istante in cui viene percepito l'allarme e l'istante in cui il primo occupante si muove verso l'uscita. Rappresenta il tempo necessario agli occupanti per svolgere una serie di attività nella fase precedente l'esodo vero e proprio.

Questa componente è composta dal tempo di riconoscimento e tempo di risposta ed è l'addendo che richiede più attenzione per la sua determinazione, in quanto contraddistinto da una elevata complessità legata al fatto che è influenzato da diversi fattori. È un tempo fortemente condizionato dal tipo di occupanti, dallo stato di veglia e dal livello di familiarità con l'edificio. Durante il tempo di riconoscimento gli occupanti continuano le attività che stavano svolgendo, finché riconoscono l'esigenza di rispondere all'allarme. Nel tempo di risposta gli occupanti cessano le loro attività e si dedicano a lasciare la struttura. Lo scenario di progetto incide sul valore di Δt_{pre} in modo importante.

Tempo di movimento

È il tempo necessario agli occupanti per raggiungere un luogo sicuro dal termine delle attività di pre-movimento precedentemente descritte.

Questa quota parte del tempo RSET dipende a sua volta da diversi fattori come: la distanza degli occupanti dalle vie di esodo, la velocità di camminamento (differente per ogni tipologia di occupante), ed infine alla geometria, dimensioni, dislivelli ed ostacoli delle vie d'esodo utilizzate, le quali comportano poi incidenze sulle portate delle vie di esodo.

Determinazione dei tempi

Per tutti questi addenti la ISO/TR 16738:2009, insieme alla BS 7974-6:2004 fornisce dei valori a cui fare riferimento, tuttavia il professionista antincendio può assumere differenti valori garantendone la validità, sulla base di analisi più accurate. In particolare per il calcolo del tempo di movimento è possibile avvalersi di strumenti di calcolo come le simulazioni di esodo. Di queste se ne sono sviluppate diverse tipologie, e sono a tutt'oggi in fase di sperimentazione, e di conseguenza ancora poco impiegate, poiché prima di essere accettati dal mondo della progettazione occorre che i risultati siano valutati ed infine validati. Tra i più diffusi vi sono

sicuramente i modelli idraulici ed i modelli agent-based che verranno descritti successivamente.

4.1 Storia dei modelli di simulazione dell'esodo

Nell'ultimo decennio i modelli di evacuazione usati nell'ingegneria antincendio hanno incrementato le loro capacità. Sono nati come modelli computazionali semplici basati su equazioni di movimento dell'esodo che implementavano solamente spazi ridotti, sviluppi successivi invece hanno permesso di simulare comportamenti complessi, come il decision-making tramite le più innovative tecniche di simulazione. Un grande vantaggio che risiede in questi modelli automatici consiste nel fatto permettono di ripetere le simulazioni più volte, permettendo al progettista di valutare quali siano le misure migliori da adottare al caso esaminato andando a variarle ed effettuando una simulazione per ogni scenario ipotizzato. Inoltre la ripetizione delle simulazioni permette di comprendere al meglio le dinamiche dell'evacuazione e di avere un'idea del fenomeno che si avvicina maggiormente alla realtà rispetto alle tecniche manuali.

Per comprendere meglio le dinamiche e le caratteristiche degli attuali modelli di evacuazione ed i principi ad essi annessi, occorre prima analizzare il processo evolutivo che questi hanno subito con l'avanzamento degli studi sul comportamento umano durante situazioni di emergenza. I primi studi scientifici in materia di simulazioni di esodo sono stati effettuati tra gli anni '70 ed '80. Tali ricerche rappresentano la base scientifica sulla quale tutti i successivi modelli hanno fondato le loro basi. Il calcolo di RSET era in un primo momento fondato sul calcolo per mezzo di semplici equazioni in cui il comportamento umano non era ancora considerato e il movimento degli occupanti era approssimato a quello di un fluido. Questo principio perciò assimila il singolo individuo ad una particella di fluido e tratta l'argomento con le leggi della fluidodinamica. Un concetto che venne sviluppato in quegli anni fu quello di non considerare tutta la larghezza di esodo disponibile, perché ci si era accorti che solamente una porzione (larghezza effettiva di esodo) di quest'ultima veniva impiegata durante l'evacuazione. Nacque così il modello idraulico che tutt'ora sta alla base di numerose tecniche che cercano di simulare il movimento delle persone ed è basato sulla risoluzione delle equazioni sulla regolazione dei fluidi di Navier-Stokes. Il vero limite del calcolo di RSET basato sul modello appena citato è rappresentato dal fatto che questo non tiene conto degli aspetti comportamentali. Infatti il tempo RSET non comprende solamente la quota parte per il raggiungimento del luogo sicuro, bensì occorre considerare anche un tempo addizionale in cui avviene il cosiddetto "decision-making process" ovvero l'attività legata agli aspetti decisionali nella fase precedente al movimento durante l'esodo. Ad oggi si sta attraversando una fase di

abbandono degli strumenti che si basavano solamente su equazioni e calcoli manuali, e si stanno concentrando tutte le energie verso lo studio di modelli basati sugli agenti. Questi ultimi permettono al progettista di imporre determinate leggi comportamentali per regolare le relazioni tra occupanti e tra occupanti ed ambiente circostante. Tuttavia occorre però osservare che non tutti i fattori influenzanti il comportamento durante le attività di esodo sono stati approfonditi, poiché gli studi svolti finora non sono ancora riusciti a caratterizzare questi fenomeni dal punto di vista matematico. Problema legato soprattutto al fatto numerosi aspetti del comportamento umano sono del tutto probabilistici ed irrazionali, perciò difficili da prevedere.

Concludendo questa primo inquadramento riguardante l'evoluzione storica sulla simulazione dell'esodo si può affermare che la graduale diffusione dei metodi di Fire Safety Engineering deriverà in parte anche dallo sviluppo dei modelli sopra citati, i quali vedranno crescere il proprio bacino di utilizzatori tanto più saranno in grado di incrementare la propria credibilità ed affidabilità attraverso il processo di validazione dei risultati.

4.2 I modelli di esodo: aspetti generali e caratteristiche

Come annunciato nel paragrafo precedente esistono molteplici modelli di simulazione dell'esodo, ed è fondamentale che la figura del progettista antincendio sia preparato sull'argomento e possa di conseguenza selezionare il modello più appropriato in funzione delle proprie esigenze. È opportuno fare distinzione tra i software di simulazione ed i modelli di evacuazione sui quali i primi si basano.

In letteratura si possono trovare alcuni studi scientifici con l'obiettivo di facilitare la scelta del modello che meglio si adatta alle esigenze del progetto oggetto di studio. Questi cercano di classificare i modelli di evacuazione in funzione delle loro caratteristiche principali. Uno di questi studi in merito sono rappresentati da Kuligowski nel 2010, in cui si discutono si discutono vari aspetti caratterizzanti questi modelli e si cerca di fornire delle classificazioni in funzione di essi. Altre ricerche in merito sono state effettuate in "*Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches*" e "*A review of optimisation models for pedestrian evacuation and design problems*" nei quali si desidera classificare gli approcci metodologici sui quali i modelli si basano e discutere delle eventuali ottimizzazioni.

Esistono due modi per rappresentare gli occupanti all'interno del modello:

- modelli macroscopici;
- modelli microscopici.

Modello Macroscopico

In questo approccio, chiamato anche “flow-based” i modelli rappresentano le persone come un unico gruppo omogeneo. Gli occupanti non sono considerati in modo individuale, ma vengono rappresentate come un flusso di un fluido in movimento, omettendo quindi ogni distinzione per singolo individuo. Solitamente i modelli che impiegano questi principi sono costituiti da una rete, in cui i nodi identificano le superfici dell’edificio. L’analogia permette di utilizzare le leggi della fluidodinamica, definendo una densità per il fluido. Questi modelli si basano su correlazioni tra la velocità di movimento e la densità, dove ad esempio vi sono restringimenti del percorso di esodo vi saranno decrementi del flusso. I modelli che si basano sull’analogia tra flusso di persone e flusso di mezzi continui vengono anche denominati “*Continuum models*” o “*Fluiddynamic based models*”. Sono caratterizzati da equazioni relativamente semplici basate sulla teoria dei fluidi.

Tuttavia ad oggi questo tipo di modelli risulta adottato solamente da alcuni software di simulazione. Uno dei motivi principali per cui non è largamente diffuso risiede nel fatto che non è in grado di descrivere la popolazione in modo reale ed eterogeneo.

Modello Microscopico

Nel modello microscopico gli occupanti sono considerati come singoli individui con delle ben specifiche proprietà fisiche e comportamentali, ciò comporta la possibilità di rappresentare al meglio le peculiarità della popolazione. Nel modello di evacuazione infatti, le persone possono eseguire delle azioni impartite per mezzo di regole comportamentali. Alcuni esempi possono essere la possibilità di riduzione o incremento della velocità di camminamento in funzione della presenza ed i legami con gli altri occupanti. Questo approccio di modellazione è denominato “*Agent-Based Modeling*” (ABM) e le sue applicazioni spaziano in svariati ambiti. Sebbene essi rappresentino in modo più completo la realtà, essendo legati agli aspetti di tipo comportamentale dei singoli individui sono oggetto di numerose ricerche in merito al fine di ottenere delle relazioni e delle regole che possano essere implementate per descrivere in modo esaustivo il fenomeno dell’esodo.

Per i fatti sopra citati l’approccio microscopico risulta ad oggi il più diffuso.

Modellazione delle geometrie

Le geometrie per descrivere e rappresentare l’ambiente possono essere classificate in tre tipologie differenti:

- course network;
- fine network;
- continuous.

Course network

La geometria viene descritta per mezzo di un network costituito da nodi ed archi. Ciascun nodo rappresenta un'area, e ad esso è possibile associare valori limite di densità per regolare il massimo numero di occupanti presenti. I percorsi invece sono rappresentati da connessioni con archi ai quali può essere associata una velocità di percorrenza. Essendo un modello molto semplificato dell'ambiente reale, perché la simulazione restituisca dei risultati attendibili occorre che il progettista faccia particolare attenzione nel descriverne le geometrie, e nella discretizzazione dei percorsi tramite gli elementi arco. Tuttavia questa caratteristica ha un impatto positivo sulle tempistiche della simulazione, in quanto sono necessari tempi relativamente brevi per restituire dei risultati e quindi risulta possibile indagare più scenari. Il grosso svantaggio di questo tipo di modelli sta nel fatto che non prevedono la possibilità di ubicare in modo preciso gli occupanti sulla superficie, proprio perché quest'ultima è semplificata da un nodo.

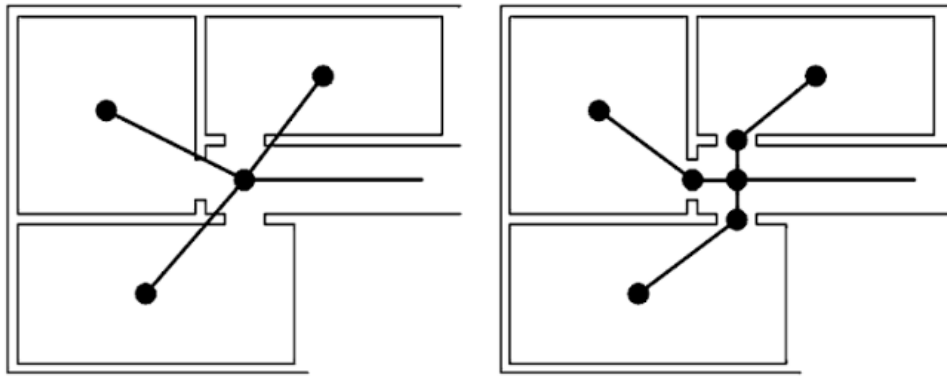


Figura 6. Rappresentazione del modello course network.

Fine network

Il modello si compone di una griglia con celle o una maglia con nodi ed archi. Come il modello sopra descritto, anch'esso richiede tempi di simulazione brevi legati alla semplicità della struttura del modello stesso. Il vantaggio rispetto al course network sta nel fatto che ogni cella può rappresentare un'area a disposizione del movimento oppure un'ostruzione (muri, arredi, ecc.), in questo modo è possibile modellare la posizione del singolo individuo. Tuttavia il modello presenta delle limitazioni, ad esempio ogni cella può contenere solamente un occupante; inoltre la dimensione di ogni cella generalmente è 0,5, ciò implica che la massima densità consentita è pari a 4 pers./m², ovvero una persona per ogni cella.

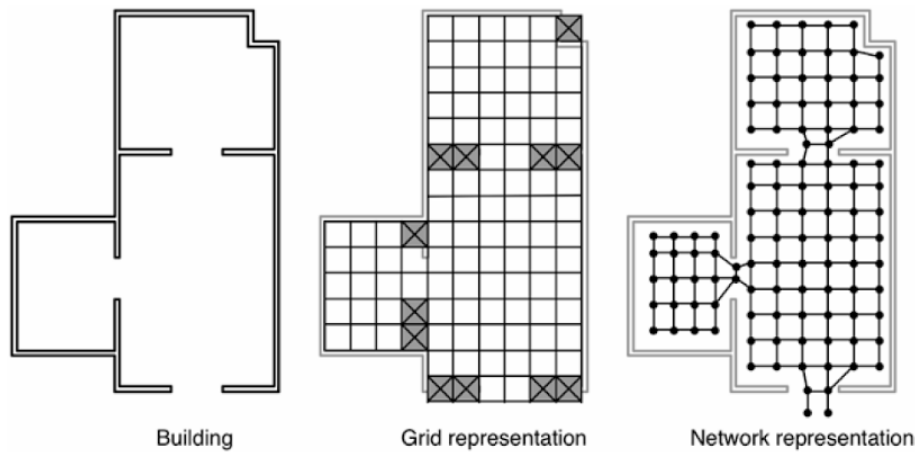


Figura 7. Rappresentazione del modello fine network.

Continuous

I modelli più diffusi rappresentano l'ambiente per mezzo di uno spazio continuo in cui gli occupanti sono liberi di muoversi. Ne consegue che questo modello sia quello che meglio approssima il movimento reale. Tali modelli generalmente prevedono la non sovrapposizione dei soggetti coinvolti durante l'esodo, che sono rappresentati generalmente da dei cerchi. Sebbene rappresentino un modello più ottimizzato rispetto agli altri, richiede un levato tempo di calcolo, in quanto le geometrie modellate sono più complesse.

4.2.1 Modelli fluidodinamici

I modelli fluidodinamici simulano il movimento della folla assimilandola ad un flusso di un fluido risolvendo le equazioni del moto per mezzo delle equazioni di Navier-Stokes. Modelli di questo tipo descrivono tramite equazioni differenziali come la densità e la velocità cambiano al variare del tempo.

4.2.2 Agent-based model

Il bisogno di poter descrivere il comportamento umano oltre al movimento ha indirizzato la ricerca verso lo sviluppo di nuovi modelli. La realizzazione di questi ultimi è stata permessa dall'innovazione tecnologica a cui abbiamo assistito nell'ultimo ventennio, la quale con l'incremento della potenza di calcolo degli elaboratori ha generato nuove possibilità nel campo scientifico.

Il modello basato su agenti (agent based model) è un modello microscopico che consente la simulazione di sistemi molto complessi. Il sistema è modellato come un insieme di entità

(agenti) in cui ognuno di essi si comporta autonomamente secondo delle regole ben precise. Ogni agente è in grado di valutare le sue condizioni e prendere decisioni in merito seguendo le regole che precedentemente sono state implementate all'interno del modello. All'interno del modello ABM infatti è possibile implementare un elevato numero di regole comportamentali. L'agente si muove all'interno della simulazione secondo due step: in una prima fase l'individuo riconosce il contesto nel quale viene inserito, dopodiché nel secondo step esegue le regole predefinite nel modello per quella specifica situazione. Sebbene sotto un certo punto di vista il modello ABM possa sembrare semplice in quanto costituito da interamente da agenti e le loro relazioni, esso è in grado di rappresentare complessi modelli comportamentali e fornire informazioni in merito alle dinamiche del sistema reale che simula. Per questo motivo gli impieghi dell'ABM spaziano in numerosi campi molto differenti tra loro: simulazioni di esodo, simulazioni di strategie, mercato azionario, ecc... Uno degli aspetti caratteristici di questo metodo è l'approccio "bottom-up" tramite il quale il modello considera le interazioni dei singoli elementi del sistema, dopodiché cerca di determinare le caratteristiche peculiari prodotte da queste interazioni. Le interazioni vengono ripetute durante la simulazione con la conseguenza che il modello diventa molto dispendioso dal punto di vista computazionale rispetto i suoi concorrenti, tuttavia è quello più utilizzato dagli attuali software di simulazione di esodo, poiché è molto flessibile e permette di descrivere in modo fedele l'eterogeneità delle caratteristiche comportamentali della popolazione. Risultato impensabile con l'impiego metodi puramente matematici che non prevedono una certa ripetizione delle interazioni. La ricerca: *"Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches"* ha sintetizzato i benefici del modello ABM in tre punti:

- cattura i fenomeni emergenti;
- descrizione naturale del sistema;
- flessibilità.

Riassumendo si può affermare che l'affermarsi dell'approccio ABM è legato al fatto che esso permette di modellare l'agente e le interazioni tra agenti in modo flessibile ed ottimizzato. All'interno del mondo dei modelli agent-based vi sono ulteriori classificazioni in funzione di alcune caratteristiche. Ad esempio si può fare una prima distinzione in riferimento al livello di "intelligenza" degli agenti. Infatti è possibile ottenere un comportamento dell'occupante basato su un processo decisionale, ovvero il comportamento dipende dalle decisioni prese dagli agenti stessi durante il percorso. Al contrario il percorso e gli obiettivi possono essere predefiniti e l'agente si muoverà all'interno dell'ambiente evitando le collisioni. I modelli che prevedo l'implementazione di un certo livello di intelligenza vengono definiti sistemi multi-agent. Altro parametro in base al quale è possibile fare delle distinzioni tra i sottomodelli ABM è rappresentato dal modo in cui avvengono le interazioni. Queste ultime possono fare riferimento a regole oppure a forze.

4.2.3 Social force model

I social force model (SFM) sono stati proposti nel 1995 da Helbing e Molnar. Gli autori suggeriscono che il movimento dei pedoni può essere descritto tramite delle forze sociali. Le quali non sono esercitate in modo diretto, bensì sono una sorta di misura delle motivazioni che le persone possiedono per eseguire determinate azioni, in questo caso i movimenti.

Il modello si basa sul presupposto che sebbene in un primo momento il comportamento umano possa sembrare caotico ed imprevedibile, per situazioni non troppo complesse è possibile tuttavia utilizzare dei modelli comportamentali di tipo stocastico al fine di descrivere i comportamenti di un gran numero di persone (come ad esempio la folla). Il modello si basa su tre concetti principali:

- volontà di raggiungere una specifica destinazione: solitamente l'individuo cerca di scegliere la strada più confortevole, nonché la più breve;
- influenza degli altri pedoni sul moto di un certo pedone: l'individuo cerca di mantenere una certa distanza dagli altri, questi valori dipendono dalla densità di occupanti e la velocità;
- i pedoni possono essere attratti da altre persone: un esempio sono le relazioni tra famigliari o amici.

I sopracitati effetti sono stati tradotti in una formula:

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\vec{F}_\alpha(t)}_{\text{Total Effect}} = & \underbrace{\vec{F}_\alpha^0(\vec{v}_\alpha, v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha)}_{\text{Effect of Pedestrian's Desire}} + \underbrace{\sum_\beta \vec{F}_{\alpha\beta}(\vec{e}_\alpha, \vec{r}_\alpha - \vec{r}_\beta)}_{\text{Repulsive of Pedestrian } \beta} \\
 & + \underbrace{\sum_B \vec{F}_{\alpha B}(\vec{e}_\alpha, \vec{r}_\alpha - \vec{r}_B^*)}_{\text{Repulsive of Border B}} + \underbrace{\sum_i \vec{F}_{\alpha i}(\vec{e}_\alpha, \vec{r}_\alpha - \vec{r}_i, t)}_{\text{Attractive Effective}},
 \end{aligned}$$

dove:

$\vec{v}_\alpha$ è la velocità del pedone “ α ”;

v_α^0 è la velocità desiderata dal pedone “ α ”;

$\vec{e}_\alpha$ è la direzione desiderata dal pedone “ α ”;

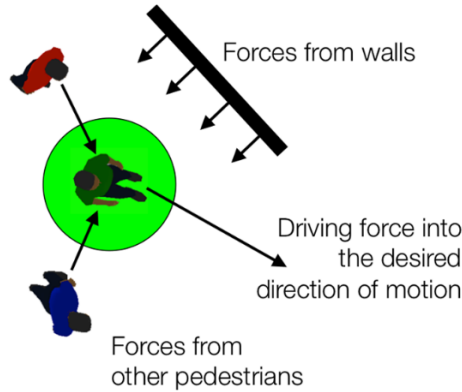
$\vec{r}_\alpha$ è l'attuale posizione del pedone “ α ” al tempo t ;

$\vec{r}_\beta$ è l'attuale posizione del pedone “ β ” al tempo t ;

$\vec{r}_B^*$ è la posizione del confine “B” più vicino al pedone “ α ”.

In seguito all'esigenza di sviluppare un modello che considerasse anche gli effetti del panico, è stata sviluppata una successiva definizione matematica:

$$\underbrace{m_i \frac{dv_i}{dt}}_{\text{Acceleration}} = m_i \underbrace{\frac{v_i^0(t)e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i}}_{\text{Driving Force}} + \underbrace{\sum_{j(\neq i)} f_{ij} + \sum_W f_{iW}}_{\text{Interaction Forces}},$$



4.2.4 Cellular automata model

Il modello ad automi cellulari è costituito da una griglia regolare di celle avente una qualsiasi dimensione finita, e forma qualunque. Ognuna di queste celle può assumere un insieme finito di stati. Il concetto venne sviluppato da Neumann intorno ai primi anni cinquanta e ha preso piede grazie allo sviluppo degli strumenti nell'ambito computazionale. Gli automi cellulari si evolvono ad ogni step temporale discreto. Alla griglia composta da un certo numero di celle si associa ad ogni istante lo stato del sistema, dopodiché, partendo da quella condizione iniziale, si fa evolvere nel tempo andando ad impostare delle regole per un certo numero di step, fino al raggiungimento della situazione desiderata. Questi modelli sono dei sistemi dinamici discreti, per questo motivo si prestano sostituirsi a quei modelli basati invece su equazioni differenziali parziali. Attualmente il modello ad automi cellulari è applicato a diversi sistemi complessi, come i modelli di traffico, ma anche nel settore biologico. Solo negli ultimi anni è stato impiegato per descrivere le dinamiche durante un'evacuazione di persone. In questo caso il modello è costituito da una griglia uniforme. I modelli ad automi cellulari costruiti col fine di indagare sul movimento delle persone si possono classificare in due sottogruppi: il primo che si basa sulle interazioni tra i pedoni e l'ambiente ed il secondo basato sulle interazioni tra i pedoni. I modelli appena descritti, insieme al Lattice Gas Automata (che è una loro sottocategoria) sono modelli discreti nello spazio, nel tempo e nelle variabili di stato, si prestano molto bene quindi a descrivere i comportamenti della collettività.

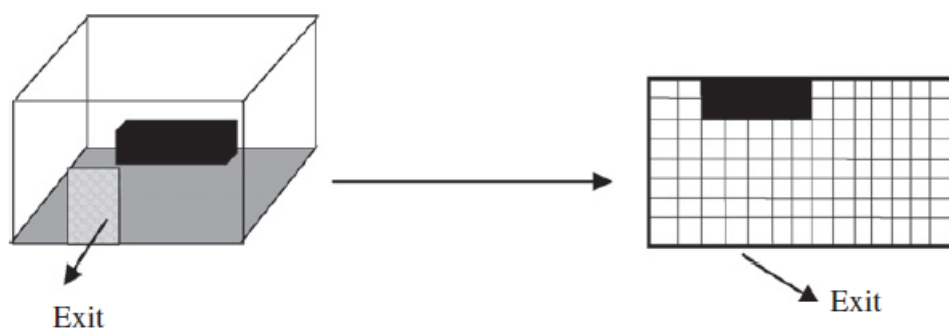


Figura 8. Ambiente 3D e corrispondente griglia di celle.

CAPITOLO 5 I SOFTWARE DI MODELLAZIONE DELL'ESODO

Per poter impiegare i modelli descritti nel Capitolo 4, è necessario prendere questi metodi e tradurli in strumenti di facile applicazione per i progettisti, ovvero i software di simulazione. Di questi ne esistono varie tipologie, ognuno con caratteristiche differenti legate al modello implementato al loro interno. L'importanza di utilizzare strumenti di calcolo avanzati per indagare le dinamiche dell'evacuazione da un edificio è notevole. Basti pensare che fino a pochi anni addietro le valutazioni sull'efficienza dei sistemi di esodo nel rispetto della salvaguardia della vita veniva completamente svolta in modo manuale, senza l'ausilio di alcun elaboratore. Il calcolo è descritto in "*Society of Fire Protection Engineers (SFPE) Handbook*", col quale si determinava il flusso di esodo. Il manuale prevede il calcolo del tempo necessario agli occupanti per percorrere le vie d'esodo fino a raggiungere l'esterno del fabbricato, partendo dagli elementi di uscita per ogni piano. Oltre ad assumere quindi diverse ipotesi semplificative rispetto alle reali situazioni che potrebbero avvenire durante un incendio, il procedimento non consente in alcun modo di eseguire delle valutazioni in merito al comportamento degli occupanti e all'influenza che uno scenario di incendio può avere su di essi. Con l'impiego di software dedicati alla simulazione delle dinamiche di esodo si hanno numerosi benefici, dal punto di vista progettuale. L'elevata complessità di calcolo permette loro di restituire dei risultati più realistici, inoltre il progettista se munito di componenti hardware abbastanza performanti è in grado di effettuare più simulazioni in tempi relativamente brevi. Questo comporta avere una migliore comprensione delle dinamiche del fenomeno e di conseguenza eseguire un'interpretazione dei risultati più affidabile.

Alcuni di essi hanno implementato anche la possibilità di inserire al loro interno i risultati di output delle simulazioni fluidodinamiche dell'incendio, in questo modo, sulla base di modelli agent-based citati al capitolo precedente riescono ad elaborare e prevedere la risposta che ogni occupante ha se sollecitato dai prodotti della combustione o dalla ridotta visibilità dovuta alla presenza di fumi.

Nel capitolo corrente verranno esplicitate le caratteristiche principali dei software disponibili in riferimento agli studi fatti da Kuligowski, Peacock e Hoskins in “*A Review Building Evacuation Models, 2nd Edition*” del Nist.

5.1 Classificazione

È possibile classificare i software non solo in base alle loro funzionalità, ma anche secondo altri aspetti peculiari, l'analisi pubblicata dal Nist (National Institute of Standards and Technology) individua i seguenti parametri di classificazione: disponibilità, metodo, scopo del modello, tipo di struttura, modalità di visualizzazione, comportamento degli occupanti, tipo di movimento degli occupanti, possibilità di implementare gli effetti dell'incendio, tipologie di importazione, metodi di visualizzazione e validazione. Di seguito verranno discusse le principali categorie di classificazione appena mostrate tralasciando quelle che non interessano il fine dello studio.

Metodo di modellazione

I metodi di modellazione rappresentano una delle caratteristiche più importanti dei software di modellazione poiché in funzione di essi si svolge il calcolo dei tempi necessari all'esodo. Si possono individuare tre categorie:

- modello comportamentale (B): modelli in cui è implementato il concetto del decision-making per la descrizione degli occupanti; vi sono anche modelli che sono in grado di eseguire una valutazione del rischio (B-RA);
- modello parzialmente comportamentale (PB): la componente comportamentale viene inserita indirettamente per i singoli occupanti tramite leggi di probabilità, tempi di reazione, ecc..;
- modello basato sul movimento (M) e (M-O): il moto degli occupanti viene descritto con leggi dell'idraulica.

Scopo del modello

È opportuno eseguire questa differenziazione poiché i software sono applicabili a tutte le situazioni, bensì ognuno è specializzato e più idoneo a simulare determinati tipi di scenari e circostanze. È importante conoscere gli obiettivi del modello al fine di utilizzare la tipologia che meglio si presta al caso analizzato. Esistono modelli che sono in grado di rappresentare qualsiasi tipologia di edificio (1), specifici per le abitazioni (2), specifici per le stazioni di trasporto pubblico (3), specifici per edifici bassi (4), se permettono la modellazione di un solo percorso di esodo (5).

Tipo di struttura

Esistono modelli che utilizzano strutture differenti, queste, sono già state analizzate in modo approfondito nel Capitolo precedente, e sono:

- fine network (a maglia fine) (F);
- course network (a maglia grossolana) (C);
- spazio continuo (Co).

Modalità di visualizzazione

Un'ulteriore classificazione si può effettuare in base alle modalità di visualizzazione da parte del singolo individuo e da parte del modello. Ovvero come il modello vede gli occupanti e come gli occupanti vedono l'edificio. Le modalità di visualizzazione sono di due tipi per entrambe le prospettive: globale (G) ed individuale (I).

Comportamento degli occupanti

Aspetto fondamentale riguarda le modalità in cui viene concepito il comportamento degli individui all'interno del modello. Esso può essere:

- implicito (I): fanno parte di questa categoria i modelli che implementano il comportamento introducendo dei tempi di reazione per alcuni occupanti o inserendo delle caratteristiche che incidono sul movimento di questi ultimi;
- condizionale (C): sono modelli basati su regole, in cui si assegnano azioni a ciascun individuo o gruppi. Queste azioni sono influenzate dalle condizioni al contorno legate all'ambiente in cui si trovano gli occupanti;
- intelligenza artificiale (AI): modelli che cercano di simulare l'intelligenza umana;
- probabilistico (P): modelli di evacuazione basati su una serie di regole o prevedono comportamenti condizionali basati su modelli probabilistici;
- nessun comportamento (N): se il modello non considera alcun aspetto comportamentale degli occupanti.

Tipo di movimento degli occupanti

È possibile fare una distinzione anche sul modo in cui un occupante si sposta durante la simulazione. La diversa tipologia di movimento influenza parametri come ad esempio la velocità. La grande differenza sull'utilizzo di un modello rispetto un altro viene evidenziata soprattutto in casi in cui si presentano fenomeni di congestionamento.

- correlazione di densità (D);
- scelta dell'utente (UC);
- distanza interpersonale (ID);
- potenziale (P);

- disponibilità di celle adiacenti (E);
- condizionale (C);
- acquisizione di conoscenza (Ac_K);
- flusso non vincolato (Un_F);
- automa cellulare (CA).

Possibilità di inserire dati sull'incendio

Alcuni modelli prevedono la possibilità di inserire nella modellazione le informazioni relative allo sviluppo dell'incendio e dei suoi prodotti. Sebbene i software con questa caratteristica non siano molti, è una proprietà molto importante al fine dello studio di un esodo, per questo motivo gli studi in merito sono in continuo sviluppo e presto si spera che ulteriori software siano in grado di percepire ed elaborare i dati legati all'incendio. Lo studio suddivide i modelli in tre categorie: Y1, Y2 e Y3. Della prima categoria fanno parte quei modelli che possono importare informazioni sull'incendio da altri modelli; appartengono invece alla seconda categoria i modelli in cui l'utente può inserire alcuni dati relativi l'incendio; l'ultima categoria invece racchiude tutti quei modelli non capaci di elaborare dati di incendio.

Importazione

Lo studio si focalizza anche sugli aspetti legati alle possibilità di importazione di ciascun software, suddividendolo in tre categorie: modelli che prevedono l'importazione di file CAD (Y), software che non lo prevedono (N), software che attualmente non sono in grado di utilizzare file creati da software CAD ma tale funzione è in via di sviluppo (F). Ad oggi questa classificazione dovrebbe essere rivista o almeno implementata in quanto l'avvento e la conseguente consolidazione della metodologia BIM ha portato il mondo dell'ingegneria in generale verso una progettazione tridimensionale. Sono oggi utilizzati numerosi formati di interscambio di informazioni sul modello, alcuni di essi sono il formato FBX ed il formato IFC (Industry Foundation Classes), quest'ultimo nato proprio per rispondere alle necessità di interoperabilità tra i vari protagonisti della progettazione.

Modalità di visualizzazione

Alcuni modelli sono in grado di rappresentare l'ambiente modellato in tre dimensioni (3D), altri solamente in due dimensioni (2D), altri ancora non possiedono un'interfaccia grafica di output (N). Allo stato attuale si evince comunque che la maggior parte dei software più diffusi possiedono almeno la visualizzazione 2D se non tridimensionale.

Questa proprietà risulta un grande valore aggiunto al modello soprattutto dal punto di vista interpretativo, poiché permette maggiore trasparenza di visualizzazione delle geometrie dell'edificio.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva dei maggiori software di simulazione dell'esodo e le relative caratteristiche che sono state appena descritte.

Model	Available to public	Modeling Method	Purpose	Grid/ Structure	Perspective of M/O	Behavior ^a	Movement ^a	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 ^c	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 ^b	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 ^c	Y	PB	1	Co.	I	I, C, P	ID	Y3	N/Y	2,3-D	FD,PE,OM
Pathfinder 2009 ^c	Y	PB	1	Co.	I/G	I	D,ID	N	Y	2,3-D	C,FD,PE,OM
SimWalk ^c	Y	PB	1,3	Co.	I	C, P	P	N	Y	2,3-D	FD,PE,3P
PEDFLOW ^c	Y	B	1	Co.	I	C, P	ID	Y2	Y	2,3-D	PE
PedGo ^c	Y,N1	PB/B	1	F	I/G	I/C, P	P,E (CA), C	Y2	Y	2,3-D	FD,PE,OM,3P
ASERI ^c	Y	B-RA	1	Co.	I	C, P	ID	Y1,2	Y	2,3-D	FD, PE
BldEXO ^b	Y	B	1	F	I	C, P	P, E	Y1,2	Y	2,3-D	FD,PE,OM,3P
Legion ^c	Y,N1	B	1	Co.	I	AI, P	ID, C	Y1	Y	2,3-D	C,FD,PE,3P
SpaceSensor ^c	Y	B	3	Co.	I	C, P	C, Ac_K	N	Y	2,3-D	FD,OM
EPT ^c	Y,N1	B	1	F	I	AI	UC,C	Y2	Y	2,3-D	FD
Myriad II ^c	Y, N1	B	1	C, F, Co.	I	AI	D, UC, IP, Ac_K	Y1	Y	2,3-D	PE, 3P
MassMotion ^c	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 ^c	N1	PB	1	Co.	I	I	D	N	Y	2-D	FD,OM
EXIT89 ^c	N2	PB	1	C	I	I/C, P	D	Y1	N	N	FD,3P
MASSegress ^b	N2	B	1	Co.	I	C, AI	C	N	Y	2,3-D	PE,OM
EvacuationNZ ^c	N2	B	1	C	I/G	I, C, P	D, UC	Y2	Y	2-D	FD, PE,OM

Figura 9. Classificazione tratta da "A Review of Building Evacuation Models, 2nd Edition".

5.2 Pathfinder

Pathfinder, della software house Thunderhead è un simulatore di evacuazione che utilizza un modello agent-based (ABM). È costituito principalmente da tre moduli: un'interfaccia grafica, un simulatore e un visualizzatore tridimensionale per gli output. Con i software è possibile simulare il movimento degli occupanti con due modalità differenti: la SFPE mode e la steering mode.

Il programma è stato progettato per soddisfare le necessità dell'ingegneria antincendio, la quale spesso si deve interfacciare con modelli di edifici sempre più complessi.

Il modello basato su agenti su cui il simulatore si basa, permette di catturare comportamenti complessi e interazioni tra gli occupanti. A differenza della maggior parte degli altri software del settore, inoltre Pathfinder fornisce strumenti che semplificano la fase di input delle informazioni da modellare e permette di restituire i risultati per mezzo di tecniche di visualizzazione di alta qualità.

Il software può essere impiegato come strumento di pianificazione delle dinamiche di evacuazione di un ambiente e permettere ai progettisti di valutare la progettazione dell'esodo tramite i tempi di uscita nei diversi scenari ipotizzati.

Geometrie

Il software utilizza modelli geometrici tridimensionali, tuttavia al fine della simulazione gli elementi considerati sono solamente di tipo bidimensionale. L'ambiente di movimento di Pathfinder è un modello di spazio continuo tridimensionale caratterizzato da una mesh triangolare sulla quale gli occupanti sono liberi di muoversi. L'impiego delle mesh triangolari per la rappresentazione geometrica permette al software di discretizzare in modo abbastanza efficace anche superfici curve. Come detto, qualsiasi tipo di oggetto tridimensionale all'interno dell'ambiente di modellazione è riconosciuto dal software come uno spazio vuoto all'interno della mesh di navigazione. Questa tecnica quindi impedisce agli occupanti di poter muoversi in tali spazi ospitanti le ostruzioni (muri, arredi, oggetti, ecc...). La decisione di impiegare solamente oggetti 2D è stata adottata dagli sviluppatori al fine di ridurre la complessità di calcolo durante la simulazione.

Modelli di movimento: "SFPE" mode e "Steering" mode.

L'approccio ABM su cui si basa il software consente di modellare il comportamento di gruppi di persone simulando i comportamenti e le interazioni di singoli occupanti. Ciascun occupante possiede proprietà individuali, obiettivi e percezioni ben specifici. Ogni individuo può quindi eseguire delle azioni differenti in funzione delle proprie caratteristiche. Di seguito vengono illustrati e descritti i principi e le regole che stanno alla base delle due modalità di movimento previste dal simulatore.

SFPE mode

La modalità "SFPE" è stata progettata per produrre risultati corrispondenti al calcolo presentato nel manuale dell'SFPE (SFPE Handbook of Fire Protection Engineering). Generalmente questa modalità viene utilizzata dai progettisti per confrontare i risultati della steering mode con un metodo di calcolo ben noto. Questa modalità considera il movimento degli occupanti come un modello di flusso in cui vengono definite la velocità di camminamento e le portate del flusso attraverso le porte e i corridoi. È bene evidenziare che con questa modalità più occupanti possono occupare la stessa posizione all'interno dello spazio di navigazione e quindi sovrapporsi. Di seguito vengono riportati i principali parametri utilizzati in questa modalità.

Densità massima per la stanza: il software utilizza la densità per regolare le velocità ed il flusso dalle porte. Tramite l'imposizione di una densità massima è possibile controllare il numero di occupanti ai quali viene data la possibilità di entrare in una data stanza tramite porte e scalinate. La densità massima deve essere maggiore di zero e l'utente può modificare tale parametro a seconda del caso analizzato, tuttavia il programma fornisce dei valori standard di default per eseguire i calcoli in cui fissa il valore di densità massima pari a 3,55 persone/m².

Boundary Layer: con questo termine si indica lo strato limite, ovvero la effettiva larghezza delle porte. L'effettiva larghezza delle porte influisce sulla determinazione della velocità di attraversamento di queste ultime da parte degli occupanti. Tale parametro è calcolato con la seguente formula: $W-2BL$, dove con 'W' si indica la larghezza della porta e con 'BL' si indica il boundary layer.

Portate delle porte ad alta densità - utilizzare un flusso specifico calcolato: questo parametro è controllato tramite la spunta di un flag e permette di controllare il flusso attraverso le porte in funzione della densità. Abilitando il flag il flusso specifico delle porte viene calcolato in base alla densità di occupanti delle stanze adiacenti.

Portate delle porte ad alta densità -utilizzare sempre il massimo flusso: questo parametro è controllato tramite la spunta di un flag e permette di calcolare il flusso attraverso le porte utilizzando sempre il massimo flusso specifico.

Per quanto concerne il parametro velocità il modello introduce una velocità di movimento ed una velocità di base per l'occupante. Di seguito si descrivono i principi sui quali si basa la determinazione dei valori di velocità. Essa infatti dipende da molteplici fattori. Il modello SFPE introduce la velocità di base V_b definita come:

$$v_b = v_{bmax} \cdot v_f(D) \cdot v_{ft}$$

Come si evince dalla formula, la velocità di base è funzione della densità (D) e della velocità massima (V_{max}).

I valori V_f e V_{ft} si riferiscono a due frazioni di velocità, e sono definite come segue:

$V_f(D)$ rappresenta la frazione di velocità in funzione della densità di occupanti della stanza.

$$v_f(D) = \begin{cases} 1 & D < 0,55 \text{ pers/m}^2 \\ \max \left[v_{fmin}, \frac{1}{85} (1 - 0,266 \cdot D) \right] & D \geq 0,55 \text{ pers/m}^2 \end{cases}$$

Dove:

v_{fmin} è la frazione di velocità minima, essa è preimpostata ad un valore di 0,15.

V_{ft} la quota parte di velocità che tiene conto del tipo di terreno percorso dagli occupanti, esso è definito come: $v_{ft} = \frac{k}{1,4}$ in cui il tipo di terreno è preso in considerazione tramite la costante k e vale 1,4 m/s nel caso di superfici piane o rampe, mentre assume valori differenti per le scale in funzione della pedata e dell'alzata (e della pendenza) dei gradini. Tali valori sono reperibili nel testo "*SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*".

Elementi attraversati				k [m/s]
Corridoi. rampe				1.4
Scale	alzata [cm]	pedata [cm]	pendenza	
	19.05	25.40	0.75	1.00
	17.80	27.90	0.64	1.08
	16.50	30.50	0.54	1.16
	16.50	33.00	0.50	1.23

La pendenza viene determinata come rapporto tra alzata e pedata. Se tale rapporto supera il valore di 0,75 il software assegna un valore di k che al minimo raggiunge 0,034 in questo modo la velocità di base non si annulla e anche nel caso di scale ripide non vi sono rallentamenti significanti. Se invece il rapporto raggiunge valori inferiori a 0,50, il software effettua un'interpolazione inserendo un punto avente k pari a 1,4 m/s e rapporto alzata/pedata nullo (simulando quindi un piano orizzontale privo di pendenza).

Per quanto riguarda invece la densità, essa viene assunta come uniforme in tutta l'estensione della stanza considerata. Nello specifico viene determinata dividendo il numero di occupanti in una determinata stanza per la differenza tra la superficie della stanza e l'area del boundary layer. Quest'ultima calcolata moltiplicando la lunghezza totale dei bordi limite (boundary edges) della stanza per lo strato limite.

La modalità prevede anche la possibilità di associare agli elementi un fattore chiamato "modificatore di velocità" (k_v) in grado appunto di alterare le velocità di uscita da questi componenti. Il software attribuisce a ciascun elemento un valore unitario per k_v , ed il progettista può settarlo in modo opportuno a seconda delle necessità.

$$v = k_v \cdot v_b$$

Dove:

v_b è la velocità di base per ciascun occupante;

k_v è il modificatore di velocità per ciascun componente.

Regolazione del flusso attraverso le porte

La modalità SFPE prevede il calcolo del tempo impiegato da un numero 'n' di occupanti per attraversare una porta come segue:

$$T = \frac{n-1}{F_s}$$

Come si può vedere dalla formula è stata introdotta la riduzione di un'unità al valore di 'n' cosicché il primo occupante ad attraversare l'uscita non attenda alcun ritardo.

Il calcolo del flusso specifico F_s attraverso la porta viene determinato seguendo le indicazioni riportate nel manuale della SFPE nel quale si associa appunto un flusso specifico ad ogni porta ed un conseguente tempo di ritardo. Il tempo di ritardo 'T' descrive la porzione di tempo che

intercorre tra il passaggio di un occupante e quello successivo. Il software prevede inoltre di poter settare il parametro F_s in modo differente per ciascun elemento porta in funzione della direzione di attraversamento e del tipo di superfici ad essa adiacenti. Il flusso specifico viene determinato con la seguente formula: $F_s = [1 - (0,266 \cdot D)] \cdot k \cdot D$.

In cui D rappresenta la massima densità determinata premendo la più alta tra le due delle stanze adiacenti la porta considerata. Essa può assumere valori variabili in un range contenuto tra 1,9 e 3 pers/m². Valori stabiliti al fine di non ottenere un flusso troppo alterato, ad esempio per valori per alte densità il flusso non raggiunga mai valori pari a 0 pers/m².

È possibile anche fare eseguire il calcolo al software sulla base del flusso specifico massimo, in questo caso la densità D è preimpostata ad un valore di 1,88 pers/m².

Con il termine k invece si intende la costante di velocità di evacuazione che viene stabilita in relazione alle caratteristiche della superficie della stanza precedente rispetto la porta.

Gestione delle collisioni

Come già accennato in precedenza, la modalità SFPE, non considera le collisioni tra gli occupanti, infatti questi possono addirittura compenetrarsi e occupare lo stesso spazio della mesh di navigazione allo stesso istante. Le uniche collisioni gestite in questa modalità sono quelle tra occupanti e muri.

La gestione di queste ultime si suddivide prevalentemente in due fasi:

- fase di pre-movimento;
- fase di movimento.

Durante il primo step, ovvero la fase che precede il movimento, il software modella la velocità dell'occupante in modo da condurre quest'ultimo a scorrere lungo le pareti più vicine. Nel secondo step, ovvero la fase di movimento, l'occupante si muoverà con la velocità prima descritta. In fase di movimento l'occupante può ancora eventualmente trovarsi nelle condizioni di collidere con le pareti, in questo caso l'individuo si fermerà alla prima collisione.

Steering Mode

La modalità alternativa alla SFPE mode, con la quale vengono affrontate le dinamiche di movimento secondo delle vie di fuga lineari, è la steering mode. Questa, a differenza della modalità precedentemente descritta prevede la concezione di vie di fuga curve. Infatti ad ogni occupante è permesso di procedere verso il suo obiettivo evitando altri occupanti ed ostacoli durante il percorso. In questa modalità non vengono specificate le portate per ciascuna porta, bensì vengono determinate dall'interazione tra gli occupanti.

Velocità

La velocità attribuita a ciascun occupante è frutto di considerazioni e successive elaborazioni sulla velocità calcolata con i metodi della SFPE mode. In particolare viene introdotta una velocità massima corretta ($\dot{v}_{max}$), la quale dipende dalla superficie attraversata, dalle distanze rispetto agli altri occupanti, e naturalmente dalla conseguente velocità massima (v_{max}). Il valore della $\dot{v}_{max}$ deriva dai termini v_{ft} e $v_f(D)$ esplicitati precedentemente. Le velocità possono essere quelle di default dalla modalità SFPE oppure essere impostate in modo manuale nel profilo degli occupanti. Come per la modalità SFPE $v_f(D)$ dipende dalla densità di occupanti della stanza e la V_{ft} dal tipo di superficie attraversata.

Accelerazione

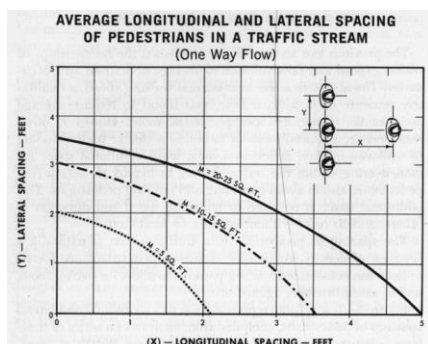
La steering mode tratta l'accelerazione come combinazione delle sue componenti tangenziale e radiale. Nello specifico il sistema calcola una accelerazione tangenziale diretta ed una inversa che si esprimono come segue:

$$a_{fmax} = \frac{v_{max}}{t_{accel}} ; a_{bmax} = 2 \cdot a_{fmax}$$

L'accelerazione radiale invece ha la seguente forma: $a_{rmax} = 1,5 \cdot a_{fmax}$.

Densità

La $\dot{v}_{max}$ come si è detto viene determinata in funzione alla distanza tra gli occupanti e perciò

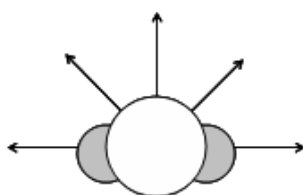


risulta strettamente correlata ai valori di densità. La steering mode stima il valore da attribuire a quest'ultima sulla base degli studi effettuati da Fruin nel 1987. Gli studi in merito alla progettazione e pianificazione degli occupanti hanno individuato due parametri: la spaziatura longitudinale e quella laterale media dei pedoni.

Figura 10. Dimensioni per un occupante, tratta da [20].

Sistema di guida

Nella modalità steering gli occupanti si muovono verso il loro obiettivo seguendo una certa approssimazione una determinata curva di ricerca. Durante il percorso essi sono in grado di rispondere ad eventuali stimolazioni legate all'ambiente circostante. Pathfinder usa la tecnica dell'“inverse steering” che è un processo di valutazione di una serie di movimenti in diverse direzioni possibili che termina



con la determinazione di una funzione di costo. Sulla base di essa il software seleziona qual è la direzione che minimizza la funzione. La valutazione della funzione viene elaborata nel seguente modo: la funzione si compone di diversi fattori, i quali, possono assumere un valore pari a 0 o 1 a seconda della direzione analizzata. Il costo totale è dato dalla somma dei valori di ogni fattore e viene fornito un valore di costo totale per ogni direzione possibile. Ogni fattore comportamentale viene determinato in modi differenti a seconda delle sue caratteristiche.

CAPITOLO 6 CARATTERIZZAZIONE DEGLI OCCUPANTI

Un tema oggetto di molti dibattiti è senza dubbio rappresentato dal fatto che i modelli di simulazione di esodo si propongono di rappresentare le dinamiche legate all'evacuazione in caso di emergenza basandosi su teorie ed assunzioni attinte dai dati sperimentali o prove di evacuazione. Questi ultimi affetti da un elevato livello di incertezza. Se da un lato negli ultimi anni la descrizione degli aspetti fisici e geometrici ha raggiunto un grado di approfondimento tale da rendere tali aspetti come assodati, dall'altro i più avanzati modelli di simulazione di esodo di cui sono state analizzate e descritte le principali caratteristiche al capitolo precedente, come visto, implementano all'interno del proprio modello non solo gli aspetti puramente geometrici e fisici, ma anche quelli legati alla caratterizzazione comportamentale dell'occupante. Per questo motivo la fase di definizione del profilo idoneo per ciascun occupante risulta essere uno degli elementi che in maggior misura influenzano gli esiti della simulazione in correlazione al caso studio, proprio perché il comportamento umano ha un'influenza notevole sui tempi di evacuazione. In una prima analisi si evince come alcuni di questi aspetti sono stati per anni totalmente trascurati. Basti pensare che la maggior parte degli studi svolti alla fine del secolo scorso in merito all'argomento facevano spesso e volentieri riferimento ad una popolazione che non rappresentava affatto la reale eterogeneità di quest'ultima. I modelli prendevano in considerazione delle condizioni ideali, nelle quali la società non si identificava per niente. Generalmente, il campione su cui si basavano gli studi era composto da una popolazione normodotata ed autonoma. Non veniva perciò trattato alcun tipo di disabilità, da quella motoria a quella sensoriale, veniva quindi fatta una fotografia della realtà che non la rispecchiava affatto, portando in questo modo ad ottenere dei risultati in parte falsati e distanti dalle effettive condizioni.

6.1 Le caratteristiche principali

Al fine prevedere le dinamiche durante un evento di evacuazione da un edificio ed evidenziarne i fattori rilevanti è utile indagare le caratteristiche peculiari degli occupanti durante un'emergenza, trattandoli sia come singoli pedoni, ma anche come gruppo.

Ogni occupante può essere descritto da una serie di attributi che ne differenziano il comportamento e il movimento rispetto gli altri. Questi fattori sono innumerevoli e vengono di seguito elencati:

- genere;
- età;
- familiarità con l'edificio;
- attaccamento sociale;
- attaccamento agli oggetti.

La prima differenziazione si può fare considerando il genere, infatti numerosi episodi hanno dimostrato che il sesso maschile e quello femminile assumono comportamenti diversi in caso di pericolo. Altro elemento determinante è l'età dell'occupante, basti fare riferimento ad eventi che hanno interessato bambini, adulti ed anziani. Ognuna delle tre tipologie elencate presenta caratteristiche ed approcci differenti in fase di esodo. Un elemento che ad esempio si può osservare nelle persone più anziane è la fatica, infatti possono presentare dei cali di resistenza e conseguente incremento dei tempi di esodo.

Vi è poi un aspetto: la familiarità con l'edificio. Analizzando alcuni eventi passati è emerso come gli individui scelgano un percorso anziché un altro proprio in funzione della loro conoscenza rispetto l'ambiente che li sta ospitando. Molto spesso infatti si è osservato che gli occupanti utilizzano per l'esodo lo stesso percorso che hanno svolto per accedere all'edificio ma a ritroso, in alcuni casi non curandosi della segnaletica.

Altri fattori possono essere quello di attaccamento sociale e di attaccamento agli oggetti. I legami affettivi infatti rappresentano un fattore determinante in queste situazioni. Alcune persone infatti non pensano immediatamente ad evacuare l'edificio, bensì di raggiungere ed aiutare i propri cari prima di allontanarsi dalla struttura. Si assiste anche a situazioni in cui l'occupante decide di recuperare gli effetti personali, basti pensare agli incendi che si verificano in luoghi ove si svolge la vita quotidiana come le abitazioni. Purtroppo la familiarità in questo caso si traduce in un pericolo poiché l'occupante non percepisce realmente il pericolo sentendosi in un ambiente per lui sicuro.

Per tenere conto almeno di una parte degli aspetti comportamentali e fisici appena enunciati, le ricerche in merito hanno proposto di assegnare per ciascuna tipologia di occupante dei valori

di **velocità** e dei **tempi di pre-movimento**. La norma ISO/TR 16738:2009 è il documento che contiene queste informazioni e ha come obiettivo quello di cercare di razionalizzare i dati dei diversi studi sull'argomento in modo da renderli disponibili ed utilizzabili dalla collettività. In esso sono contenuti i valori in termini di tempo e velocità volti a caratterizzare i profili di occupanti. Tuttavia sono innumerevoli gli approfondimenti sull'argomento volti ad indagare questi parametri. Il codice di prevenzione incendi permette infatti l'impiego di dati reperiti da normative vigenti, ma in alternativa, consente al progettista di attingere i dati di input per la modellazione di esodo anche da letteratura tecnica benché quest'ultima abbia validità a livello scientifico.

6.2 Inclusione: individuazione dei profili

Come si può notare le proprietà fin qui analizzate riguardano un bacino molto ristretto della società, in quanto vengono completamente omesse le considerazioni di eventuali persone con un ridotto livello di autonomia nel movimento o ancora con ridotte capacità cognitive. In Italia, come nel resto dell'Europa, il mondo della progettazione e quello delle disabilità hanno percorso per anni due binari differenti senza mai incrociarsi. Basta guardarsi attorno durante la vita quotidiana per accorgersi che numerosi luoghi, tra cui una moltitudine di edifici pubblici presenta importanti disagi nei confronti di persone non completamente autonome. Questo perché fino a qualche decennio fa l'approccio al mondo delle disabilità da parte dei progettisti, seppur forse inconsapevolmente, era quello della segregazione. Gli effetti negativi di questa negligenza, come detto pocanzi hanno un notevole impatto ancora al giorno d'oggi, infatti la maggioranza degli edifici costruiti nel secolo scorso presentano una completa inadeguatezza da questo punto di vista. Il termine segregazione seppur fin troppo di effetto, è legittimo, in quanto la linea di pensiero pareva essere quella di voler escludere questa porzione di società da qualsiasi attività pubblica e non solo. Solo nel 1989 si sentì la necessità di progettare in modo accessibile e sicuro tenendo quindi in considerazione le persone affette da disabilità motorie. Questa esigenza si manifestò con il D.M. 236/89 (Prescrizioni tecniche necessarie a garantire l'accessibilità, l'adattabilità e la visibilità degli edifici privati e di edilizia residenziale pubblica sovvenzionata e agevolata, ai fini del superamento delle barriere architettoniche). In esso vi è la definizione di accessibilità, un nuovo concetto, per il mondo della progettazione italiano, che veniva definito come "la possibilità, anche per persone con ridotta o impedita capacità motoria o sensoriale, di raggiungere l'edificio e le sue singole unità immobiliari e ambientali, di entrarvi agevolmente e di fruirne spazi e attrezzature in condizioni di adeguata sicurezza e autonomia". Finalmente dunque la progettazione non era più rivolta solamente ad una parte di popolazione ma era veramente costruita a misura d'uomo e delle sue condizioni. Occorre però evidenziare che sebbene il tema della diversità venne affrontato, tuttavia, seppur

implicitamente la figura del normodotato e quella del disabile nella cultura della società erano comunque due profili ben distinti tra loro. I progetti venivano comunque concepiti e sviluppati in funzione delle esigenze di un utilizzatore finale “standard”, il quale si ipotizzava possedere piena efficienza a livello motorio e cognitivo. Sebbene si rispettassero le imposizioni previste dal D.M.236/89, il progetto era finalizzato ad una specifica tipologia di occupante.

Il grande passo in avanti è avvenuto nell’ultimo decennio, nel quale la società sta gradualmente cambiando visione rispetto questo argomento, divenuto ad oggi tema di grande sensibilità. Si sta assistendo ad una educazione della popolazione in riferimento a questi aspetti ed a un conseguente cambiamento culturale.

Un aiuto da questo punto di vista alla progettazione è stato fornito sicuramente dal D.M. 3/08/2015, il Codice di Prevenzione Incendi, nel quale si riportano per la prima volta nel campo delle normative antincendio, il tema dell’inclusione. Con il termine inclusione si descrive un nuovo concetto metodologico tramite il quale le persone con annesse le varie tipologie di disabilità (temporanee o permanenti) che frequentano l’attività diventano parte integrante della progettazione. Questo approccio tuttavia richiede un grosso sforzo dal lato progettuale poiché va a stravolgere i canoni sui quali si è basata la progettazione da anni, andando ad influire sulle dimensioni o ad influenzare la scelta di alcuni elementi. È importante perciò che si segua e si supporti questa strada educando la società ad una progettazione inclusiva.

L’affermarsi di questa nuova filosofia nella progettazione ha creato l’esigenza di conoscere e saper descrivere in modo dettagliato ogni aspetto della popolazione, in termini di comportamentali, fisici e geometrici al fine di poter basare la validazione di un progetto sulla base di una società eterogenea.



Il primo step è stato quello di cercare di identificare tutte le casistiche di occupanti e le caratteristiche ad esse correlate, oltre i comuni profili della persona autonoma e indipendente è stato analizzato a fondo il tema delle disabilità e dell’inclusione. Quest’ultimo negli ultimi anni ha costituito uno dei punti cardine sui quali focalizzare la progettazione, che altrimenti risulterebbe non ottimale. Al fine di avere informazioni generali sull’argomento si è fatto riferimento alla guida DARAC “*Emergency Evacuation Planning Guide for People with Disabilities*”. DARAC è l’acronimo di “Disability Access Review and Advisory Committee”, il

cui obiettivo principale è quello di identificare le esigenze esistenti e le problematiche emergenti dalla comunità di disabili col fine di implementare queste necessità all'interno delle guide NFPA.

La guida, pubblicata nel giugno 2016, contiene le disposizioni per gli utenti con disabilità. Essa è stata sviluppata direttamente insieme alla comunità di disabili al fine di fornire indicazioni sull'argomento il più possibile attendibili e di efficacie utilizzo. In essa si individuano 5 diverse categorie di disabilità. Inoltre al suo interno sono contenute anche alcune linee guida ai fini di migliorare la progettazione e la pianificazione dell'evacuazione degli occupanti dagli edifici.

In riferimento al testo sopra citato si è individuata quindi una prima classificazione riguardante le differenti tipologie di disabilità:

- mobilità;
- cecità o ipovedenza;
- udito;
- linguaggio;
- cognitivo.

Di seguito, in funzione della classificazione appena descritta si riportano le potenziali tipologie di occupanti con disabilità che possono essere presenti in una situazione di emergenza.

Tipologie di profili con ridotta mobilità

Utenti in sedia a rotelle



Le criticità fondamentali per l'esodo di questo tipo di occupanti consistono nell'attraversamento di spazi troppo stretti, non progettati in modo idoneo, muoversi su superfici non orizzontali (scale). Di questi si può fare una ulteriore distinzione, tra sedia a rotelle classica e sedia a rotelle elettrica. In caso di sedia a rotelle classica si possono avere utenti autonomi nel movimento oppure, in caso di multipla disabilità necessiteranno di un assistente il quale avrà l'incarico di spostarli durante la fase di esodo.

Dispositivi di mobilità richiesti:

- sedia a rotelle;
- sedia a rotelle elettrica;

Utenti di ambulatorio



Questa categoria comprende tutti quegli utenti con ridotte capacità motorie, dotate ad esempio di "devices" di supporto, quali bastoni, stampelle, scarpe ortopediche, ecc..

La capacità di spostamento risulta essere limitata ma autonoma. In genere questo tipo di occupante si reca autonomamente in luogo sicuro temporaneo per poi essere assistito dallo staff per evacuare l'edificio.

Dispositivi di mobilità richiesti:

- bastone;
- stampelle;
- girello.

Utenti con problemi respiratori



Utenti autonomi sia durante l'esodo orizzontale che in quello verticale, ma che potrebbero avere difficoltà durante l'evacuazione per difficoltà respiratorie, nausea, vertigini. Questi soggetti effettuano generalmente delle pause durante l'evacuazione, che risulta nella maggior parte dei casi autonoma.

Dispositivi di mobilità richiesti:

- nessuno.

Ciechi o con ridotta visibilità



In questa categoria rientrano sia utenti con cecità totale, sia quelle persone con capacità visive ridotte. Generalmente sono munite di bastone o cane guida. In caso di emergenza richiedono delle segnaletiche alternative a quelle visive.

Dispositivi di mobilità richiesti:

- bastone;
- cane da assistenza.

Non udenti



Generalmente i disabili non udenti possono essere muniti di apparecchi acustici in grado di amplificare i suoni e permettere loro di sentire. In caso di emergenza, soprattutto se legata ad un incendio presentano la necessità di avere un continuo contatto verso gli altri occupanti, in quanto solamente

leggendo il labiale riusciranno a comunicare con gli altri utenti.

Dispositivi di mobilità richiesti:

- nessuno.

Utenti con problemi di linguaggio



Principalmente queste persone non sono in grado di parlare o di comunicare verbalmente in modo chiaro con gli altri occupanti. Questo tipo di disabilità non risulta generalmente essere un problema, in quanto essi sono in grado di spostarsi in modo autonomo e di capire ciò che sta succedendo nell'ambiente.

L'unica complicazione si ha nel momento in cui la struttura da evacuare preveda dei luoghi sicuri temporanei o ascensori antincendio muniti di telefoni di emergenza, i quali non possono essere usati da questa particolare famiglia di disabili.

Dispositivi di mobilità richiesti:

- nessuno.

Utenti con problemi di tipo cognitivo



Questa famiglia comprende chi presenta una ridotta o compromessa capacità di elaborare o comprendere le informazioni ricevute dai propri sensi.

La guida DARAC inserisce in questa categoria tutti quegli utenti che presentino alterazioni cognitive di qualunque causa, ad esempio sclerosi multipla,

depressione, alcolismo, Alzheimer, morbo di Parkinson, lesioni cerebrali e alcune condizioni psichiatriche.

Sono tra i profili di disabilità più problematici, in quanto non risultano essere autonomi per nessuna fase dell'esodo.

Dispositivi di mobilità richiesti:

- vari.

Utenti con disabilità temporanee

Di questa categoria fanno parte gli utenti che possiedono una o più disabilità causata da una patologia o un agente esterno e tale situazione è di breve durata. Tra i pazienti di un ospedale vi possono persone che presentano disabilità non permanenti, ma dovute ad esempio a malattie, interventi chirurgici o traumi.

Dispositivi di mobilità richiesti:

- vari.

Utenti con disabilità multiple

Agli utenti fin qui descritti, occorre aggiungere una ulteriore categoria per quelle persona caratterizzate da più di una disabilità, basti pensare a persone con traumi dovuti ad incidenti automobilistici, che possono perdere la loro capacità motoria insieme a quella uditiva o visiva.

Dispositivi di mobilità richiesti:

- vari.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva dei profili precedentemente descritti ed i relativi dispositivi.

TIPOLOGIE DI DISABILITA'	DISPOSITIVI
Ridotta Mobilità	Sedia a rotelle
	Sedia a rotelle elettrica
	Bastone
	Stampelle
	Girello
Problemi respiratori	-
Ciechi o con ridotta visibilità	Bastone
	Cane da assistenza
Non udenti	-
Problemi di linguaggio	-
Problemi di tipo cognitivo	Vari
Disabilità temporanee	Vari
Disabilità multiple	Vari

Tabella 2. Tipologie di disabilità e relativi dispositivi.

Dopo aver descritto in modo completo gli aspetti principali per ciascuna tipologia di occupante si è proceduto cercando di attribuire a ciascun profilo un certo livello di autonomia espresso in una scala di valori da 1 a 3 in numeri romani. Nello specifico agli occupanti del tutto autonomi è stato assegnato un livello di autonomia pari a I, agli occupanti che durante alcune fasi di esodo richiedono assistenza è stato attribuito un valore pari a II, infine a quegli individui che nel perdurare dell'intera evacuazione necessitano di personale assistenziale è stato assegnato il terzo livello di autonomia. Di seguito se ne riporta uno schema.

DESCRIZIONE DEL LIVELLO DI AUTONOMIA		
Livello	Descrizione	
Livello I	Spostamento in modo autonomo	
Livello II	Può essere in gradi di recarsi al luogo sicuro temporaneo del piano in modo autonomo per poi attendere assistenza per raggiungere il luogo sicuro	
Livello III	Attesa di assistenza per compiere l'intera evacuazione	
TIPOLOGIE DI DISABILITA'	DISPOSITIVI	LIVELLO DI AUTONOMIA
Ridotta Mobilità	Sedia a rotelle	II-III
	Sedia a rotelle elettrica	II
	Bastone	I-II
	Stampelle	I-II
	Girello	I-II
Problemi respiratori	-	I-II-III
Ciechi o con ridotta visibilità	Bastone	II-III
	Cane da assistenza	II-III
Non udenti	-	I-II
Problemi di linguaggio	-	I
Problemi di tipo cognitivo	Vari	I
Disabilità temporanee	Vari	I-II-III
Disabilità multiple	Vari	I-II-III

Tabella 3. Attribuzione del livello di autonomia.

È bene osservare come alcune tipologie di occupanti possono rientrare in differenti classi di autonomia in funzione ad esempio delle misure di progettazione dell'esodo previste all'interno dell'edificio. Basti pensare ad esempio agli occupanti in sedia a rotelle manuale, che possono presentare simultaneamente anche altri tipi di disabilità.

Oltre ai profili sopra riportati occorre prendere in considerazione anche casi limite, in cui l'individuo si trova in situazioni molto particolari, che ad esempio si possono presentare nel caso di strutture ospedaliere. Queste particolari attività infatti possono comprendere persone allettate o in barella, i quali molto spesso richiedono una protezione sul posto in locale adeguatamente progettato.

Al fine di ottenere un quadro generale sulle possibili figure da considerare durante una simulazione di esodo, di seguito viene riportata una tabella riassuntiva comprendente tutte le tipologie di occupante fin qui analizzate. Si aggiungono inoltre altri profili, che sono particolari sottocategorie dell'occupante autonomo e privo di disabilità:

- la figura del personale del team di soccorso, in Italia rappresentata dalla squadra dei Vigili del Fuoco;
- il personale addestrato in caso di emergenza.

		TIPOLOGIE DI OCCUPANTI
GRADO DI AUTONOMIA	In parte o del tutto non autonomi	In sedia a rotelle
		In sedia a rotelle elettrica
		Bastone
		In stampelle
		Girello
		Cieco o con ridotta visibilità
		Non udente
		Problemi di linguaggio
		Problemi di tipo cognitivo
		In barella
		In letto di ospedale
	Autonomi	Occupante in condizioni standard
		Personale addestrato
		Squadra di soccorso (VVF)

Tabella 4. Classificazione tipologia di occupanti.

Dopo aver definito un quadro completo riguardante tutte le figure che possono coinvolte durante una situazione di emergenza in caso di incendio, è necessario descrivere tramite dei

parametri significativi. L'obiettivo quindi è quello di tradurre gli aspetti qualitativi appena descritti, in valori quantitativi inseribili all'interno di un modello matematico di evacuazione. Le normative vigenti, come già anticipato all'inizio del capitolo, cercano di descrivere ciascuna tipologia di occupante in termini di velocità di camminamento e tempistiche di pre-movimento. Vari studi in merito alla determinazione di tali valori sono stati svolti nell'ultimo ventennio. Tuttavia molti di essi riguardano, come si vedrà a breve, un particolare campione di persone, molto spesso non adeguatamente ampio al fine di rappresentare le caratteristiche dell'intera collettività.

6.2.1 Velocità

Una stima per i valori di velocità in caso di emergenza viene fornita dagli studi effettuati da Nelson e Mowrer.

Le loro analisi prendono come riferimento i precedenti studi svolti da Fruin, Predtechenskii, Milinskii, e Pauls. Tutti gli studi sopra riportati basano i propri calcoli sulla correlazione che lega la densità di popolazione alla velocità di movimento tramite un modello idraulico. Le ipotesi alla base di questo approccio sono principalmente tre:

- tutti gli occupanti iniziano ad evacuare gli ambienti nello stesso istante;
- il flusso di ciascun occupante non è influenzato dalle decisioni degli altri individui;
- tutte le persone o quasi sono autonome nel movimento e prive di disabilità.

Nello studio si dimostra che se la densità di occupanti sulla superficie considerata è inferiore a 0,54 pers/m², le persone sono in grado di muoversi liberamente in modo del tutto indipendente dalla velocità di altri occupanti. Quando la densità raggiunge valori superiori a 3,8 pers/m² il movimento degli occupanti ne risulta influenzato. In particolare con valori di densità tra 0,54 e 3,8 pers/m² si ha una funzione lineare che lega la densità con la velocità.

$$S = k - akD$$

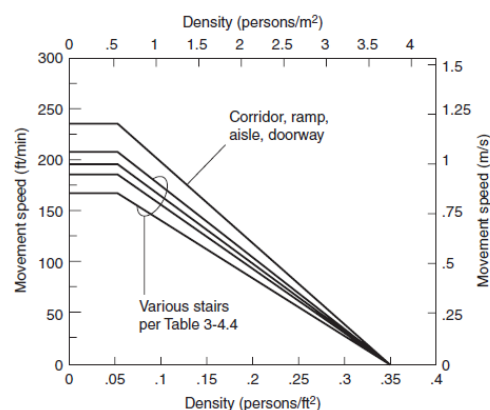
dove:

S è la velocità;

D è la densità;

k è una costante;

a è una costante che vale 0,266.



Dalla formula sopra riportata si possono ricavare le velocità. Dallo studio si evince che questa nel caso di superfici orizzontali assume un valore pari a **1,19 m/s**, mentre nel caso di esodo verticale può assumere diversi valori in funzione del rapporto tra alzata e pedata.

Dall'analisi di altri studi simili come quelli svolti da Pauls in "*Building evacuation: Research findings and recommendations*" per gli edifici adibiti ad uffici si è riscontrato come le velocità determinate siano circa uguali a quelle determinate da Nelson e Mowrer, assumendo valori pari a **1,25 m/s**. di seguito si riportano i valori di velocità in funzione del rapporto tra alzata e pedata in riferimento agli studi effettuati da Nelson e Mowrer e riportati nella tabella G.2 della ISO/TR 16738:2009.

Exit route element		k^a	Travel speed m/s	Maximum specific flow F_{Smax} persons/m/s of effective width
Corridor, aisle, ramp, doorway		1,40	1,19	1,19
Stair riser mm	Stair tread mm	—	—	—
191	254	1,00	0,85	0,94
178	279	1,08	0,95	1,01
165	305	1,16	1,00	1,09
165	330	1,23	1,05	1,16
^a Constants for Equation (G.1), effects of density on travel speed.				

Tabella 5. Tab. G.2 tratta da ISO/TR 16738:2009.

Se gli studi sopra menzionati sono riferiti ad una popolazione media senza fare distinzioni di età e di sesso, altre indagini inserite all'interno della norma BS 5588-11 hanno analizzato le velocità effettuando queste distinzioni. Da questi studi si evince che una popolazione di circa 20 anni possiede una velocità pari a 1,6 m/s per gli uomini e 1,3 m/s per le donne.

Gli studi sulle velocità sopra analizzati, come già accennato, riguardano una popolazione priva di disabilità, perciò non sono esaustivi al fine di una modellazione di esodo più completa ed inclusiva.

È proprio per la carenza di alcuni dati che dagli anni '90 fino ai giorni nostri sono state effettuate numerose ricerche con l'obiettivo di indagare tempi di pre-movimento, velocità e dinamiche dell'esodo in riferimento ad una vasta gamma di tipologie di occupante. Tra questi studi si possono citare quelli di Proulx, Boyce risalenti alla fine del secolo scorso, fino a giungere a tempi più recenti con gli studi realizzati da Hunt.

Tra le ricerche sull'argomento si può citare quella effettuata da Hunt in "*Simulating hospital evacuation*" in cui si analizza l'evacuazione di persone con gravi difficoltà motorie all'interno di edifici ospedalieri. Nella sua ricerca è presente una rassegna dei principali risultati dei test

in riferimento ai valori di velocità di esodo effettuati negli anni. In riferimento a questa raccolta di dati vengono ora descritti gli studi in essa contenuti.

Proulx (1995)

Alla fine del secolo scorso, Proulx ha effettuato delle riprese video indagando le dinamiche di alcune prove di evacuazione. In particolare l'indagine riguardava tre edifici alti, due costituiti da 14 piani ed il terzo avente 12 piani. L'analisi è stata effettuata in Canada, impiegando occupanti generici, con varie età senza fare distinzioni per sesso. Dai risultati dell'esperimento è emerso che i disabili in sedia a rotelle tendono ad attendere da fermi gli assistenti per essere aiutati durante l'esodo, mentre gli occupanti con ridotte capacità motorie hanno richiesto tempi più lunghi. Infine i soggetti più anziani sono stati caratterizzati da velocità di movimento ridotte rispetto alla media degli occupanti indagati.

Shields (1997)

Due anni più tardi Shields ha svolto delle indagini in merito alle dinamiche di esodo all'interno di un hotel in Gran Bretagna, in cui ha raccolto dei dati utili sulle velocità di occupanti in sedia a rotelle sempre tramite riprese a video. In questo caso la prova di evacuazione non fu annunciata, tuttavia sia gli occupanti in carrozzina sia gli assistenti ne erano al corrente. Come nell'esperimento di Proulx anche in questo caso gli occupanti in sedia a rotelle hanno atteso assistenza prima di effettuare l'evacuazione.

Brand (2001)

Questo studio effettuato in Svezia, si basa sull'osservazione dei seguenti profili durante una prova di evacuazione: persone con ridotte capacità motorie autonome, persone in sedia a rotelle manuali ed elettriche. Anche in questo caso come negli studi precedenti non si fa distinzione in funzione del sesso degli occupanti, mentre riguardo l'età si sono presi occupanti dai quindici anni in su.

Sano (2004)

Studio effettuato in Giappone nel 2004, basato su una prova sperimentale considerando un edificio di 20 piani. L'obiettivo è stato quello di indagare le velocità di esodo 20 partecipanti con sedia di evacuazione aventi tra i venti ed i trent'anni.

Fujiyama e Tyler (2004)

Nello stesso anno sono stati svolti sempre in Giappone delle prove di evacuazione col fine di indagare le dinamiche di esodo di persone anziane, si è preso come riferimento un campione composto da persone di sesso maschile e femminile aventi un'età compresa tra i 60 e gli 81 anni. La ricerca ha analizzato le velocità di percorrenza in salita ed in discesa su quattro rampe di scale e una breve superficie piana in un esodo senza ostacoli. L'evacuazione è stata effettuata

per due configurazioni di velocità per le quali gli occupanti erano stati precedentemente addestrati: andamento normale e veloce.

Adams e Galea (2010)

In questo studio sono stati presi in considerazione più strumenti per l'assistenza all'esodo. Per ciascun device sono stati esplicitati i valori relativi di velocità lungo le vie di esodo orizzontali e verticali. La prova non prende però in considerazione alcun ritardo dovuto alla preparazione dell'utente, né tantomeno viene differita la velocità in base al sesso.

Sørensen e Dederichs (2012)

Le indagini sono state svolte in Nuova Zelanda, e riguardano l'osservazione mediante riprese video del movimento in corridoi ed in discesa dalle scale da parte di occupanti autonomi caratterizzati da disabilità di tipo visivo. La prova di evacuazione ha coinvolto un numero di 46 occupanti.

Lavender (2012)

Lo studio, effettuato negli Stati Uniti nel 2012, riguarda l'osservazione dell'uso di più metodi per il trasporto di persone con ridotta capacità motoria.

Jiang (2012)

L'esperimento condotto nel 2012 aveva come fine l'analisi del movimento di persone con limitate capacità motorie con e senza stampelle. L'indagine ha preso un campione di 117 occupanti in una stazione della metropolitana in Cina. Anche in questo caso l'osservazione è stata svolta mediante l'ausilio di filmati video.

Kuligowski (2012)

Kuligowski ha analizzato tramite una prova di evacuazione le dinamiche di esodo in una casa di assistenza statunitense. In particolare l'indagine si è focalizzata sulla determinazione delle velocità lungo le rampe delle scale, nello specifico sono state impiegate 13 rampe. È stato analizzato sulla base di 119 persone, delle quali sono state prese le velocità. Tuttavia la prova ha registrato valori relativi ad occupanti che non necessariamente avevano iniziato il loro moto da un punto ben specifico, ma anche da un livello inferiore, perciò occorre fare attenzione nella valutazione e nell'attendibilità di tali dati.

Alonso (2014 e 2016)

Il lavoro riguarda gli effetti di una modifica proposta per la norma NFPA 101 (Life Safety Code), che prevedeva l'incremento delle dimensioni massime consentite per i compartimenti a prova di fumo in ambito sanitario. Con questa modifica ci sarebbe stato un numero maggiore di

pazienti. Per questo motivo il lavoro analizza le modalità di evacuazione di pazienti non autonomi in ambito ospedaliero.

Gli studi in merito alla determinazione delle velocità per ciascun tipo di utente sono quindi in continua evoluzione. Attualmente si ha a disposizione una modesta quantità di dati, tuttavia questi, molto spesso sono oggetto di dibattito all'interno del mondo scientifico, poiché di difficile interpretazione, basti pensare alle infinite modalità con le quali nei vari studi viene affrontata l'osservazione delle prove e la misurazione delle relative velocità. Queste ultime infatti vengono influenzate in modo esponenziale dalle condizioni al contorno.

Risulta quindi ad oggi molto complicato uniformare tali valori al fine di avere a disposizione dei valori razionali ed univoci per ogni profilo di occupante.

Per questi motivi la fase di scelta di tali valori rappresenta uno step essenziale della modellazione dell'esodo, in quanto da essa dipenderanno gli sviluppi dell'evacuazione ed i tempi di cui l'esodo necessiterà. L'utilizzo degli strumenti della FSE per la valutazione della salvaguardia della vita quindi attribuiscono al progettista un elevato carico di responsabilità nella scelta dei dati di input che meglio si addicono allo specifico caso analizzato.

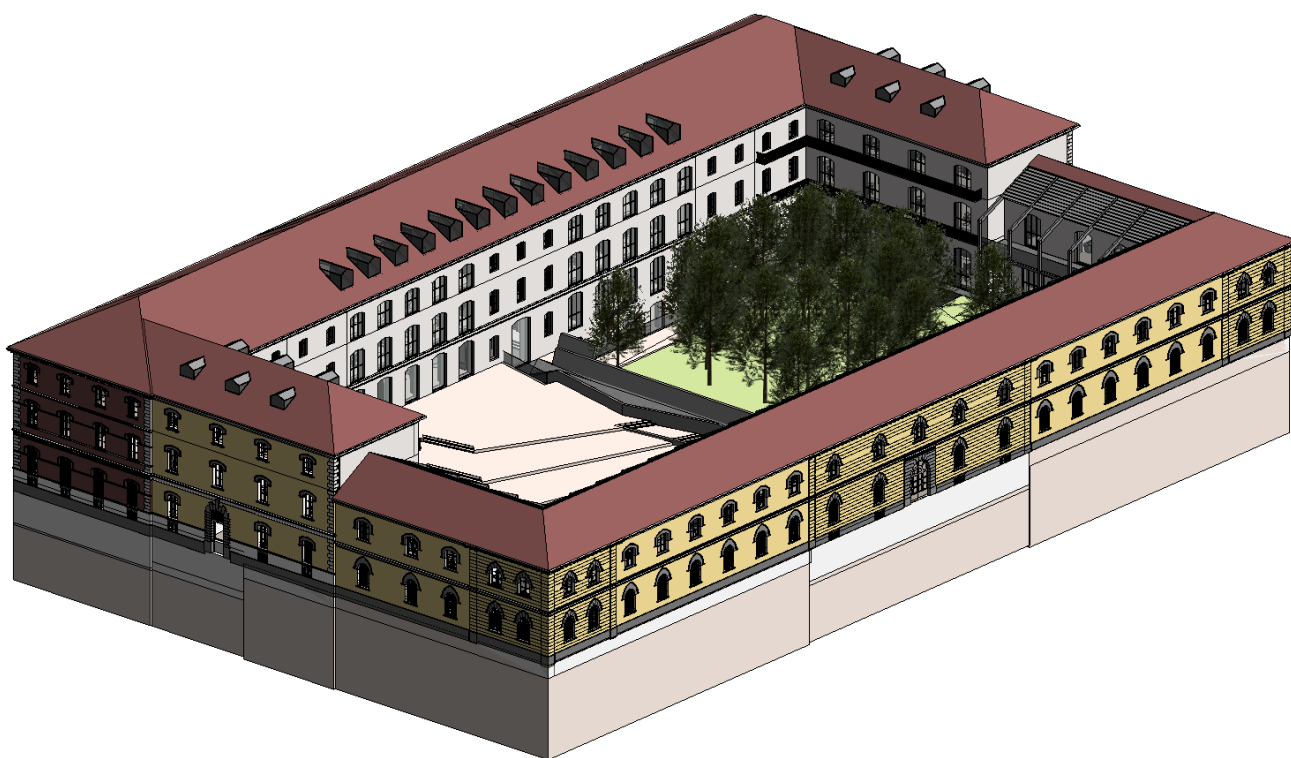
La norma ISO/TR 16738:2009 contiene alcuni dei valori delle ricerche sopra riportate con l'obiettivo di fornire al progettista una raccolta, seppur non esaustiva, dei valori di velocità per le tipologie di occupante più comuni. Tuttavia nel caso in cui vengano analizzate situazioni particolari come le strutture ospedaliere, la norma non è in grado di fornire tutti i dati necessari. È compito dunque del progettista reperire i dati da documenti scientifici, ed analisi egualmente validi.

Di seguito si riportano alcuni valori di velocità presi dalla letteratura attualmente disponibile, comprendente sia alcuni dei risultati delle prove analizzate nell'elaborato di Hunt, sia di altri studi sulla materia. Per quanto concerne i dati raccolti da Hunt sono stati omessi per semplicità le differenziazioni in funzione del sesso. Mentre per le velocità relative al trasporto del paziente allettato è possibile assumere che possieda gli stessi valori del paziente in barella, in quanto i dispositivi hanno caratteristiche dimensionali simili. Occorre inoltre osservare come i valori di velocità sotto riportati riguardino esclusivamente il movimento lungo una superficie orizzontale, tuttavia in letteratura si possono trovare valori anche per le velocità lungo le vie d'esodo verticali, molto spesso differita tra senso di percorrenza discendente e ascendente.

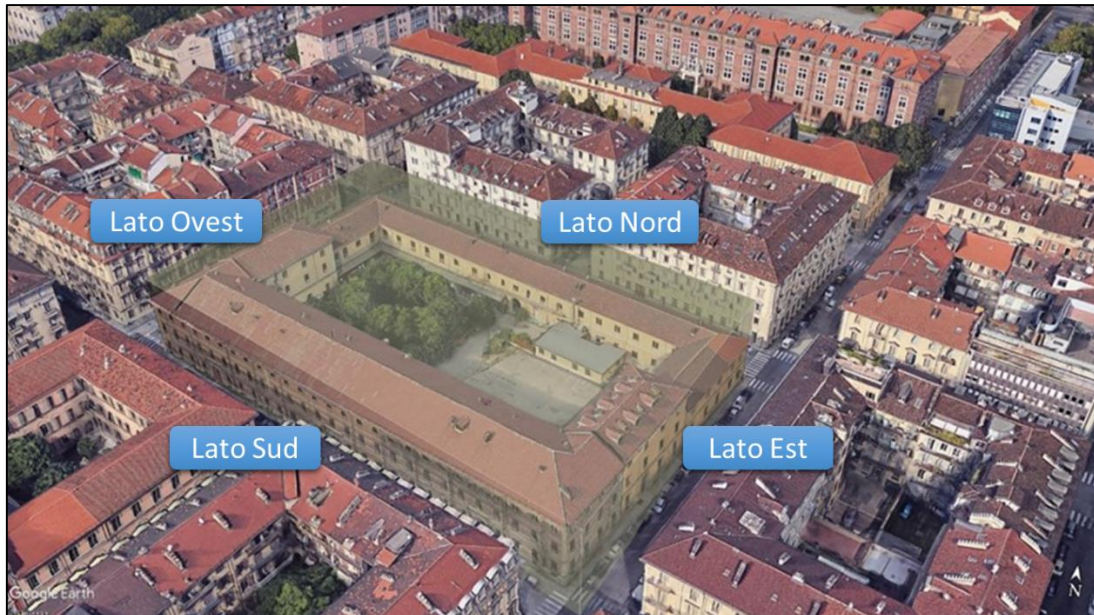
Profili	Fonte Hunt				Fonte Boyce				Fonte Alonso				Fonte Fruin		Fonte Nelson e Mowrer	
	Velocità di esodo <u>orizzontale</u>				Velocità di esodo <u>orizzontale</u> senza				Velocità di esodo <u>orizzontale</u> senza				Velocità di esodo <u>orizzontale</u>		Velocità di esodo <u>orizzontale</u>	
	Legge di distribuzione				Legge di distribuzione				Legge di distribuzione				Legge di distribuzione		Legge di distribuzione	
	Distribuzione	μ	σ	Max	Nome	μ	σ	Min	Max	Nome	μ	σ	Min	Max	μ	μ
Staff Medico					Normale	1	0.42	0.10	1.77	Normale	1.35	0.25	0.65	2.05		
All disabled					Normale	0.8	0.37	0.10	1.68	Normale						
With locomotion disability					Normale	1.25	0.32	0.82	1.77	Uniforme	1.12	0.28	0.84	1.40		
Senza disabilità					Normale	0.95	0.32	0.24	1.68							
Paziente autonomo					Normale	0.94	0.30	0.63	1.35							
Stampelle					Normale	0.81	0.38	0.26	1.60							
Bastone					Normale											
Griello					Normale	0.57	0.29	0.10	1.02							
Sedia a rotelle elettrica					Normale	0.89			0.93							
Sedia a rotelle manuale					Normale	0.69	0.35	0.38	0.94							
Paziente assistito					Normale	0.78	0.34	0.21	1.40							
Sedia a rotelle assistito					Normale	1.30	0.34	0.84	1.98	Normale	0.63	0.04				
Paziente allettato																
Barella	Uniforme			0.91						Normale	0.40	0.04				
Evac chair	Uniforme			1.34												
Carry chair	Uniforme			1.41												
Rescue sheet	Uniforme			0.52												
				1.23												
				1.65												
				1.75												
				1.23												

Figura 11. Raccolta dei valori di velocità orizzontale.

CAPITOLO 7 IL CASO STUDIO: LA EX- CASERMA – ATTIVITÀ UFFICI



7.1 Inquadramento generale



Il caso studio riguarda il progetto di recupero di una ex caserma militare sita in Piemonte. L'edificio occupa un intero isolato di un'area caratterizzata principalmente da insediamenti a destinazione pubblica, terziaria e residenziale risalenti all'impianto di fine ottocento della città in cui è ubicato. L'edificio presenta una conformazione planimetrica regolare, con i fabbricati che si sviluppano in parte su tre ed in parte su due piani fuori terra, oltre al livello sottotetto e ad un piano interrato, ed affacciano su una corte interna.

L'edificio nasce inizialmente come magazzino militare ed era composto da un corpo di fabbrica principale, di tre piani fuori terra lungo un lato e da due ali laterali di due piani fuori. Nel 1913 questi fabbricati sono stati sopraelevati col duplice obiettivo di ospitare alcuni uffici e attribuire maggiore omogeneità ai lati corti della struttura. L'edificio risulta essere sottoposto a vincolo da parte del Ministero dei beni culturali, per cui anche gli interventi di adeguamento dal punto di vista della prevenzione incendi dovranno essere tali da garantire i vincoli architettonici ai quali è soggetto.

L'intervento

In accordo con la variante al PRG si prevede la conservazione dell'edificio esistente con interventi fino alla ristrutturazione edilizia. La riqualificazione dell'edificio avverrà mediante

cambio di destinazione d'uso; in particolare la nuova destinazione d'uso sarà uffici non aperti al pubblico.

Nel progetto di ristrutturazione e riqualificazione del fabbricato sono previste diverse azioni, di seguito si riportano gli interventi che più hanno influenzato la progettazione dell'esodo.

Il sistema distributivo principale è stato riorganizzato con formazione di nuovi percorsi orizzontali e verticali, sono stati introdotti due nuovi blocchi scale e recuperate due scale esistenti, inoltre è previsto l'inserimento di nuovi ascensori al fine di ottimizzare la distribuzione verticale nell'edificio.

Interno corpo di fabbrica

- Rifacimento interno dell'edificio nel rispetto dei caratteri storico ambientali dell'impianto e di elementi di pregio;
- Mantenimento dei piani esistenti con recupero delle strutture esistenti e inserimento di un pavimento sopraelevato in aggiunta alla struttura esistente, il quale comporta un cambio delle quote degli orizzontamenti;
- Recupero del piano sottotetto con funzione ad ufficio;
- Realizzazione di un Auditorium al piano interrato sottostante a parte del cortile interno;
- Nuove aree interrate adibite a locali per impianti;
- Nuovo parcheggio interno con ingresso lungo uno dei due lati corti del fabbricato.

Metodologia progettuale generale

L'intero progetto è stato elaborato utilizzando la metodologia BIM (Building Information Modelling). L'impiego di questo approccio permette ai team di progettazione di avere a disposizione dei modelli digitali della struttura in esame in tutte le fasi del processo edilizio. In questo modo si ha il completo controllo del fabbricato in ogni suo step progettuale. Inoltre grazie a questa metodologia vengono coinvolti più software caratterizzati da un elevato livello di interoperabilità che consente alle varie discipline di lavorare e scambiarsi i dati in modo efficiente ed ottimizzato. Lo scopo attuale del mondo della progettazione è quello di rendere quest'ultima digitale in tutti i suoi aspetti e permettere di conseguenza di seguire il manufatto in tutta la sua vita utile grazie a questi strumenti traendone anche benefici sul livello di qualità del prodotto.

La progettazione antincendio in questo caso è stata svolta secondo il D.M. 3/08/2015 "Codice di Prevenzione Incendi", con riferimento alla regola tecnica verticale dedicata alle attività adibite ad uffici (D.M. 8/06/2016).

Schema distributivo



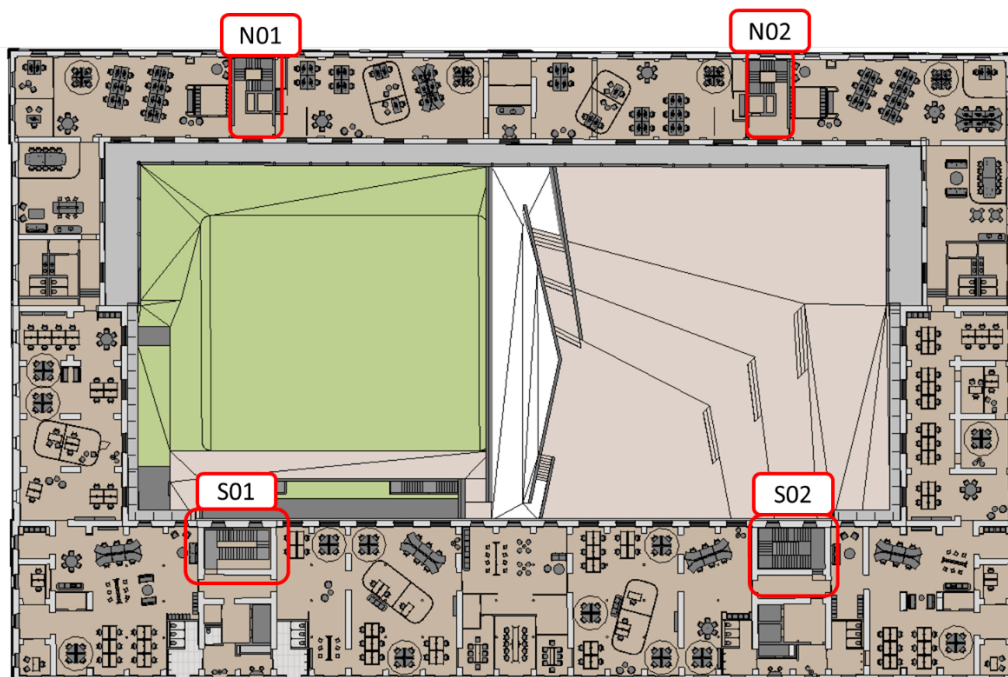
L'edificio, come detto, si sviluppa su tre livelli fuori terra e due interrati. Nello specifico la manica ubicata sul lato Sud è costituita da tre piani fuori terra ed un piano interrato, mentre la manica a Nord è costituita da due piani fuori terra. Esse sono collegate tramite le maniche laterali (Est e Ovest) che si sviluppano fino a due piani fuori terra.

Il fabbricato prevede un numero di uscite pari a due, una posta sul lato Sud e l'altra sul lato Nord.

L'intero edificio quindi ospita ambienti relativi ad uffici prevalentemente di tipo open space, mentre al piano terzo del lato Sud vi è la zona amministrativa.

Oltre all'attività prevalente per cui l'edificio è stato riqualificato, ovvero l'attività di uffici, il complesso ospita inoltre un auditorium i cui volumi sono ubicati nella corte centrale al piano interrato. Esso quindi costituisce un'attività secondaria all'interno del progetto. L'auditorium è dotato di un'uscita diretta verso il cortile centrale tramite una scala, inoltre è presente un'ulteriore uscita che permette agli utenti di utilizzare una delle 4 scale presenti nella struttura che servono l'attività uffici (S02).

In basso viene mostrata una porzione del fabbricato nella quale si evidenziano le posizioni e la codifica dei 4 blocchi scala, rispettivamente chiamati: N01, N02, S01, S02.



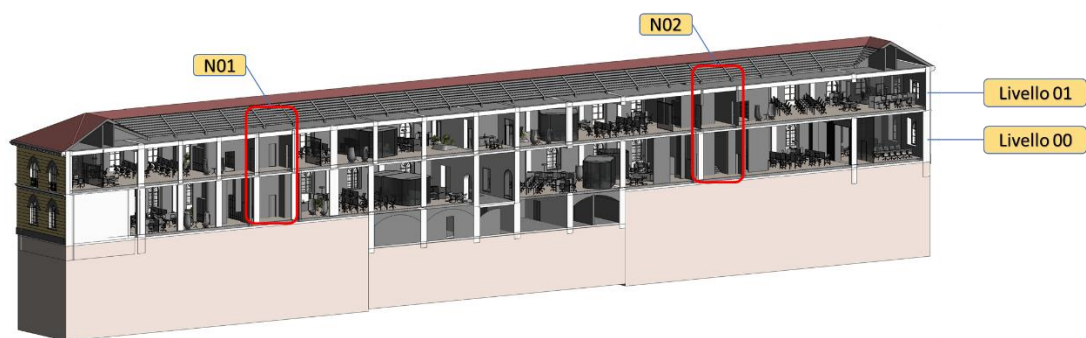


Figura 12. Lato Nord.

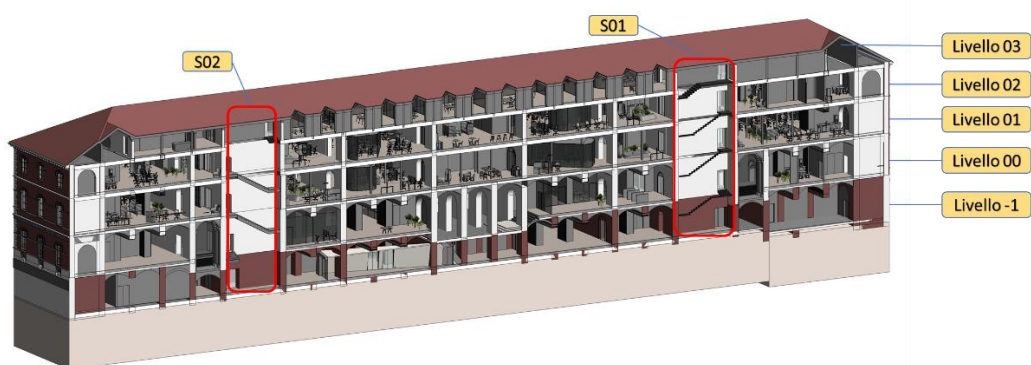


Figura 13. Lato Sud.



Figura 14. Lato Est.



Figura 15. Lato Ovest.

7.2 Progettazione dell'esodo secondo D.M. 3/08/2015

Il riferimento alla strategia S.4 è servito per avere a disposizione una prima soluzione con l'intenzione di possedere una base sulla quale verificare l'efficienza delle soluzioni adottate con gli strumenti di Fire Safety Engineering. Non è stata utilizzata quindi la strategia al fine di ottenere una soluzione conforme, ma per avere un input progettuale che poi è stato verificato con la sezione M.

Il primo step è quello di stabilire a che livello di prestazione appartiene l'edificio analizzato. Di seguito si riportano la tabella che riporta i livelli di prestazione e la tabella che specifica i criteri di attribuzione per questa specifica misura antincendio.

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

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 6. Tabella S.4-1 e S.4-2 del C.P.I. 2015.

L'analisi viene effettuata analizzando ogni comparto dell'edificio. Nel caso in esame viene attribuito un livello di prestazione I per tutti i compartimenti presenti. Esso prevede l'esodo degli occupanti dell'attività verso un luogo sicuro. Al fine di soddisfare i requisiti richiesti dalla soluzione conforme il progetto è stato realizzato seguendo quanto riportato nel paragrafo s.4.5 del C.P.I. 2015.

Dati di ingresso

I dati di ingresso, già descritti al capitolo 3 del presente elaborato, sono il profilo di rischio **R_{vita}** e il valore di **affollamento** dell'attività. Si prosegue quindi con la determinazione di entrambi i parametri.

Determinazione del Profilo R_{vita}

Per l'individuazione del profilo R_{vita} da associare ad ogni compartimento dell'attività oggetto di studio si è fatto riferimento a quanto riportato nel paragrafo G.3.2 del Codice.

Si è determinato i valori del parametro δ_{occ} in riferimento alla tabella G.3-1.

Tabella 7. Tabelle G.3-1 e G.3-2 del C.P.I. 2015

Caratteristiche prevalenti degli occupanti δ_{occ}	
A	Gli occupanti sono in stato di veglia ed hanno familiarità con l'edificio
B	Gli occupanti sono in stato di veglia e non hanno familiarità con l'edificio
C Ci Cii Ciii	Gli occupanti possono essere addormentati: • in attività individuale di lunga durata; • in attività gestita di lunga durata; • in attività gestita di breve durata
D	Gli occupanti ricevono cure mediche
E	Occupanti in transito

$\delta\alpha$	Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio t_α [s]
1	600 lenta
2	300 media
3	150 rapida

4	75 ultra rapida
----------	-----------------

Il caso in esame risulta rientrare nella categoria A per quanto riguarda le caratteristiche degli occupanti, in quanto essi si trovano in stato di veglia e hanno familiarità con l'edificio, trattandosi di uffici non aperti al pubblico.

Per quanto riguarda il valore di $\delta\alpha$ si può affermare di rientrare nel caso 2, il quale prevede scatole di cartone impilate, libri, mobilio in legno, ecc.

In definitiva si evince che il Profilo R_{vita} da attribuire in questo caso specifico a tutti gli ambienti dell'attività risulta essere il **profilo A2**, in accordo con la tabella G.3-4 del Codice.

Tuttavia il Codice nella tabella G.3-5 del Codice, fornisce dei valori indicativi di R_{vita} per alcune tipologie di destinazione d'uso. Come si evince il profilo A2 ricavato dal metodo sopra descritto coincide con la tipologia proposta dalla tabella.

Tabella 8. Tabella G.3-5 del C.P.I. 2015

Tipologie di destinazione d'uso	R_{vita}
Palestra scolastica	A1
Autorimessa privata	A2
Ufficio non aperto al pubblico, sala mensa, aula scolastica, sala riunioni aziendale, archivio, deposito librario, attività commerciale all'ingrosso	A2-A3
Laboratorio scolastico, sala server	A3
Attività produttive, attività artigianali, impianti di processo, laboratorio di ricerca,	A1-A4

magazzino, officina meccanica	
Depositi sostanze o miscele pericolose	A4
Galleria d'arte, sala d'attesa, ristorante, studio medico, ambulatorio medico	B1-B2
Autorimessa pubblica	B2
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
Civile abitazione	Ci2-Ci3
Dormitorio, residence, studentato, residenza per persone autosufficienti	Cii2-Cii3
Rifugio alpino	Ciii1-Ciii2
Camera di albergo	Ciii2-Ciii3
Degenza ospedaliera, terapia intensiva, sala operatoria, residenza per persone non autosufficienti e con assistenza sanitaria	D2
Stazione ferroviaria, aeroporto, stazione metropolitana	E2

Affollamento

Nel caso in esame, essendo l'edificio adibito prevalentemente a uffici, è corretto ipotizzare che in caso di emergenza le persone all'interno del fabbricato stiano svolgendo le attività previste dalla destinazione d'uso dello stesso. L'edificio è stato suddiviso in macro settori, ognuno dei quali ospitante un certo numero di occupanti calcolato moltiplicando il valore di densità di occupanti per il valore della superficie del settore. Eccezione fatta per l'auditorium posto al

piano interrato, per il quale l'affollamento è stato calcolato in funzione del numero dei posti a sedere. Di seguito si riporta la tabella che contiene i valori di affollamento specifico o criteri di calcolo per ogni tipo di attività suggerita dal Codice.

Tabella 9. Tabella S.4-6 del C.P.I. 2015.

Tipologia di attività	Densità di affollamento o criteri	
	Valore	Unità di misura
Luoghi di pubblico spettacolo senza posti a sedere	1,2	Pers/m ²
Aree per mostre, esposizioni, manifestazioni varie di intrattenimento a carattere temporaneo		
Aree adibite a ristorazione	0,7	Pers/m ²
Aree adibite ad attività scolastica e laboratori (senza posti a sedere)	0,4	Pers/m ²
Sale d'attesa		
Uffici aperti al pubblico		
Aree di vendita di piccole attività commerciali al dettaglio con settore alimentare o misto		
Aree di vendita di medie e grandi attività commerciali al dettaglio con settore alimentare o misto	0,2	Pers/m ²
Aree di vendita di attività commerciali al dettaglio senza settore alimentare		
Sale di lettura di biblioteche, archivi		
Ambulatori		
Uffici non aperti al pubblico	0,1	Pers/m ²
Aree di vendita di attività commerciali all'ingrosso		
Aree di vendita di piccole attività commerciali al dettaglio con specifica gamma merceologica non alimentare		
Civile abitazione	0,05	Pers/m ²
Autorimesse	2 persone per veicolo parchato	-
Degenza	1 degente e 2 accompagnatori per posto letto	-
Aree con posti a sedere o posti letto (es. sale riunioni, aule scolastiche, dormitori, ...)	N° posti	-
Altre attività	Numero massimo presenti (addetti + pubblico)	-

In definitiva si sono calcolati i valori di affollamento per ciascun piano dell'edificio. Occorre evidenziare che dopo aver determinato l'affollamento moltiplicando per il corrispettivo valore di riferimento per l'attività uffici pari a 0,1 pers/m², tuttavia si è deciso di incrementare l'ipotesi sul numero di occupanti in funzione dei posti a sedere e delle postazioni di lavoro presenti in fase di progetto. Ciò è stato fatto a scopo cautelativo, poiché ipotizzando un valore

di affollamento al più maggiore di quello reale significa verificare e progettare le vie di esodo nella condizione più critica.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva con i valori di affollamento suddivisi per ogni piano dell'attività.

Tabella 10. Calcolo dell'affollamento di ogni piano.

Livello	Superficie [m ²]	Densità di affollamento [pers/m ²] o criterio	Affollamento secondo il calcolo	Affollamento di progetto
Auditorium	210,33	N° posti a sedere	150	150
B01	834,33	0,1	83	131
L00	2174,26	0,1	217	297
L01	2905,93	0,1	291	326
L02	1992,26	0,1	199	232
L03	817,43	0,1	82	106
Affollamento totale di progetto				1242

Si ha dunque un affollamento complessivo pari a 1242 occupanti.

Dopo aver definito entrambi i dati di ingresso, si prosegue con la progettazione dell'esodo.

Numero minimo di vie di esodo

Il numero minimo di vie di esodo indipendenti di cui ogni compartimento della struttura dovrà essere fornito è riportato nella tabella S.4-8.

Tabella 11. Tabella S.4-8 del C.P.I. 2015.

R _{vita}	Affollamento	Numero minimo
Qualsiasi	≤ 50 occupanti	1 [1]
A1, A2, Ci1, Ci2, Ci3	≤ 100 occupanti	
Qualsiasi	≤ 500 occupanti	2
	≤ 1000 occupanti	3
	> 1000 occupanti	4
[1] Sia comunque rispettata la massima lunghezza del corridoio cieco di cui al paragrafo S.4.8.2		

Nel caso oggetto di studio si hanno tre piano fuori terra al lato Sud, mentre due lati fuori terra al lato nord, mentre i lati est ed ovest risultano essere in parte tre due piani fuori terra ed in

parte tre. È stato previsto il compartimento multipiano per i livelli: L00 – L01 – L02, mentre è previsto un compartimento singolo per i livelli interrato e terzo.

L'edificio è munito di 4 corpi scala adeguatamente compartimentati rispetto i restanti ambienti ospitanti gli uffici. Uno dei corpi scale inoltre risulta essere a prova di fumo. Risulta quindi verificato il numero di vie di esodo in riferimento ad ogni piano e compartimento presenti.

Lunghezze delle vie di esodo e dei corridoi ciechi

Occorre verificare che almeno una delle lunghezze di esodo calcolate a partire da qualsiasi punto dell'attività non superi i valori massimi consentiti dal codice contenuti nella tabella S.4-10. Per quanto riguarda invece i corridoi ciechi occorre verificare che nessuno dei corridoi ciechi presenti nell'edificio superi i valori riportati nella stessa tabella. La verifica viene effettuata in funzione del profilo R_{vita} .

Tabella 12. Tabella S.4-10 del C.P.I. 2015

R_{vita}	Max lunghezza d'esodo Les [m]	Max lunghezza corridoio cieco Lcc [m]	R_{vita}	Max lunghezza d'esodo Les [m]	Max lunghezza corridoio cieco Lcc [m]
A1	70	30	B1,E1	60	25
A2	60	25	B2,E2	50	20
A3	45	20	B3,E3	40	15
A4	30	15	C1	40	20
D1	30	15	C2	30	15
D2	20	10	C3	20	10

Dalla tabella sopra riportata, risulta che il valore massimo consentito per la lunghezza di esodo è pari a 60 m, mentre sono permessi valori al massimo pari a 25 m per i corridoi ciechi. Tuttavia il codice prevede la possibilità di incrementare questi valori nel momento in cui siano adottate nel progetto alcune misure antincendio aggiuntive.

Nel caso in esame, essendo previsto un livello di prestazione di livello IV per la rivelazione ed allarme è possibile incrementare la lunghezza Les del 15%, portandola quindi ad un valore massimo di 69m. in modo analogo è possibile incrementare il massimo valore per Lcc che risulta diventare pari a 28,75 m.

Vie di esodo orizzontali

La larghezza minima da osservare per le vie di esodo orizzontali (L_o) quali porte, corridoi ed uscite, è determinata secondo il paragrafo S.4.8.3 moltiplicando la larghezza unitaria (L_u) per il numero di occupanti (n_o) che impiegano quella determinata via di 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	-	-

Dalla tabella sopra riportata, la larghezza unitaria nel caso di profilo A2 è pari a 3,80 mm/persona. Il calcolo è stato effettuato per ogni piano e per ogni ambito di piano.

Livello	Affollamento	R _{vita}	Larghezza unitaria [mm/pers]	Lo [mm]	Lo [cm]	Verifica
B01	131	A2	3,80	498	50	✓
L00	297	A2	3,80	1129	113	✓
L01	326	A2	3,80	1239	124	✓
L02	232	A2	3,80	882	88	✓
L03	106	A2	3,80	403	40	✓

I valori di Lo sopra riportati sono da considerarsi come dimensioni complessive delle uscite per ciascun piano. Infatti, la lunghezza Lo può essere suddivisa tra più percorsi, garantendo comunque la larghezza minima di 900 mm al fine di consentire l'esodo anche alle persone che utilizzano ausili per il movimento. Inoltre nel caso in esame essendo previste almeno due uscite per piano, almeno una di esse deve avere larghezza maggiore o uguale a 1200 mm.

Nel caso studio sono presenti, come detto, 4 blocchi scala, ai quali, per tutti i piani eccetto il livello 3, è possibile accedervi per mezzo di due uscite di piano, perciò, in totale si hanno 8 uscite di piano per ciascun lato. Nella tabella sotto riportata si riportano le verifiche in merito.

Livello	Affollamento	Larghezza uscite orizzontali [mm]										Totali [mm]	Lo _{min} [mm/pers]	Verifica	
		Codifica uscite orizzontali													
L00	297	S1_1 900	S1_2 900	S2_1 900	S2_2 900	N1_1 900	N1_2 900	N2_1 900	N2_2 900	E 1200	O 1200	9600	1129	Tot > Lo _{min}	✓
L01	326	S1_1 900	S1_2 900	S2_1 900	S2_2 900	N1_1 900	N1_2 900	N2_1 900	N2_2 900			7200	1239	Tot > Lo _{min}	✓
L02	232	S1_1 900	S1_2 900	S2_1 900	S2_2 900	N1_1 900			N2_2 900			5400	882	Tot > Lo _{min}	✓
L03	106	S1_1 900	S1_2 900	S2_1 900	S2_2 900							3600	403	Tot > Lo _{min}	✓

Risulta evidente di come per ciascun piano le verifiche siano soddisfatte. Il codice inoltre prevede di soddisfare la verifica di ridondanza, ovvero di ripetere la stessa verifica rendendo indisponibile un'uscita per ciascun piano analizzato.

Livello	Affollamento	Larghezza uscite orizzontali [mm]										Totali [mm]	L _{0min} [mm/pers]	Verifica	
		Codifica uscite orizzontali													
L00	297	S1_1 900	S1_2 900	S2_1 900	S2_2 900	N1_1 900	N1_2 900	N2_1 900	N2_2 900	E 1200	O 1200	8400	1129	Tot > L _{0min}	✓
L01	326	S1_1 900	S1_2 900	S2_1 900	S2_2 900	N1_1 900	N1_2 900	N2_1 900	N2_2 900			6300	1239	Tot > L _{0min}	✓
L02	232	S1_1 900	S1_2 900	S2_1 900	S2_2 900	N1_1 900			N2_2 900			4500	882	Tot > L _{0min}	✓
L03	106	S1_1 900	S1_2 900	S2_1 900	S2_2 900							2400	403	Tot > L _{0min}	✓

Nel caso in esame si sono rese indisponibili le uscite caratterizzate da dimensioni maggiori, al fine di verificare la situazione peggiore che possa verificarsi. Anche in questo caso, come mostrato nella tabella sottostante, le verifiche sono largamente soddisfatte.

Vie di esodo verticali

La procedura di esodo scelta per il progetto è quella di esodo simultaneo. Con questo approccio si prevede che le vie di esodo verticali siano in grado di garantire l'evacuazione contemporanea di tutti gli occupanti.

La larghezza minima da osservare per le vie di esodo verticali (L_v) è determinata secondo il paragrafo S.4.8.6.1 moltiplicando la larghezza unitaria (L_u) per il numero di occupanti (n_v) che impiegano quella determinata via di esodo verticale.

R _{vita}	Numero totale dei piani serviti dalla via d'esodo verticale									
	1	2	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

Dalla tabella sopra riportata, la larghezza unitaria nel caso di profilo A2 è rispettivamente pari a 3,25 mm/persona nel caso dei blocchi scala S1 ed S2, i quali servono 3 piani fuori terra ed il piano interrato e pari a 4,55 mm/persona nel caso dei blocchi scala posti sul lato nord (N1 ed N2). Nel calcolo non si considera l'apporto del piano terra in quanto esso dispone di uscite indipendenti e gli occupanti quindi non utilizzano i vani scala.

Il calcolo è stato differenziato suddividendolo per le due scale lato nord e le altre due poste sul lato sud.

Lato Sud

La manica di edificio posta sul lato Sud è servita da due blocchi scale, So1 ed So2 le quali servono rispettivamente i livelli: terzo, secondo, primo ed interrato. In particolare gli utilizzatori delle due vie di esodo si sono calcolati come segue:

Livello 03: si considera il valore di affollamento totale;

Livello 02: si considerano gli affollamenti del settore centrale sud al quale vengono sommati in una percentuale pari al 50% dell'affollamento dei settori Ovest ed Est;

Livello 01: si considerano gli affollamenti del settore centrale sud al quale vengono sommati in una percentuale pari al 50% dell'affollamento dei settori Ovest ed Est;

Livello B01: si considera il valore di affollamento totale.

Livello	Affollamento	nv	Lu [mm]	Lv [mm]
B01	131	631	3,25	2051
L01	$149+30*(50\%)+33*(50\%)$			
L02	$161+37*(50\%)+34*(50\%)$			
L03	106			

Lato Nord

La manica di edificio posta sul lato Nord è servita da due blocchi scale, No1 ed No2 le quali servono rispettivamente i livelli: primo e secondo. In particolare gli utilizzatori delle due vie di esodo si sono calcolati come segue:

Livello 02: si considera una percentuale pari al 50% dell'affollamento dei settori Ovest ed Est;

Livello 01: si considerano gli affollamenti del settore centrale Nord e dei settori Nord-Ovest e Nord-Est al quale vengono sommati in una percentuale pari al 50% dell'affollamento dei settori Ovest ed Est;

Livello	Affollamento	nv	Lu [mm]	Lv [mm]
L01	$114+30*(50\%)+33*(50\%)$	182	4,55	828
L02	$37*(50\%)+34*(50\%)$			

Dopo aver determinato il valore di larghezza minima per le vie di esodo verticali (L_v) si è verificato che tale valore fosse rispettato nella configurazione di progetto.

Scale	Larghezza uscite verticali [mm]				Totali [mm]	Lv _{min} [mm/pers]	Verifica	
	Codifica blocchi scala							
Lato Sud	S01	S02	N01	N02			Tot > Lv _{min}	✓
	1300	1300	-	-	2600	2051		
Lato Nord	S01	S02	N01	N02			Tot > Lv _{min}	✓
	-	-	1300	1300	2600	828		

La verifica risulta quindi soddisfatta. Come previsto dal codice si è effettuata, analogamente a quanto già svolto per le vie di esodo orizzontali, la verifica di ridondanza. Nel caso in esame rendendo indisponibile una delle 4 scale, la verifica risulta tuttavia abbondantemente soddisfatta, in quanto gli occupanti hanno comunque a disposizione gli altri tre blocchi scale di cui uno a prova di fumo.

Uscite finali

In ultima analisi occorre verificare il rispetto della dimensione minima per le uscite finali. Esse permettono agli occupanti di raggiungere il luogo sicuro o il luogo sicuro temporaneo. Occorre considerare che il codice contiene le seguenti indicazioni in merito:

- la larghezza L_F può essere costituita dalla somma delle larghezze di più varchi;
- la larghezza minima deve essere almeno pari a 900mm;
- alle uscite finali impiegate da un massimo di 10 persone è consentita una dimensione ridotta, pari a 800 mm;
- i locali che prevedono la presenza occasionale di personale addetto possono essere serviti da uscite finali di dimensioni pari a 600mm.

La larghezza minima per le uscite finali viene determinata come precedentemente descritto al capitolo 3. Di seguito se ne riporta il calcolo in forma tabellare.

Uscita finale	ΣL_o [mm]	ΣL_v [mm]	Totali [mm]	Larghezza uscite di progetto [mm]
US_N1	209	623	832	1200
US_N2	198	623	821	1200
US_S1	217	1251	1468	1500
US_S2	201	1251	1452	1500
US_O	114	-	114	1200
US_E1	152	-	152	1200
US_E2	38	-	38	1200

7.3 Modellazione di esodo: Pathfinder®

Sulla base dei dati assunti in precedenza, dei tempi di pre-movimento, degli obiettivi e delle soglie di prestazione, si è costruito un modello di simulazione al fine di indagare sulla reale efficienza della progettazione dell'esodo sviluppata al paragrafo precedente, nonché di effettuare le opportune modifiche nel caso si riscontrino dei difetti di progettazione.

I software di simulazione dell'esodo rappresentano dunque uno strumento di grande supporto alla progettazione, grazie ad essi infatti il progettista è in grado di valutare l'efficienza del sistema progettato. Nei paragrafi successivi verrà esplicitato il processo di modellazione di esodo mediante il software Pathfinder ed i risultati ottenuti.

7.3.1 Gestione di un modello complesso

Dopo aver pianificato le vie d'esodo si è ritenuto necessario indagare tramite delle modellazioni di esodo opportune la reale efficacia delle misure di progettazione e le eventuali criticità.

Per una più completa analisi sulle dinamiche dell'evacuazione si sono impostate tre simulazioni distinte delle quali sono poi stati confrontati i risultati in termini di tempi ed efficienza delle misure di esodo. Ciascuna di esse riferita ad uno scenario ben preciso. Grazie alle tre simulazioni si è potuto osservare come la variazione dei parametri comportamentali ("Behavior") possa influenzare l'efficienza del sistema di esodo. In tutte le tre configurazioni gli occupanti sono stati posizionati in modo coerente con i posti a sedere, ma sono state modellate in modo differente le condizioni al contorno legate all'ambiente e gli aspetti comportamentali.

Scenario 1: configurazione automatica

Il primo scenario è riferito ad una configurazione che si può definire automatica. Questa simulazione colloca gli occupanti in modo consono con i posti a sedere. Dal punto di vista comportamentale, però è stato impostato a tutti gli occupanti il behavior "Any Exit" per mezzo del quale gli individui effettuano l'evacuazione sulla base del criterio del percorso più veloce. Lo scenario appena descritto risulta essere molto importante in quanto si può osservare come ed in che quantità le persone tendono effettuare l'esodo in modo non congruo rispetto la cartellonistica appositamente progettata. Dai risultati di questa prima simulazione il progettista è in grado di trarre delle conclusioni ad esempio sull'ottimizzazione del posizionamento della segnaletica luminescente.

Scenario 2: configurazione di progetto

Il secondo scenario modellato rappresenta a tutti gli effetti la configurazione programmata, ovvero quella stabilita nella fase di progettazione in cui gli occupanti vengono “guidati” all’esterno dell’edificio mediante le corrette segnaletiche di riferimento. In questa particolare configurazione gli occupanti sono stati suddivisi in gruppi in funzione della loro ubicazione all’interno del fabbricato. In accordo con quanto previsto dal progetto del sistema di esodo, a ciascuno di questi gruppi è stato assegnato un differente comportamento.

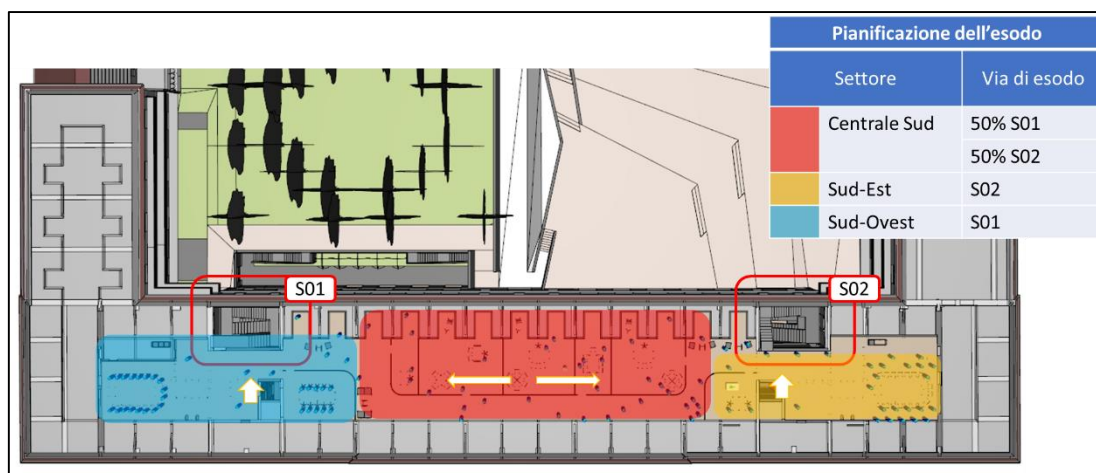


Figura 16. Livello 03

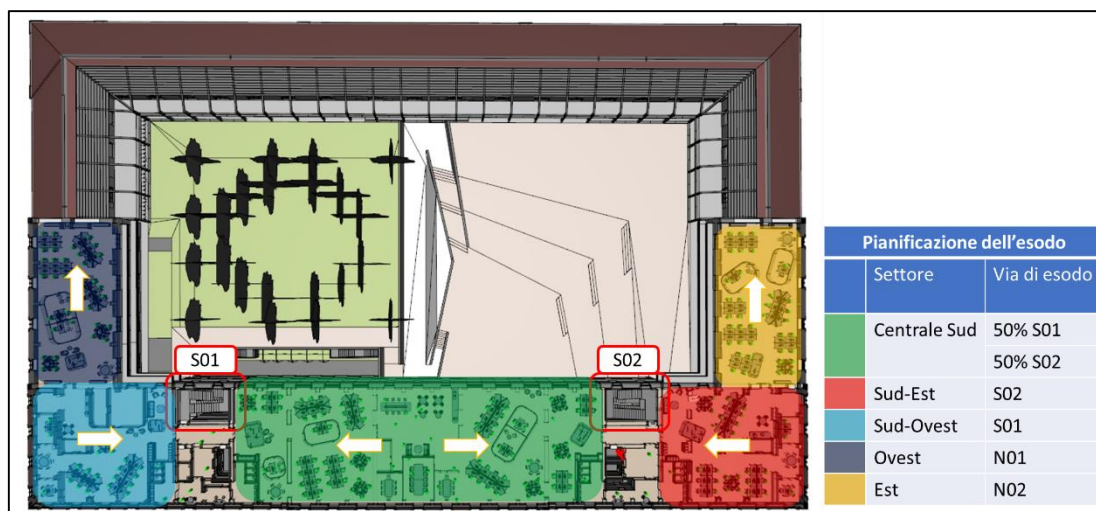


Figura 17. Livello 02

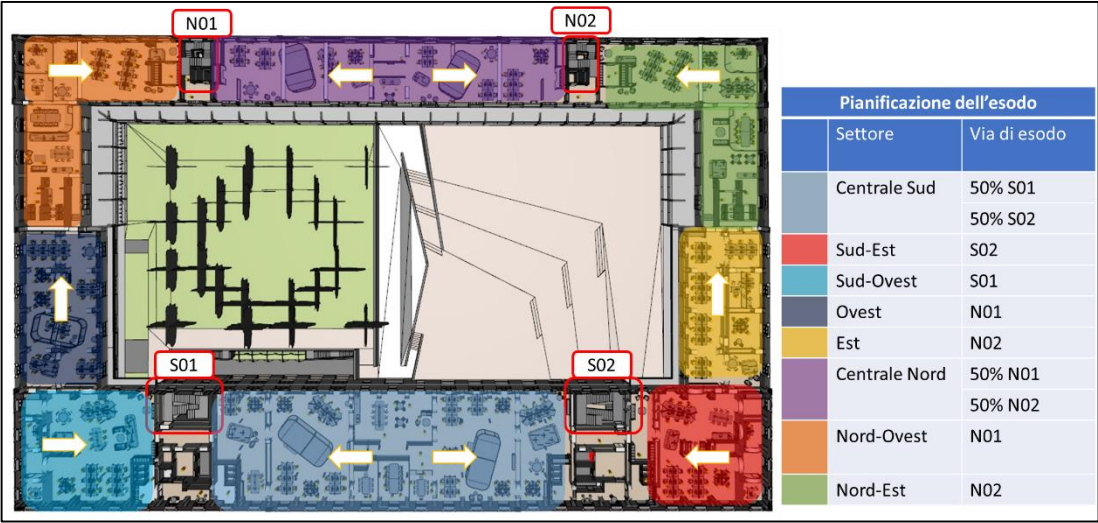


Figura 18. Livello 01

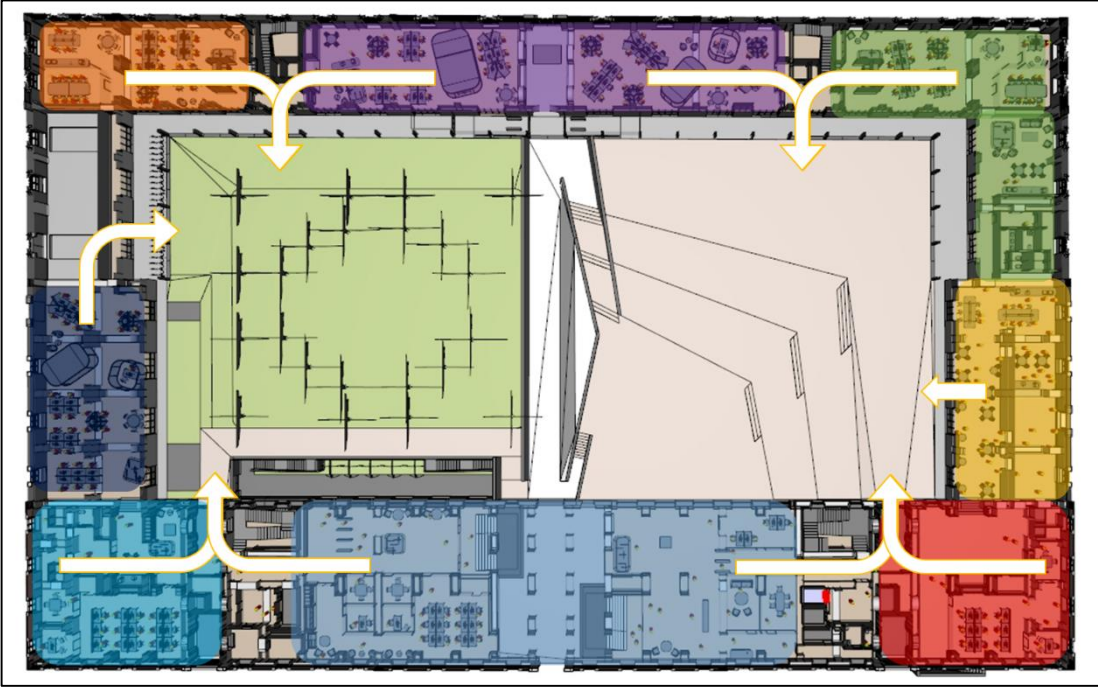


Figura 19. Livello 00

Scenario 3: configurazione critica

Quest'ultima configurazione è del tutto analoga a quella di progetto proposta dallo scenario 2, ma si differenzia da quest'ultima dal fatto che in questo scenario si rende indisponibile uno dei 4 percorsi di esodo verticali presenti, ovvero del blocco scale SO1. Lo scopo è quello di verificare l'efficienza del sistema di esodo nonostante l'indisposizione di parte delle vie di esodo ed osservare quali zone dell'edificio saranno soggette ad un incremento della densità di occupanti e dove si verranno a creare le code più critiche.

Interoperabilità

Il software consente all'operatore di importare vari formati. È possibile importare il formato di esportazione del software PyroSim nel caso in cui sia già presente una modellazione dell'incendio mediante questo software. Altri estensioni riconosciute dal simulatore sono i file più noti file .dwg e .dxf utilizzati dai maggiori software CAD in commercio fino ad arrivare a formati di più recente introduzione come l'FBX e l'IFC. Se tramite il formato FBX è possibile importare direttamente delle geometrie tridimensionali capaci di contenere informazioni sui materiali, la vera innovazione riguardo ad interoperabilità si ha nell'utilizzo del formato IFC. Questo infatti si basa sul concetto di rendere "smart" la progettazione ed incentivare l'interoperabilità tra le varie discipline presenti nel processo edilizio.

L'intera progettazione (architettonica, impiantistica e strutturale) è stata sviluppata completamente mediante la metodologia BIM per mezzo del software Autodesk Revit®. Questo ha permesso di ottenere un modello di partenza per la modellazione, tridimensionale e ricco di informazioni, infatti grazie a questo approccio metodologico è stato possibile importare l'intero modello 3D all'interno del software Pathfinder, il quale dall'ultima versione rilasciata nel dicembre 2018 ha, come anticipato pocanzi, implementato la possibilità di importare modelli in formato IFC e riconoscere direttamente le superfici calpestabili (pavimenti, scale, rampe) e le ostruzioni. Tuttavia dopo aver testato questa possibilità sono stati riscontrati diversi errori nel riconoscimento degli elementi. Si è preferito perciò utilizzare il formato FBX.



Al fine di ottenere un migliore risultato grafico e mantenere il riconoscimento dei materiali anche all'interno della modellazione di esodo per l'esportazione del modello da Revit si è impiegato il plugin SimLab. In alternativa sarebbe stato possibile importare il .dwg contenente solamente i pavimenti dell'edificio e successivamente posizionarli alla quota corretta proseguendo collegandoli tramite elementi scala.

Si è deciso di non seguire quest'ultima procedura in quanto avendo a disposizione il modello BIM contenente tutte le informazioni tridimensionali necessarie si è ottenuta una rappresentazione dell'edificio più precisa in termini di geometrie ed ingombri. Il risultato finale è un modello 3D, i cui elementi geometrici in uno step successivo saranno convertiti in oggetti riconosciuti dal software di simulazione: stanze, porte, rampe e scale.

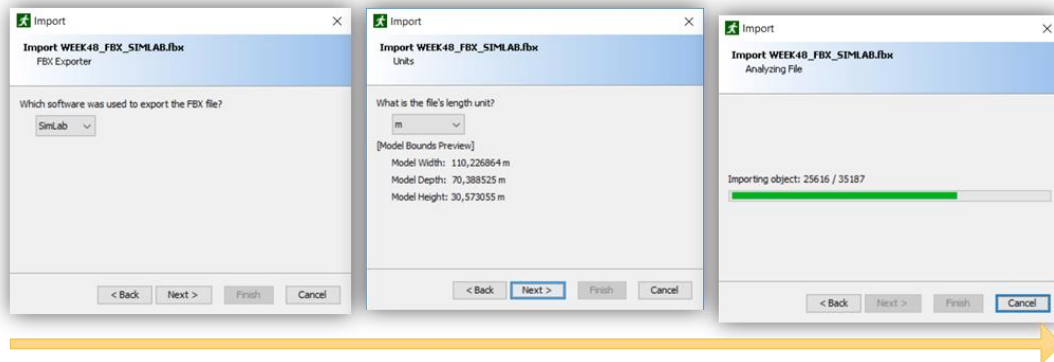


Figura 20. Importazione del file FBX.

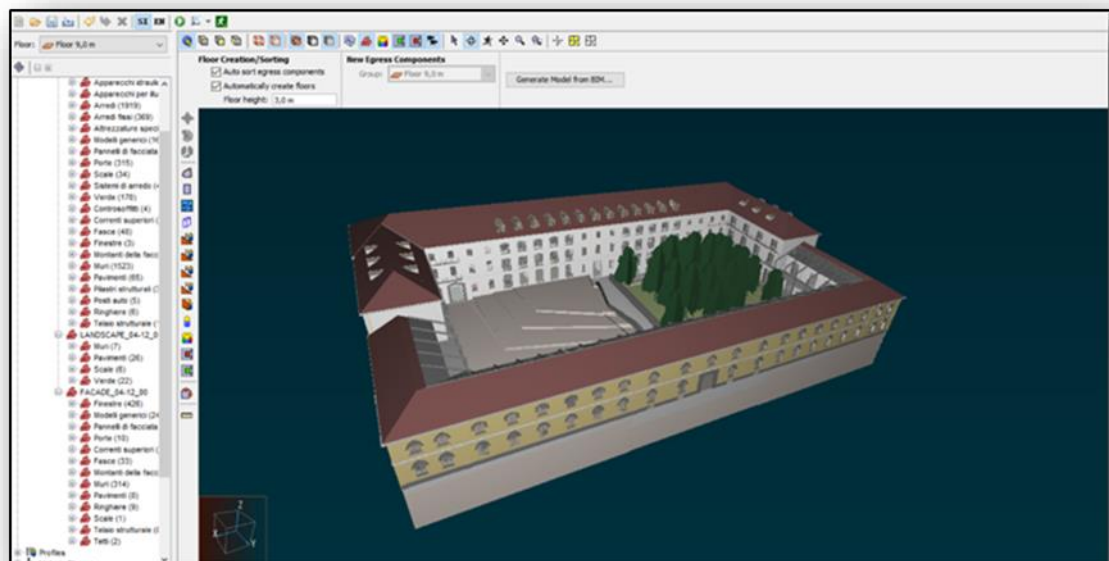


Figura 21. Risultato finale dell'importazione.

Estrazione e modellazione degli elementi

Gli elementi modellati dal programma sono i seguenti:

- pavimenti;
- scale;
- rampe;
- ascensori;
- porte.

Dalla lista sopra descritta si evince come il software non consideri elementi verticali quali muri di separazione, pilastri, ecc..., questi oggetti vengono trattati come ostruzioni, ovvero come elementi di estrazione dalle aree di pavimento. Dopo aver generato le geometrie occorre collocare gli occupanti con i relativi comportamenti e dimensioni fisiche.

Come detto il software, non utilizza direttamente l'intero modello importato. Bensì seppur consenta di rappresentare le geometrie tridimensionali, il programma lavora sostanzialmente con elementi bidimensionali. Avendo importato un progetto precedentemente sviluppato il software consente di convertire alcune geometrie in elementi che il software è in grado di elaborare.

Rooms

Il primo step è stato quello di estrarre le superfici orizzontali sulle quali in un secondo momento posizionare gli occupanti. Mediante il comando *"Extract Room from Imported Geometry"* è possibile convertire gli elementi selezionati in stanze.

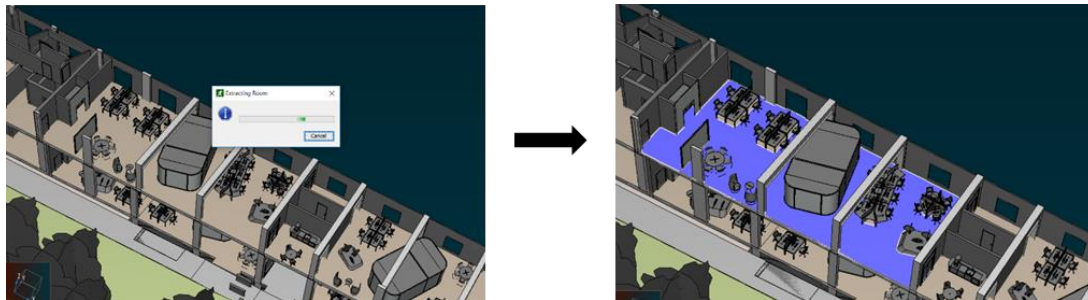


Figura 22. Estrazione delle stanze mediante il comando *"Extract Room"*.

È bene sottolineare che il software, durante la fase di estrapolazione delle superfici, tratta gli eventuali ostacoli quali ad esempio arredi e pareti divisorie, come dei vuoti, sottraendo gli spazi occupanti da questi elementi dalle geometrie generate. Ogni oggetto importato possiede delle proprietà. Esse sono settabili dall'apposito pannello. In questa barra è possibile stabilire la tipologia di importazione per quel determinato elemento, se porta, stanza, ostacolo, ecc.. per fare in modo che alcuni oggetti non vengano presi in considerazione durante la fase di

estrazione delle superfici è necessario selezionare la voce “Ignored” all’interno di questa impostazione.

Dopo aver generato tutte le “rooms” per ciascun livello dell’edificio si è proseguito inserendo gli elementi di connessione orizzontali (“Door”) e verticali (“Stairs” e “Ramps”) mediante l’apposito comando.

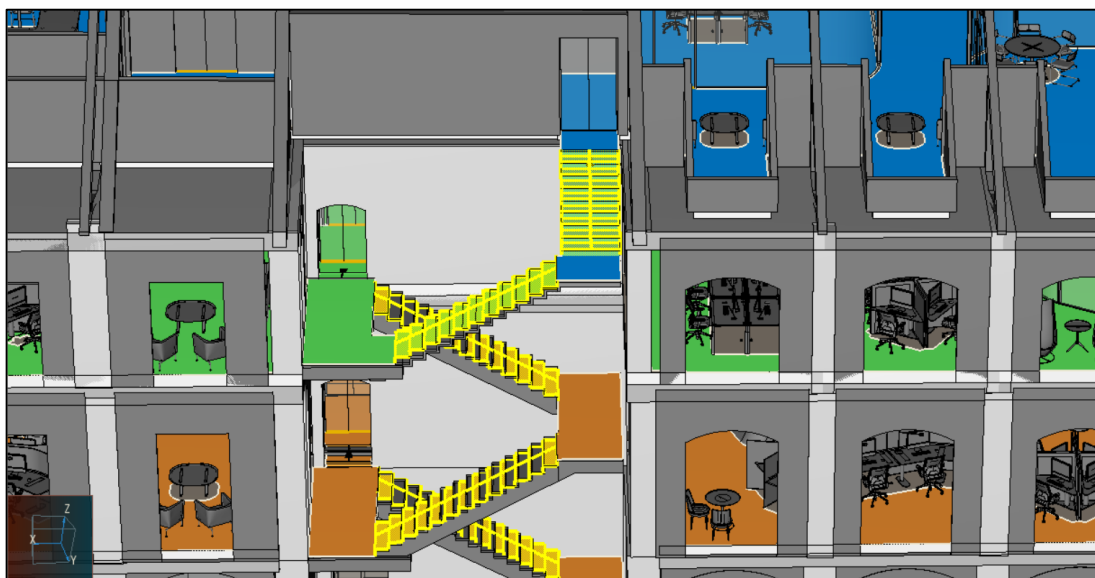
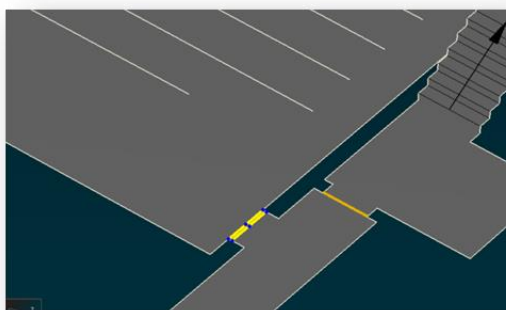


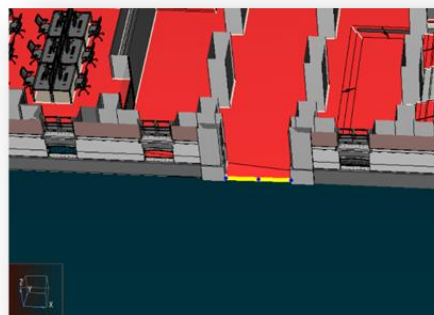
Figura 23. Inserimento dell'elemento "Stair".

Doors

Sono state posizionate le porte, che in funzione della loro ubicazione possono assumere due ruoli differenti; infatti si possono distinguere due tipologie di “Doors”, la prima ha la funzione di connessione tra due “Rooms”, mentre possono rappresentare un’uscita di emergenza nel caso in cui vengano poste in adiacenza di una sola “Room”. Sotto vengono riportate entrambe le tipologie.



Door come connessione



Door come uscita

Figura 24. Inserimento degli elementi "Doors".

Ascensore antincendio

In accordo con quanto previsto dal progetto, si è modellato posto ascensore antincendio in prossimità del blocco scale S02.

Le dinamiche legate al concetto di ascensore antincendio all'interno di Pathfinder sono legati ad alcuni principi quali:

- l'ascensore possiede un piano di riferimento in cui si trova ad inizio simulazione;
- viene stabilito anche un piano di scarico al quale esso porterà gli occupanti;
- di default l'ascensore può essere chiamato da occupanti distanti dalla porta di accesso di 0,50 metri;
- è possibile stabilire delle gerarchie basate su livelli di priorità in funzione delle quali un piano viene servito prima di un altro.

L'ascensore può essere creato quando tutti gli altri elementi del modello sono già stati modellati. In particolare occorre selezionare la room di riferimento e la porta ad essa collegata e definire un livello di inizio e fine del tragitto.

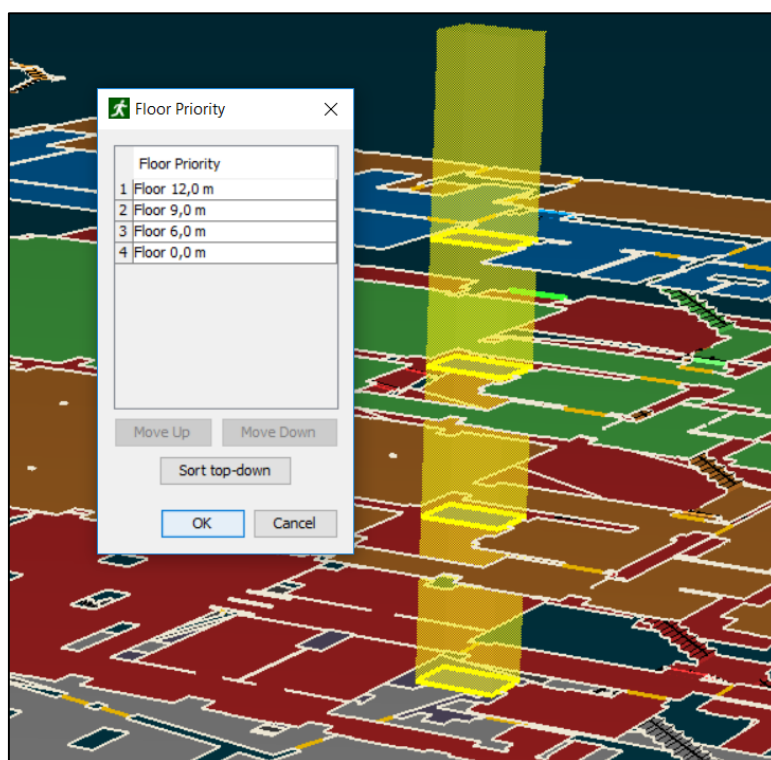


Figura 25. Inserimento di un ascensore antincendio.

Il risultato finale è un modello tridimensionale sul quale gli occupanti sono in grado di muoversi liberamente durante la simulazione.

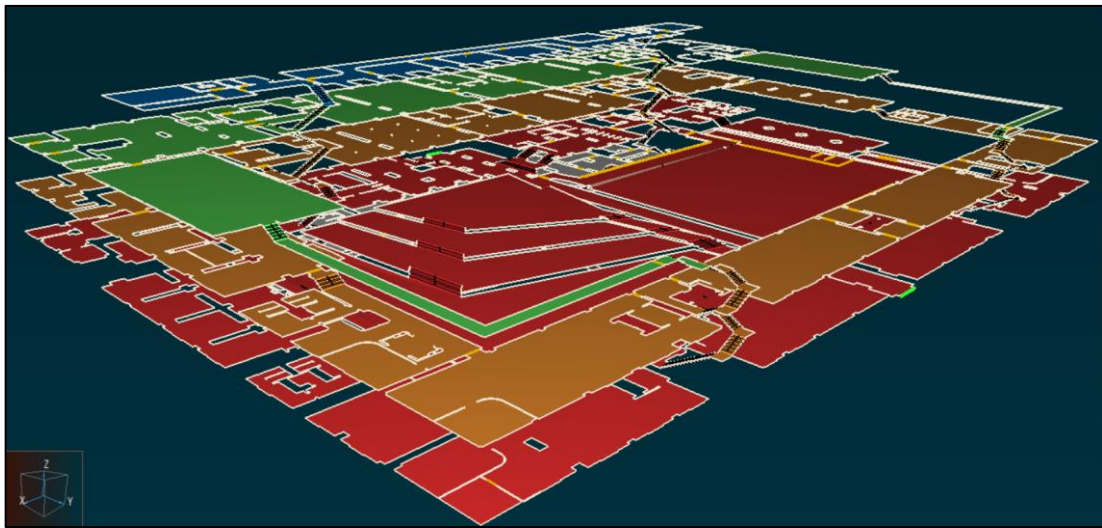


Figura 26. Risultato finale dopo l'inserimento di tutti gli elementi geometrici.

OCCUPANTI

Dopo aver ultimato il modello dal punto di vista geometrico e funzionale, si è proseguito nel collocare e caratterizzare gli occupanti in termini di tempi di pre-movimento, livello di autonomia, velocità, e azioni da intraprendere durante l'esodo.

Il software permette di collocare gli occupanti in modo puntuale oppure secondo una certa distribuzione all'interno della superficie in funzione del rapporto persone/m² fornito in molti casi dalle normative in materia.

Nel caso in esame, essendo l'edificio adibito prevalentemente a uffici, si è ipotizzato che le persone all'interno del fabbricato stiano svolgendo le attività previste dalla destinazione d'uso dello stesso, per questo motivo si è deciso di posizionare gli occupanti in armonia rispetto ai posti a sedere presenti.

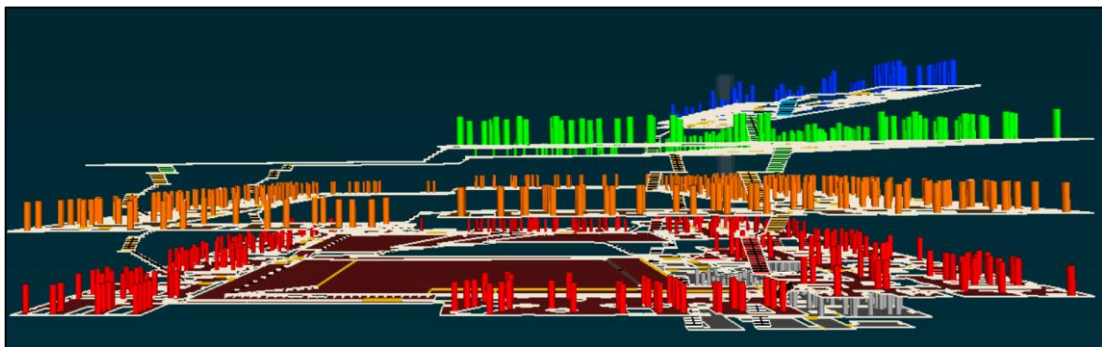


Figura 27. Inserimento degli occupanti.

L'edificio è stato suddiviso in macro settori, ognuno dei quali contiene un certo numero di persone calcolato moltiplicando il valore di densità di occupanti per il valore della superficie del settore. Eccezione fatta per l'ambiente ospitante l'auditorium, per il quale l'affollamento è stato calcolato in funzione dei posti a sedere. Il numero di individui presenti in ciascun settore è stato descritto al Capitolo 6.

CARATTERIZZAZIONE DEGLI OCCUPANTI

Pathfinder suddivide la caratterizzazione degli occupanti in due categorie: il **profilo** ed il **comportamento**. La prima categoria definisce quelle caratteristiche che sono fisse per ciascun occupante, come le dimensioni, la velocità massima, l'avatar ed il colore identificativo. Il comportamento invece viene imposto tramite il comando "*Behavior*" e definisce una sequenza di azioni che l'individuo intraprenderà durante la simulazione.

Profilo

La tipologia di occupanti prevista nel caso studio è principalmente costituita da due profili. Il primo riferito al generico occupante normodotato ed autonomo nel movimento ed il secondo è rappresentato dall'utente in sedia a rotelle. Sulla base di queste caratteristiche sono stati modellati i seguenti profili all'interno del programma mediante il comando "*Edit profiles*".

Per adibire l'ascensore antincendio ad uso specifico di una determinata porzione di utenti è stato necessario duplicare alcuni profili. Si sono dunque venuti a creare quattro profili differenti:

- occupante generico;
- disabile in sedia a rotelle;
- accompagnatore;
- disabile in sedia a rotelle fruitore dell'ascensore antincendio.

Per ciascuno dei profili elencati si sono definite le velocità in accordo con i valori analizzati al Capitolo 6. Nello specifico si sono presi in esame i seguenti valori di velocità: pari a 1,19 m/s per il generico occupante, ed un valore di 0,69 m/s per il disabile in sedia a rotelle.

Di seguito vengono riportate le modellazioni dei profili appena descritti.

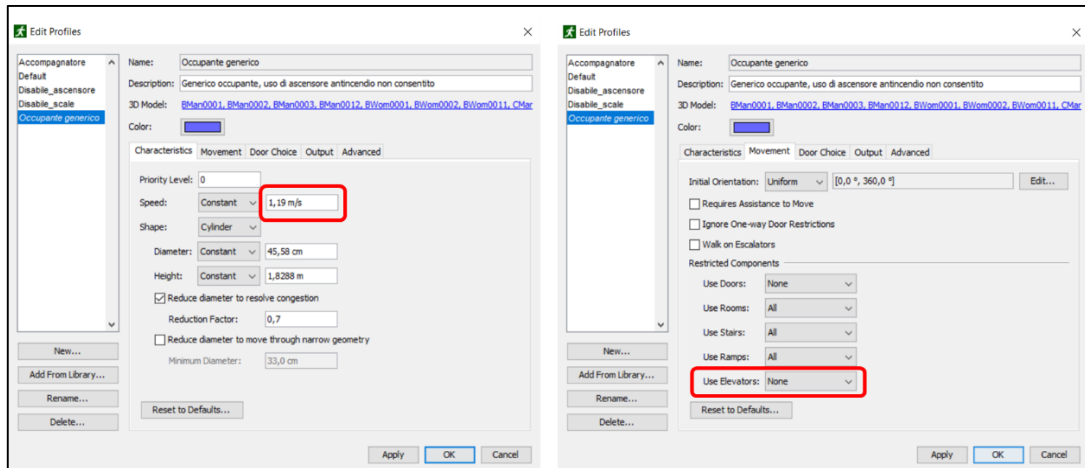


Figura 28. Occupante generico

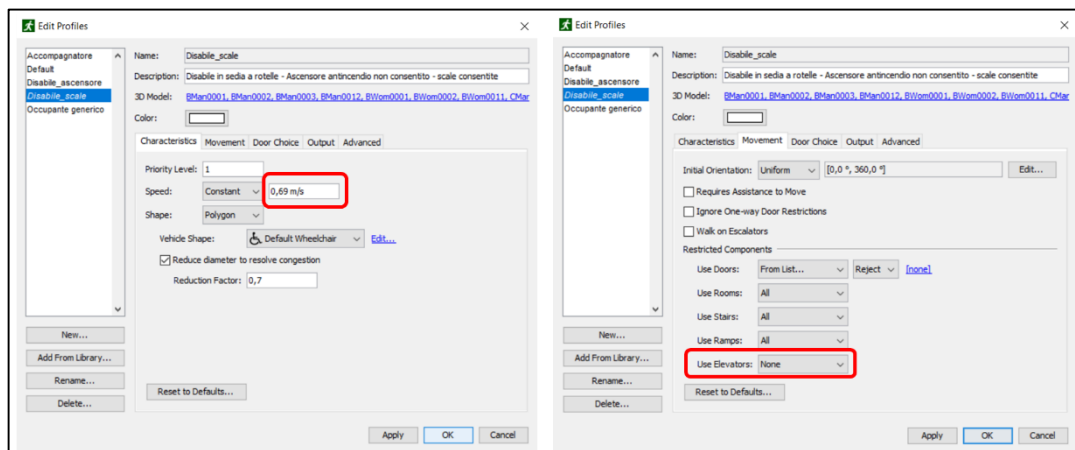


Figura 29. Disabile in sedia a rotelle (uso dell'ascensore antincendio non consentito).

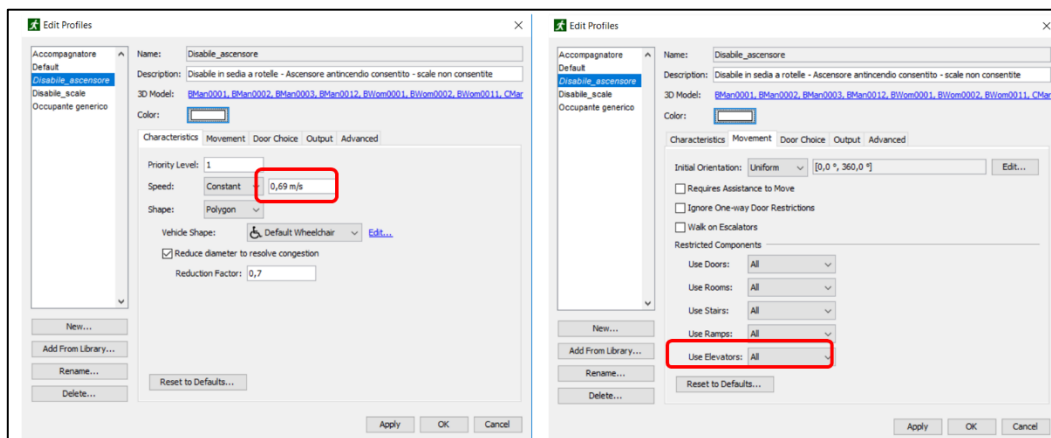


Figura 30. Disabile in sedia a rotelle (uso dell'ascensore antincendio consentito).

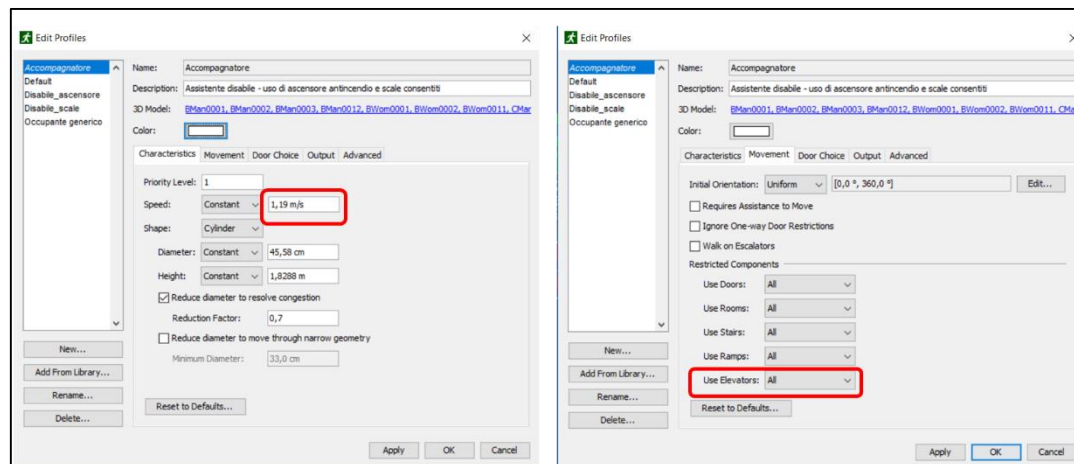
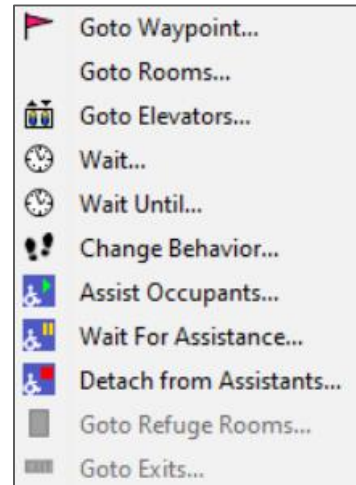


Figura 31. Assistente del disabile.

Per quanto concerne i valori legati alla geometria e agli ingombri di ciascun occupante, sono stati lasciati quelli predefiniti dal sistema, ovvero un diametro pari a 45,58 cm per l'occupante standard ed un ingombro di 1,32 per 0,76 cm per il disabile in sedia a rotelle.

Comportamento

Il comportamento è composto da una sequenza di azioni che gli occupanti svolgono prima di essere rimossi dalla simulazione. Il software prevede diverse tipologie di azioni. I comportamenti sono stati modellati secondo criteri differenti a seconda dello scenario analizzato. Per comprendere al meglio i comportamenti assegnati agli occupanti in ognuno dei 3 scenari precedentemente descritti, di seguito si elencano le azioni previste dal software. Successivamente verrà descritto come queste azioni sono state impiegate nel caso studio.



Go to waypoint: indica che un occupante deve dirigersi verso un punto specifico.

Go to rooms: indica che un occupante debba dirigersi verso una stanza specifica.

Go to elevator: indica che un occupante debba utilizzare gli ascensori.

Wait: indica all'occupante di attendere un determinato tempo o fino ad un certo tempo preimpostato.

Assist occupants: indica all'occupante di assistere determinati individui che attendono assistenza.

Wait for assistance: indica all'occupante di attendere l'arrivo di un team di assistenti.

Detach from assistant: indica all'occupante di staccarsi dai propri assistenti, in modo da permettere a quest'ultimo di assistere eventuali altri occupanti.

Go to refuge: indica che un occupante deve dirigersi verso una specifica area sicura.

Go to exit: specifica di dirigersi verso le uscite indicate secondo il criterio del percorso più veloce.

Change behavior: consente all'occupante di terminare un comportamento ed iniziarne uno nuovo. Il nuovo criterio viene scelto in modo casuale secondo una distribuzione impostata manualmente.

A seconda di quale dei 3 scenari si sta analizzando, la fase di modellazione dei comportamenti è stata eseguita in modo differente.

Gli occupanti sono stati suddivisi in gruppi in funzione della loro ubicazione all'interno del fabbricato. Ad essi è stato assegnato un colore per consentire poi in fase di lettura degli output di risalire immediatamente a quel livello dell'edificio appartengono.

Per lo scenario 2, in accordo con quanto previsto dal progetto del sistema di esodo, a ciascun gruppo di occupanti è stato assegnato un differente comportamento.

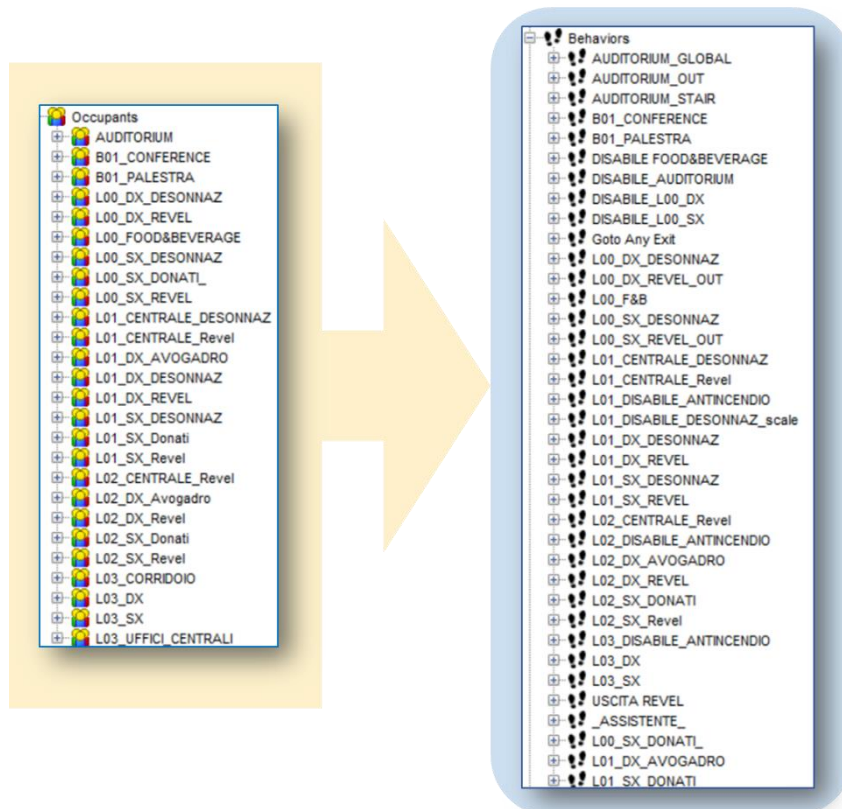


Figura 32. Attribuzione di un Behavior ad ogni occupante.

Al fine di caratterizzare in modo ottimale la simulazione dei comportamenti sono state impiegate sostanzialmente tutte le azioni implementate dal software eccetto che il comando “Go to refuge”, poiché le procedure di esodo previste nel progetto non prevedono aree di rifugio, invece presenti ad esempio nel caso di ospedali.

Stima del tempo di rivelazione ed allarme

Il rapporto tecnico ISO/TR 16738:2009 fornisce delle indicazioni sul valore del tempo di rivelazione ed allarme. Tuttavia il si prende come riferimento la tabella contenuta nel testo “Codice di Prevenzione Incendi commentato” che mette in relazione tale tempo con le soluzioni conformi previste dal Codice 2015 per le singole tipologie di attività in merito agli IRAI. L’attività, oggetto di studio, avente come detto un profilo R_{vita} A2 possiede un impianto IRAI in tutti gli ambienti di cui è costituita. Dalla tabella sotto riportata si determina il seguente valore:

$$t_{det} = 180 [s]$$

R_{vita}	$t_{det} + t_a$ [s]	Descrizione
A1	360	Attività a basso rischio, probabilmente sprovviste di IRAI, basso livello di prestazione per la gestione della sicurezza antincendio
A2	180	Attività probabilmente provviste di IRAI, livello di prestazione per la gestione della sicurezza antincendio medio.
A3	120	Attività dotate di IRAI, livello di prestazione per la gestione della sicurezza antincendio medio-elevato, addetti formati al rischio antincendio, compartimenti di ridotte dimensioni.
A4	120	Attività dotate di IRAI, livello di prestazione per la gestione della sicurezza antincendio elevato, addetti formati al rischio antincendio, compartimenti di ridotte dimensioni.

Stima del tempo di pre-movimento

A tutti gli occupanti è stato assegnato lo stesso tempo di pre- movimento, questo è stato settato tramite il comando “Delay” presente nella barra delle proprietà di ciascun comportamento. Il valore di t_{pre} è stato determinato in riferimento a quanto riportato nella tabella E.2 del rapporto tecnico ISO/TR 16738:2009 della quale se ne riporta uno stralcio.

Tabella 13. Stralcio di tabella E.2 tratta da: ISO/TR 16738:2009

Scenario category and modifier levels ^a	First occupants t_{pre} (1st percentile)	Occupant distribution t_{pre} (99th percentile)
A: Awake and familiar		
M1 B1 – B2 A1 – A2 ^a	0,5	1,5
M2 B1 – B2 A1 – A2	1	3
M3 B1 – B2 A1 – A3	> 15 ^b	> 30 ^b
For B3, add 0,5 for way-finding.	—	—
M1 normally requires a voice alarm/PA if unfamiliar visitors likely to be present.	—	—

Si è indentificato il valore idoneo di t_{pre} in funzione dei seguenti parametri:

- tipologia di occupante;
- tipo di allarme impiegato;
- geometria dell’edificio;
- grado di addestramento.

Per stabilire in quale caso si ricade si è fatto riferimento all’Annex D della ISO TR 16738.

In particolare, le lettere A, B, M si riferiscono rispettivamente ad:

- A: qualità del sistema di allarme [suddiviso in classi da A1 ad A3];
- B: il grado di complessità dell’edificio [suddiviso in classi da B1 ad 3];
- M: il grado di addestramento che gli occupanti hanno nei confronti di un eventuale incendio, ovvero la qualità della gestione della sicurezza antincendio [suddiviso in classi da M1 ad M3].

Parametro A

Dal capitolo D.3.2 della normativa si è definito il parametro A in particolare si è scelta la seguente casistica:

“alarm system level A1: automatic detection throughout the building, activating an immediate general alarm to occupants of all affected parts of the building”.

Parametro B

Dal capitolo D.3.3 della normativa si è definito il parametro B; in particolare si è scelta la seguente casistica:

“building level B2: simple multi-enclosure, usually multi-storey, building, with most features prescriptively designed and simple internal layouts;”.

Questo parametro indica il grado di complessità dell’edificio analizzato. Nel caso in esame si ha un edificio di semplice geometria, di forma assimilabile ad un rettangolo. Esso inoltre possiede percorsi di esodo brevi, una di esse direttamente verso l’esterno.

Parametro M

Dal capitolo D.3.4 della normativa si è definito il parametro M; in particolare si è scelta la seguente casistica:

“management level M2: this is similar to level M1, but with a lower staff ratio and floor wardens might not always be present. There might not be an independent audit. Building features may be level B2 or B3 and alarm level A2. The design escape and evacuation times are more conservative than for a level M1 system”.

Si ricade nel livello M2, ovvero simile al livello M1, ma con un rapporto tra personale qualificato e numero di visitatori inferiore, inoltre il controllo di accesso all’edificio può non essere sempre garantito.

Definite quindi le caratteristiche dell’attività si ricade nella categoria:

M2-B2-A1

In riferimento allo stralcio di tabella sopra riportato si assume perciò un tempo di pre-movimento pari a:

$$t_{pre} = 60 \div 180 [s]$$

Si è perciò impostato un tempo t_{pre} caratterizzato da una distribuzione log-normale tra 60 e 180 secondi.

Di seguito si riportano alcuni esempi di comportamenti impostati nel progetto.

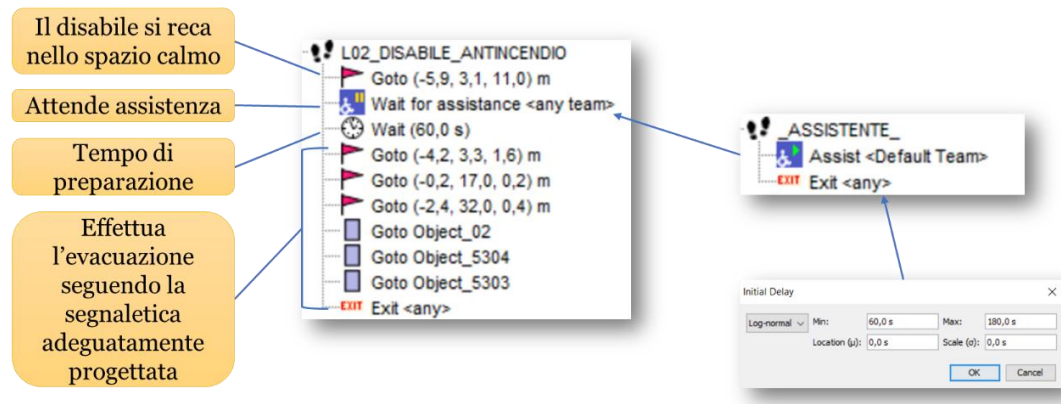


Figura 33. Comportamento di un occupante in sedia a rotelle ubicato al livello 2 dell'edificio.



Figura 34. Comportamento di un occupante autonomo.

Dopo aver configurato le caratteristiche fisiche e comportamentali degli occupanti e dell'ambiente, si è proceduto avviando la simulazione per ciascun scenario ipotizzato.

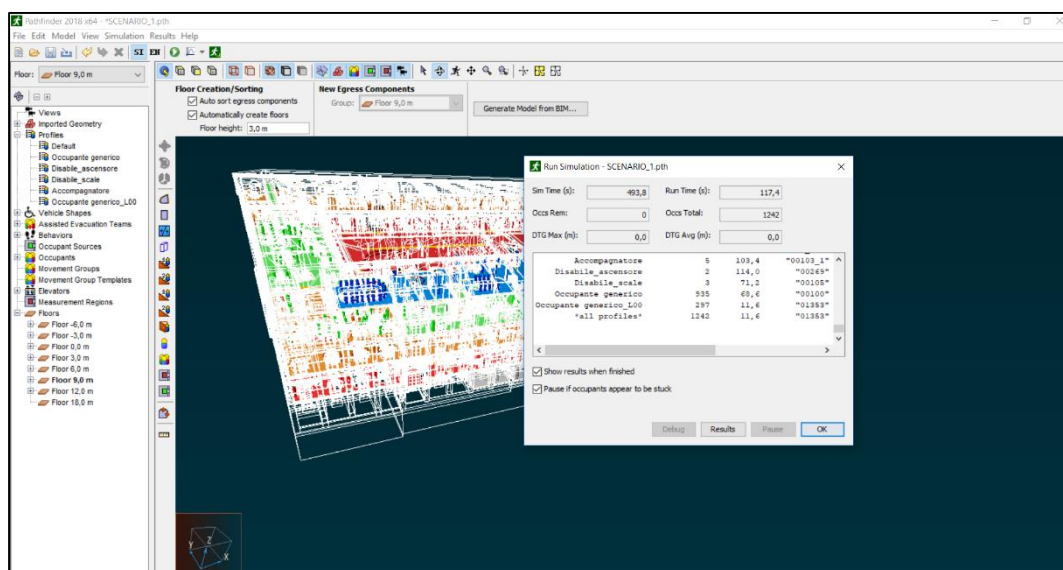


Figura 35. Avvio della simulazione.

7.3.2 Risultati delle simulazioni

Terminata la simulazione, il software restituisce diverse tipologie di output che permettono di fare delle valutazioni sul modello analizzandolo sotto differenti aspetti.

L'output principale previsto dal programma è un visualizzatore di risultati 3D, che consiste in un lettore video che permette di riprodurre lo svolgimento dell'esodo simultaneamente alla navigazione dentro il modello stesso da parte dell'utente. Tramite l'applicativo è possibile mettere in pausa il video al fine di estrapolare determinate viste e settare la velocità di riproduzione più consona ai fini dell'indagine. Inoltre, come verrà illustrato successivamente in questo capitolo, è possibile inserire i risultati di simulazioni di incendio modellati con il software PyroSim®.

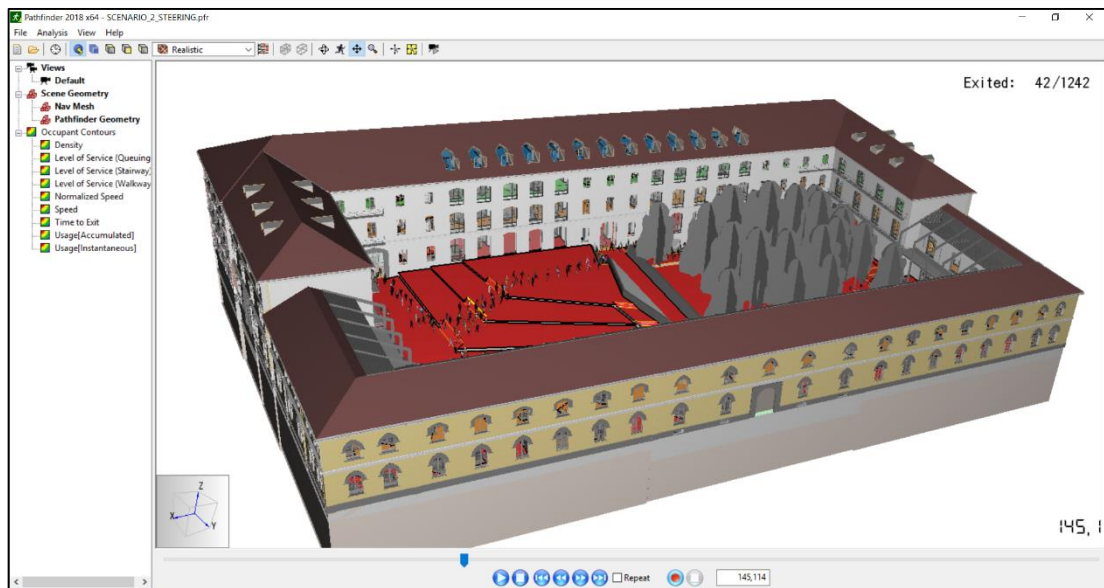
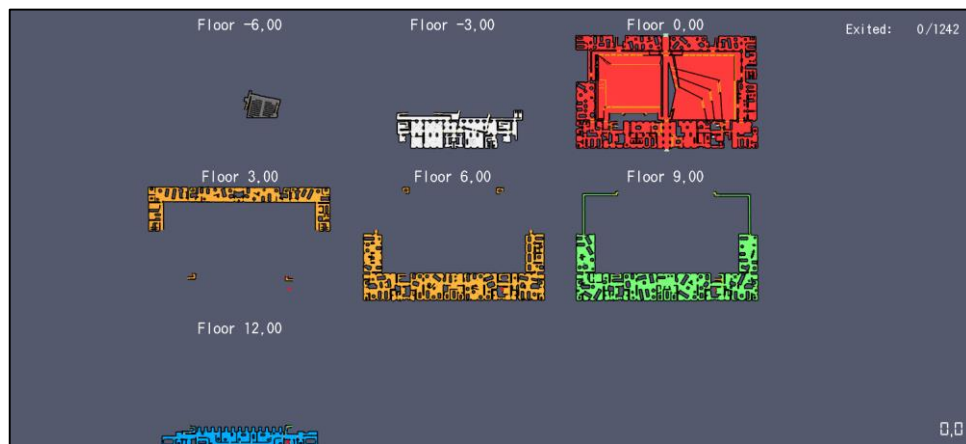
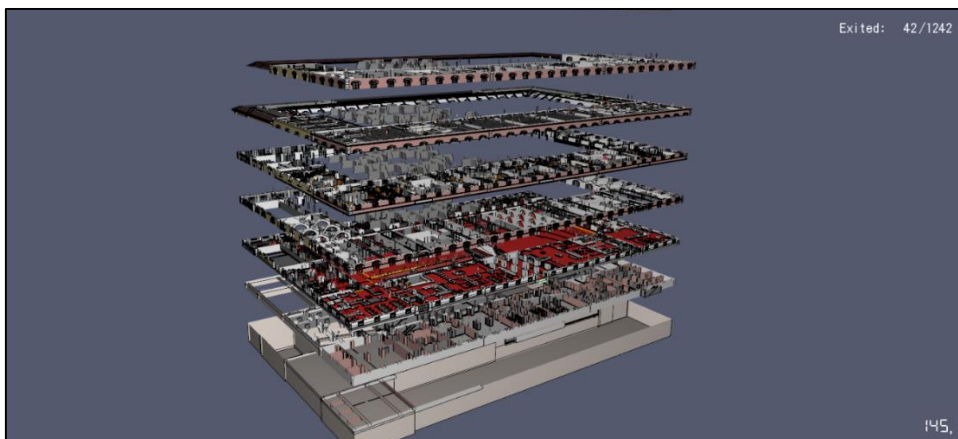


Figura 36. Interfaccia grafica degli output.

Nel caso in esame, si è presentata la necessità di riuscire ad osservare simultaneamente l'evacuazione da ogni piano dell'edificio, in modo da rendere più chiare le dinamiche di esodo. Tramite il comando “*Floor Setting*” è possibile “splittare” ogni livello dell'edificio lungo l'asse verticale, in modo da rendere meno compatto e più leggibile il percorso degli occupanti; alternativamente il comando consente di “spalmare” ogni livello sul piano orizzontale, affinché l'utente possa avere pieno controllo su tutti i piani del manufatto in ogni istante. Di seguito si riporta un esempio di visualizzazione per entrambe le opzioni.





Tramite il comando “*Section Box*” è inoltre possibile sezionare il modello in modo da evidenziare le parti che si vogliono analizzare, un esempio è riportato dell’immagine sotto, nel quale si evidenzia il LoS (Level of Service) relativo alla coda lungo le scale.

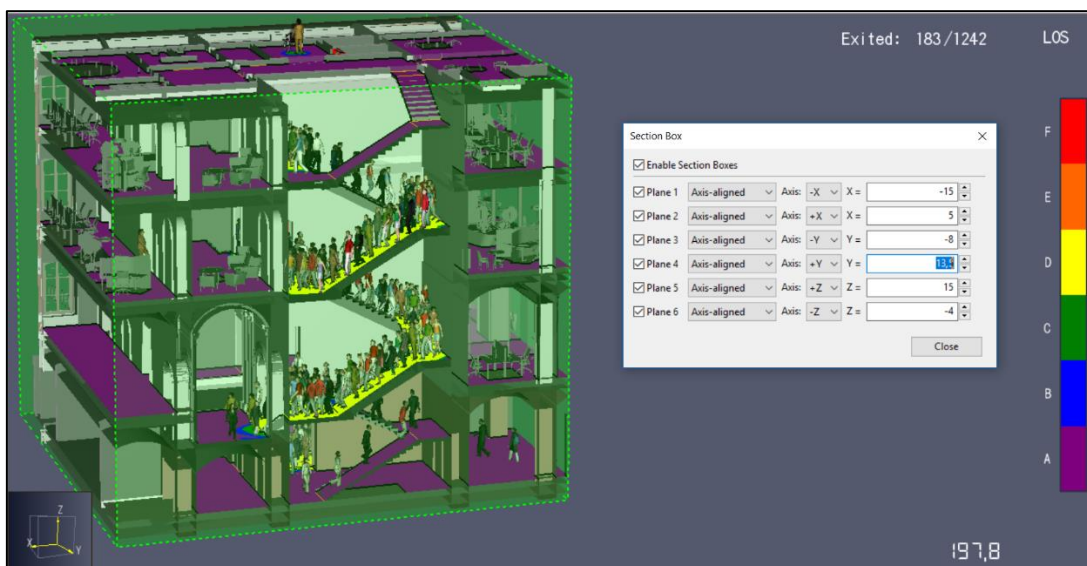


Figura 37. Sezione al fine di visualizzare i LoS sulle scale.

Per quanto riguarda la visualizzazione degli occupanti il software prevede 4 tipologie di rappresentazione differenti, di seguito elencate:

- Dischi: ciascun occupante è rappresentato da un disco bidimensionale con un triangolo che indica la direzione in cui si sta muovendo l’individuo;
- Cilindri: ciascun occupante è rappresentato da un cilindro tridimensionale di altezza e diametro pari a quelli impostati nel profilo;
- Generico: in questa visualizzazione ogni occupante è rappresentato mediante un manichino animato;

- Persona: è la rappresentazione più realistica, e consente di raffigurare ogni occupante mediante un avatar pre-impostato nella sezione “profilo”.

La scelta del tipo di raffigurazione per gli occupanti risulta strettamente legata agli obiettivi. Ad esempio nel caso preso in esame, seppur la rappresentazione tramite avatar attribuisca un maggiore carattere realistico alla simulazione, molto spesso si è preferito analizzare l'esodo utilizzando la visualizzazione a cilindri, per mezzo della quale, associando opportunamente differenti colori a seconda del gruppo di occupanti preso in esame, è possibile risalire facilmente a quale gruppo di occupanti faccia parte il singolo individuo.

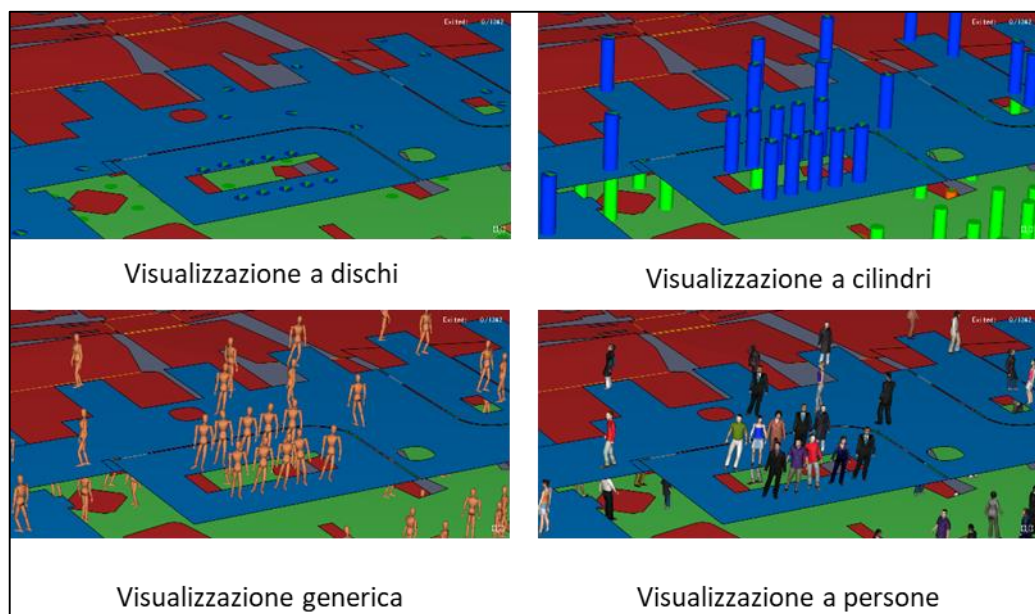


Figura 38. Tipi di visualizzazione per gli occupanti.

Valutazione dei tempi

Come detto per ciascuno dei tre scenari modellati si è eseguita la simulazione in modalità “Steering” le cui caratteristiche sono state descritte al capitolo 5.

Di seguito vengono confrontati i risultati ottenuti dai tre scenari in termini di tempo.

	TEMPI della simulazione	
	[minuti]	[secondi]
SCENARIO 1		
Configurazione automatica	8:13	493,80
SCENARIO 2		
Configurazione programmata	7:33	453,50
SCENARIO 3		
Configurazione critica	8:40	520,00

Figura 39. Confronto dei tempi di esodo tra i 3 Scenari.

Il confronto ha consentito di quantificare il guadagno in termini di tempo di movimento t_{travel} che si è ottenuto mediante le misure progettuali adottate. Dai valori sopra riportati si evince come grazie alla predisposizione della opportuna segnaletica si possa evacuare l'intero edificio in circa sette minuti e mezzo, risparmiando in questo modo 40 secondi circa rispetto ad una configurazione non guidata. È necessario fare un'ulteriore osservazione, oltre al confronto dei dati sui tempi, anche in merito ai percorsi intrapresi dagli occupanti. La scelta della via d'esodo infatti non influenza solamente l'evacuazione in termini di tempo, ma anche di sicurezza, in quanto è apparso dallo scenario 1 (configurazione non guidata) che numerosi occupanti impiegano vie di esodo non sicure, attraversando ad esempio altri comparti adiacenti anziché scegliere il percorso che permetta loro di uscire immediatamente dalla struttura. Ciò come detto ha una forte influenza negativa sulla valutazione della salvaguardia della vita durante l'esodo, che potrebbe risulterne compromessa.

In ultima analisi si può evidenziare come l'indisposizione di uno dei quattro blocchi scale (scenario 3) comporti un incremento di tempi di circa 1:10 minuti rispetto la situazione programmata standard.

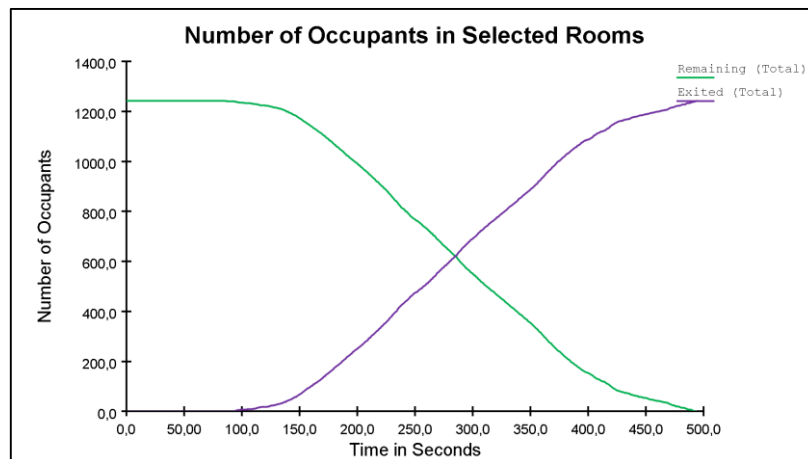


Figura 40. Scenario 1 – Grafico occupanti/tempo

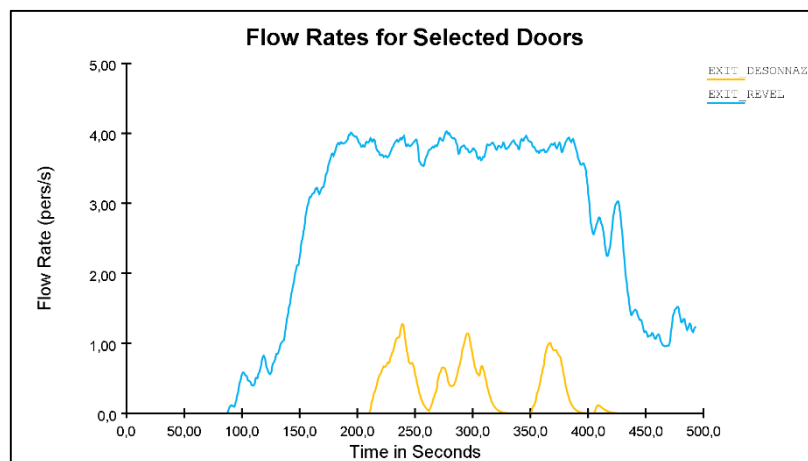


Figura 41. Scenario 1 - Flusso dalle uscite

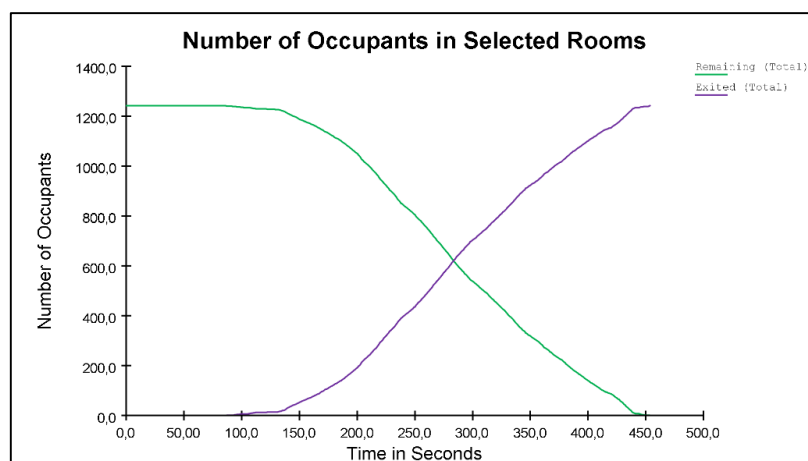


Figura 42. Scenario 2 – Grafico occupanti/tempo

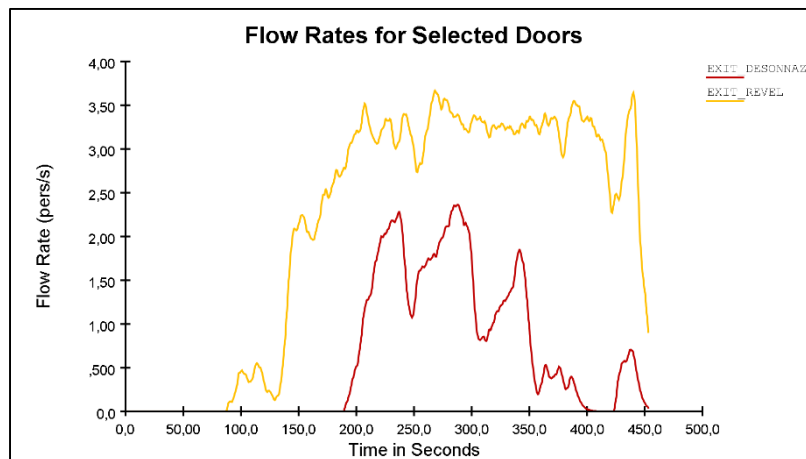


Figura 43. Scenario 2 - Flusso dalle uscite

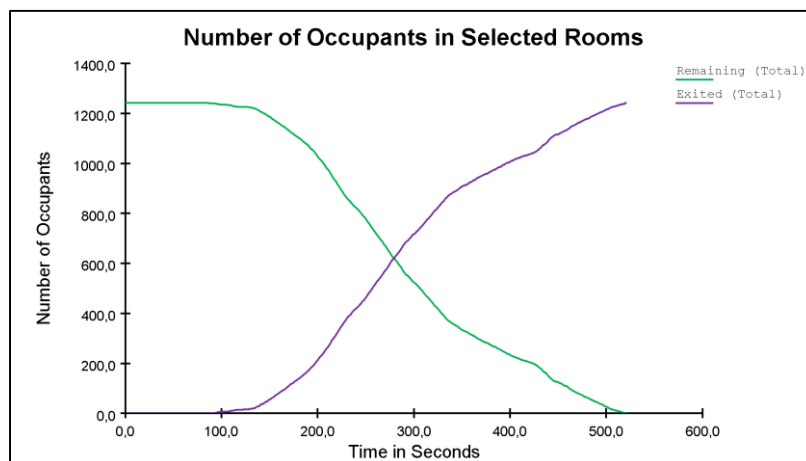


Figura 44. Scenario 3 – Grafico occupanti/tempo

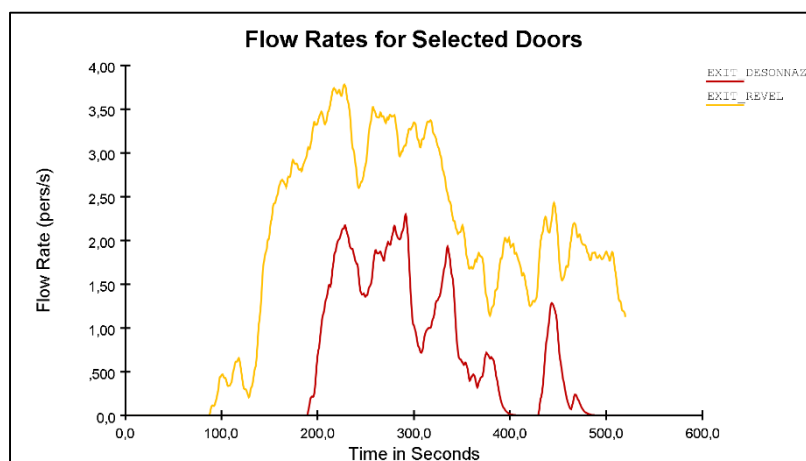


Figura 45. Scenario 3- Flusso dalle uscite

Determinazione del tempo richiesto per l'esodo RSET

Dalla simulazione sono stati quindi restituiti i tempi di movimento, che insieme agli altri tre addendi descritti al capitolo 4, costituiscono il tempo necessario per l'esodo RSET.

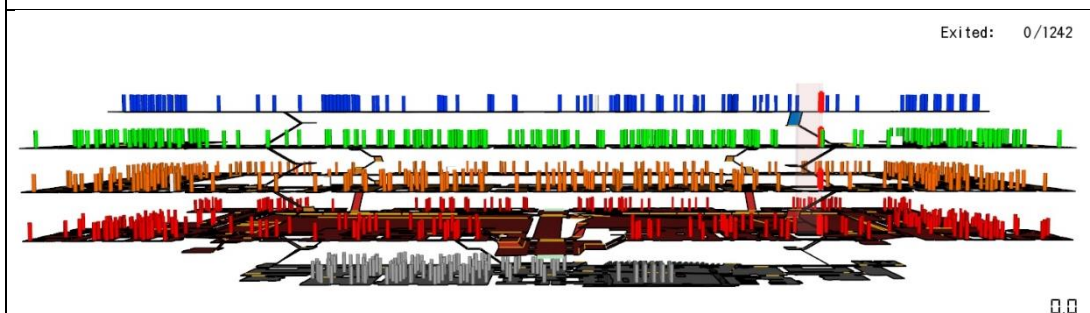
Scenari	Tempi [s]			RSET [s]
	$t_{det}+t_a$	t_{pre}	t_{tra}	
SCENARIO 1	180	60÷180	493,8	673,8
Configurazione automatica				
SCENARIO 2	180	60÷180	453,5	633,5
Configurazione programmata				
SCENARIO 3	180	60÷180	520,0	700
Configurazione critica				

Tabella 14. Valore di RSET per ogni Scenario.

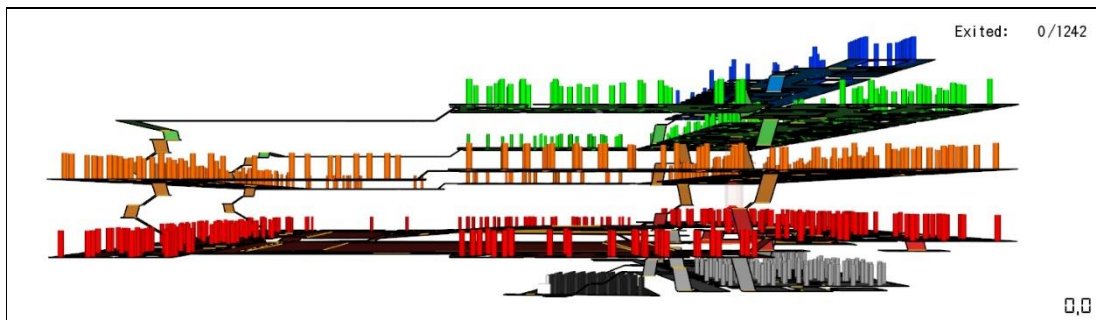
RSET rappresenta, come già detto il tempo necessario per effettuare l'esodo. I valori sopra riportati, tuttavia, sono da considerarsi puramente indicativi, poiché ciascun occupante presenta un tempo RSET differente in riferimento al compartimento che sta evacuando. Una buona progettazione antincendio quindi deve analizzare, oltre il tempo complessivo, anche quello riferito a ciascun compartimento, stanza, o ambiente. Per questo motivo si va ora ad esaminare l'esodo focalizzando l'attenzione su porzioni del fabbricato.

Valutazioni qualitative dei 3 scenari

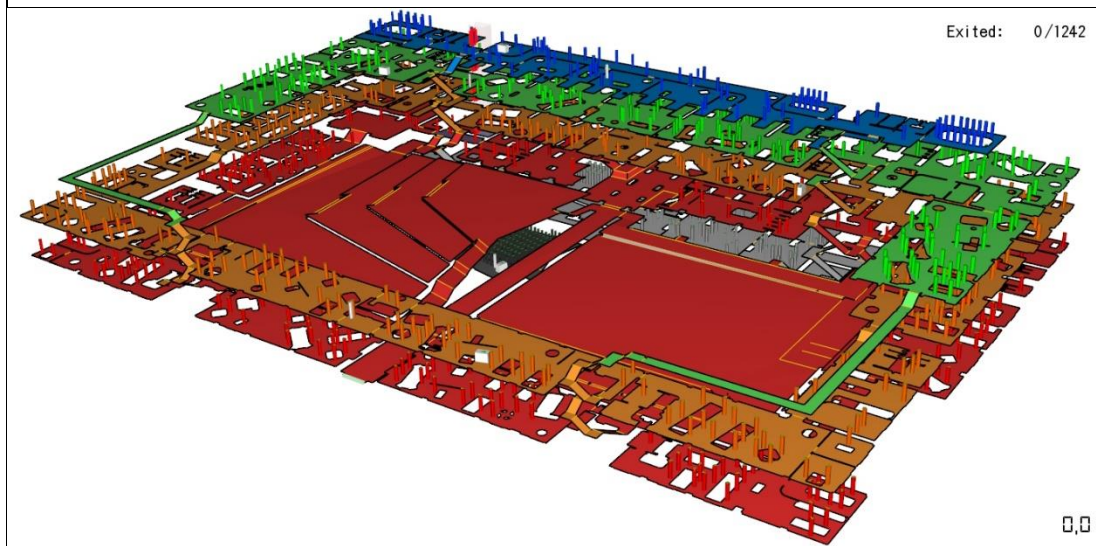
Istante iniziale: gli occupanti sono ubicati ciascuno al suo piano di riferimento. E' stato attribuito un colore differente in funzione del piano di appartenenza.



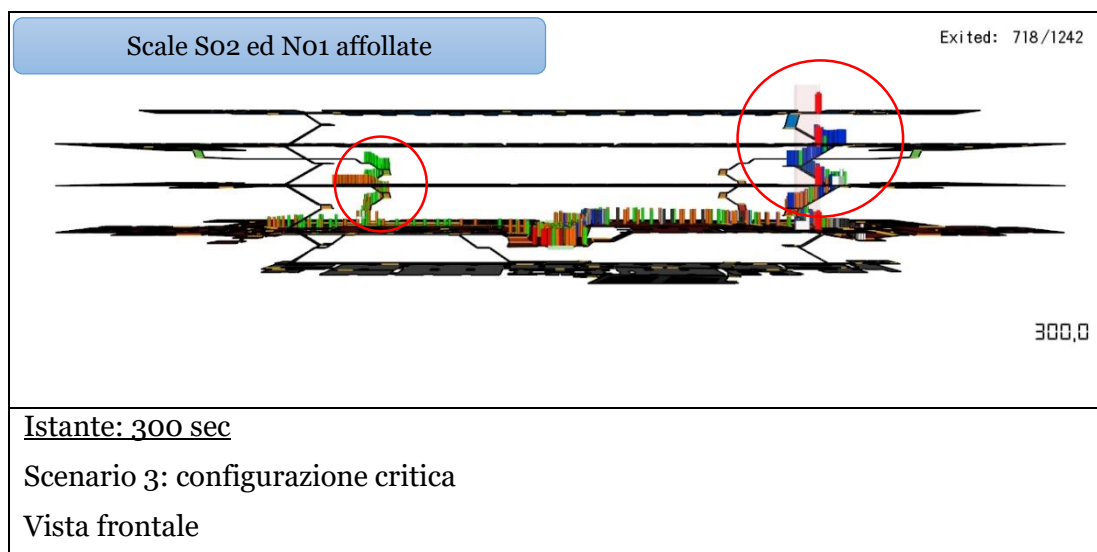
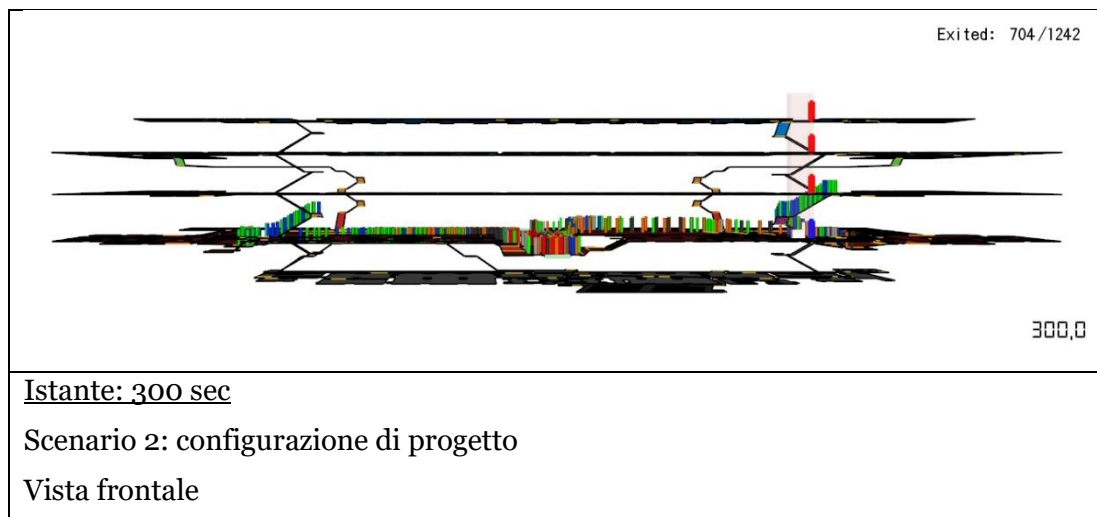
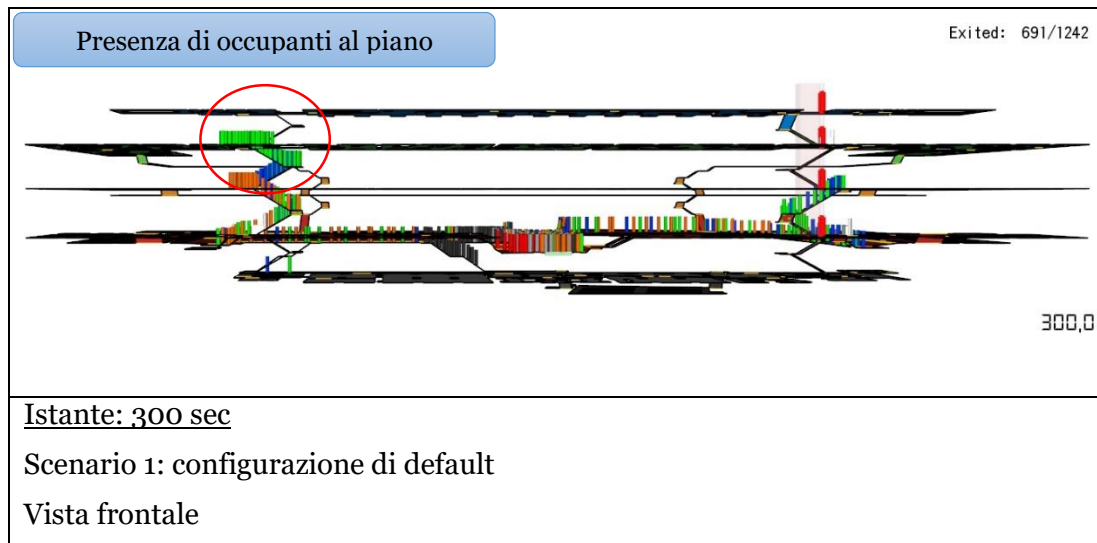
Vista dal lato Nord

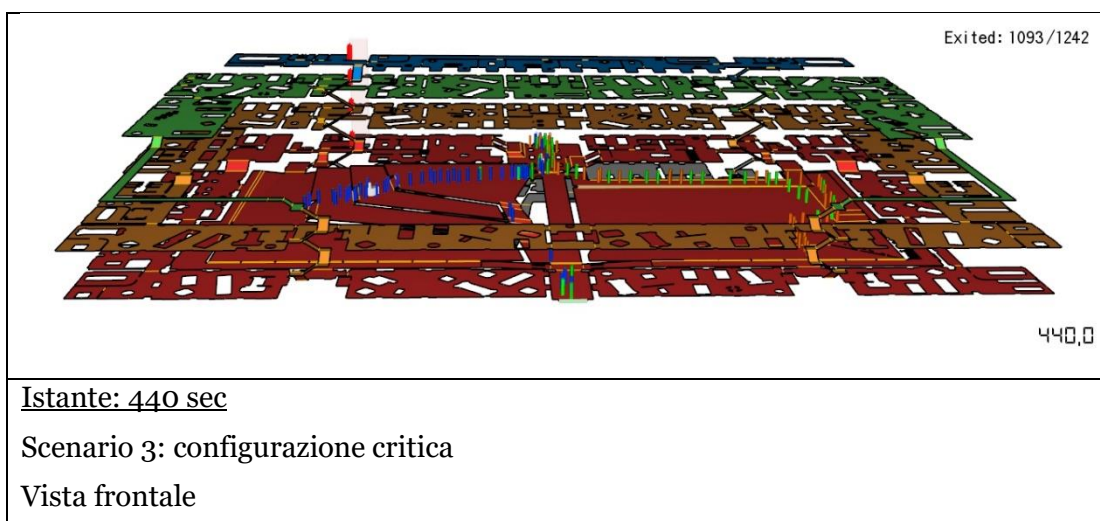
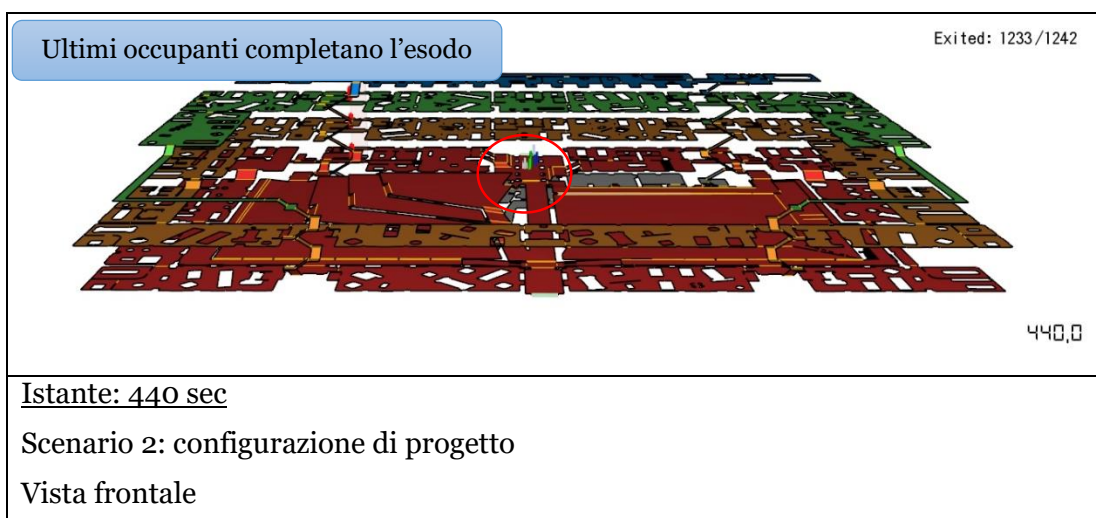
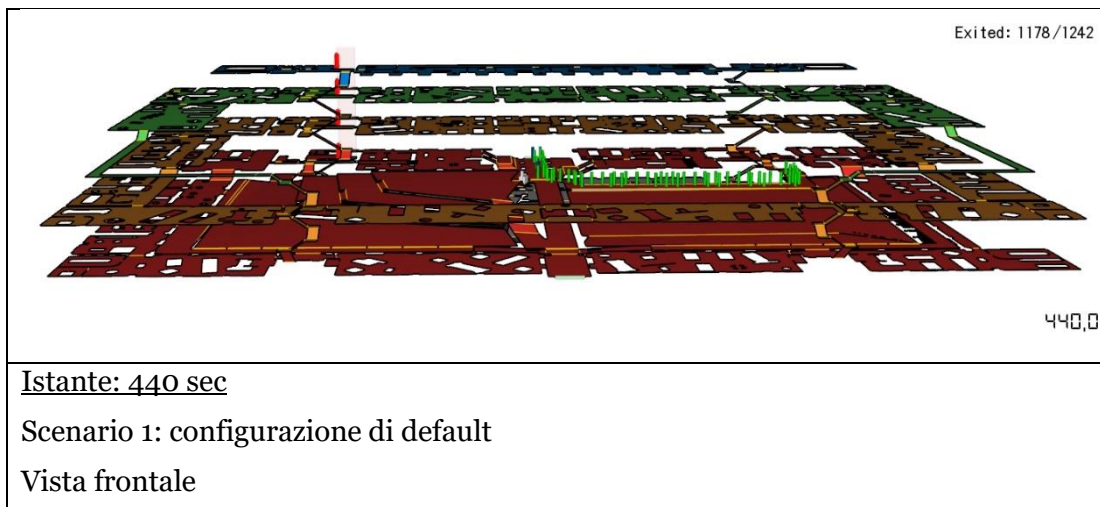


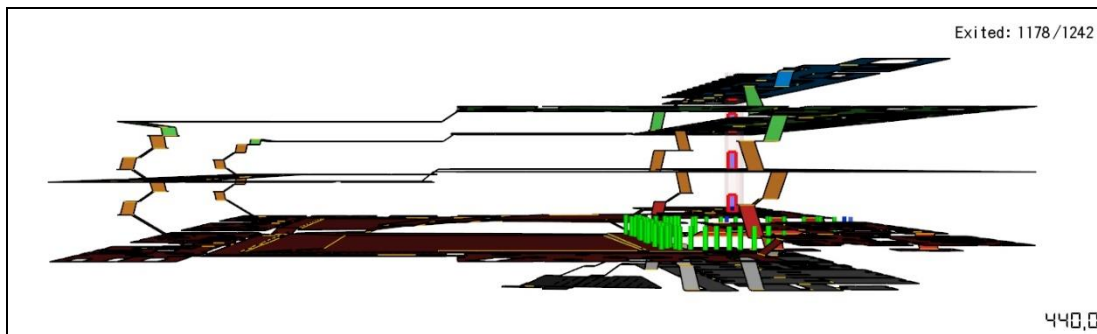
Vista dal lato Ovest



Vista generale



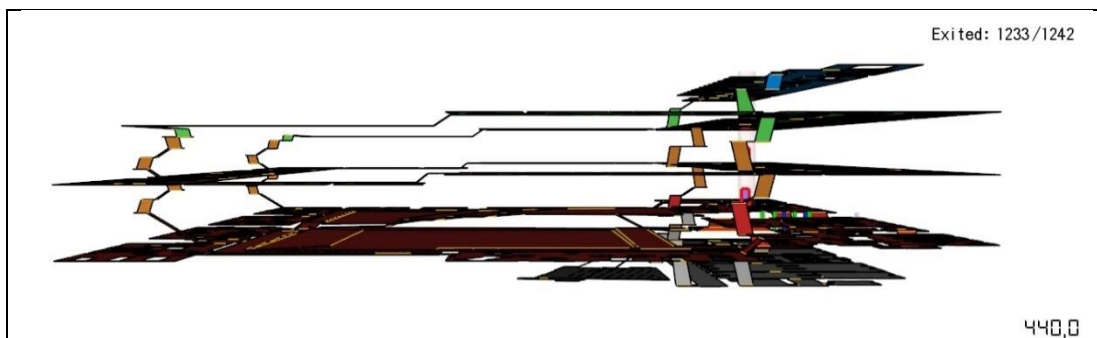




Istante: 440 sec

Scenario 1: configurazione di default

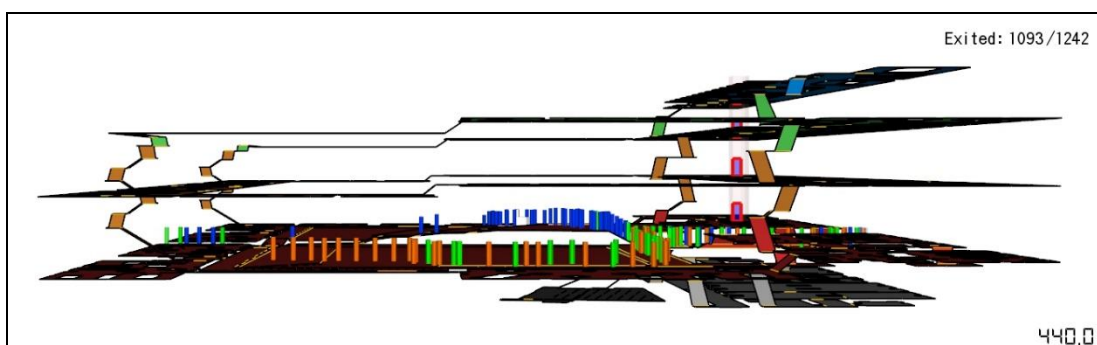
Vista laterale



Istante: 440 sec

Scenario 2: configurazione di progetto

Vista laterale



Istante: 440 sec

Scenario 3: configurazione critica

Vista laterale

Rappresentazione delle fasi di esodo per un occupante in sedia a rotelle

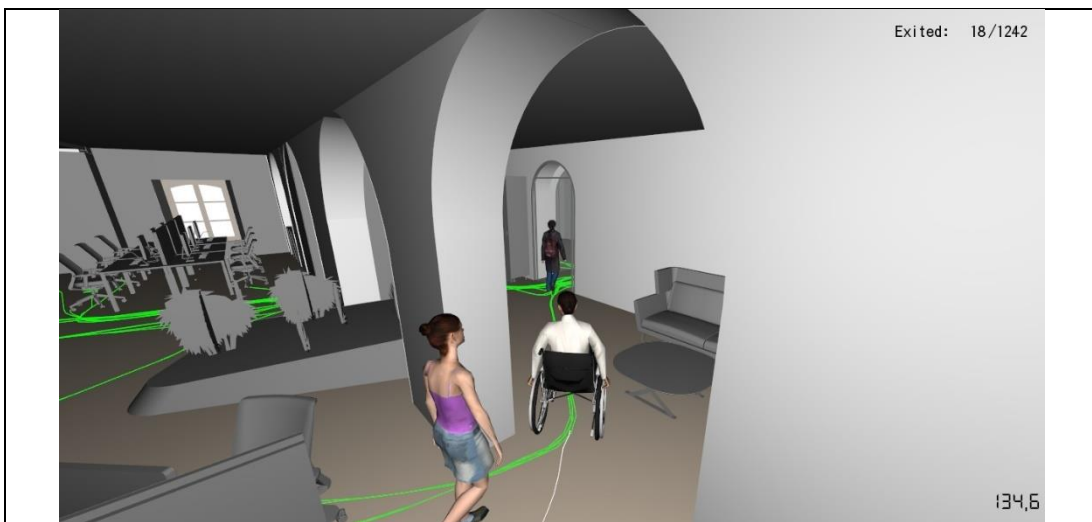
Si rappresentano ora le fasi di esodo per l'occupante in sedia a rotelle fruitore dell'ascensore antincendio, in particolare si rappresenta l'esempio del disabile che si trova al piano secondo.



Fasi dell'esodo di un disabile:

Istante iniziale

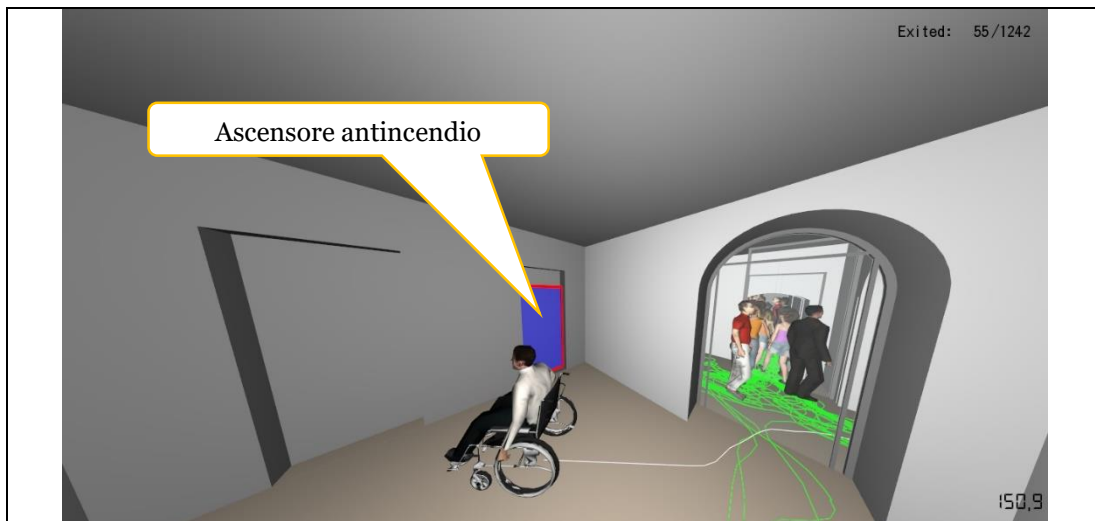
Scenario 1: configurazione di progetto



Fasi dell'esodo di un disabile:

Istante iniziale

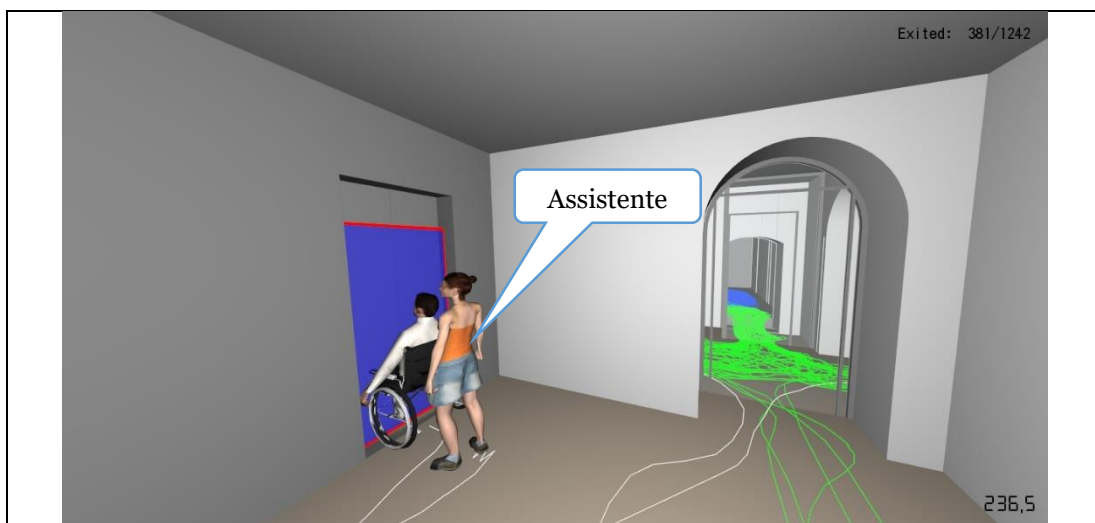
Scenario 1: configurazione di progetto



Fasi dell'esodo di un disabile:

Attesa di un assistente in spazio calmo

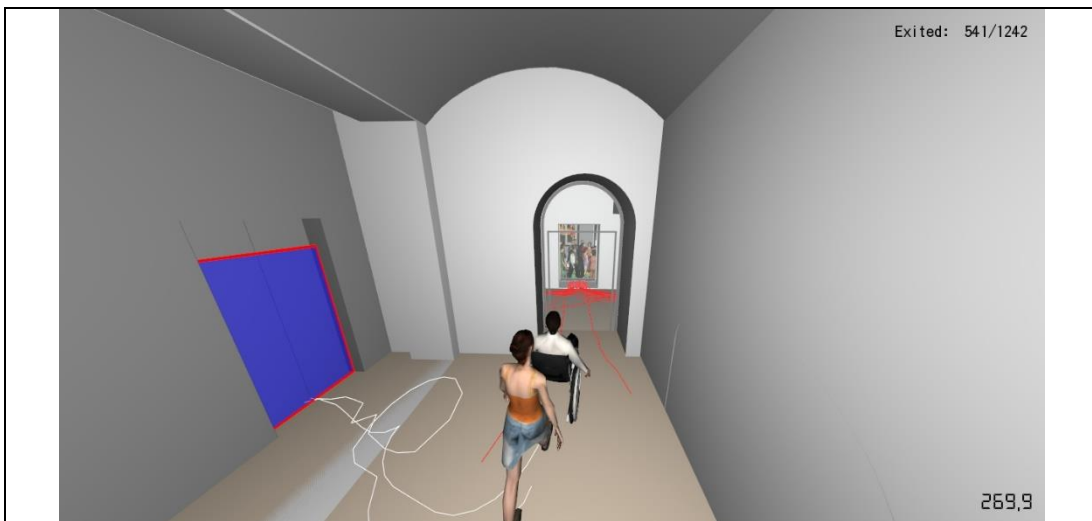
Scenario 1: configurazione di progetto



Fasi dell'esodo di un disabile:

Attesa dell'ascensore antincendio

Scenario 1: configurazione di progetto



Fasi dell'esodo di un disabile:

Discesa al piano terreno

Scenario 1: configurazione di progetto



Fasi dell'esodo di un disabile:

Raggiungimento dello spazio scoperto all'esterno dell'edificio

Scenario 1: configurazione di progetto

Per comprendere al meglio le dinamiche ed ottenere così un quadro completo sull'efficacia della progettazione dell'esodo è utile analizzare la simulazione andando a verificare gli ambienti dove si verificano situazioni di densità elevate. Si è ritenuto necessario eseguire questo tipo di verifiche poiché solamente in questo modo è possibile comprendere se la

formazione di eventuali code in prossimità delle vie di esodo verticali risulti problematica o meno.

Valutazione dei dati dinamici

È bene osservare che un parere importante sull'efficienza della progettazione dell'esodo non riguarda soltanto la valutazione dei tempi, bensì occorre valutare anche in che condizioni esso avviene. Un aiuto da questo punto di vista viene fornito dalla visualizzazione di dati dinamici degli occupanti. Nello specifico si sono valutati i tre scenari secondo i seguenti aspetti:

- Densità;
- Livello di servizio;
- Velocità;
- Tempo di uscita;

Densità

Questo parametro indica istantaneamente che livello di densità è presente in ogni spazio. Mediante questa rappresentazione è stato fatto un confronto tra i due blocchi scale posti a Sud, confrontando la situazione di progetto con quella critica. Dalle analisi emerge come, nella situazione critica, nonostante l'incremento dovuto alla quota parte di occupanti che impiegano la via d'esodo verticale So2, la densità di questo blocco scale non supera comunque il valore massimo di 3 occupanti al m².

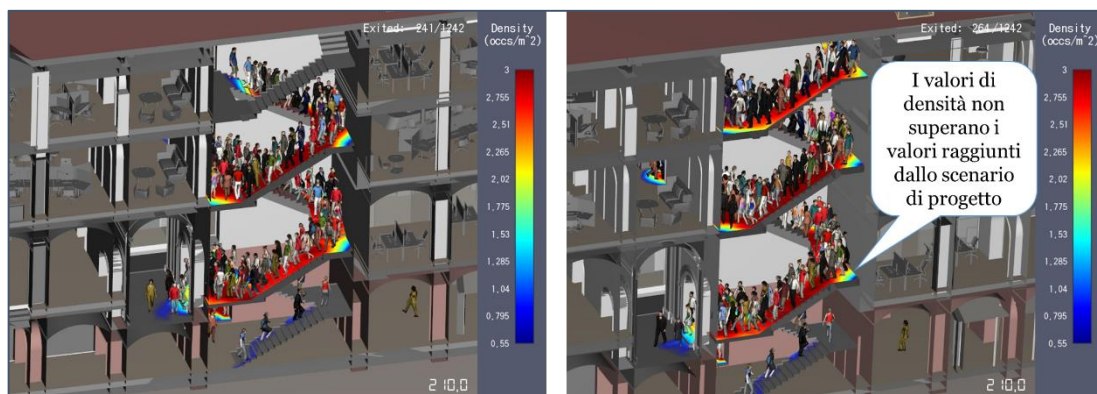
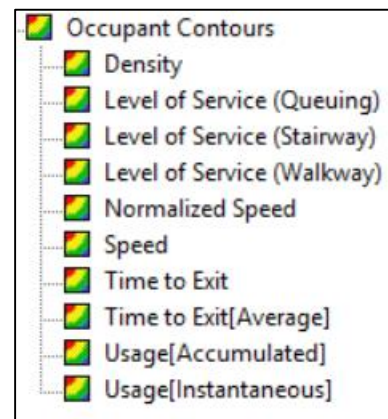
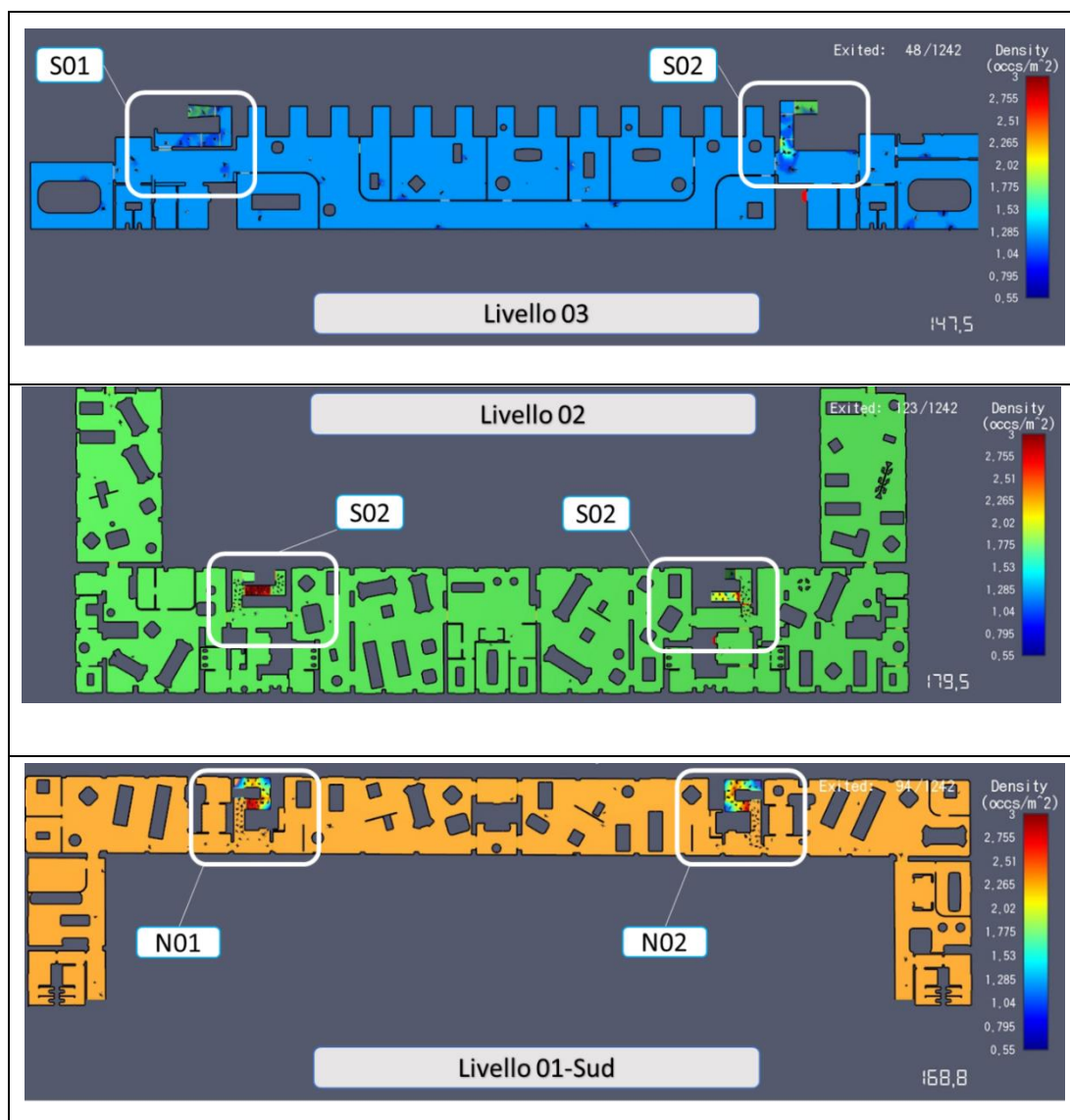
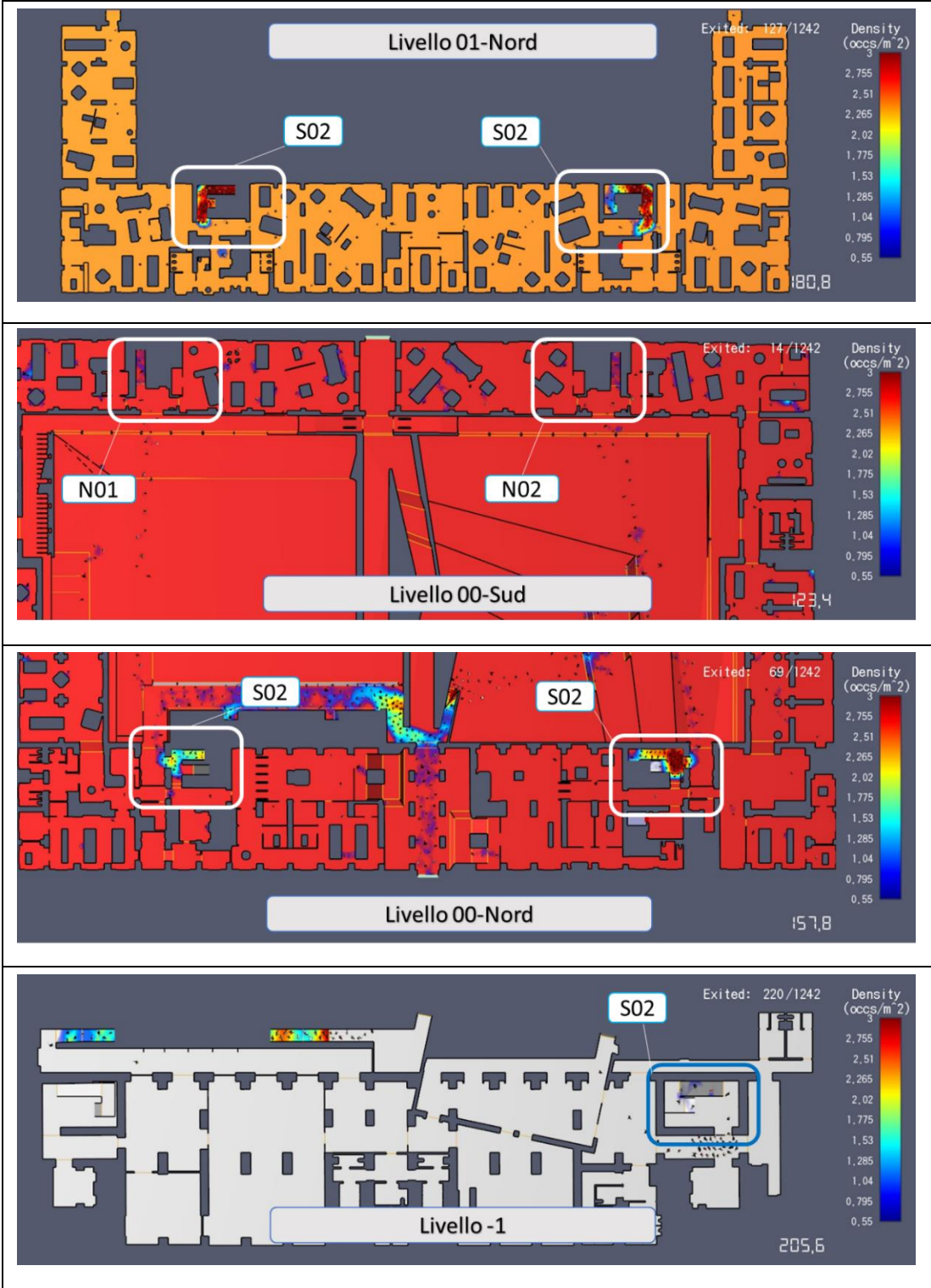
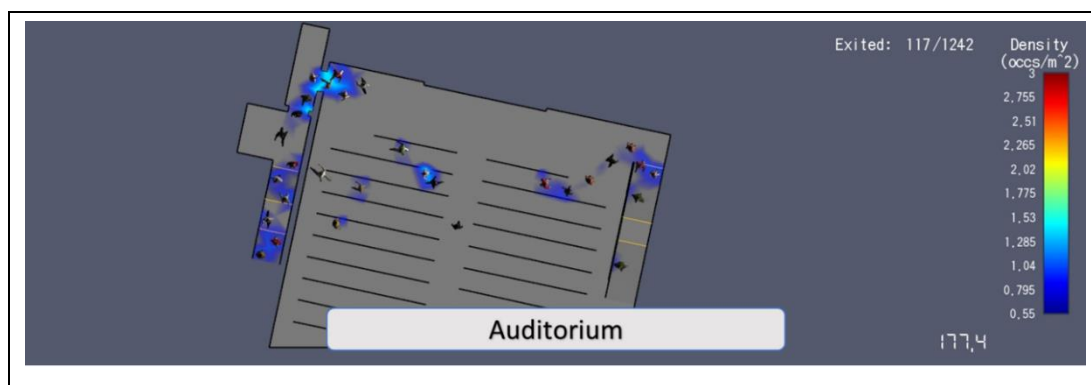


Figura 46. Confronto dei valori di densità per la via di esodo verticale So2. Scenario 2 a sinistra e scenario 3 a destra.

Dopo aver verificato che anche nel caso più critico i valori di densità non subissero variazioni rilevanti, si è proceduto andando a esaminare che in nessuno dei piani dell'edificio vi siano situazioni in cui gli occupanti siano costretti ad attendere in coda in locali non protetti prima di poter intraprendere il percorso di esodo verticale mediante una delle 4 scale presenti. Questo controllo è molto importante, in quanto durante un incendio occorre assicurare a tutti gli occupanti di poter sostare in luogo adeguatamente predisposto senza mettere in pericolo la vita delle persone. Sarebbe perciò un errore di progettazione se dalla simulazione risultasse che le persone siano costrette ad attendere in locali adiacenti a quelli protetti del corpo scale. Di seguito vengono proposta la visualizzazione del livello di densità all'istante più critico per ciascun piano.







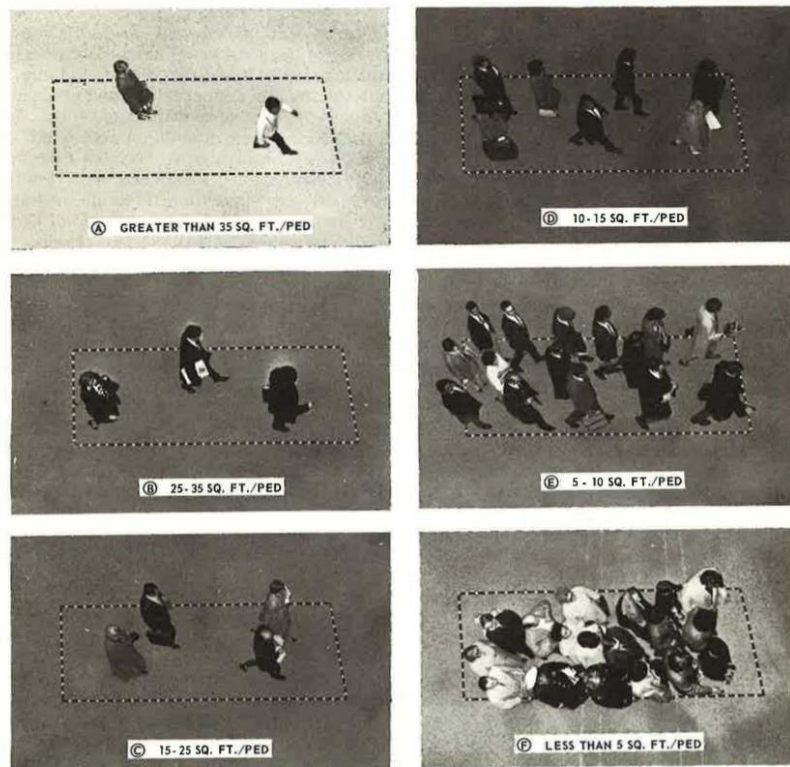
Livello di Servizio (Level of Service)

Tramite il software è possibile analizzare anche il parametro LoS.

Il livello di servizio (LoS) è un parametro introdotto nel 1987 dagli studi di Fruin. Lo studio ha analizzato, mediante dei fotogrammi, la relazione tra volume, velocità e comfort delle persone in differenti situazioni di concentrazione di occupanti individuando infine 6 livelli di servizio. Questi sono classificati tramite sei lettere maiuscole da A ad F in ordine decrescente in funzione della qualità dell'ambiente in cui l'occupante si trova in termini di libertà di scelta individuale della velocità di camminata, di libertà di passaggio e di probabilità di conflitti nel percorso. Di seguito si descrivono i livelli di servizio individuati dallo studio e le relative caratteristiche in riferimento alle camminate pedonali.

- **A** – equivale ad un'occupazione media di un'area pedonale pari o maggiore a 35 ft²/pers. In questo livello le persone non subiscono alcuna alterazione della propria marcia, possono scegliere la loro velocità di camminata in modo libero e sono in grado di aggirare i pedoni più lenti. È il livello caratterizzato dal comfort maggiore. Gli ambienti che tipicamente ricadono in questo livello sono edifici pubblici o grandi piazze in cui non vi sia sovraffollamento.
- **B** – equivale ad un'occupazione media di un'area pedonale compresa tra i 25 ed i 35 ft²/pers. Rispetto al livello precedente vi è una maggiore densità di occupanti, ciò comporta un lieve condizionamento sulla libertà di manovra e sul mantenimento delle velocità desiderate, tuttavia il comfort è discreto.
- **C** – equivale ad un'occupazione media di un'area pedonale compresa tra i 15 ed i 25 ft²/pers. In questo livello la libertà di scelta della velocità di camminata è limitata, così come è limitata la possibilità di evitare gli altri pedoni. Il livello è caratterizzato dalla presenza di flussi inversi, ciò comporta un'alta probabilità di conflitto tra i pedoni, i quali devono spesso variare la propria velocità e direzione per evitarsi. Il comfort è modesto.

- **D** – equivale ad un'occupazione media di un'area pedonale compresa tra i 10 ed i 15 ft²/pers. Le velocità e la libertà di movimento sono fortemente condizionate, il comfort è definibile come basso.
- **E** – equivale ad un'occupazione media di un'area pedonale compresa tra i 5 ed i 10 ft²/pers. Questo livello è tipico per strutture quali stadi o stazioni ferroviarie.
- **F** – equivale ad un'occupazione media di un'area pedonale pari a 5 ft²/pers o minore. In questo livello tutte le velocità sono limitate. Il movimento è caratterizzato da frequenti contatti con gli altri occupanti, inoltre inversioni o cambiamenti di direzione sono quasi del tutto impossibili. Il comfort in questo caso risulta del tutto assente.



Altri livelli di servizio sono stati determinati in riferimento alle code e al movimento su scale. Nella tabella sottostante si riporta uno schema rappresentativo delle tre scale di LoS studiate da Fruin utilizzate all'interno del software Pathfinder.

LoS (Walking)			LoS (Queuing)			LoS (Stairs)		
	A	$\geq 35 \text{ ft}^2/\text{pers}$		A	$\geq 13 \text{ ft}^2/\text{pers}$		A	$\geq 20 \text{ ft}^2/\text{pers}$
	B	$25 \div 35 \text{ ft}^2/\text{pers}$		B	$10 \div 13 \text{ ft}^2/\text{pers}$		B	$15 \div 20 \text{ ft}^2/\text{pers}$
	C	$15 \div 25 \text{ ft}^2/\text{pers}$		C	$7 \div 10 \text{ ft}^2/\text{pers}$		C	$10 \div 15 \text{ ft}^2/\text{pers}$
	D	$10 \div 15 \text{ ft}^2/\text{pers}$		D	$3 \div 7 \text{ ft}^2/\text{pers}$		D	$7 \div 10 \text{ ft}^2/\text{pers}$
	E	$5 \div 10 \text{ ft}^2/\text{pers}$		E	$2 \div 3 \text{ ft}^2/\text{pers}$		E	$4 \div 7 \text{ ft}^2/\text{pers}$
	F	$< 5 \text{ ft}^2/\text{pers}$		F	$< 2 \text{ ft}^2/\text{pers}$		F	$< 4 \text{ ft}^2/\text{pers}$

Tabella 15. Le tre tipologie di livelli di servizio.



Figura 47. Rappresentazione del LoS per la scala SO1

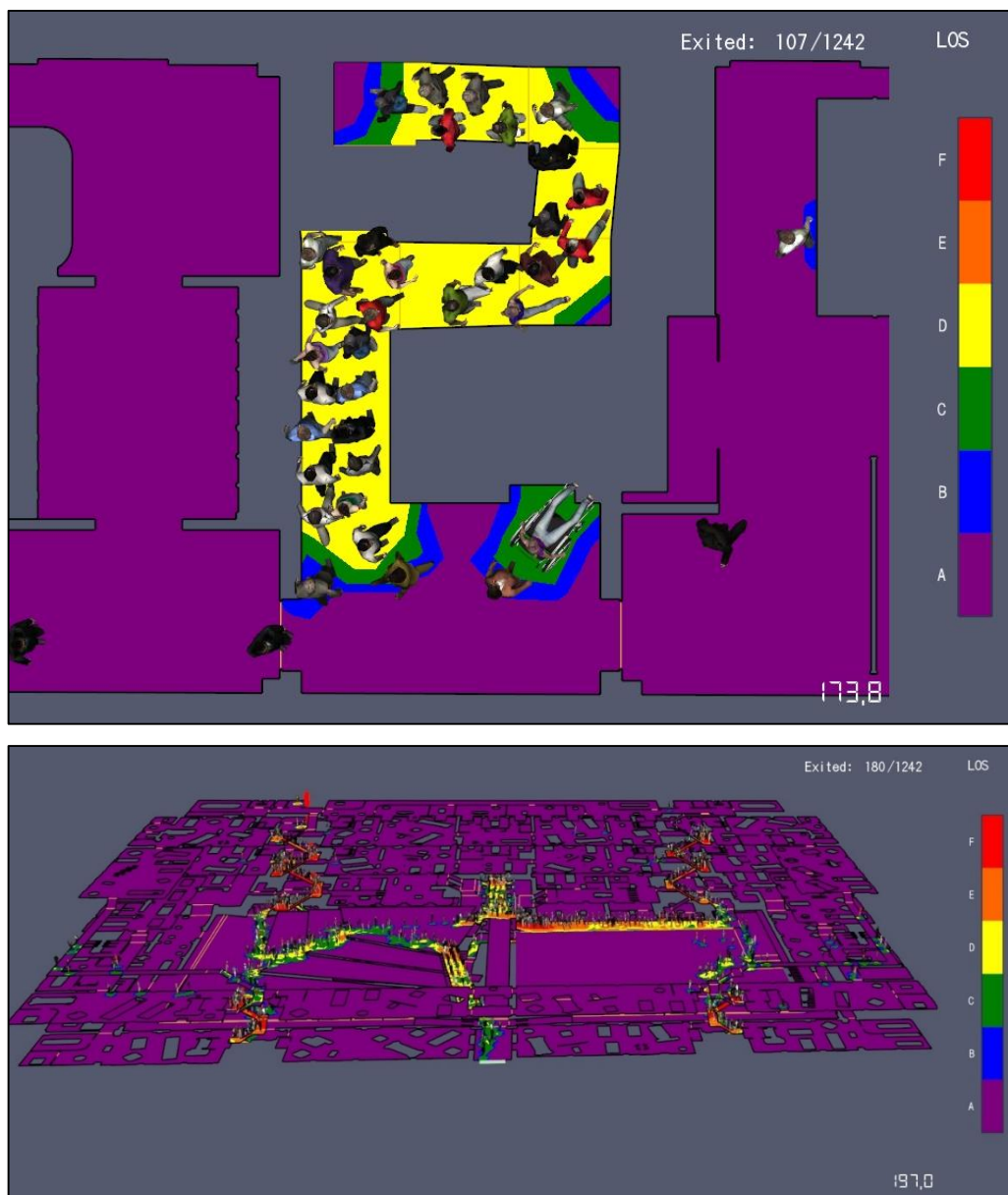


Figura 48. Los (queuing) del vano scale No1 al piano primo [in alto] e dell'intero edificio [in basso].

Dalle analisi svolte riguardo i percorsi orizzontali e verticali, risulta che mediamente i livelli di servizio rientrano in un range tra il livello A ed il livello D, tuttavia, per brevi tratti delle scale si sono evidenziati picchi fino al raggiungimento dei livelli E ed F, comunque accettabili durante l'esodo e che non compromettono affatto lo svolgimento dell'intera evacuazione.

7.3.3 Verifica della salvaguardia della vita

Per valutare l'efficacia delle misure di prevenzione incendi impiegate, il codice di prevenzione incendi prevede, come descritto al capitolo 4, il confronto tra i valori di RSET e quelli di ASET. Il primo dei due parametri sopra citati, come si è visto, è il risultato principale delle simulazioni di esodo. Per quanto riguarda invece ASET, esso viene determinato tramite opportune simulazioni di incendio. ASET rappresenta il tempo a disposizione degli occupanti per mettersi in salvo, esso dipende perciò da come l'incendio si innesca, e si sviluppa all'interno dell'ambiente considerato. Le modellazioni di incendio hanno lo scopo di verificare l'azione delle misure attive e passive previste in sede di progetto.

Il codice prevede due metodi differenti per il calcolo di ASET:

- metodo avanzato;
- metodo semplificato.

Il primo consente al progettista di utilizzare modelli di fluidodinamica computazionale (CFD) al fine di stimare l'evoluzione dell'incendio e dei suoi effetti. In alternativa, esiste appunto il metodo semplificato che utilizza invece soglie di prestazione molto più conservative, basandosi sul concetto della "zero exposure".

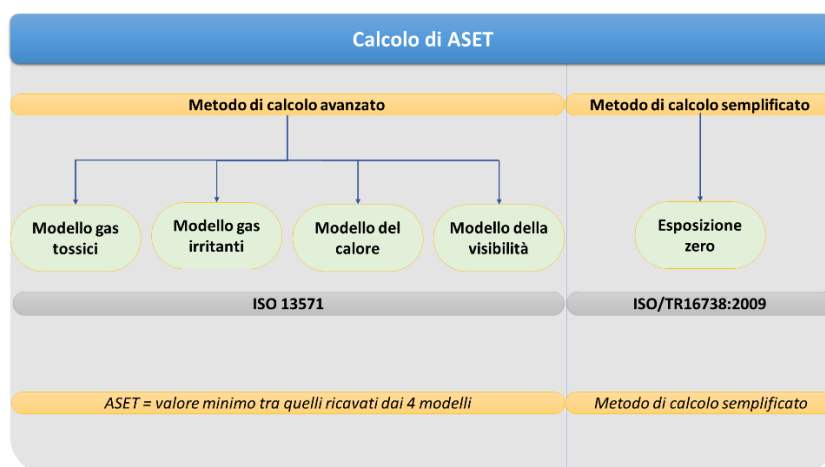


Figura 49. Metodi di calcolo per ASET.

Sebbene il metodo semplificato risulti più di facile applicazione, tuttavia molto spesso, essendo molto restrittivo, porta a valutazioni negative sulle misure adottate, che invece se analizzate tramite un metodo più complesso potrebbero dare esiti positivi.

Di seguito si riportano i parametri e le relative soglie di prestazione da garantire previste dal C. P.I. per il metodo avanzato.

Tabella 16. Tabella M.3-2 del C.P.I. 2015

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 < 100m²: 5 m	ISO 13571-2012.
		Soccorritori: 5 m Soccorritori in locali di superficie lorda < 100m²: 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 incapaci al raggiungimento della soglia
		Soccorritori: nessuna valutazione	
Calore	Temperatura massima di esposizione.	Occupanti: 60°C Soccorritori: 80°C	ISO 13571-2012 [1]
Calore	Irraggiamento termico massimo da tutte le sorgenti (incendio, effluenti dell'incendio, struttura) di esposizione degli occupanti.	Occupanti: 2,5 kW/m²	ISO 13571-2012, per esposizioni maggiori di 30 minuti, senza modifica significativa dei tempi di esodo (2,5 kW/m²).
		Soccorritori: 3 kW/m²	[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*.

Nel caso in esame si è impiegato quest'ultimo metodo, ovvero il metodo avanzato, al fine di calcolare il valore di ASET per l'ambiente interrato ospitante l'auditorium.

Auditorium

L'esigenza di effettuare questa ulteriore analisi è motivata dal fatto che, la sola modellazione di esodo non è sufficiente al fine di fornire delle valutazioni sull'effettiva efficienza del sistema progettato. Le simulazioni di incendio e di esodo dunque, insieme devono costituire un binomio grazie al quale il progettista è in grado di trarre delle valutazioni sulle misure adottate. Il complesso comprende un auditorium ubicato al piano -1, esso rientra nell'attività 65 categoria B. del D.P.R. n.151 del 1 Agosto 2011.

Identificazione degli scenari di incendio

Una volta definite le soglie di prestazione, si è proseguito individuando gli scenari di incendio. Si è quindi seguita la procedura presente al capitolo M2 del Codice. Facendo una considerazione in merito alla tipologia di attività e alle caratteristiche degli occupanti presenti. In definitiva, tra i diversi scenari individuati, si è selezionato quello che è risultato essere il più gravoso, e al tempo stesso credibile, ovvero ipotizzando un innesco accidentale di un notebook adiacente ad alcuni cappotti posti su una sedia, in prossimità di una delle uscite.

Descrizione quantitativa dello scenario di progetto

In questa fase si caratterizzano tre aspetti principali dello scenario: l'attività, gli occupanti e l'incendio.

Attività

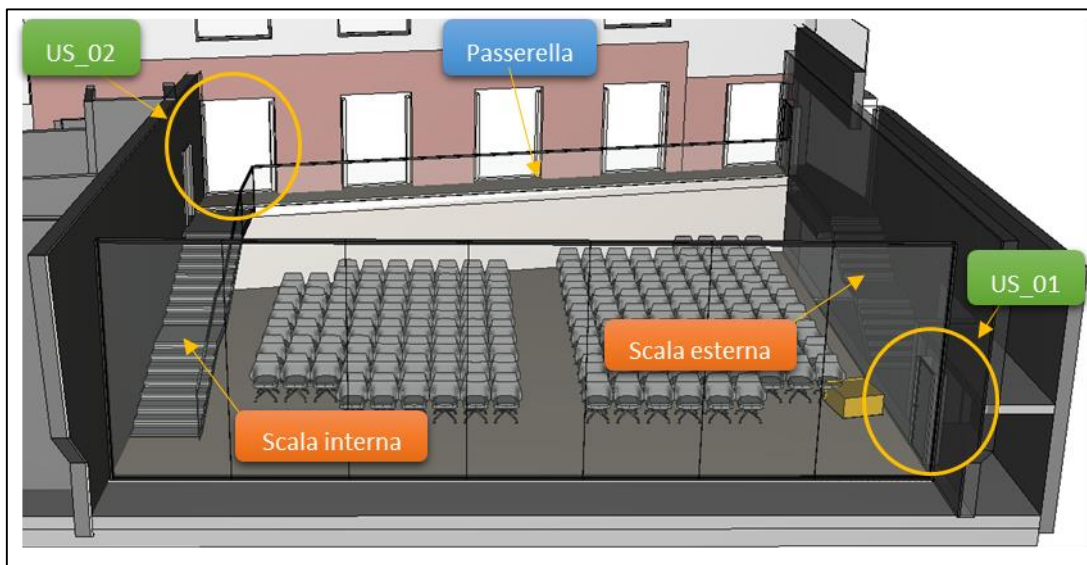


Figura 50. Auditorium

È stata prevista per l'ambiente una capienza massima pari a 150 persone, pari al numero di posti a sedere. L'ambiente costituisce un comparto separato dal resto della struttura ed è munito di due uscite: la US_01 posta al livello del pavimento che conduce gli occupanti verso una scala che porta direttamente all'esterno della struttura, la US_02 invece si trova alla fine di due rampe di scale interne all'auditorium e conduce le persone verso il blocco scale So2 che dovrà essere impiegato per raggiungere il piano terreno e successivamente le uscite verso l'esterno.

A livello impiantistico, nell'ambiente è presente un sistema evacuazione fumi e calore (SEFC) costituito da bocchette di immissione a livello del pavimento e bocchette di estrazione poste nel controsoffitto. In aggiunta esso è dotato di un sistema di barriere al fumo in prossimità della scala che conduce all'uscita US_02 in modo da non permettere ai fumi di renderla inutilizzabile.

Occupanti

Si sono definite le tipologie di occupante aventi velocità di movimento in accordo con quelle già delineate durante la fase di modellazione dell'intera struttura. Nello specifico si sono identificate le seguenti tipologie: occupante generico senza disabilità e disabile in sedia a rotelle. Si sono quindi fissati i tempi come segue.

Tempo di rivelazione

Pari a 40 secondi, determinato tramite il software Pyrosim®. Corrisponde all'istante in cui si attiva l'IRAI.

Tempo di allarme generale

L'auditorium è servito da un impianto di allarme, il quale è collegato a quello di rivelazione, di conseguenza tale valore è assimilabile a zero, in accordo alla norma ISO/TR 16738:2009.

Tempo di pre-movimento

Il tempo di pre-movimento è stato determinando facendo riferimento alla BS PD 7974-6:2004, che nel caso specifico prevede un tempo variabile in un range tra i 60 ed i 180 secondi. Nel caso in esame si è scelto di impostare tale valore pari a 120 sec.

Scenario category and modifier	First occupants Δt_{pre} (not person/s)	Occupant distribution Δt_{pre} (not person/s) ^a
A: awake and familiar		
M1 B1 - B2 A1 - A2	0.5	1.0
M2 B1 - B2 A1 - A2	1	2
M3 B1 - B2 A1 - A3	>15	>15
For B3, add 0.5 for wayfinding		
M1 would normally require voice alarm/PA if unfamiliar visitors likely to be present		
B: awake and unfamiliar		
M1 B1 A1 - A2	0.5	2
M2 B1 A1 - A2	1.0	3
M3 B1 A1 - A3	>15	>15
For B2 add 0.5 for wayfinding		
For B3 add 1.0 for wayfinding		
M1 would normally require voice alarm/PA		

120 sec

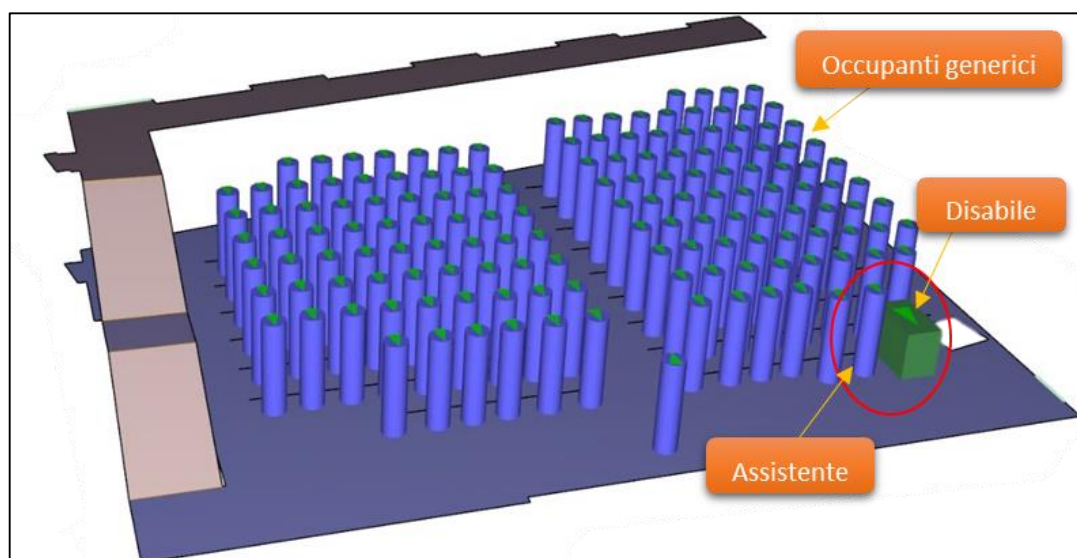


Figura 51. Posizionamento occupanti

Incendio

Il focolare è stato posizionato in prossimità dell'uscita US_01. Per la determinazione della curva RHR (Rate of Heat Released) si è fatto riferimento alle curve proposte dal manuale NFPA. Nello specifico si è ipotizzato l'innesco di un pc laptop posizionato in adiacenza di due cappotti da uomo sopra 4 sedie impilate. Il tipo di crescita scelto per la curva è quello di tipo medio, caratterizzato dal raggiungimento di 1 MW a 300 secondi. Di seguito si riportano le tre curve che sono state utilizzate al fine di costruire quella inerente al caso ipotizzato.

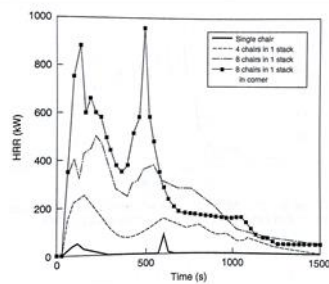


Figure 3-1.19. HRR of metal-frame, upholstered stacking chairs.

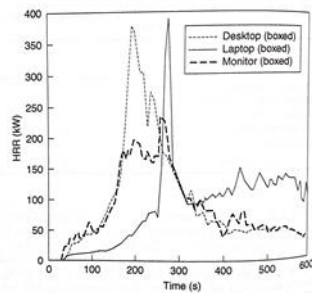


Figure 3-1.48. HRR of single, packaged, and boxed computers and monitors.

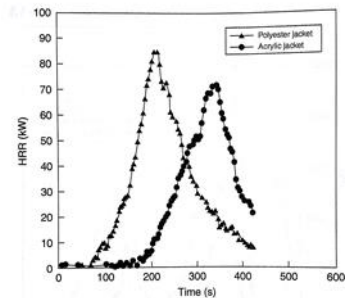


Figure 3-1.20. HRR of two men's jackets.

Figura 52. Curve RHR.

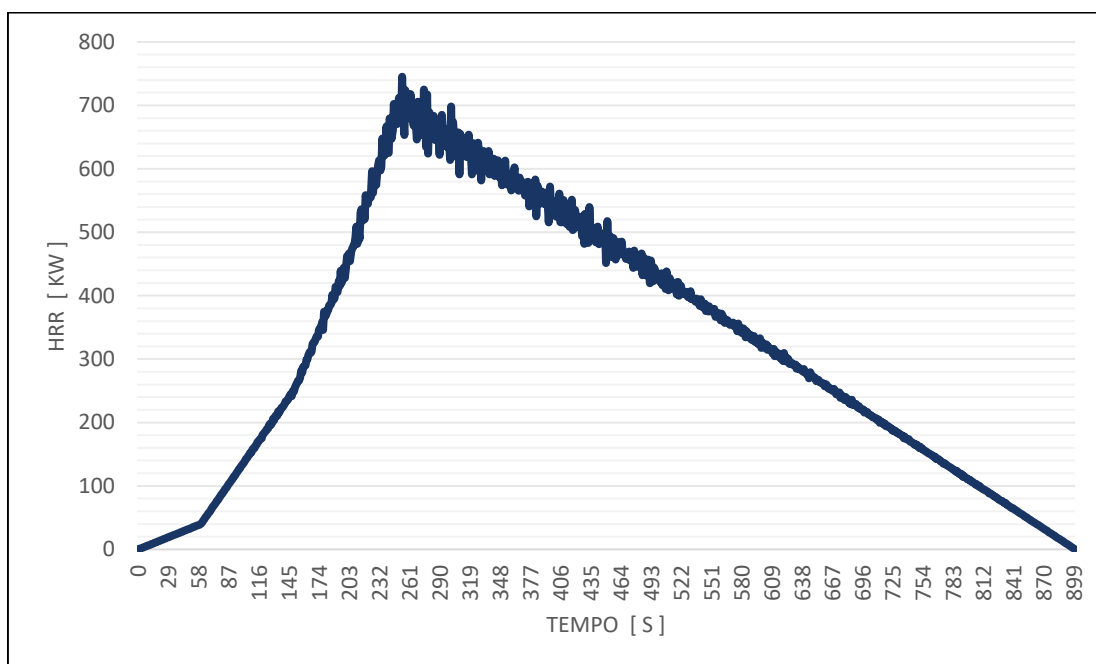


Figura 53. Curva RHR di progetto

La durata dello scenario è in funzione dell'obiettivo, che in questo caso è quello di salvaguardare la vita, ovvero l'intervallo di tempo analizzato sarà quello compreso tra l'innesco e l'istante in cui tutti gli occupanti hanno abbandonato l'ambiente.

Calcolo di RSET

Sono state effettuate due simulazioni differenti, dove nello scenario 2 si ipotizza che l'uscita US_01 sia resa indisponibile data la vicinanza con il focolare. Si riportano di seguito i valori di RSET estrapolati dalle simulazioni.

Scenari	Tempi [s]			RSET [s]
	$t_{det}+t_a$	t_{pre}	t_{tra}	
SCENARIO 1	0+40	120	234,5	394,5
Configurazione standard				
SCENARIO 2	0+40	120	281	441
Configurazione critica				

Tabella 17. Tempi necessari per l'esodo dall'Auditorium.

Sovrapposizione dei risultati

Dalla sovrapposizione dei risultati, si evince come sia nel primo scenario che nel secondo la possibilità di evacuare l'ambiente senza pericolo non è compromessa. In particolare si nota che visibilità, temperatura irraggiamento non scendono mai sotto i valori soglia prima definiti.

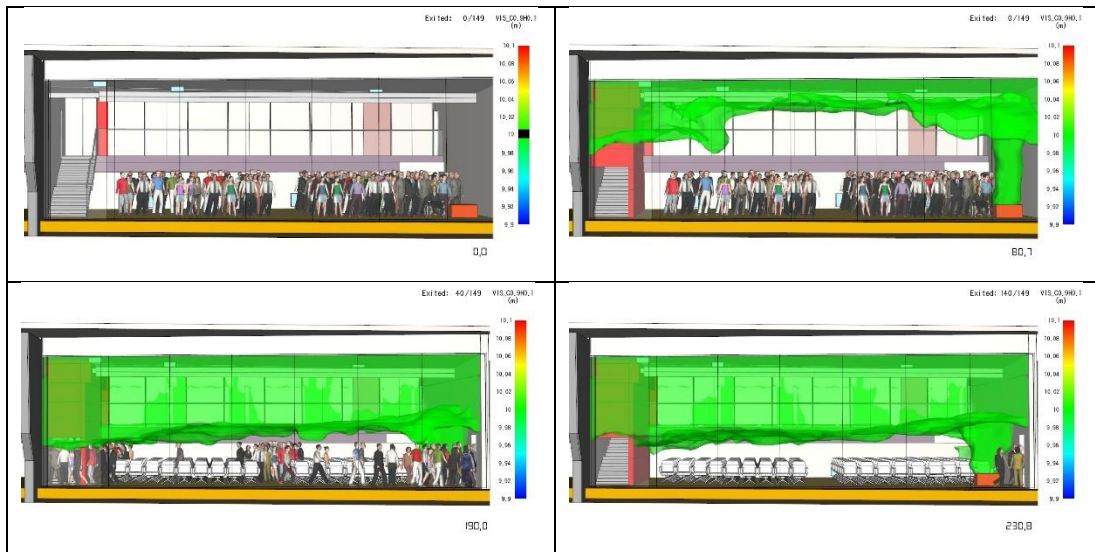
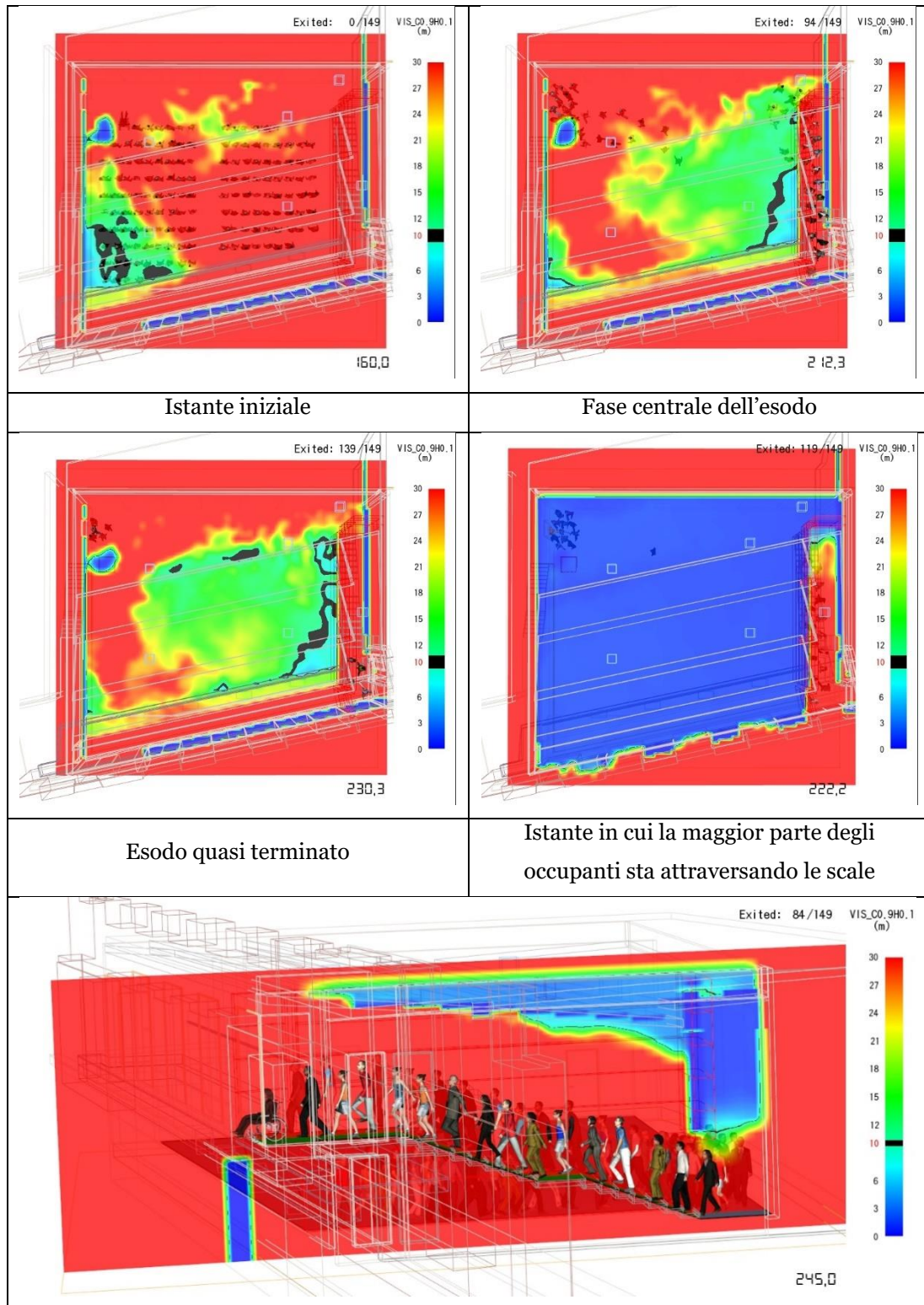


Figura 54. Visualizzazione delle isosuperfici.

Nelle immagini sopra riportate viene proposta la visualizzazione tramite isosuperfici, la quale rappresenta tramite una scala cromatica il valore di visibilità nell'ambiente. Nello specifico è stato impostato il colore verde per rappresentare il valore di visibilità pari alla soglia di 10 m. si evince quindi che la visibilità non viene compromessa in nessun istante dell'esodo.

Per indagare il requisito di visibilità in modo più approfondito si è scelta la visualizzazione a slice verticali e orizzontali. In particolare viene accertata la visibilità alla quota di 1,80 m come

stabilito dal Codice, sia per il livello dei posti a sedere, sia lungo le scale. In entrambi i casi le soluzioni adottate risultano efficaci, in quanto il valore di visibilità non scende mai sotto i 15 metri circa.



Verifica della visibilità lungo le scale

Figura 55. Verifica della visibilità.

Il secondo parametro da monitorare risulta essere quello relativo alla temperatura, essa non deve superare il valore soglia di 60°C. Dall'immagine sotto riportata, rappresentativa della fase centrale dell'esodo si evince come il picco massimo di temperatura raggiunto risulta essere decisamente inferiore al limite imposto dalla normativa.

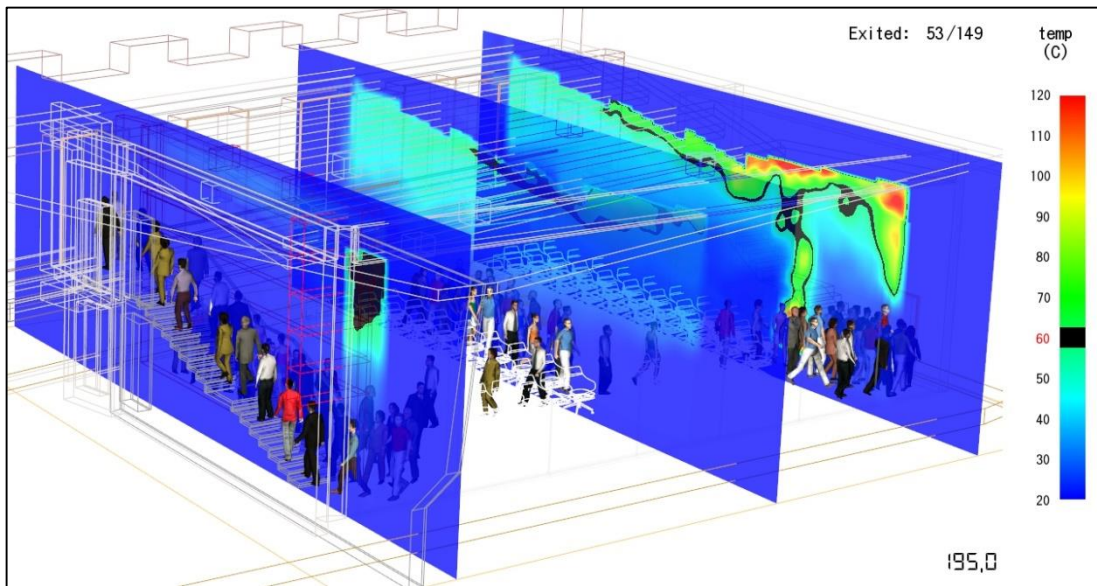


Tabella 18. Visualizzazione delle slice di temperatura.

Valutazione dei valori soglia per gli ultimi occupanti.

In ultima analisi si sono valutati i valori di visibilità, temperatura e FED (“fractional effective dose”) per gli ultimi occupanti che attraversano rispettivamente l'uscita US_01 e US_02.

Il programma permette di esportare gli output della simulazione in formato .CSV nei quali sono contenute informazioni relative a visibilità, temperatura, concentrazione di gas tossici, e ubicazione dell'occupante in un dato istante. È stata costruita una macro Excel apposita che consentisse in modo rapido di estrapolare i grafici dell'andamento di tali parametri.

The screenshot shows the MACRO.FED-VIS-TEMP Excel spreadsheet. The data table has the following columns: **time**, **location**, **distance**, **last goal started**, **CARBON DIOXIDE VOLUME FRACTION**, **CARBON MONOXIDE VOLUME FRACTION**, **OXYGEN VOLUME FRACTION**, **SOOT VISIBILITY**, **TEMPERATURE**, and **FED TOTAL**. The rows represent simulation data points over time, with locations like Room02 and Room03.

Figura 56. Esempio di .CSV esportato dal software.

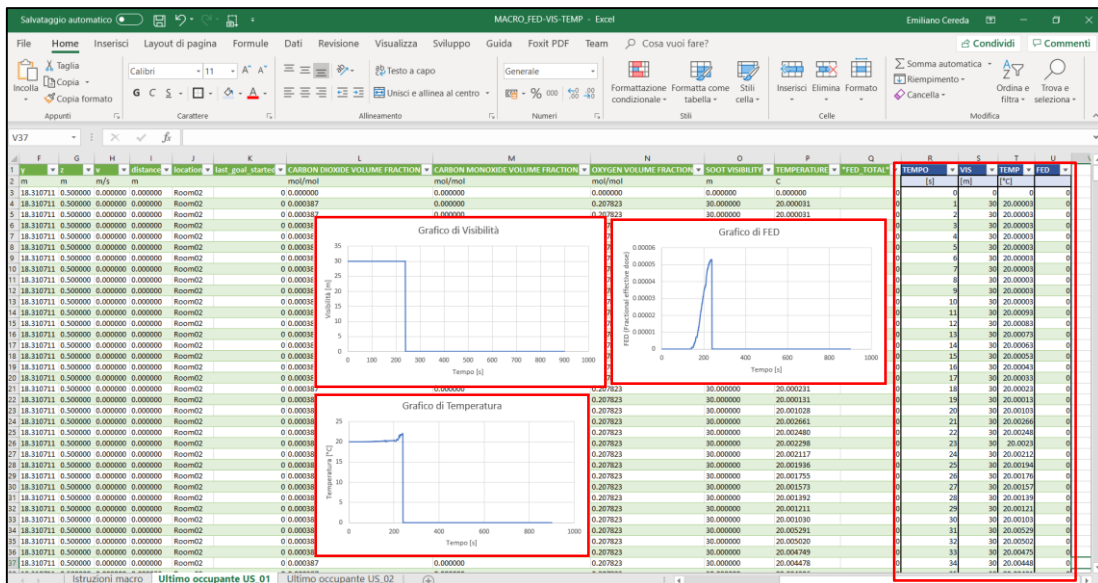


Figura 57. Esecuzione della macro e generazione dei grafici.

Di seguito si riportano i grafici esportati. Da essi si evince come anche per gli utenti più critici non si raggiungano mai i valori soglia imposti da normativa.

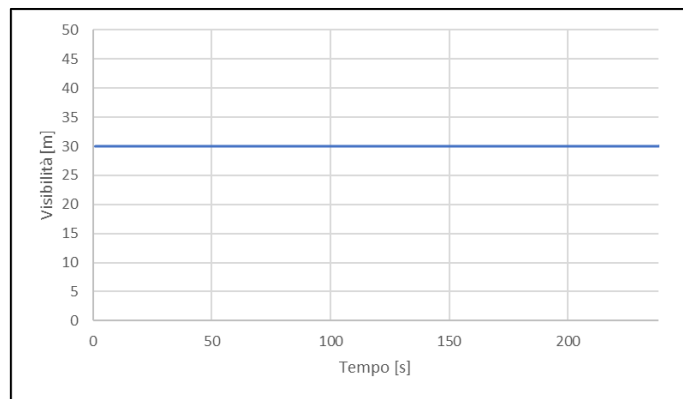


Figura 58. Visibilità per l'ultimo occupante che utilizza US_o1.

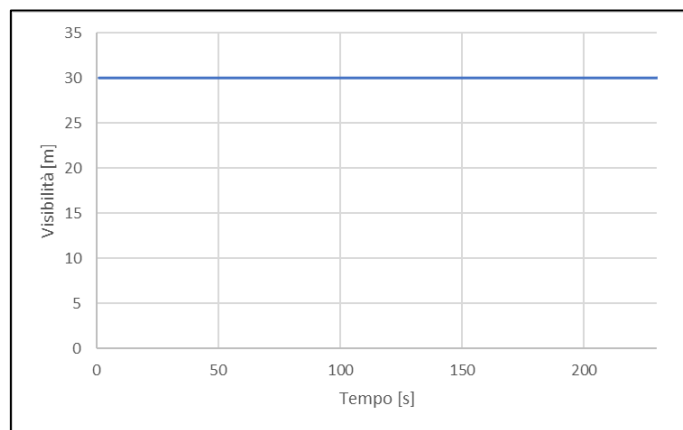


Figura 59. Visibilità per l'ultimo occupante che utilizza US_o2.

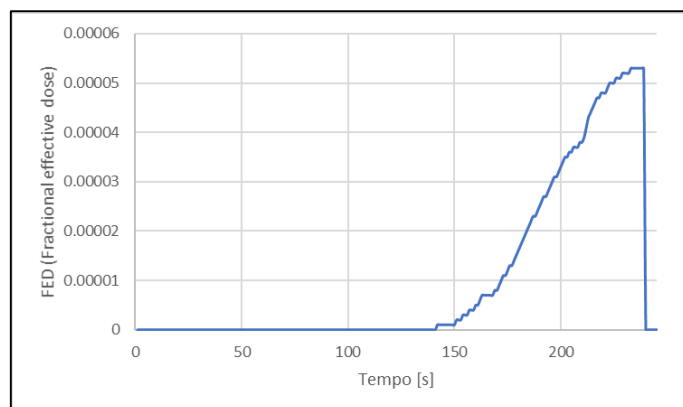


Figura 60. FED per l'ultimo occupante che utilizza US_o1.

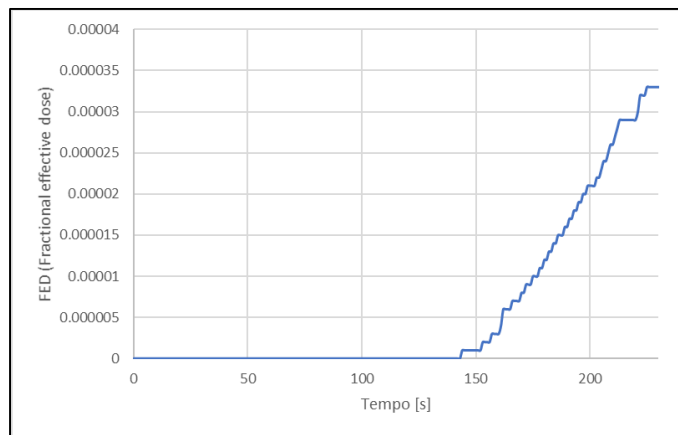


Figura 61. FED per l'ultimo occupante che utilizza US_o2.

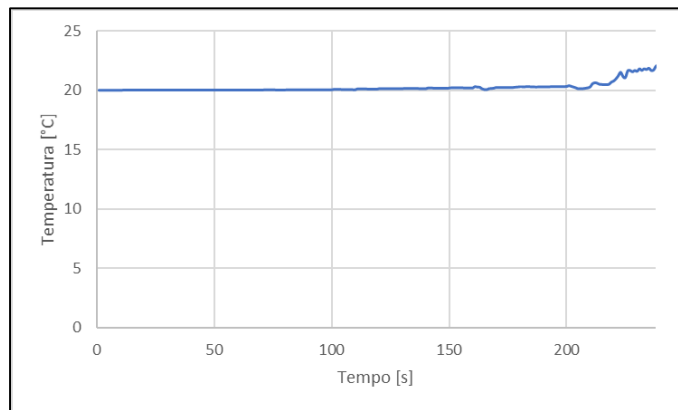


Figura 62. Temperatura per l'ultimo occupante che utilizza US_o1.

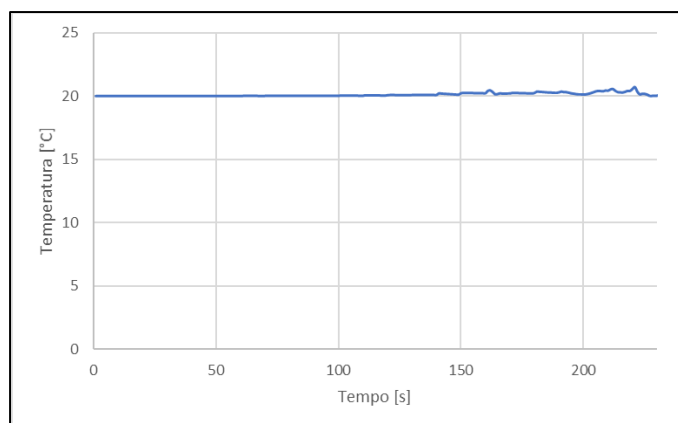


Figura 63. Temperatura per l'ultimo occupante che utilizza US_o2.

Edificio complessivo

Dopo aver valutato l'efficienza dell'esodo per gli occupanti presenti nell'auditorium, controllando che siano rispettati tutti i livelli soglia imposti dal codice, l'attenzione si è spostata sull'intero edificio. In questo caso si è analizzato lo Scenario 3, descritto in questo capitolo, ovvero la circostanza in cui una delle quattro vie di esodo verticali risulti indisponibile.

Si è ipotizzato un incendio al piano terra, in particolare nel settore "Sud-Ovest" adiacente al blocco scale. Con questa modellazione si vuole indagare la possibilità delle persone di mettersi in salvo nonostante l'indisponibilità di una scala. Come si può vedere dalle immagini di seguito riportate, il fumo generato dall'incendio al piano LOO si espande molto velocemente in tutto il settore, risalendo dal blocco scale rendendolo completamente inutilizzabile. Nonostante ciò gli occupanti dei piani fuori terra eccetto il piano terra riescono ad evacuare gli ambienti senza particolari problemi, in quanto non interessati dai fumi. L'esodo per le persone che invece si trovano al piano terreno, in particolar modo quelle vicino alla sorgente di innesco, risulta fin dai primi istanti interessate da un abbassamento drastico della visibilità. È bene osservare però che l'area interessata dall'incendio sarà caratterizzata da tempi di pre-movimento differenti da quelli delle altre zone dell'edificio, essi senza dubbio saranno notevolmente inferiori. Si può quindi ipotizzare che anche per gli occupanti immediatamente vicini al focolare l'esodo possa essere effettuato senza problemi.

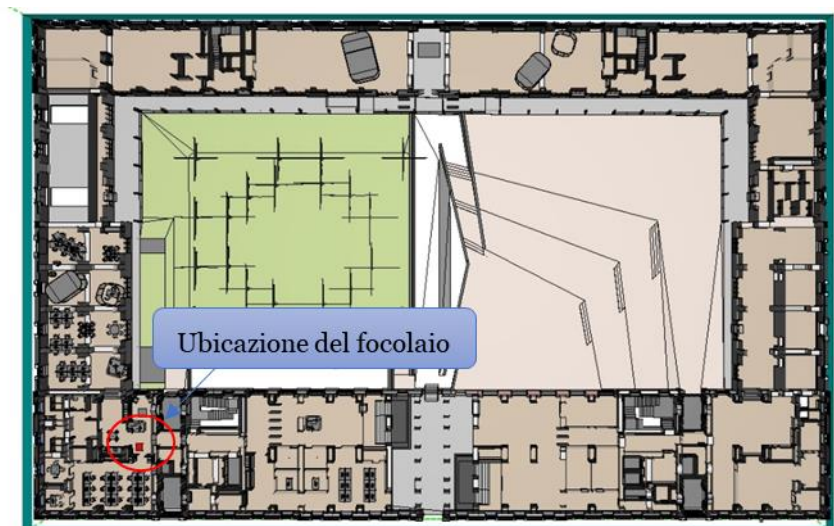


Figura 64. Posizionamento del focolaio.

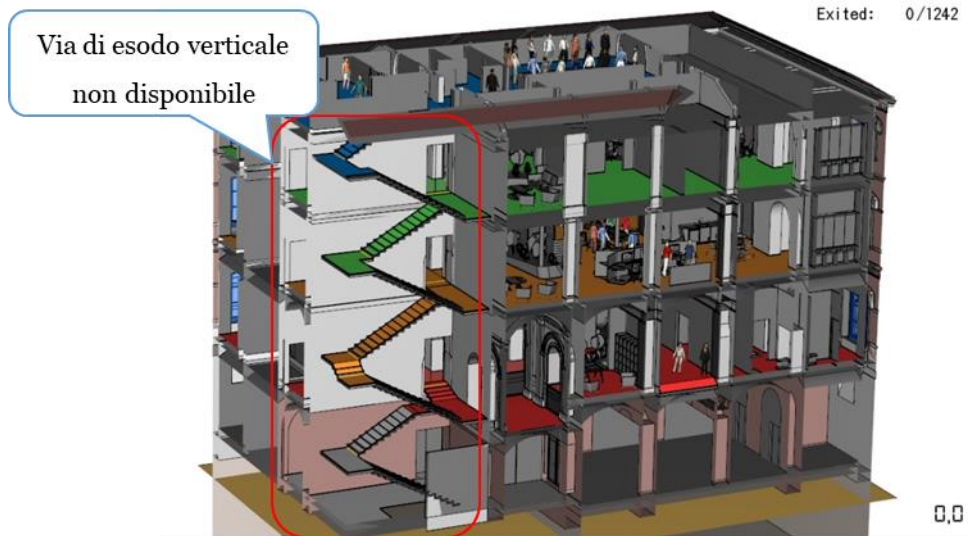


Figura 65. Porzione di edificio interessata dall'incendio.

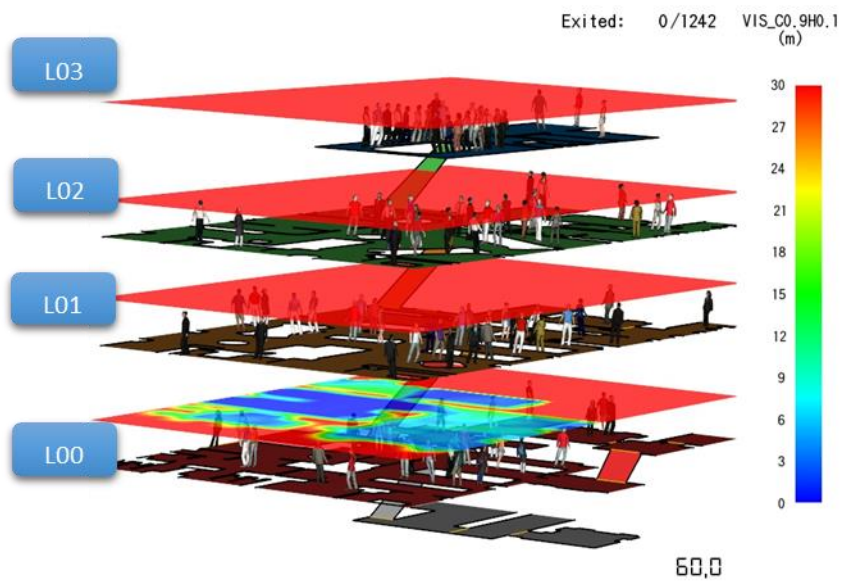


Figura 66. Istante iniziale: la visibilità al piano terreno risulta già compromessa.

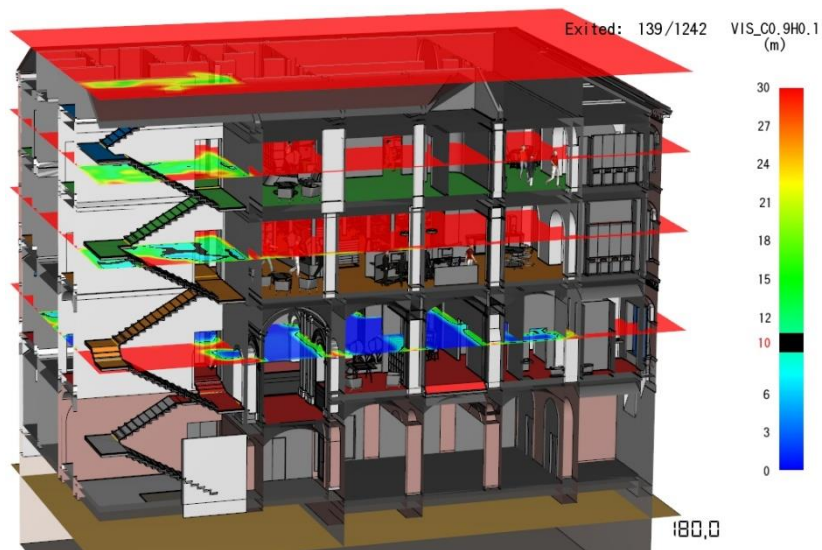


Figura 67. Istante in cui anche gli ultimi occupanti iniziano l'esodo.

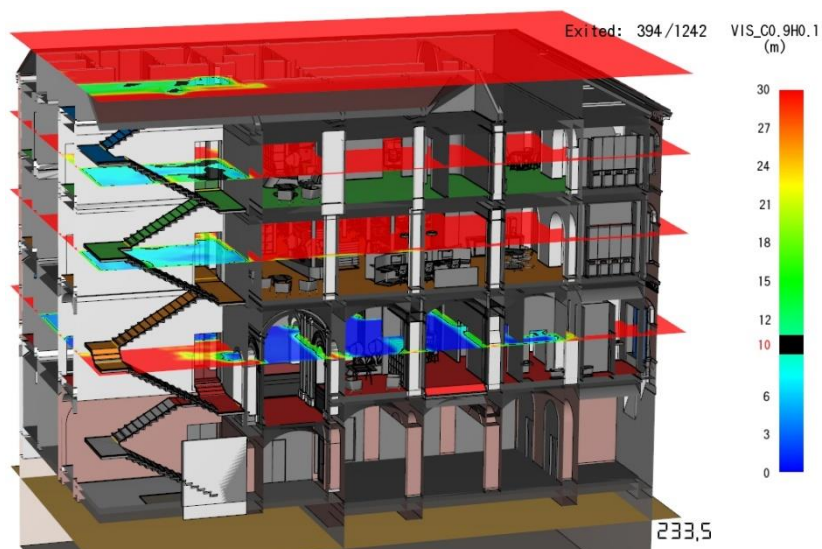


Figura 68. Istante in cui anche gli ultimi occupanti dei piani superiori al terreno hanno abbandonato i locali.

7.4 Modellazione di esodo: MassMotion®

Come già affermato nel capitolo 4, esistono diversi modelli di simulazione di esodo ed innumerevoli software che adottano questi modelli come base per la loro elaborazione. Per questo motivo sta al progettista scegliere tra le diverse tipologie, quella più indicata per il caso oggetto di studio. Ad esempio esistono modelli specifici che integrano oltre alla simulazione di persone, anche quella di veicoli, questi sono di largo utilizzo nel settore riguardante le infrastrutture, basti pensare ad esempio alle stazioni ferroviarie, aree in cui vi è una vasta gamma di pedoni in movimento, tra veicoli di diverso tipo e persone. Altri modelli ancora sono stati inizialmente sviluppati con scopi ancora differenti, che esulano dal settore antincendio, un esempio sono quelli che simulano il movimento delle masse con l'obiettivo di posizionare in modo ottimale i cartelloni pubblicitari nel caso di spazi di grande transito o ancora di predisporre al meglio l'esposizione in una sala museale. Con questa considerazione quindi si vuole dire che la scelta del modello più adatto risulta essere determinante. Al fine di aumentare la qualità dell'indagine, il progettista potrebbe prevedere ad esempio l'impiego di più di un modello, per poi confrontare i risultati ed avere un quadro delle dinamiche di esodo più completo. Occorre quindi che la figura del progettista sia diffidente nei confronti degli output dei software e non accetti mai un risultato senza prima averne accettata la validità.

Per questo motivo in questo paragrafo si propone la modellazione dell'esodo effettuata con un altro software in commercio, dopodiché i risultati verranno confrontati con quelli ottenuti in precedenza.

Modello utilizzato

Per il confronto è stato preparato un modello semplificato in modo da poter confrontare al meglio risultati e non avere elementi che potessero condizionare questi ultimi in modo anomalo. In sostanza sono stati eliminati gli arredi, poiché avrebbero causato troppe differenze tra i due software, in quanto se Pathfinder genera dei vuoti per lo spazio di ingombro di ciascun elemento tridimensionale, MassMotion tiene in considerazione tali oggetti come se fossero un'ostruzione. La posizione degli occupanti di conseguenza è stata eseguita in modo randomizzato per tutto l'edificio.

È stato inoltre eliminato l'ascensore antincendio, poiché MassMotion non ha ancora implementato completamente questa funzione. Infatti risulta possibile creare questo tipo di elementi in modo macchinoso mediante la creazione di percorsi verticali. Per quanto riguarda il comportamento, si è utilizzato quello previsto nello scenario 1, nel quale gli occupanti esodano dall'edificio in modo automatico senza particolari indicazioni sui percorsi da seguire impartite dall'operatore.

Interoperabilità

Il software consente due strade alternative per la creazione del modello geometrico di partenza.

In presenza di un modello precedentemente generato tramite altri software dedicati è possibile importare le geometrie di riferimento in diversi formati. MassMotion può importare oggetti 3D, disegni 2D, immagini o oggetti creati precedentemente con il software stesso.

Gli oggetti tridimensionali possono essere importati come generica geometria o come geometria IFC, mentre gli oggetti 2D vengono riconosciuti come livelli di disegno.

Durante la fase di importazione vi sono varie opzioni, a seconda del tipo di file utilizzato, per controllare come verrà gestito il file. Dopodiché tutti gli oggetti importati vengono raggruppati in un'unica raccolta denominata “*Transform*” che permette di scalare, ruotare o tradurre la geometria importata in elementi riconosciuti dal software.

In alternativa è possibile creare oggetti tridimensionali direttamente all'interno del programma stesso tramite i comandi presenti nella barra laterale di destra “*Modelling Panel*”. Nel caso studio il modello è stato precedentemente realizzato tramite il software Revit di Autodesk, il quale comprende funzionalità per la progettazione architettonica, l'ingegneria MEP e la progettazione strutturale. Revit supporta un processo di progettazione collaborativo multidisciplinare e permette di esportare il modello con i formati più comuni, tra cui IFC, DWG e FBX.

In particolare il modello Revit è stato esportato nel formato FBX, in quanto costituisce una struttura aperta utile al trasferimento di dati 3D. Nell'ultima versione del software (9.5) è stata implementata la possibilità di importazione del formato IFC (Industry Foundation Classes), il quale consente un elevato livello di interoperabilità tra i due software poiché permette a MassMotion di leggere in modo automatico alcune informazioni e convertire direttamente gli elementi geometrici in oggetti 3D, quali pavimenti, scale, rampe, porte, e barriere. Tuttavia, dopo alcune prove si sono riscontrati alcuni problemi nella lettura di tale formato, perciò si è importato il file FBX.



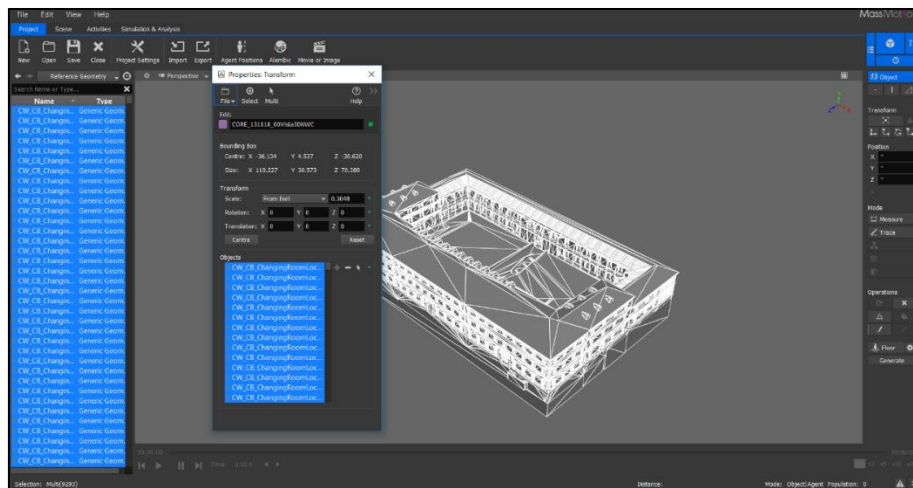


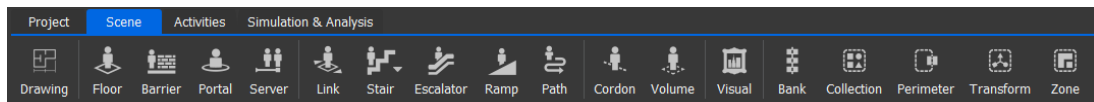
Figura 69. Importazione del file FBX.

Estrazione e modellazione degli elementi

Gli oggetti che costituiscono il software possono essere classificati nelle seguenti tre categorie:

- Scene: oggetti fisici come i pavimenti o barriere che hanno una presenza fisica nella scena;
- Activities: creare agenti, modificare agenti o eseguire operazioni sulla scena;
- Analysis: col fine di analizzare i risultati della simulazione.

Gli oggetti della scena presenti nel software si possono trovare all'interno della scheda "Scene" della "Ribbon bar".



La scheda è a sua volta suddivisa in sottocategorie, quali: *Basic Objects*, *Connecting Objects*, *Counting Objects*, *Decorative Objects*.

Le geometrie di base sono le seguenti:

- Floor: caratterizzati da superfici piane sulle quali gli occupanti possono muoversi;
- Barrier: caratterizzati da tutti quegli elementi che ostacolano il movimento degli occupanti (ad esempio pareti e arredi fissi);
- Portal: rappresentano elementi all'interno dei quali gli occupanti vengono generati;
- Stair: elemento di connessione verticale (scale);
- Escalator: elemento di connessione verticale (scala mobile);
- Ramp: elemento di connessione verticale (rampa);
- Server: utilizzato per modellare code e comportamenti di agenti complessi;

- Visual: caratterizzati da tutti quegli elementi che non ricoprono una funzione in riferimento alla simulazione, ma hanno il solo scopo di migliorare la visualizzazione;
- Link: oggetto di connessione orizzontale che collega i piani appartenenti ad uno stesso livello e tra loro adiacenti (rappresenta una porta o tornello);
- Path: oggetto di connessione costruito da un segmento di curva. Esso può svilupparsi anche in senso verticale e non solo in senso orizzontale (viene in aiuto nel caso in cui si voglia simulare il comportamento di un ascensore);

All'interno del software non sono presenti oggetti che rappresentino gli ascensori, tuttavia risulta però possibile generare un percorso verticale in grado di simulare tale movimento tramite la combinazione degli elementi *"Path"*, *"Floor"* e *"Link"*.

Tramite il comando *"Collections"* inoltre è possibile raggruppare più elementi in una collezione, in questo modo risulta più efficace modellare i vari scenari e si può abilitare, "accendere" o "spegnere" la visualizzazione dei soli elementi di cui si necessita per lo scenario analizzato.

Gli oggetti importati risultano essere del tipo *"Generic Geometry"*, ovvero non hanno associata alcuna funzione all'interno del software. Si dovrà procedere ora alla conversione di tali elementi in oggetti di MassMotion.

Questo procedimento viene effettuato tramite un "click" col tasto destro del mouse sulla voce dell'elemento da convertire all'interno della *"List View"* presente nella barra laterale di sinistra e selezionando il comando *"Convert To"* o in alternativa *"Generate"* e successivamente andando a selezionare la tipologia di oggetto che si vuole ottenere. E' possibile ottenere lo stesso risultato cliccando col tasto destro del mouse direttamente sull'elemento 3D. Con questo procedimento si sono creati tutti gli elementi necessari alla simulazione; in particolare sono stati modellati gli elementi: floor, barrier, portal, link, stair e ramp. Di seguito vengono riportati alcune immagini per ciascun elemento modellato.

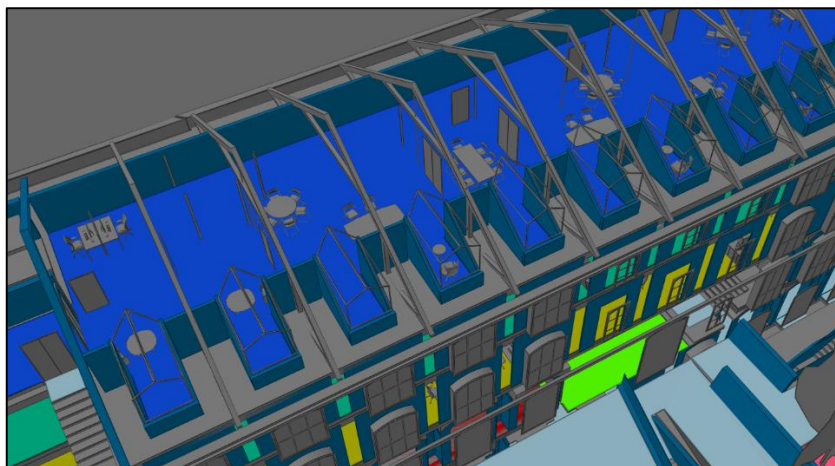


Figura 70. Generazione di pavimenti.

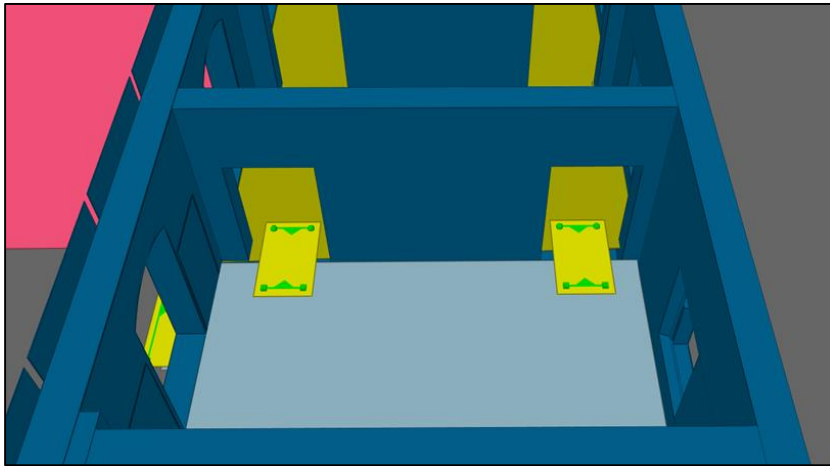


Figura 71. Esempio di creazione di "Link".

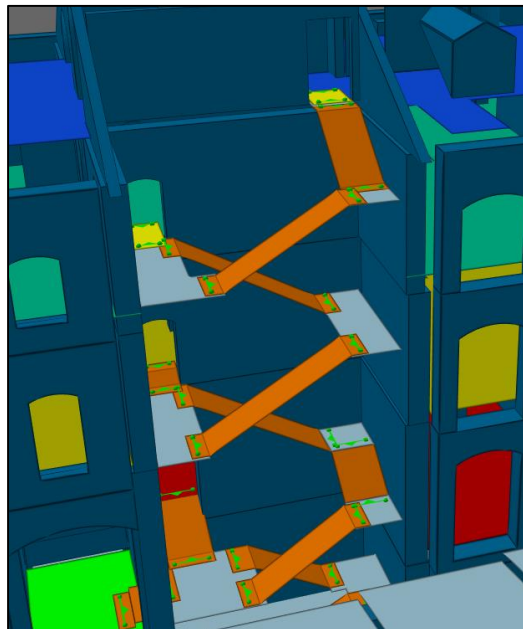


Figura 72. Creazione scale.

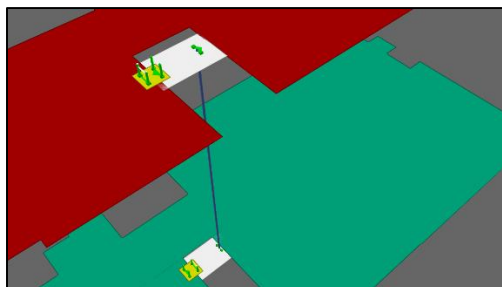


Figura 73. Prova di creazione di un ascensore antincendio.

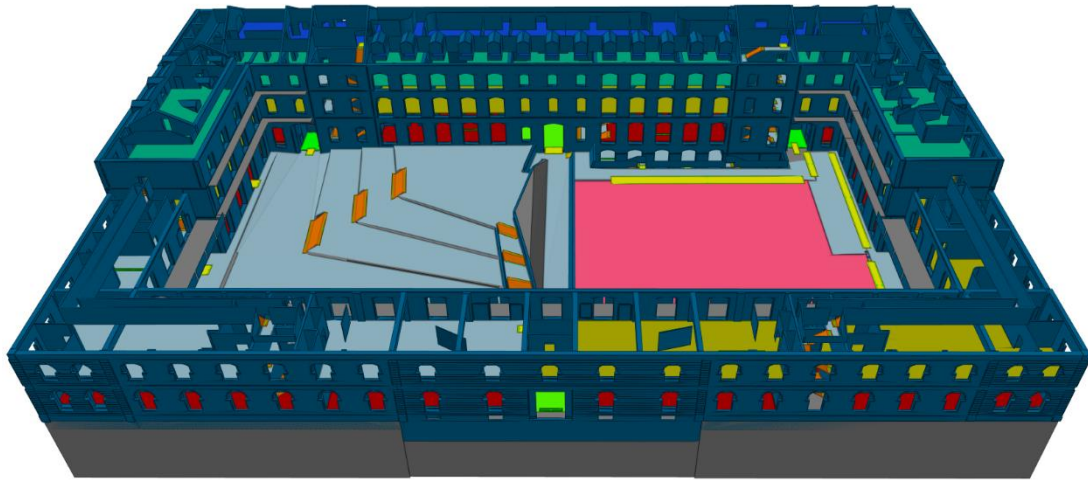


Figura 74. Risultato finale.

Posizionamento occupanti

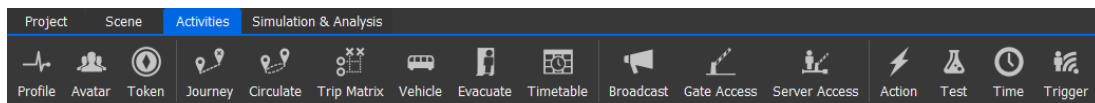
Portali

Il posizionamento degli occupanti è gestito tramite i portali. Questi elementi possono rappresentare la sorgente o la destinazione degli individui all'interno della simulazione.

È stato quindi posizionato un portale per su ogni livello dell'edificio. All'interno delle proprietà di ciascun portale è possibile selezionare le modalità con le quali gli occupanti vengono generati sulla superficie. Nel caso in esame si è selezionata la voce “On floor”, che prevede di generare gli occupanti in modo randomizzato su tutta la superficie considerata.

Caratterizzazione degli occupanti

Gli oggetti presenti nella scheda “Activities” comprendono la creazione degli occupanti, la definizione delle loro caratteristiche e del loro comportamento in fase di esodo.



In particolare, per la caratterizzazione comportamentale e fisica degli occupanti si hanno a disposizione i seguenti elementi:

- Profile: definisce il profilo dell'occupante;
- Avatar: definisce la caratterizzazione fisica dell'occupante;
- Token: elementi che se associati ad un occupante, fanno compiere determinate azioni;
- Evacuate: evento che indica agli agenti di evacuare dall'ambiente analizzato in modi specifici;
- Broadcast: evento che applica un'azione al fine di modificare il comportamento degli occupanti;

- Journey: crea agenti su un portale di origine e li conduce ad un portale di uscita. Quando l'occupante ha raggiunto il portale di destinazione automaticamente viene eliminato dalla simulazione.

Profilo

Tramite la finestra “*Profile*” si possono settare le caratteristiche fisiche dell'occupante. Questa sezione contiene informazioni riguardanti la tipologia di occupante; è possibile selezionare uno dei profili preimpostati, inerenti ai maggiori studi sull'argomento (Fruin, PD 7974, ecc..) o in alternativa si possono impostare i valori di in modo manuale. Inoltre è possibile stabilire la velocità di esodo orizzontale e verticale e le rispettive distribuzioni. Altre funzioni sono quelle di attribuire un determinato “*Avatar*” al profilo, ovvero una caratterizzazione grafica dell'occupante. Nel caso in esame si è prevista un'unica categoria di occupante normodotato, secondo i valori riportati nella norma PD7974.

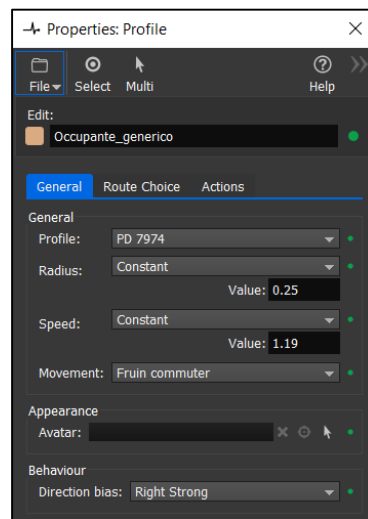


Figura 75. Settaggio di un profilo.

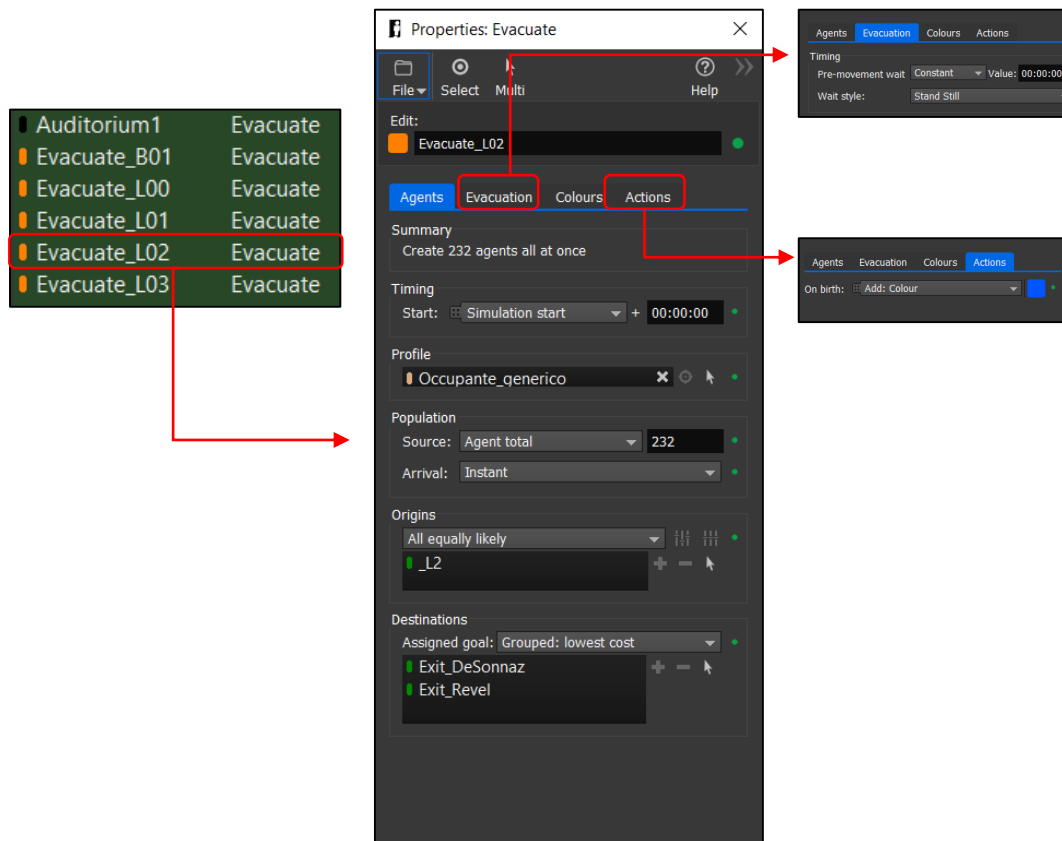
Evacuate

Il comando “*Evacuate*” permette di indicare il numero di occupanti e di gestirne l'esodo. In questa scheda è possibile impostare quali portali sono interessati dall'evento, in particolare occorre selezionare quali sono i portali di ingresso ed indicare i portali di uscita. Solamente gli agenti creati da questo evento liberano le zone indicate o si dirigono verso i portali di destinazione prescelti.

Nella scheda “*Agents*” si dovranno scegliere la tipologia di profilo, il tempo di inizio dell'evento, il numero di occupanti ed i loro portali di origine (“*Origins*”). Inoltre il software permette di gestire la distribuzione degli occupanti in modo automatico suddividendo il numero stabilito per il numero di portali interessati, oppure, in alternativa si può procedere andando ad inserire manualmente la percentuale del numero di occupanti in modo differito per ciascun portale. Quest'ultima funzione risulta molto utile nel caso in cui si voglia assumere un numero di occupanti prestabilito per un dato locale.

Nella scheda “*Evacuation*” invece si è impostato il tempo di pre-movimento e indicati i portali di uscita.

Al fine di non suddividere in percentuali il numero di occupanti, si sono impostati 6 evacuatee differenti, ciascuno riferito ad un livello di piano specifico. In questo modo si è ottenuta una distribuzione del numero di per ogni piano analoga al modello simulato con Pathfinder.



Nel caso in esame si impostato che gli occupanti abbiano come obiettivo il raggiungimento di una delle due uscite previste secondo il criterio del percorso più veloce. In alternativa si sarebbe potuto modellare il comportamento di ciascun gruppo tramite delle relazioni del tipo “*If/Then/Else*” con le quali è possibile impostare il percorso degli occupanti in modo più dettagliato, ad esempio facendogli raggiungere delle tappe intermedie rappresentate da appositi portali posizionati in modo opportuno. Tuttavia il fine di questa simulazione è quello di ottenere dei risultati confrontabili tra i due software utilizzati, perciò si è deciso di non alterare i percorsi di evacuazione, in accordo con il “*Behavior*” “*Any exit*” impostato su Pathfinder.

Dopo aver impostato i parametri riguardanti gli occupanti, il modello è completo e pronto per essere sottoposto alla fase di validazione.

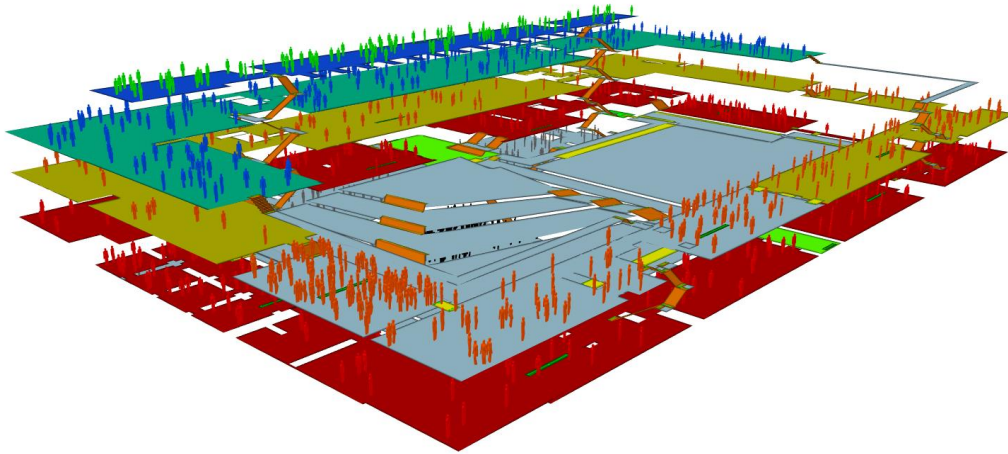
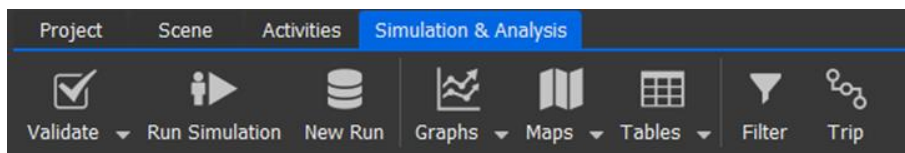


Figura 76. Modello finale pronto per la simulazione.

7.4.1 Simulazione e risultati

Lo step successivo dopo aver terminato il modello geometrico e definite le caratterizzazioni fisiche degli occupanti e il loro comportamento è stato quello di validare, lanciare la simulazione ed esportare i dati di output necessari. Queste funzioni si trovano nella scheda “Simulation & Analysis”.



Una volta impostati tutti i precedenti parametri e modellato opportunamente il caso studio, si procede con l'avvio della simulazione. Cliccando sul comando “Run Simulation” viene avviata la simulazione; essa è preceduta da una fase di validazione del modello, la quale, nel caso in cui il processo riscontri valori non validi, non lancerà la simulazione, ma verrà visualizzato un report contenente tutte le incongruenze di progettazione presenti, con annessa una breve descrizione del problema. Avviando la simulazione, come detto, avverrà in automatico anche la validazione, ma vi è anche la possibilità di poter validare il modello (senza avviare alcuna simulazione) tramite il comando “Validate” col solo fine di indagare gli eventuali errori e le loro correzioni, per poi lanciare la simulazione in una fase successiva, nel momento in cui non vi sia più alcuna problematica. Il progettista, dovrà interpretare gli errori e manualmente correggerli procedendo attraverso un'operazione iterativa, andando di volta in volta a validare il progetto e verificare che gli errori siano stati risolti. In alternativa potrebbe risultare utile validare i singoli oggetti tramite il menu di scelta rapida dell'oggetto cliccando col tasto destro sull'elemento selezionato. Nel caso oggetto di studio si sono presentati diversi errori, tutti

relativi all'impossibilità da parte dell'elaboratore di individuare per alcuni occupanti il percorso verso le uscite. In parte l'origine è risultata essere la presenza di alcuni cavedi all'interno dei quali il software ha ugualmente posizionato un pavimento, ed in alcuni casi anche ubicato alcuni occupanti. Questi ultimi non avendo alcuna possibilità di uscita costituivano l'errore che il software restituisce. Per correggere questo problema è stato necessario intervenire in ciascun livello dell'edificio andando ad eliminare queste specifiche superfici. La seconda origine degli errori riscontrati è stata quella di avere alcune pareti che costituivano un'ostruzione in prossimità di alcune porte, anche in questi casi si è intervenuto manualmente su ogni singolo errore andando a modellare in modo opportuno questi spazi. Di sotto si riportano due esempi.

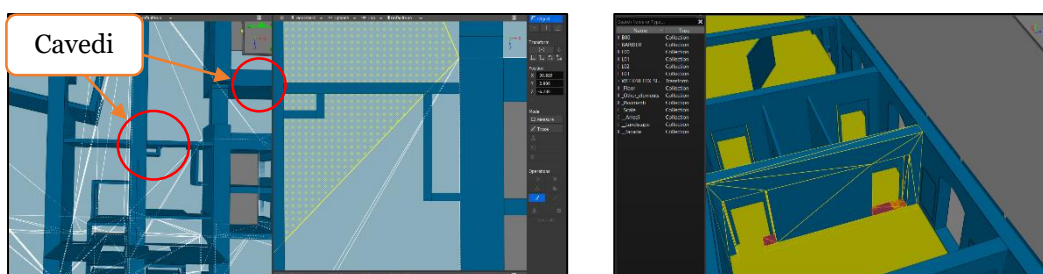


Figura 77. Esempi di errori durante la modellazione.

Una volta terminata la simulazione, il software fornisce diversi tipi di output. Nella sezione "Analysis" possono essere creati ed esportati elaborati, quali: grafici, mappe, video, immagini e tabelle. Questi oggetti sono generati sulla base dei risultati della simulazione e hanno lo scopo di esplicitarne gli esiti, come il tempo di esodo fino a luogo sicuro, evidenziare le zone più critiche caratterizzate da un'elevata densità di occupanti.

7.5 Confronto

Come accennato nel capitolo precedente, l'esigenza di effettuare un'ulteriore modellazione è nata in quanto ciascun software utilizza uno specifico modello, e di conseguenza tratta le dinamiche dell'esodo in modo differente. Sebbene i software in commercio svolgano le stesse funzioni e nascano con lo stesso obiettivo, ciascuno di essi può essere più indicato per alcune indagini anziché altre. Il confronto effettuato in questo paragrafo si propone di evidenziare le differenze sostanziali in termini qualitativi e quantitativi ed analizzare gli output delle simulazioni.

Il modello

In breve si elencano le caratteristiche principali riguardanti lo scenario di riferimento utilizzato come base per la modellazione.

- Unico profilo di occupante avente velocità orizzontale di camminamento pari a 1,19 m/s.
- Due uscite poste rispettivamente una al lato Nord ed una al lato Sud.
- Comportamento in funzione del percorso più breve.
- Assenza di arredi, gli unici ostacoli sono rappresentati unicamente da muri e pilastri.
- Tempo di pre-movimento pari a zero.

I tempi

La prima comparazione che si può fare è quella rispetto i tempi necessari per l'esodo. In questo caso entrambi i software restituiscono in file .csv contenente il numero di persone ancora presenti nella struttura per ciascun istante.

Dal confronto di tali valori risulta che l'esodo complessivo dall'intera struttura assume valori simili per entrambi i modelli, tuttavia si registra una differenza di 19 secondi.

SOFTWARE	Tempi di esodo complessivi [s]
	t_{tra}
Pathfinder	483,8
MassMotion	503

Figura 78. Tempi di esodo

Sebbene i due software restituiscano risultati analoghi in termini di tempistiche complessive, occorre però analizzare anche l'andamento delle curve "occupanti/tempo" per avere un quadro più definito. Analizzando le curve estrapolate dalle due modellazioni si possono infatti notare alcune differenze.

Sovrapponendo i risultati è evidente come solo quando sono rimaste circa 300 persone l'andamento delle due curve è del tutto analogo, mentre negli istanti iniziali la simulazione effettuata con Pathfinder è caratterizzata da una curva più ripida, che quindi permette l'evacuazione di un numero maggiore di occupanti rispetto a MassMotion.

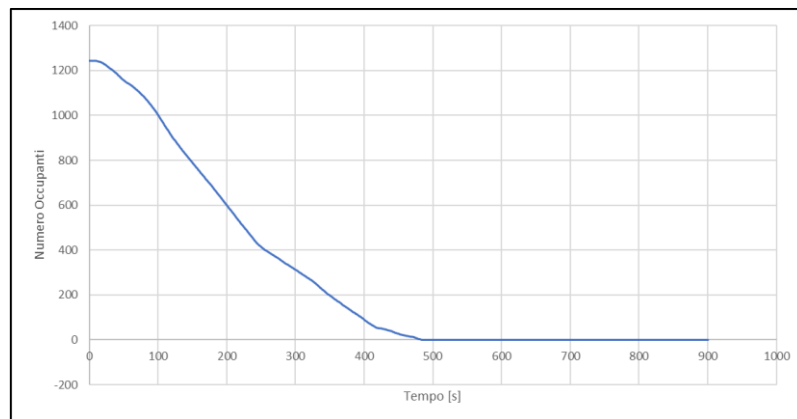


Figura 79. Pathfinder

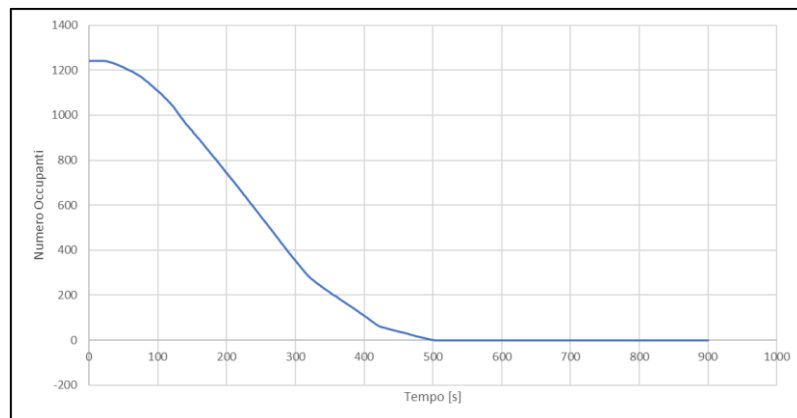


Figura 80. MassMotion

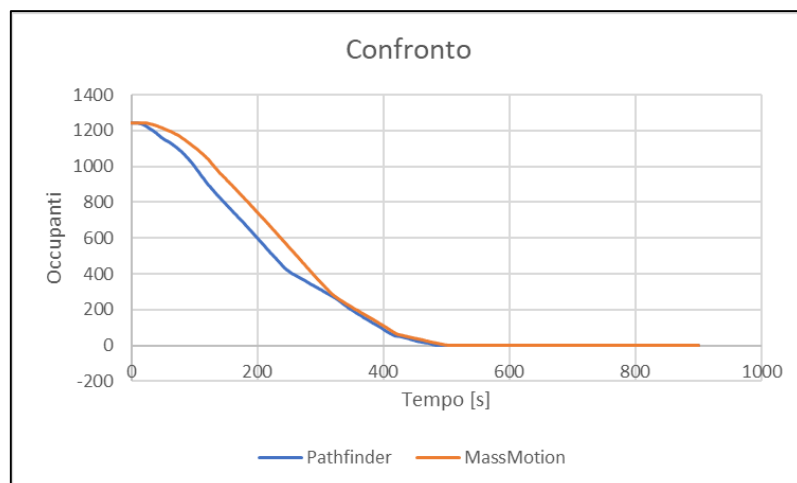
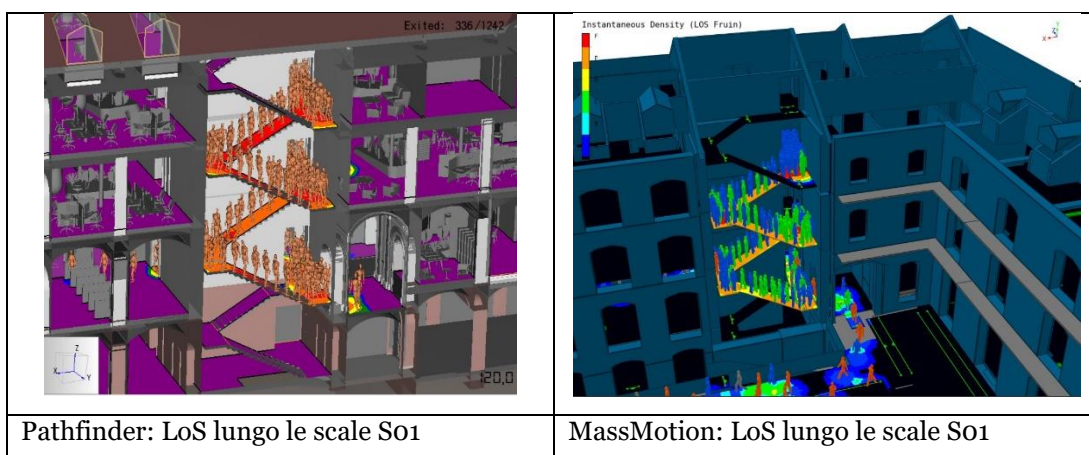
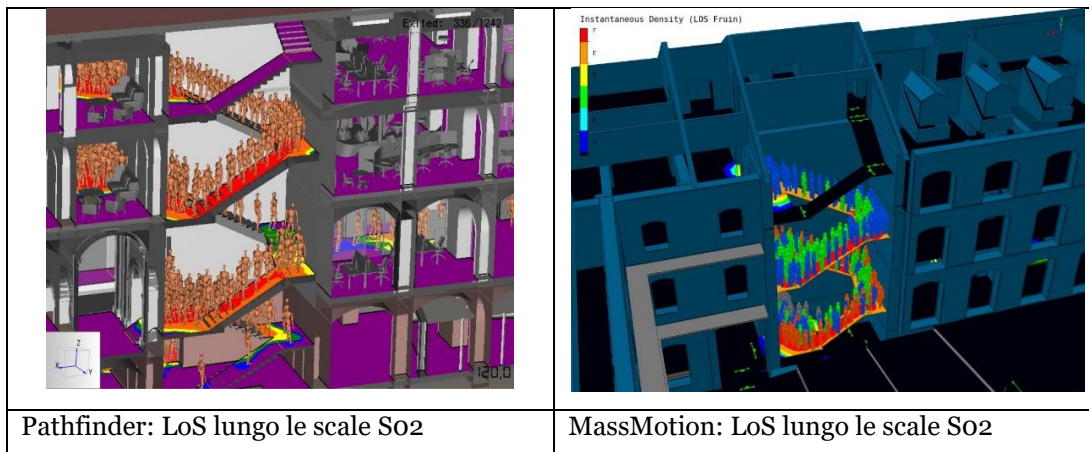


Figura 81. Confronto occupanti/tempo

Verifica dei percorsi critici



Nelle immagini sopra si sono confrontati i valori dei livelli di servizio (Fruin) per i due blocchi scale più affollati. In entrambi i confronti i valori di densità risultano analoghi.

CAPITOLO 8

IL TEMA DELL'INCLUSIONE NELLA MODELLAZIONE DELL'ESODO

Il mondo della progettazione non può non prescindere dai temi legati alle disabilità ed all'inclusione. Se fino a pochi anni fa i concetti di sicurezza e disabilità risultavano appartenere a due mondi distanti tra loro, ad oggi si è assistito ad un'inversione di marcia, tanto è che il D.M. 3/08/2015, ha introdotto tali principi di inclusione, nell'ambito della prevenzione incendi. Da alcuni studi è emerso come molte teorie sulle dinamiche dell'esodo, durante un incendio, siano in realtà poco affidabili, in quanto la maggior parte di esse non fanno riferimento a condizioni ideali. Infatti non viene quasi mai tenuta in considerazione la caratteristica di eterogeneità degli occupanti, come ad esempio l'età, ma soprattutto il livello di autonomia nel movimento. Queste carenze causano perciò delle incongruenze tra il mondo dell'ambiente simulato e quello reale e quindi ne falsano i risultati. Lo studio analizza questi aspetti cercando di individuare i corretti valori per i fattori che gli attuali software, di simulazione dell'esodo, riescono a modellare. Verranno analizzate le procedure di intervento delle squadre di soccorso, in funzione del tipo di disabilità da assistere.

In un ambiente, in relazione alle funzioni dell'edificio, possono coesistere più profili di utenti, i quali possono interagire tra loro, basti pensare ad una classe di alunni in edilizia scolastica, o al paziente allettato ed i famigliari in una camera di ospedale.

8.1 Profili e procedure di evacuazione

Il primo step è stato quello di analizzare le procedure di evacuazione da parte delle squadre di soccorso per alcune tipologie di occupanti descritti al capitolo 6. Lo step successivo invece consiste nel riprodurre all'interno del software di simulazione tali profili sotto gli aspetti fisici, dimensionali e comportamentali. I profili presi in esame in questa fase sono i seguenti:

- utente in sedia a rotelle elettrica;
- utente in sedia a rotelle manuale assistito;
- utente con bastone;
- utente con girello;
- utente con stampelle;
- utente assistito da uno o due assistenti;
- utente in barella;
- utente allettato;
- utente in sedia di evacuazione;
- bambino.

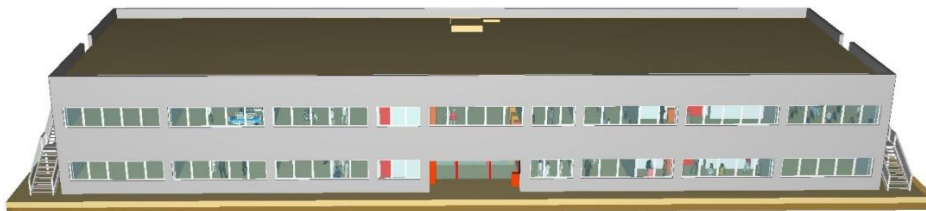
Ciascun occupante, come descritto al capitolo 6, necessita di attenzioni differenti durante la fase di evacuazione. Alcuni di essi infatti, se la struttura è stata ben progettata per rispondere a tali esigenze, saranno in grado di raggiungere un luogo sicuro o un luogo sicuro temporaneo in completa autonomia, altri invece potranno esodare dall'edificio solamente grazie al supporto di soccorritori.

Della lista di profili sopra riportata si possono riconoscere due macrofamiglie, la prima costituita da tutte quelle persone autonome nel movimento e la seconda che racchiude quei profili che non sono in grado di svolgere l'esodo in modo indipendente.

		TIPOLOGIE DI OCCUPANTI	Assistenti
GRADO DI AUTONOMIA	Autonomi	Occupante generico	-
		Lavoratore/impiegato	-
		Staff medico	-
		Squadra VVF	-
		Paziente autonomo	-
		Sedia a rotelle manuale	-
		Sedia a rotelle elettrica	-
		Bastone	-
		Stampelle	-
		Girello	-
		Bambini	-
	Non autonomi	Paziente assistito	1 oppure 2
		Sedia di evacuazione	1 in discesa 2 in salita
		Barella	4
		Letto di ospedale	2

8.1.1 L'applicazione del metodo

L'edificio preso come base per le simulazioni è costituito da due piani fuori terra. La struttura è munita di un ingresso principale e delle uscite di sicurezza laterali.



La simulazione è stata suddivisa in 3 macro settori, ognuno di essi contenente tipologie differenti di occupante. Il settore A rappresenta gli spazi adibiti a stanze per gli allettati di un ospedale, il settore B rappresenta le classi di alunni all'interno di una scuola, infine il settore C rappresenta l'area ambulatoriale di un ospedale. In questo modo è stato possibile analizzare il comportamento di più profili all'interno dello stesso modello. Non sono stati impostati i tempi di pre-movimento, in quanto lo scopo non è quello di estrapolare dei tempi di esodo per la struttura, bensì di modellare il comportamento dei vari profili precedentemente elencati.

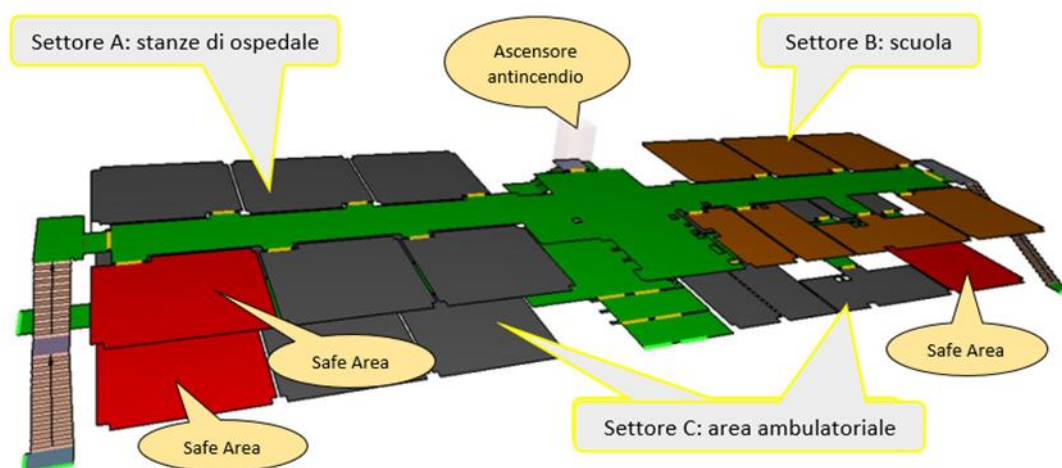


Figura 82. Suddivisione dell'edificio in settori.

8.1.2 La modellazione

Di seguito si riportano delle illustrazioni di come sono stati posizionati i vari profili di occupante precedentemente descritti.

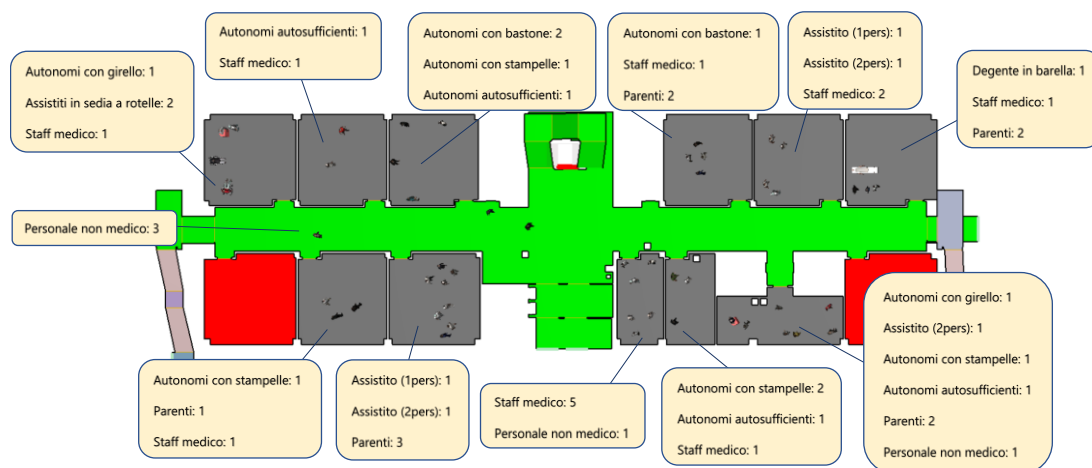


Figura 83. Piano terra - Posizionamento occupanti.

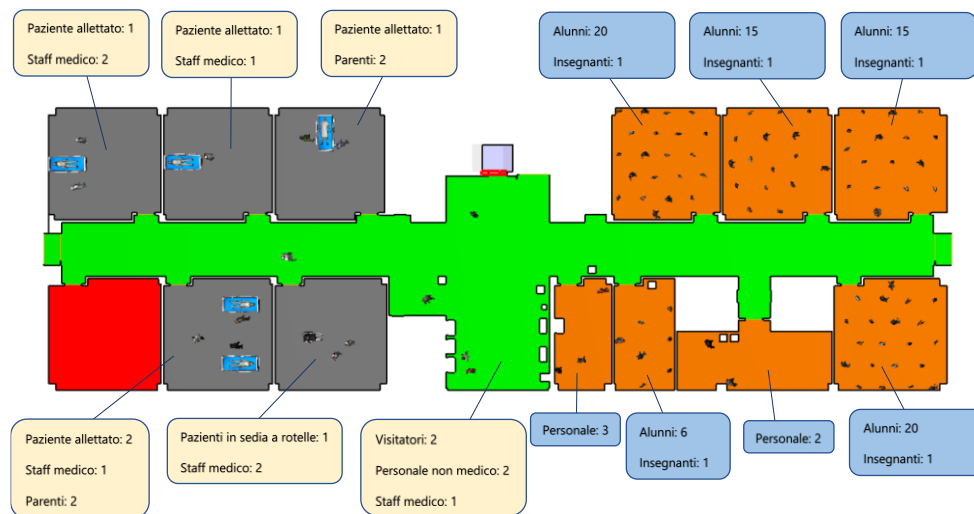


Figura 84. Piano primo - Posizionamento occupanti.

Una volta definiti i profili si è proseguito andando a creare all'interno del software Pathfinder ciascuno di essi. Come detto gli attuali software in commercio non forniscono tutti gli strumenti per tenere conto delle possibili eterogeneità della popolazione indagata. Nel caso in esame ad esempio Pathfinder tratta la disabilità solamente dal punto di vista dell'occupante in sedia a rotelle ed il paziente allettato. Tuttavia il programma fornisce un'interfaccia di modellazione dei profili che permette all'operatore di generare tutti i casi sopra citati, seppur con alcuni limiti che verranno esposti in seguito. L'ingombro di ciascuna tipologia di utente è stata adeguatamente dimensionata utilizzando le dimensioni medie presenti in letteratura.

Attualmente il software permette l'abilitazione della richiesta di assistenza solamente a quei profili la cui geometria contiene una sedia a rotelle oppure un letto di ospedale, in quanto considera come potenziali utenti non autonomi solo queste categorie. Dunque in una prima analisi potrebbe risultare impossibile la creazione di profili di persone con ridotte capacità motorie quali in stampelle, bastone, girello, o non vedenti. Tuttavia questa mancanza è stata aggirata con il seguente stratagemma: si è creato un nuovo profilo basato su quello munito di veicolo di default, dopodiché si è modellato un ottagono che andasse a discretizzare e rappresentare l'ingombro dell'utente cilindrico standard, il passo successivo è stato quello di aggiungere uno o più assistenti al profilo così creato.

Questa soluzione è risultata essere quella che meglio si adatta alla rappresentazione di ogni tipologia di disabilità motoria.

Tramite questo metodo si sono costruiti i profili per utenti muniti di girello, in barella e per quei degenti che necessitano di uno o più assistenti.

Si sono definiti i profili per lo staff medico, il quale ha il compito di accompagnare i degenti nelle aree sicure ("safe area").

Si è inoltre tenuto conto dei legami e le interazioni che possono verificarsi durante l'esodo. Un esempio sono i pazienti in visita medica accompagnati da famigliari, infatti questi ultimi in caso di emergenza molto probabilmente tenderanno a non lasciare il familiare solo, perciò questi profili tendenzialmente seguiranno lo stesso comportamento.

Ciò è stato possibile mediante l'utilizzo dei "Movement Groups" i quali permettono di condividere lo stesso comportamento tra più utenti.

In questa fase si è presentato il secondo problema dovuto ad una mancanza di questa implementazione all'interno del software, infatti all'interno di uno stesso gruppo tutti gli utenti devono obbligatoriamente possedere lo stesso *Behaviour*. Questa necessità si è presentata come un problema in fase di modellazione, poiché un utente in carrozzina avrà un percorso assistito fino al luogo sicuro, caratteristica invece assente all'interno di un profilo non munito di "veicolo". Anche in questo caso si è risolto il problema ricorrendo alla modellazione del profilo. In particolare si è creato un profilo di forma ottagonale come nel caso precedente ma andando ad eliminare la presenza di assistenti.

Questa soluzione ha generato dei "warning" all'interno del software, che vanno a segnalare l'anomalia della assenza di assistenti all'interno di questi profili, comunque la simulazione non ha presentato alcun problema ed in questo modo è stato possibile simulare anche i legami tra più utenti.

Di seguito si riportano alcuni esempi per i profili analizzati, nello specifico quelli inerenti al paziente in barella assistito da 4 persone dello staff medico, l'occupante in girello, ed il paziente assistito da due accompagnatori dello staff.

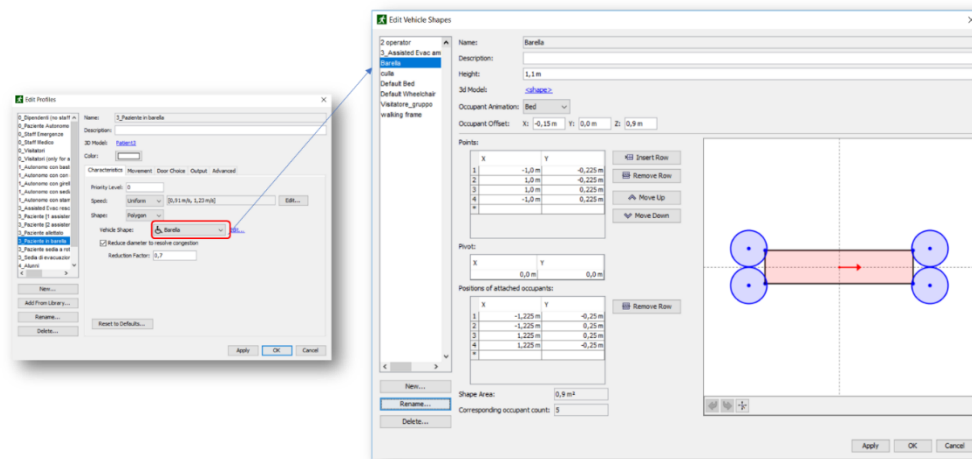


Figura 85. Profilo del paziente in barella.

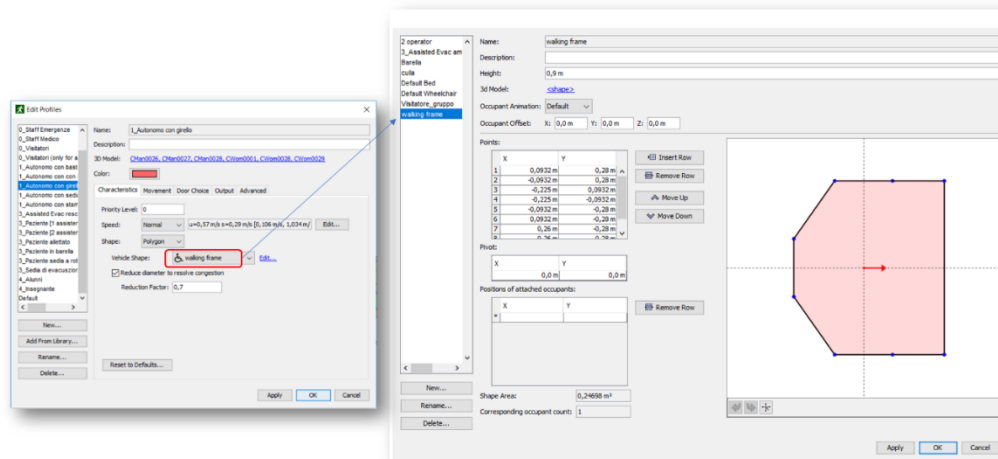


Figura 86. Profilo della persona con girello.

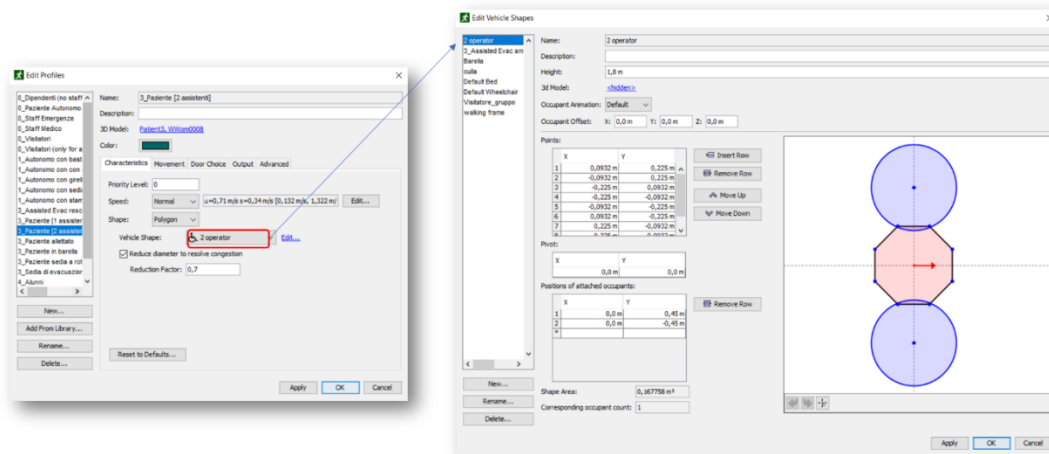
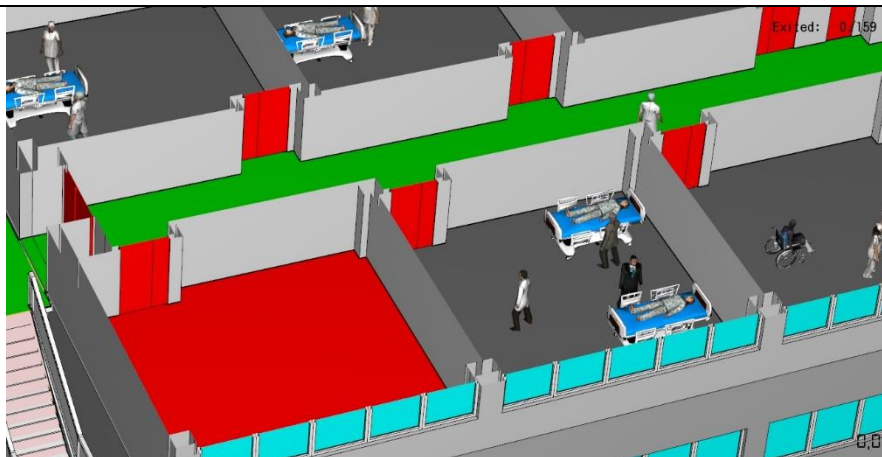


Figura 87. Profilo del paziente accompagnato da due assistenti.

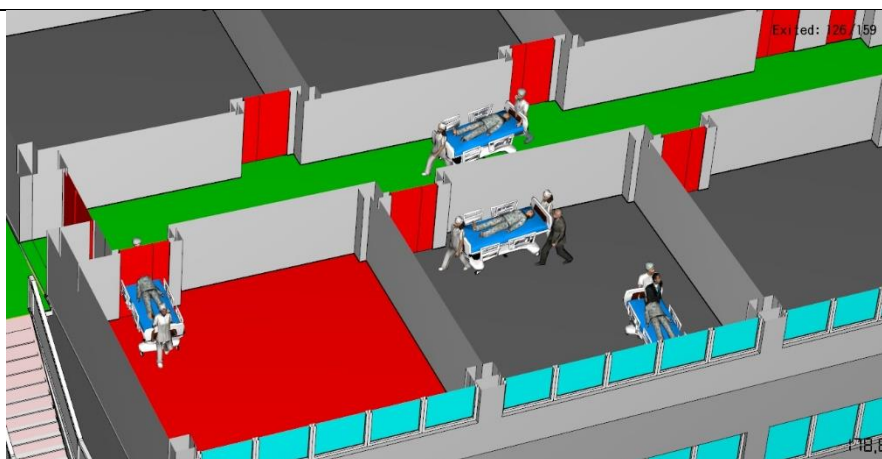
8.1.3 La simulazione

Settore A: stanze da letto di ospedale

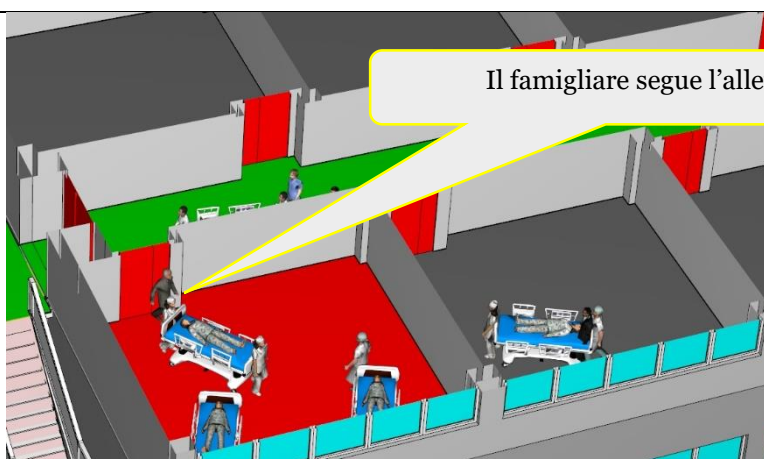
I pazienti locati in questi ambienti vengono condotti in luogo sicuro temporaneo e attendono in sicurezza di essere successivamente trasportati all'esterno dell'edificio grazie all'intervento della squadra dei VVF. Oltre agli allettati è stato inserito anche un disabile in sedia a rotelle, il quale invece verrà accompagnato all'uscita per mezzo di un ascensore antincendio posto all'interno del blocco scale principale. Di seguito vengono riportate alcune immagini rappresentative delle fasi di esodo modellate.



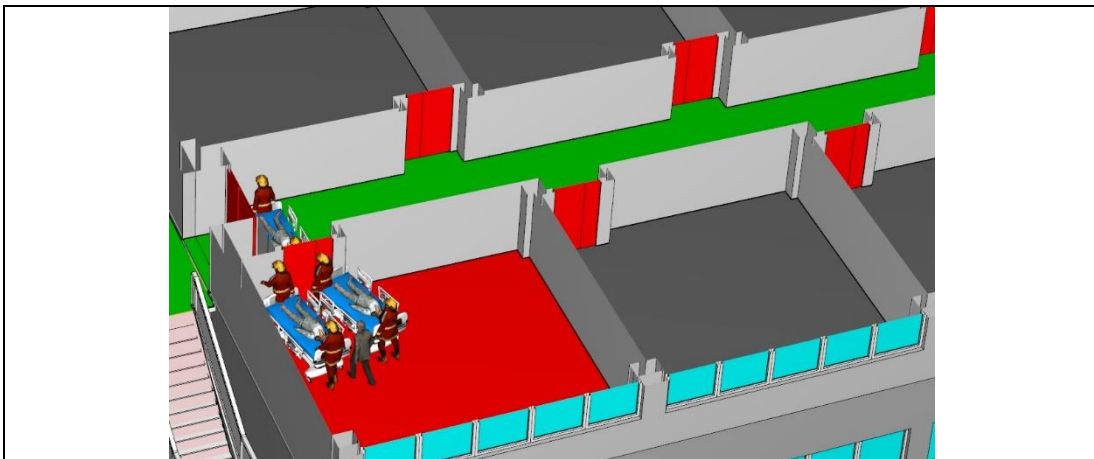
Settore A – Istante iniziale



Settore A – Arrivo dello staff medico (2 persone)



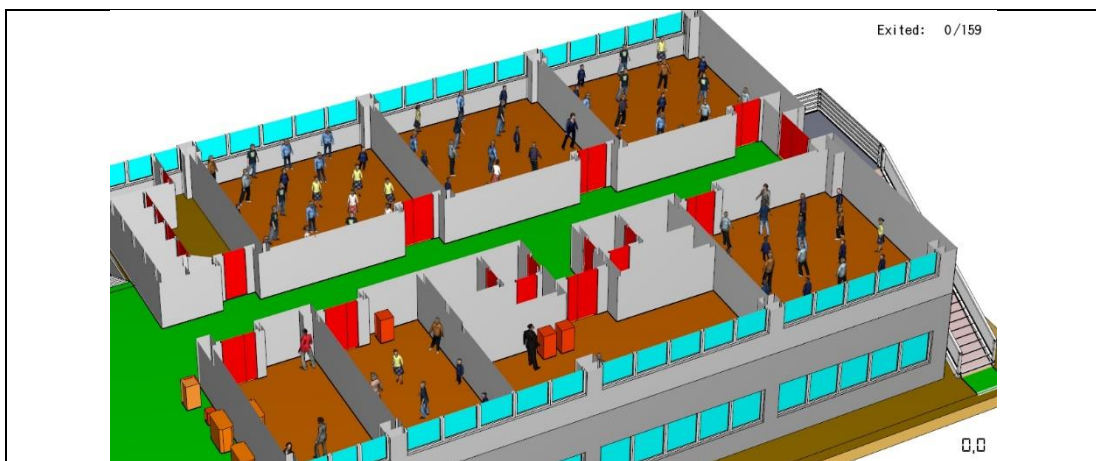
Settore A - Allettato accompagnato nella Safe Area



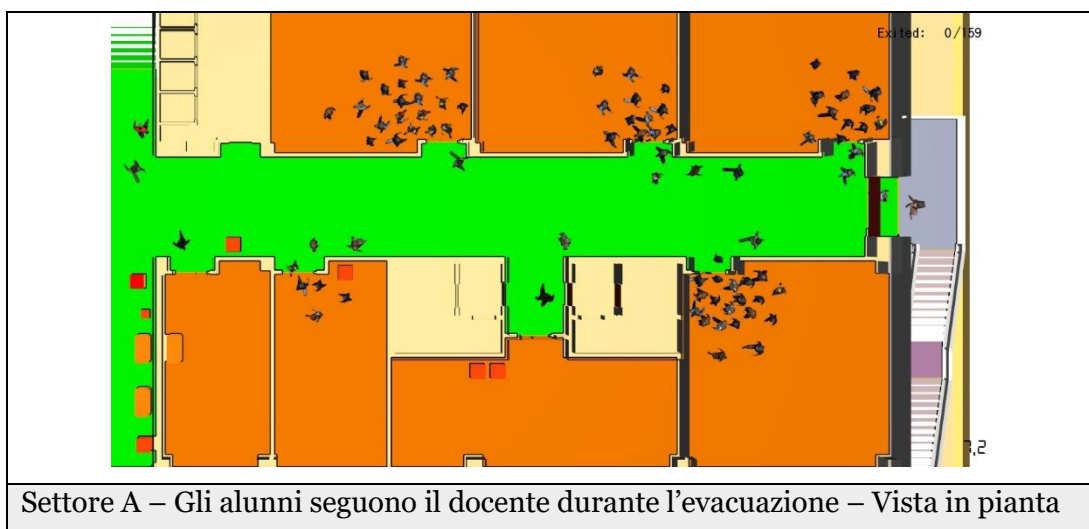
Settore A - Arrivo della squadra dei VVF

Settore B: scuola

Al settore B, collocato al piano primo, è stata assegnata la funzione fittizia di scuola. Attività che risulta fortemente caratterizzata dalla presenza di bambini, i quali durante un'emergenza sono educati a seguire il docente, il quale ha il compito di guidarli all'esterno della struttura. Al fine di simulare questa tipologia di evacuazione si sono creati degli appositi gruppi (uno per ogni classe) costituiti dagli alunni e dal docente. Al docente è stata assegnata la funzione di "Leader" del gruppo, in questo modo gli studenti seguiranno il comportamento di quest'ultimo.

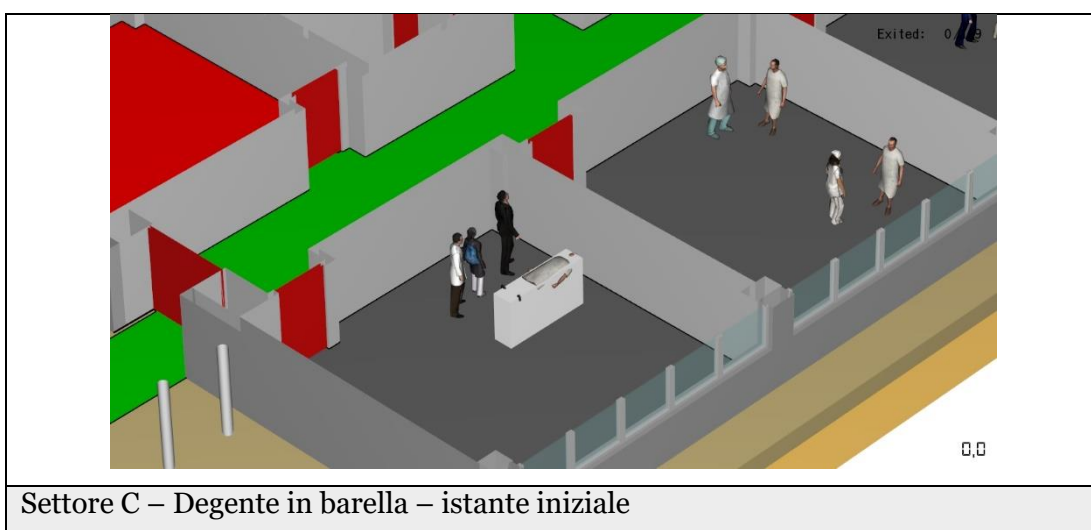
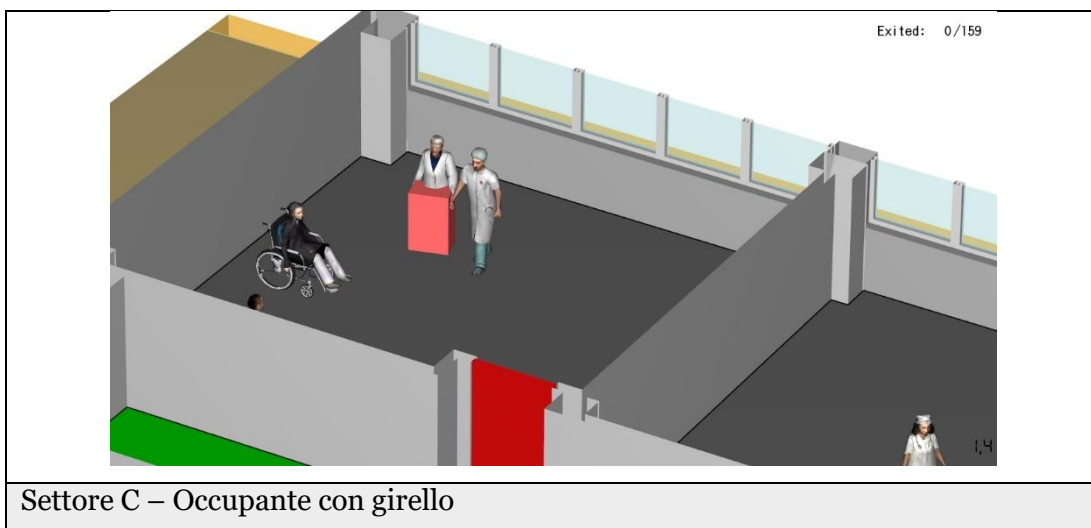
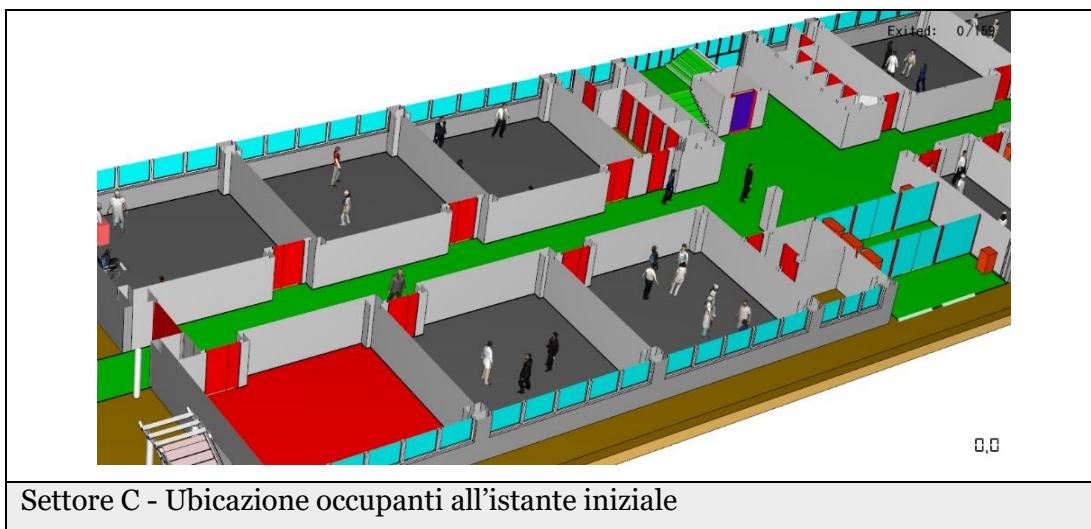


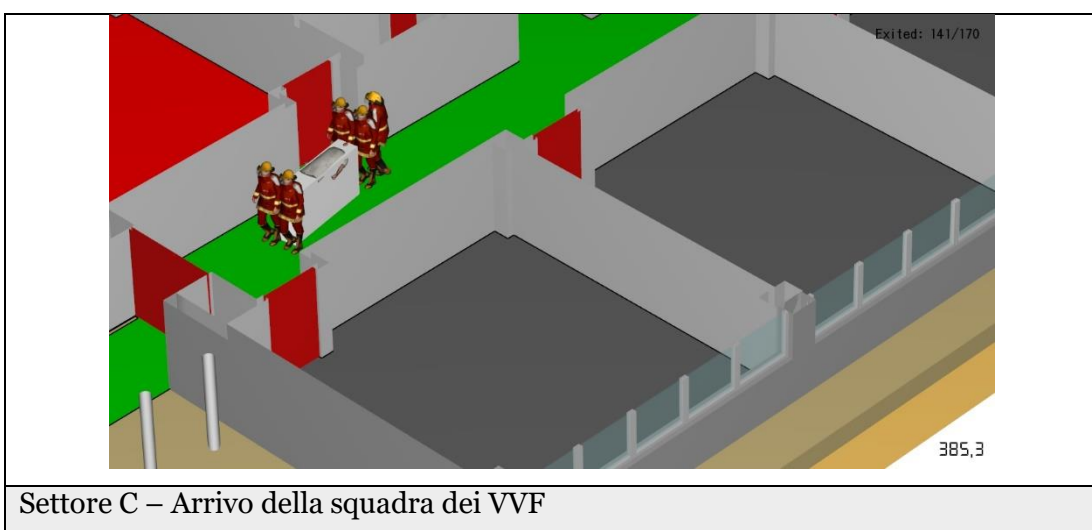
Settore B – Istante iniziale



Settore C: Area ambulatoriale

L’ultimo settore analizzato, costituito dall’intero piano terreno è stato destinato ad ospitare un ambulatorio. La particolare attività è stata scelta per il fatto che è caratterizzata da una vasta tipologia di occupanti. Basti pensare a chi raggiunge questi luoghi per una visita di routine, ad un individuo con bastone o girello, o occupanti accompagnati da uno o più assistenti.







Settore C – Pazienti assistiti durante l'esodo

Concludendo questa breve parte si evince come la maggior parte delle condizioni di mobilità possano essere in qualche modo riproducibili all'interno delle simulazioni sebbene queste non le prevedano ancora completamente. Un grande passo in avanti in questo senso avverrà nel momento in cui la maggior parte dei profili modellati in questo capitolo verrà finalmente implementata di default in questi software. Solo seguendo questa direzione il progettista, senza dover impiegare modellazioni alternative avrà tutti gli strumenti per rendere la simulazione e la progettazione dell'esodo davvero a misura d'uomo, considerando tutte le eventuali diversità.

CAPITOLO 9

LA REALTA' VIRTUALE APPLICATA ALLA FIRE SAFETY ENGINEERING

La metodologia BIM ha introdotto un approccio innovativo nella progettazione, spostando sempre più gli utenti del processo verso una progettazione tridimensionale, multidisciplinare e condivisa, che permette anche di immagazzinare tutti i dati e le informazioni di ciascun oggetto presente nel modello. Il processo BIM si propone di seguire la realizzazione dell'edificio in ogni sua fase, dal progetto alla sua manutenzione, costituendo una parte fondamentale per tutta la vita del fabbricato stesso. Proprio per questo motivo la metodologia BIM si sposa perfettamente con le ultime tecniche di visualizzazione, in quanto li esprime le sue enormi potenzialità. Le applicazioni e gli usi di questo approccio, BIM+VR, sono tuttora in fase di definizione, ma si ritiene che saranno numerosi e promettenti. In questo contributo verranno introdotti i concetti di realtà virtuale e le possibili applicazioni. Verranno quindi presentate le tecnologie e gli strumenti presenti attualmente sul mercato e quelle utilizzate nel caso studio.

9.1 Realtà virtuale, realtà aumentata e realtà mista

9.1.1 Introduzione

La simulazione all'interno dei diversi ambiti dell'ingegneria ha recentemente assunto un ruolo fondamentale soprattutto in fase di progettazione. Basti pensare alle analisi CFD (Computational Fluids Dynamics) nell'ambito della fluidodinamica, alle analisi agli elementi finiti in ambito strutturale o ancora alle simulazioni del comportamento e del movimento umano durante un'emergenza.

Grazie al grande passo in avanti della ricerca e dello sviluppo in ambito informatico e sistemistico, si sta sempre meglio concretizzando la possibilità di applicare la VR alla progettazione.

Prima di tutto si forniscono le principali definizioni di alcuni concetti che stanno alla base di queste nuove tecnologie.

Una definizione fu per la prima volta sintetizzata da Paul Milgram dell'università di Toronto nel 1994 all'interno dell'articolo "A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays".

Con riferimento al grafico della Figura 1, Milgram individuò, ai due estremi di un segmento, il "Reale" ed il "Virtuale" e nell'intervallo tra i due estremi un tipo di "Realtà Mista" (Mixed Reality) che sfuma nella "Realtà Aumentata", definendo tale segmento "Reality-Virtuality Continuum". Milgram si servì poi di tale definizione per la costruzione di una tassonomia dei sistemi di visualizzazione per ambienti in "Realtà Mista" a seconda del grado di immersività e del dispositivo di immersione.

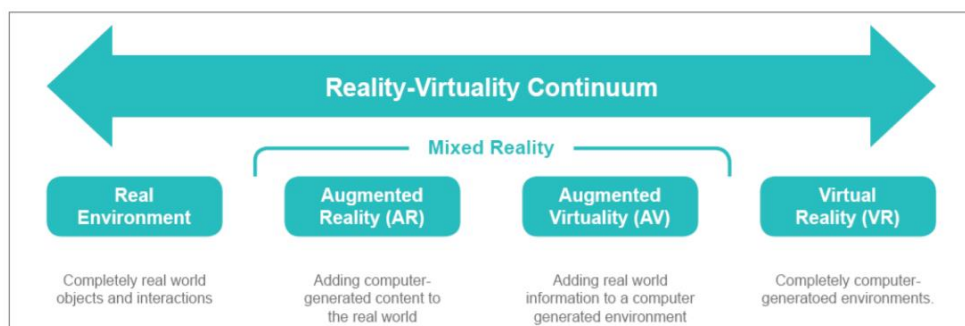


Figura 88 Concetto di "virtuality continuum" in riferimento a "A taxonomy of mixed reality visual displays", P. Milgram, and F. Kishino, 1994

9.1.2 La Realtà Virtuale (VR)

Per **Realtà Virtuale (VR)** si intende uno strumento in grado di riprodurre fedelmente una realtà. Grazie ad essa l'utente si trova completamente immerso in un ambiente tridimensionale realizzato ad hoc. Questo approccio tende a coinvolgere tutti i sensi, anche quelli che solitamente non vengono sollecitati, come l'orientamento, oltre la vista e l'udito; infatti l'utente è in grado di esplorare l'ambiente ed interagire con quest'ultimo.

A questa categoria appartengono due famiglie differenti in funzione del coinvolgimento sensoriale dell'utente, ovvero la VR immersiva e la VR non immersiva.

Nella prima famiglia (VR immersiva) l'utente viene isolato dall'ambiente esterno in modo totale e viene perciò catapultato in un ambiente virtuale interamente modellato al computer. L'esperienza immersiva viene garantita per mezzo di alcune periferiche che svolgono il compito di stimolare i nostri sensi. Principalmente vengono impiegati visori posti in prossimità degli occhi, chiamati anche HMD (Head Mounted Display), che una volta indossati immergono in un'esperienza visiva a 360 gradi. Insieme a questi accessori possono anche essere forniti comandi, come i joystick che permettono di simulare dei movimenti e delle azioni con le mani.

Della realtà non immersiva, invece, fanno parte le tecnologie in cui l'ambiente ricreato artificialmente ha un minor impatto emotivo e sensoriale sulla persona. Infatti in questo caso non si ha la possibilità di interagire con l'ambiente ma solamente una percezione visiva a schermo

9.1.3 La Realtà Aumentata (AR)

Per **Realtà Aumentata (AR)** si intende invece un arricchimento della percezione del mondo reale, in quanto questo approccio permette in tempo reale all'utente di avere accesso a più informazioni riguardo l'ambiente che sta visualizzando. Nella sua analisi, Milgram concepisce l'AR come un insieme di circostanze in cui un ambiente reale viene "aumentato" tramite oggetti virtuali realizzando così un "continuum" definito "realtà mista" tra un contesto reale e un ambiente virtuale. La AR, a differenza della VR, non richiede che il soggetto sia immerso completamente in essa, perciò per la sua visualizzazione basta tipicamente uno smartphone, un tablet o un computer. Grazie ad essa si ha una vera e propria sovrapposizione di livelli informativi digitali sull'ambiente reale. Di questa tecnologia si possono fare innumerevoli esempi, basti pensare al largo utilizzo che essa sta avendo in ambito museale o ancora per ottimizzare i tour guidati delle città. Il suo funzionamento prevede che si inquadrino con la fotocamera dello smartphone o tramite un apposito QR code ad esempio una scultura all'interno di un museo, quindi l'applicazione restituisce informazioni aggiuntive dell'oggetto

inquadrato. Lo stesso concetto si può applicare ad un edificio storico del centro cittadino: una volta inquadrato con la fotocamera si avvierà un'applicazione contenente informazioni sul fabbricato, che possono avere diversi destinatari, dal turista in grado di leggere informazioni sulla storia dell'oggetto, al manutentore che può avere accesso ai dati delle ultime manutenzioni.

9.1.4 La Realtà Mista (MR)

Per **Realtà Mista (MR)** si intende un mix interattivo tra la **VR** e la **AR**. Nello specifico, oltre all'inserimento di immagini sovrapposte alla realtà, questa categoria si pone l'obiettivo di immergere l'utente in un mondo reale in cui può considerare gli oggetti virtuali come fossero davvero esistenti. Grazie alla MR quindi è possibile osservare il mondo reale, traendo informazioni utili grazie alla Realtà Aumentata, ma anche vedendo oggetti virtuali come reali.

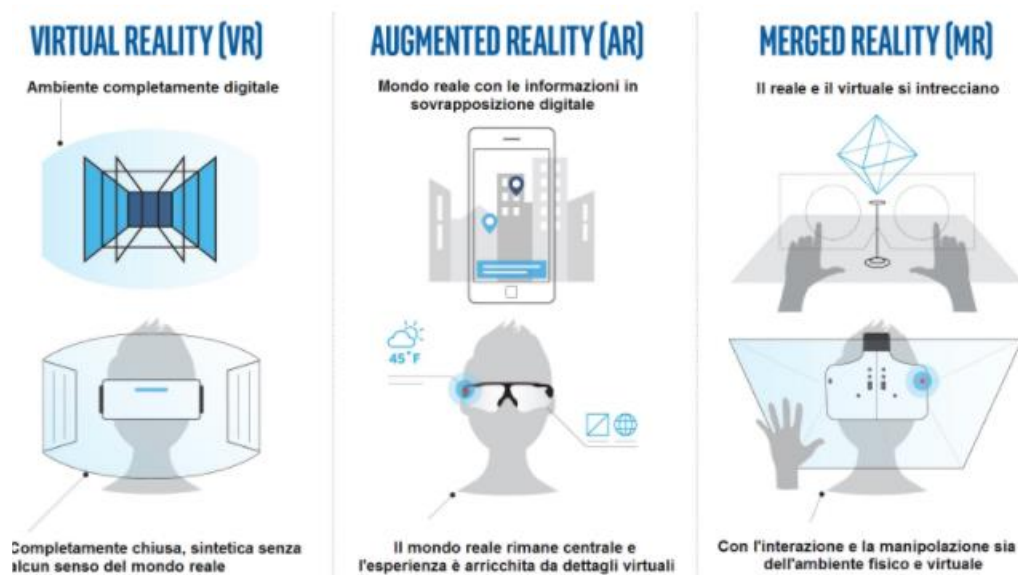


Figura 2. Classificazione Realtà (tratto da Intel Virtual Reality)

9.2 Strumenti e tecniche VR

Per poter usufruire dell'esperienza di completa immersione all'interno di una realtà virtuale sono disponibili diverse apparecchiature (sistemi) costituite da più periferiche. Generalmente la VR si ottiene mediante l'utilizzo simultaneo di tre strumenti: un computer (o dispositivo analogo, come smartphone o tablet), un visore ottico e dei controllers.

Principalmente esistono già in commercio innumerevoli soluzioni, di seguito vengono riportati e vengono descritte le caratteristiche dei due dispositivi impiegati nel caso studio.

9.2.1 Oculus Rift

Oculus Rift è un visore sviluppato dalla casa Oculus VR, il pacchetto comprende non solo il visore ma anche dei controller pensati per la realtà virtuale che migliorano notevolmente l'esperienza dell'utente, oltre a due sensori che hanno la funzione di tracciare la posizione della testa e delle mani dell'utilizzatore e di eventuali altri dispositivi connessi.

Il dispositivo è composto da due display OLED aventi risoluzione pari a 2160×1200 pixel e refresh rate pari a 90 Hz, mentre il campo visivo interno al visore è di 110 gradi.



Figura 89 Oculus Rift

9.2.2 HTC Vive

HTC Vive è l'altro dispositivo che insieme a quello sopra citato è tra i più diffusi in questo ambito. È stato sviluppato per HTC dall'azienda Valve ed è in commercio dal 2016.



Figura 90 HTC Vive

9.2.3 Cyberith Virtualizer

Cyberith Virtualizer è una piattaforma di locomozione per la realtà virtuale. Conosciuto anche con il nome di "Tapis roulant omnidirezionale", esso simula il pieno movimento negli ambienti virtuali seguendo i movimenti reali dell'utente.

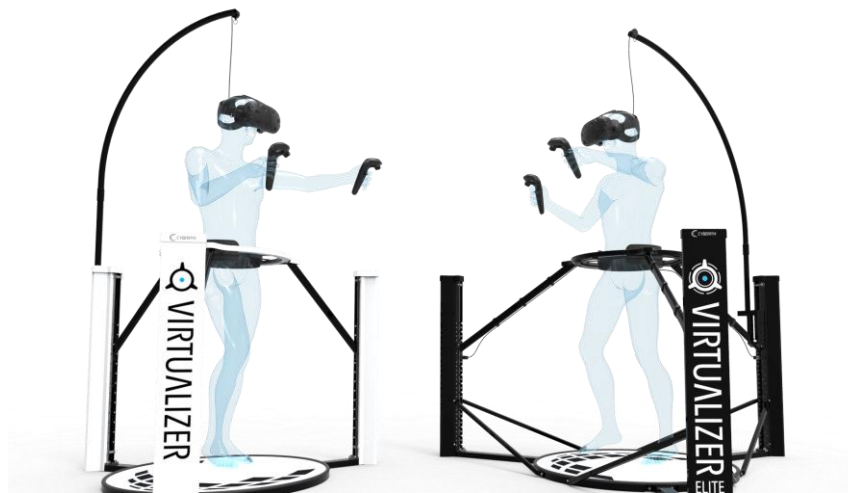


Figura 91 Cyberith Virtualizer

Allo strumento è connesso anche un visore (HTC Vive) con i relativi controllers affinché l'utente possa immergersi completamente all'interno del modello virtuale ed interagire con gli elementi all'interno di esso.

9.3 Applicazioni al settore dell'ingegneria

L'innovazione tecnologica (hardware e software), negli ultimi anni ha permesso a diversi settori, fra cui quello ingegneristico, di migliorarsi e di progettare in modo più ottimizzato e avanzato rispetto al passato. Basti pensare ai grandi passi avanti nell'ambito della progettazione grazie al passaggio dal CAD al BIM. Grazie al BIM infatti è stato possibile rendere la progettazione ancora più multidisciplinare e condivisa in tempo reale. La progettazione tridimensionale, con l'affermarsi delle varie tecniche di Virtual Reality, sta indirizzando i vari settori ad impiegare queste tecniche in aiuto alla propria disciplina. Sebbene queste tecnologie risultino ormai affermate nel settore del Gaming, ad oggi si sta assistendo al coinvolgimento anche del mondo ingegneristico.

Nel settore della progettazione, ad esempio, possono essere utilizzate le tecnologie BIM+VR per diversi obiettivi. Ad esempio con scopi manutentivi ("facility management"), oppure per ottenere informazioni riguardanti la percezione dell'illuminamento all'interno di ambienti non ancora realizzati, o ancora per presentare il progetto alla committenza rendendola partecipe già nelle prime fasi progettuali ("progettazione partecipata").

I dispositivi di VR possono altresì essere impiegati ai fini di addestramento di personale specializzato per determinate mansioni che altrimenti sarebbero pericolose o dispendiose, come nel caso della formazione dei vigili del fuoco sull'uso di particolari dispositivi di spegnimento o particolari scenari emergenziali.

9.4 La VR per la Fire Safety Engineering

Una interessante applicazione di questi strumenti immersivi è rappresentata sicuramente dal settore della prevenzione incendi. Per esempio, sono già stati avviati alcuni studi al fine di permettere ai vigili del fuoco di addestrarsi utilizzando le tecnologie sopracitate.

Con l'introduzione e diffusione dei metodi della Fire Safety Engineering nella progettazione antincendio, il progettista utilizza modelli di calcolo ai fini di valutare la salvaguardia della vita degli occupanti mediante la determinazione dei valori di ASET (Available Safe Escape Time) ed RSET (Required Safe Escape Time). Queste verifiche

richiedono l'utilizzo di software che consentano la simulazione di incendio (per esempio FDS) e la simulazione dell'esodo dall'edificio.

Gli output restituiti da questo tipo di simulazioni sono sia di tipo quantitativo, che qualitativo. Nel caso di una simulazione di incendio, da essa è possibile valutare la visibilità in qualsiasi punto dell'edificio, o piuttosto visualizzare la diffusione dei fumi nel volume e nel corso dell'incendio. Gli output delle simulazioni d'esodo sono generalmente costituiti da: mappe rappresentative della densità di affollamento, livelli di servizio (LoS) dei vari componenti del percorso di esodo, grafici dei tempi di evacuazione dall'edificio o da singoli locali, o ancora il calcolo della FED di ciascun occupante. Dalla combinazione delle simulazioni di esodo e quelle di incendio il progettista è in grado di valutare l'efficacia delle misure antincendio previste nel progetto e eventualmente ottimizzarle in modo opportuno.

9.4.1 Potenzialità la VR

L'impiego dei modelli di simulazione citati nel paragrafo precedente richiedono una buona preparazione da parte del progettista, il quale è tenuto a saper leggere i risultati delle modellazioni in modo univoco e sviluppare delle valutazioni critiche in merito ai risultati ottenuti. Se al progettista è richiesto un certo livello di esperienza affinché i risultati siano affidabili, anche all'organo valutatore è richiesto un alto grado di preparazione.

L'applicazione della Virtual Reality sicuramente rappresenta un grande valore aggiunto nel mondo dell'ingegneria antincendio. Allo stato attuale di sviluppo hardware e software, il beneficio principale è legato agli output delle simulazioni, in quanto la VR permetterebbe una migliore e più naturale rappresentazione dei risultati sia al funzionario dei VVF, sia al progettista stesso in fase di modellazione.

In questo senso, le più importanti software house del settore della Fire Safety Engineering stanno testando ed implementando la visualizzazione tramite dispositivi di VR dei risultati delle modellazioni, per consentire al progettista ed al funzionario VVF un'esperienza immersiva nell'ambiente modellato per verificarlo in prima persona senza correre alcun rischio per la propria incolumità e permettendo lo sviluppo di molteplici scenari in modo agevole ed economico.

9.4.2 Criticità

Le principali criticità degli attuali sistemi di Virtual Reality applicate al settore di prevenzione incendi, in particolare alle simulazioni di esodo ed incendio, sono legate prevalentemente al livello di immersione dell'utente all'interno del modello. Infatti al momento non risulta

possibile esplorare in modo libero l'edificio modellato, bensì, anche se la visualizzazione è dinamica (360° tramite i visori) non è tecnicamente possibile spostarsi all'interno degli ambienti in modo autonomo, ma occorre creare un percorso guidato a monte della restituzione dei risultati, oppure impersonificarsi in uno degli occupanti della simulazione.

Essendo questo un problema legato ai software in fase di sviluppo, è ipotizzabile che nel prossimo futuro sarà possibile il movimento libero dell'utente nel modello, sincronizzato con lo sviluppo dell'incendio o dell'evacuazione dell'edificio.

Quando l'hardware lo permetterà, sarà infine possibile interagire con il modello e valutare in real time le conseguenze di determinate azioni dell'utente sul comportamento dell'incendio.

9.4.3 Strumenti e software utilizzati

Gli attuali software di simulazione dell'esodo stanno iniziando ad implementare al loro interno la possibilità di osservare i dati di output con la Virtual Reality. Fra essi, i due software della Thunderhead®: Pathfinder e PyroSim prevedono il supporto alla visualizzazione mediante il visore Oculus. Possibilità analoghe sono previste anche nel software MassMotion per la sola visualizzazione dell'esodo. Di seguito si riportano alcuni esempi di visualizzazione tramite i visori all'interno del programma Pathfinder.

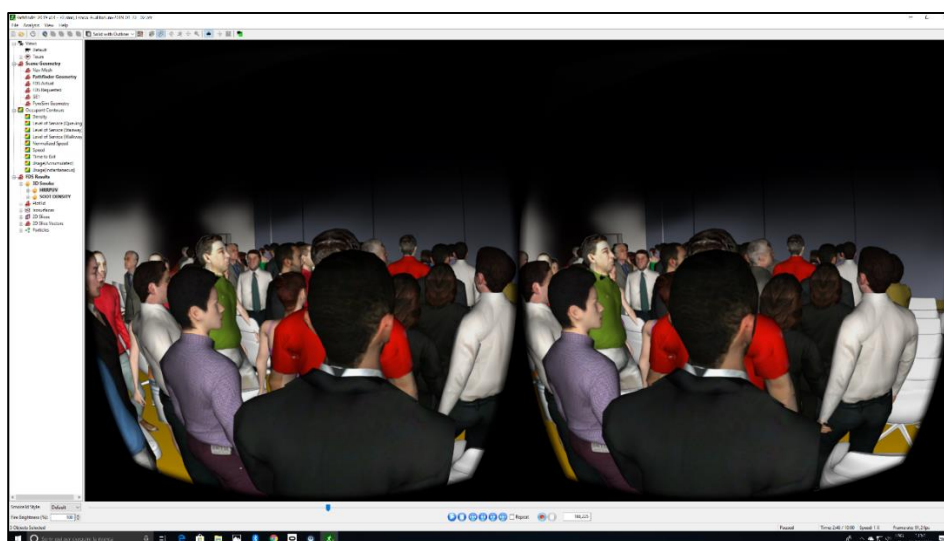


Figura 92. Visualizzazione dei fumi tramite visore Oculus Rift.



Figura 93. Visualizzazione delle isosuperfici tramite visore Oculus Rift.

Nello specifico il programma permette all'utente di "immedesimarsi" in uno degli occupanti; sebbene il movimento all'interno del modello sia vincolato a quello dell'occupante selezionato, questa possibilità consente di capire ed osservare da un punto di vista più realistico gli effetti e lo sviluppo dell'incendio. Di conseguenza questi strumenti, se opportunamente impiegati, rappresentano un grande valore aggiunto alla progettazione antincendio.

Come detto, il grande limite attuale è legato all'impossibilità di essere liberi nel movimento, la quale non permette di esplorare e comprendere in modo dettagliato ogni criticità del progetto.

9.5 L'applicazione di VR ad un caso studio

Dopo un'attenta analisi critica delle tecnologie attualmente disponibili, delle carenze e delle necessità nel settore della prevenzione incendi si è creato un applicativo avente molteplici obiettivi, e diretto al supporto di più figure professionali: il progettista e il funzionario dell'organo di valutazione (Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco).

Nello specifico si elencano in seguito le varie opportunità che il programma si propone di fornire all'utente finale:

- assistere il professionista durante la modellazione in fase progettuale, al fine di verificare che le misure antincendio adottate al caso studio siano quelle ottimali. Un esempio è quello della scelta della tipologia e della posizione della segnaletica di emergenza, la visibilità della quale può essere influenzata dalla presenza di fumi durante l'esodo. Altro esempio è rappresentato dalla verifica che gli spazi siano stati

ben progettati, ovvero che il sistema d'esodo sia privo di ostacoli, ben fruibile e progettato in modo ottimale;

- attivare un timer in grado di registrare il tempo impiegato ad evacuare l'edificio;
- verificare che la visibilità ridotta dalla presenza di fumi all'interno degli ambienti non comprometta l'esodo degli occupanti.

9.5.1 Tecnologie e strumenti utilizzati

Per la creazione del modello virtuale è stato utilizzato l'ambiente di sviluppo **Unity**, uno strumento impiegato per la creazione di videogiochi 3D o altri contenuti interattivi, quali visualizzazioni architettoniche o animazioni in tempo reale. Sebbene questa tipologia di programmi è nata inizialmente al fine di modellare ambienti tridimensionali per videogiochi, ad oggi essi stanno riscontrando efficaci potenzialità applicative nel settore della progettazione.

Tra i dispositivi di VR disponibili invece è stato utilizzato **Virtualizer** della Cyberith®, del quale precedentemente se ne sono descritte le caratteristiche principali. Si è scelto questo strumento poiché permette una totale immersione dell'utente all'interno del mondo virtuale ed inoltre consente di simulare la camminata dell'occupante, per esempio durante l'esodo.

9.6 Unity3D

L'interfaccia del software si presenta costituita da diverse aree di lavoro, ciascuna di esse avente una specifica funzione.

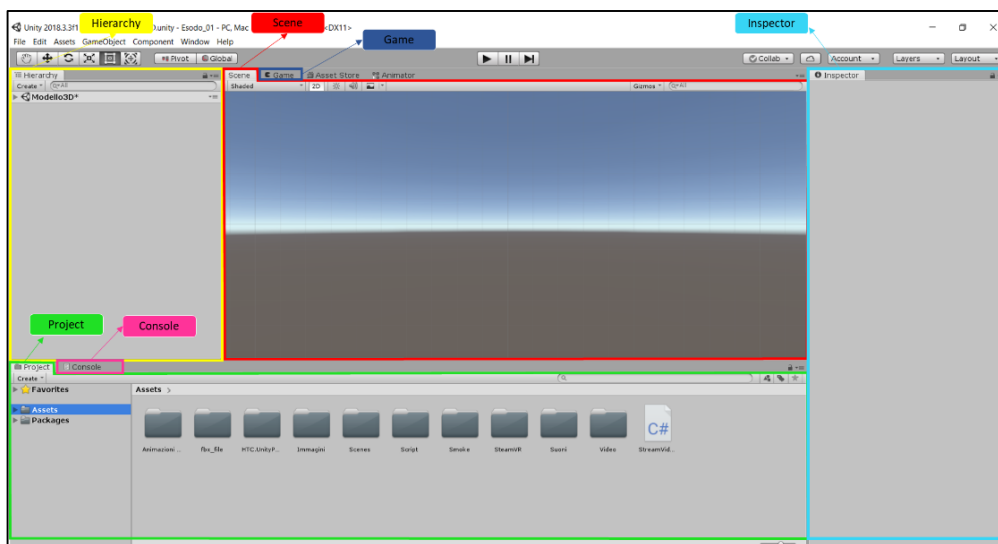


Figura 94. Interfaccia grafica di Unity3D

Scene

Nella sezione Scene viene visualizzato il modello e gli oggetti inseriti in esso, come la camera, i vari elementi tridimensionali inseriti o le luci. All'interno di una scena è possibile importare elementi creati con altri software oppure inserire oggetti direttamente da Unity.

Hierarchy

Essa è la finestra in cui vengono riportati tutti gli oggetti presenti nella scena. Il pannello delle gerarchie è caratterizzato dal fatto che ogni elemento può essere messo in relazione con un altro. Come dice il nome, gli elementi possono essere riportati in questo spazio secondo delle gerarchie, ad esempio ogni oggetto può essere “padre” di un altro. Questo approccio permette agli elementi “figli” di assumere le stesse caratteristiche e comportamenti del “padre”. Inoltre in questa area è possibile, tramite il comando “Create” inserire nuovi oggetti all'interno della scena.

Game

Questa sezione mostra la scena che viene inquadrata dalla telecamera principale (*Main Camera*). Questo pannello mostra l'aspetto finale dell'elaborazione, infatti in essa viene rappresentato ciò che l'utente finale, tramite un visore o a schermo potrà visualizzare. Lo scopo di questa area è perciò quello di fornire in tempo reale il risultato di ciò che si sta modellando.

Project

La sezione Project è un "contenitore" di tutte le cartelle ed i file inseriti nel progetto. In esso sono contenuti elementi quali materiali, modelli 3D, scene, script, suoni, video, ecc.

Inspector

La sezione "Inspector" contiene tutti i parametri e le impostazioni per ciascun oggetto della scena. In questo pannello, dopo aver selezionato uno specifico oggetto, vengono mostrate tutte le informazioni relative agli script, le mesh, e gli elementi ad esso correlati. Il contenuto di questa sezione variabile a seconda dell'oggetto selezionato.

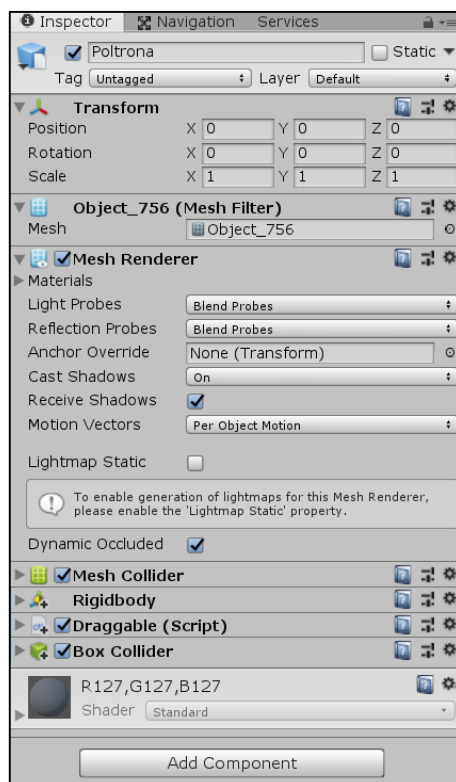


Figura 95. Esempio del contenuto di un "Inspector" per un arredo.

Console

La sezione contiene tutte le informazioni relative ad errori e warning. Viene in soccorso nel momento in cui vi sia la necessità di provare il funzionamento di alcuni elementi, come script ecc.

Per capire meglio alcuni passaggi relativi alla fase di costruzione dell'applicazione, occorre descrivere alcuni elementi caratterizzanti il software. Come detto in precedenza, ciascuna scena è costituita da vari oggetti, questi prendono il nome di “*GameObject*”. Essi possono essere elementi 3D, telecamere, ecc. Oltre agli elementi appena descritti esistono i “*Prefab*”, ovvero i prefabbricati, che sono oggetti che oltre ad essere presenti in una determinata scena, sono anche salvati all'interno del progetto e sono dunque pronti ad un nuovo utilizzo per eventuali altre scene o la stessa. Essi risultano molto utili nel caso in cui vi sia la necessità di creare lo stesso tipo di oggetto un certo numero di volte all'interno della stessa scena.

Ogni “*GameObject*” avrà differenti parametri settabili all'interno del proprio Inspector. Queste caratteristiche prendono il nome di “*component*” e possono essere aggiunte o eliminate ad ogni elemento a seconda degli obiettivi da perseguire. Di seguito si riportano alcune tipologie di “*component*”, tipicamente più utilizzate al fine della realizzazione dell'applicazione:

- *box collider*: componente che permette di gestire le collisioni tra l'oggetto e gli altri presenti nella scena, esso riproduce un ingombro maggiore di quello che effettivamente occupa l'elemento, in quanto genera un volume parallelepipedo intorno all'oggetto;
- *mesh collider*: componente del tutto identico al box collider, con la differenza che esso fa riferimento alla mesh dell'elemento senza generare un volume fittizio;
- *script*: componente che consente di attribuire ad un oggetto uno specifico script;
- *transform*: consente di settare la posizione spaziale dell'elemento nella scena;
- *animator*: associa ad uno specifico oggetto una animazione.

9.6.1 Importazione del modello

All'interno del software è stato importato il modello dell'edificio oggetto di studio precedentemente esportato in formato FBX dal software Revit Autodesk®. Il passaggio del modello BIM dal software Revit a Unity può essere svolto in diverse modalità in funzione delle esigenze e degli obiettivi finali da perseguire. In particolare, risulta possibile esportare la vista 3D da Revit in formato FBX impostando la scala opportuna, dopodiché importare il file nel software 3ds Max tramite il quale è possibile conservare ed attribuire uno specifico materiale a ciascun elemento tridimensionale. Nel caso in esame, dato che il risultato a livello grafico non risulta essere lo scopo principale dell'elaborazione e poiché dopo aver effettuato alcune prove, la volontà di dover importare l'intero edificio (e non solo parti di esso) ha portato a dover lavorare con file di grandi dimensioni, si è preferito utilizzare un altro metodo di esportazione. Il modello BIM, è stato così esportato da Revit tramite il plugin SimLab Soft. Esso ha prodotto un file in formato FBX ottenendo comunque degli ottimi risultati in merito a materiali e texture. Nell'immagine in basso si può osservare il risultato finale dell'importazione all'interno di Unity dell'intero modello.

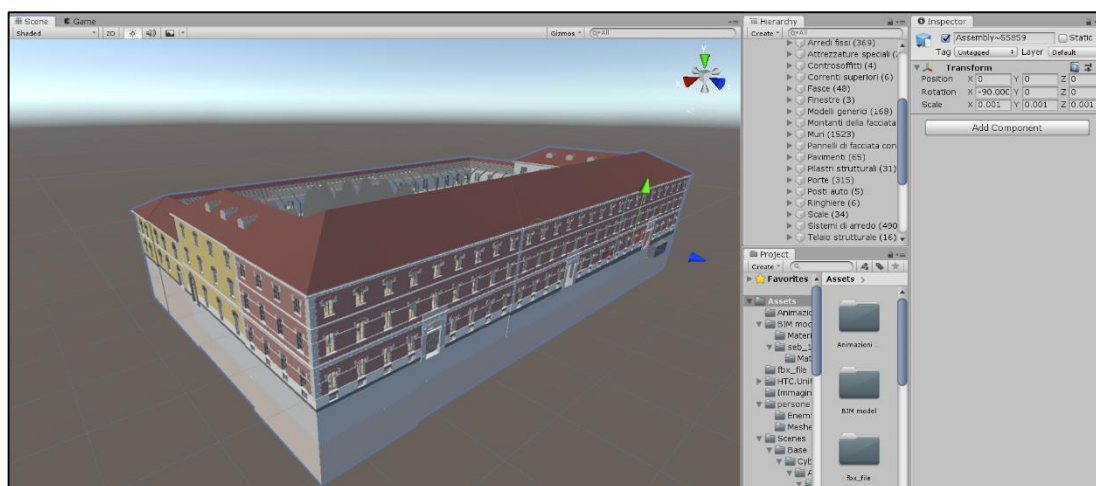
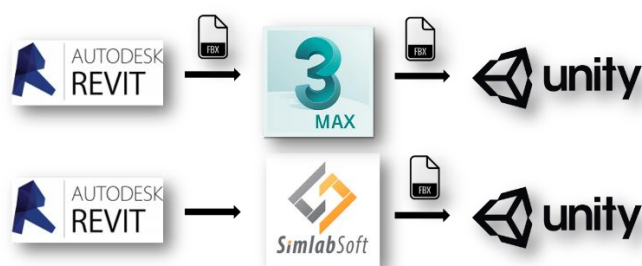


Figura 96. Modello BIM importato.

9.6.2 Il movimento

Per permettere all'utente di potersi muovere all'interno del modello è stato opportuno importare specifici *“prefab”* e script relativi al visore HTC Vive e al Virtualizer. Nel caso specifico si è importato il *“prefab”* denominato *“CVirtPlayerController”*, il quale permette all'utente di relazionarsi col modello ed esplorarlo mediante la piattaforma ed il visore.

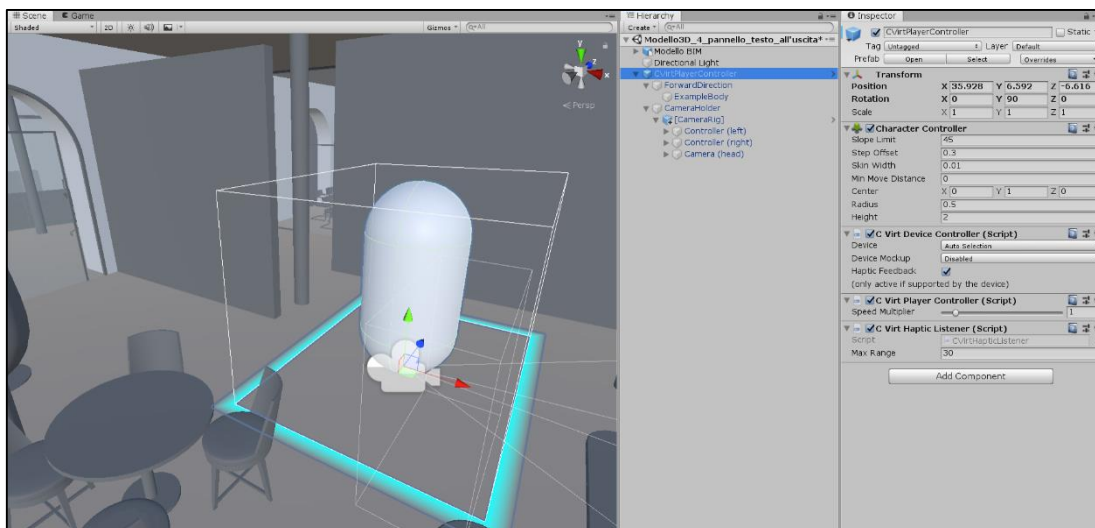


Figura 97. Prefab del “Player”.

A sua volta al suo interno è presente il prefab *“Camera Rig”*, il quale contiene i due controller e la camera con i relativi script. Inoltre il prefabbricato relativo al visore (*“Camera Head”*) comprende due altri prefab: la *“Camera (eye)”* che rappresenta lo schermo HMD e la *“Camera (ears)”* comprendente la parte relativa all'audio in uscita (gli auricolari).

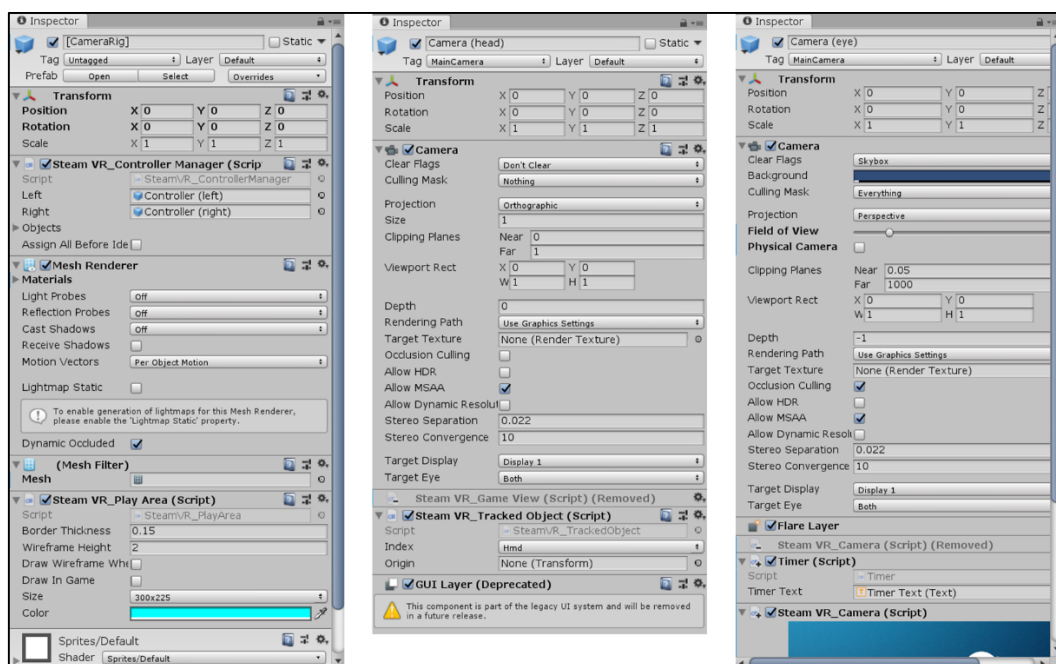


Figura 98. Contenuto del prefab "CameraRig".

Dopo aver inserito la parte relativa al movimento dell'utente, il software non permette ancora l'esplorazione, in quanto, occorre individuare ed indicare su quali superfici ci si può spostare e quali elementi devono essere riconosciuti come ostacoli. Per far ciò occorre quindi gestire le collisioni, a ciascun elemento del modello importato è stato associato un "mesh collider". In questo modo qualunque oggetto viene letto come un ostacolo fisico.

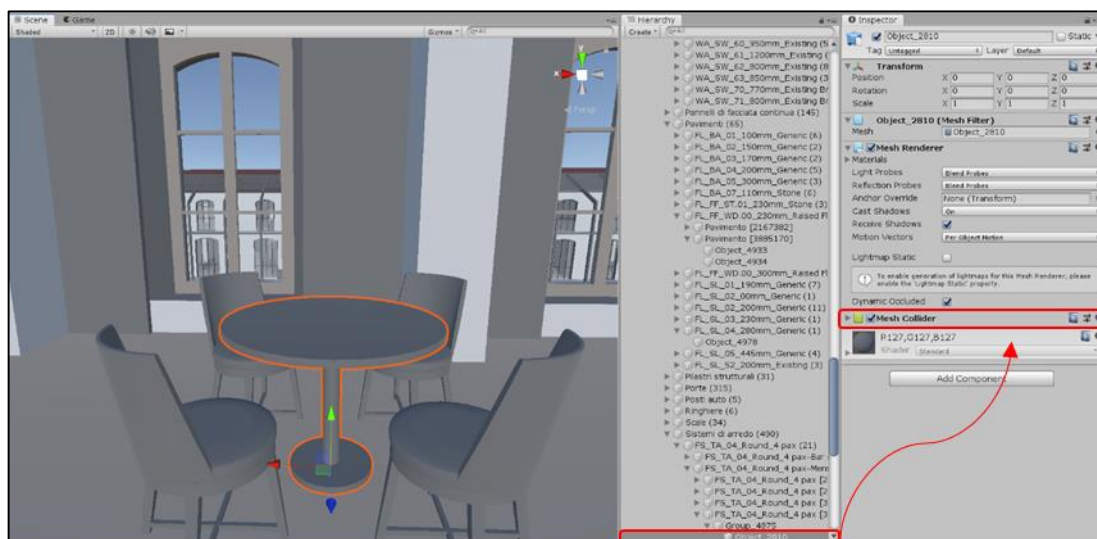


Figura 99. Assegnazione di una Mesh Collider a ciascun elemento della scena.

9.6.3 Sviluppo della scena principale

La scena principale è costituita da un menù interattivo tramite il quale l'utente può selezionare le altre scene. Essa rappresenta quindi la connessione tra tutte le scene presenti. Al fine di far prendere confidenza fin da subito con il movimento tramite la piattaforma si è scelto di posizionare il menù all'interno del modello dell'edificio 3D, nello specifico nell'ambiente ospitante l'auditorium. In questo modo l'utente si trova immediatamente dentro i volumi del fabbricato e potrà scegliere la scena da avviare tramite un pannello che verrà mostrato sullo schermo dell'auditorium stesso.

Dopo aver posizionato il "Player", ovvero la camera al centro dell'ambiente, si è proseguito andando a creare il pannello del menù. Il primo step è stato quello di inserire una "Canvas", essa è definibile come l'area che ospita tutti gli elementi del pannello interattivo che si vuole creare. Essa presenta tre differenti modalità di rendering: *screen space overlay*, *screen space camera* o *world space*. Lo *screen space overlay* permette di rappresentare gli elementi del pannello sullo schermo renderizzato, perciò, nel caso in cui il schermo venga ridimensionato, anche il Canvas si adatterà e varierà le sue dimensioni di conseguenza. Lo *screen space camera* invece è del tutto analogo al primo, ma il pannello è a una fissata distanza dalla camera. L'ultima modalità, la *world space*, è quella utilizzata nel caso in esame e consiste nella possibilità di ubicare all'interno della scena il pannello in modo fisso, trattandolo come qualunque altro oggetto appartenente alla scena. Nel caso in esame si è posizionato in prossimità dello schermo dell'auditorium in modo da simularne il funzionamento. Per inserire una "Canvas" nella scheda "Hierarchy" occorre cliccare su: Create→UI→Canvas.

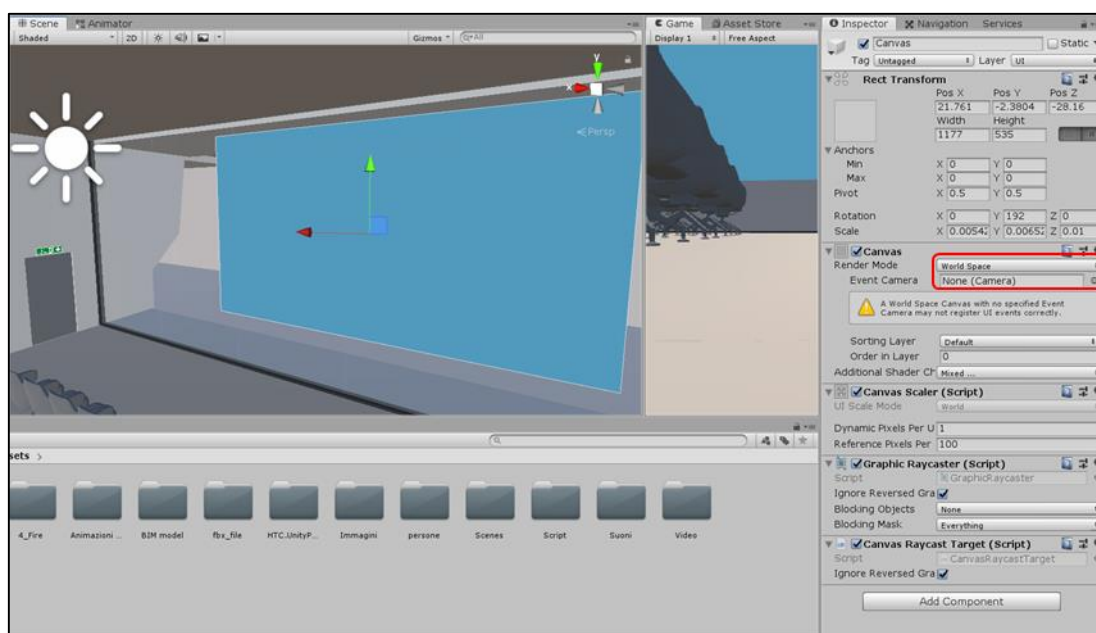


Figura 100. Inserimento della Canvas all'interno del modello.

Dopo aver inserito la Canvas si è proseguito con l'aggiunta dei pulsanti che metteranno in relazione le varie scene con quella principale. Per aggiungere un pulsante occorre cliccare su: Create→UI→Button. Insieme all'elemento "Button" verrà creato un "Event System" il quale ha la funzione di regolare l'uso degli elementi della Canvas.

Dopo aver posizionato in modo corretto tutti i pulsanti all'interno del pannello della Canvas si è settato ognuno di essi in modo opportuno, in modo da realizzare la connessione con le altre scene. Questo processo si svolge attraverso uno script predefinito all'interno dell'Inspector di ciascun bottone. In particolare sono stati settati due differenti tipologie di tasti:

- un pulsante che consente il caricamento della scena prescelta, utilizzato sia per entrare in una nuova scena partendo dalla scena principale, sia all'interno di ciascuna scena per ritornare al menù;
- un pulsante che permette all'utente di chiudere l'applicazione.

Di seguito viene riportato lo script relativo alle due tipologie appena descritte.

Script per il caricamento della scena o chiusura dell'applicazione:

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;
using UnityEngine.SceneManagement;
public class LoadLevel : MonoBehaviour
{
    public void LoadScene(string name)
    {
        Application.LoadLevel(name);
    }
    public void QuitGame()
    {
        Application.Quit();
    }
}
```

Si è proseguito andando a creare un oggetto con: Create→Create Empty. Tale elemento è stato rinominato in "SceneManager" e gli è stato associato lo script sopra riportato. È possibile aggiungere uno script ad un qualunque elemento tramite la sezione Inspector cliccando su "Add Component" e successivamente ricercando nella barra di ricerca il nome dello script che gli si vuole associare, in alternativa è possibile anche trascinare il file .cs direttamente dentro l'Inspector. Dopodiché all'interno dell'Inspector di ciascun bottone si è selezionato lo script

“LoadLevel” e si è digitato il nome della scena che si desidera caricare. Sotto viene riportato un esempio per il settaggio del pulsante di caricamento della scena “Lo1_MM”.



Figura 101. Creazione di un pulsante e associazione dello script.

In modo analogo si è settato il pulsante di chiusura dell'applicazione, con l'unica differenza che in questo caso la funzione caricata nell'Inspector è “LoadLevel.Quitgame”.

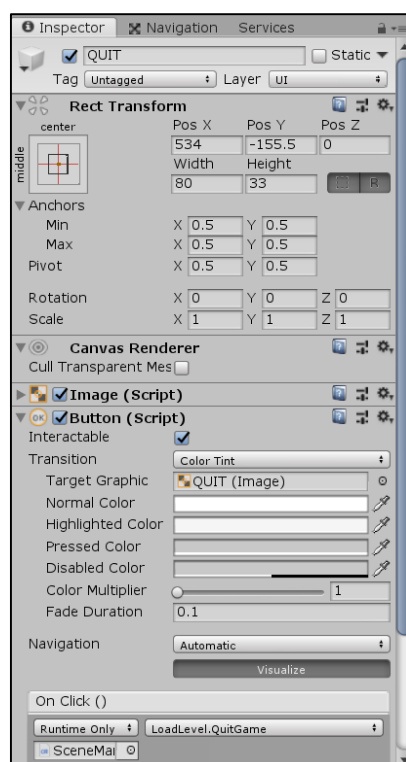


Figura 102. Creazione del pulsante di chiusura dell'applicazione.

Oltre a questi pulsanti, al pannello del menu principale si è inserito anche un video rappresentativo dell'intero modello tridimensionale dell'edificio in esame. Per rappresentare sul pannello un video si è inserito all'interno della Canvas un elemento "Raw Image" tramite il percorso: Create→UI→Raw Image. Dopo averla posizionata in modo opportuno dentro la Canvas si è aggiunto ad essa il componente "Video Player" tramite il pulsante "Add Component" presente nell'Inspector. Dopodiché si è creato uno specifico script ed aggiunto anch'esso alla Raw image.

Di seguito si riporta lo script utilizzato, chiamato "StreamVideos".

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;
using UnityEngine.UI;
using UnityEngine.Video;

public class StreamVideos : MonoBehaviour
{
    public RawImage rawImage;
    public VideoPlayer videoPlayer;
    public AudioSource audioSource;
    void Start ()
    {
        StartCoroutine(PlayVideo());
    }
    IEnumerator PlayVideo()
    {
        videoPlayer.Prepare();
        WaitForSeconds waitForSeconds = new WaitForSeconds(6);
        while (!videoPlayer.isPrepared)
        {
            yield return waitForSeconds;
            break;
        }
        rawImage.texture = videoPlayer.texture;
        videoPlayer.Play();
        audioSource.Play();
    }
}
```

Successivamente si sono andati a impostare i vari parametri dei componenti aggiunti nell'Inspector della Raw Image, ovvero il Video Player e lo script StreamVideos. Di seguito si viene riportata un'immagine con i settaggi impostati. Nel caso in esame non è stata aggiunta nessuna fonte audio poiché non ritenuto necessario.

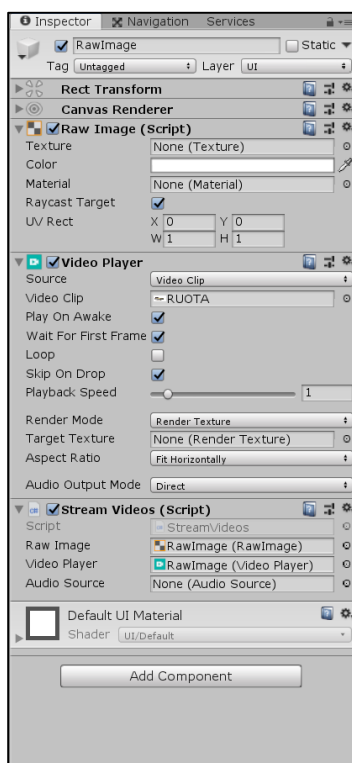


Figura 103. Esempio di settaggio di un video all'interno della Canvas.

L'ultimo step nella costruzione della scena principale è stato quello di inserire i comandi che permettessero all'utente, mediante l'utilizzo dei controller di cliccare sui pulsanti e selezionare la scena desiderata. In questo caso si è scaricato il prefabbricato opportuno dall'Asset Store disponibile direttamente all'interno del software.

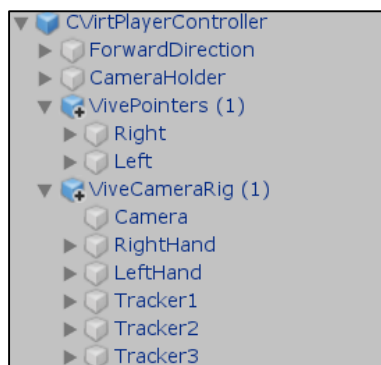


Figura 104. Componenti del controller.



Figura 105. Risultato finale del pannello di selezione della scena.

Come si può vedere dall'immagine sopra riportata, l'utente per mezzo dell'interfaccia grafica può selezionare da quale piano dell'edificio effettuare l'esodo. In alternativa, per ciascun piano, selezionando l'icona "Pathfinder" viene mostrata a video la simulazione di esodo in riferimento agli occupanti di un determinato piano. Nella barra laterale sinistra sono presenti altre due modalità. La prima, in alto, consiste in un'esplorazione libera dell'edificio, con lo scopo di far prendere confidenza con i dispositivi di movimento all'utente che sta utilizzando per la prima volta l'applicazione. La seconda, in basso, propone l'esperienza d'uso di una progettazione della segnaletica luminescente alternativa a quella standard, ovvero quella a pavimento.

9.6.4 Sviluppo delle scene di esodo

L'applicativo si propone di testare l'efficienza del sistema di esodo durante un incendio in ogni locale dell'edificio preso in esame. Al fine di soddisfare tale esigenza sono state realizzate diverse scene tante quanti sono i piani dell'edificio. Ciascuna di esse presenta caratteristiche del tutto uguali alle altre in merito agli oggetti modellati ed inseriti all'interno del modello, con l'unica differenza che in ogni scena l'utente si trova a dover affrontare l'esodo partendo da uno specifico livello del fabbricato. Nello specifico si sono perciò realizzate 5 scene differenti in funzione del piano di riferimento come segue:

- auditorium;
- piano terra;
- piano primo;
- piano secondo;
- piano terzo.

Di seguito si rappresentano in breve le caratteristiche di una delle scene sopra citate in riferimento ad un piano tipo.

Visualizzazione del tempo trascorso durante l'esodo

Al fine avere a disposizione un tempo necessario all'utente per raggiungere l'esterno della struttura si è realizzato un opportuno script che permettesse di visualizzare all'interno del visore il tempo trascorso all'interno del fabbricato.

Si è quindi creata una "Canvas" dentro la quale è stato inserito un testo mediante il percorso: Create→UI→Text. La "Canvas" ed il relativo testo sono stati creati all'interno della "Camera (eye)", inoltre nell'Inspector della Canvas sono stati settati i parametri come segue: in "Render Mode" è stata selezionata la modalità *Screen space Camera* così da poter visualizzare il testo all'interno del visore; come "Render Camera" si è impostata la Camera (eye) ed in "Plane Distance" si è fissato un valore pari a 1,2 che sta a significare che il testo starà sempre davanti alla camera ad una distanza di 1,20 m.

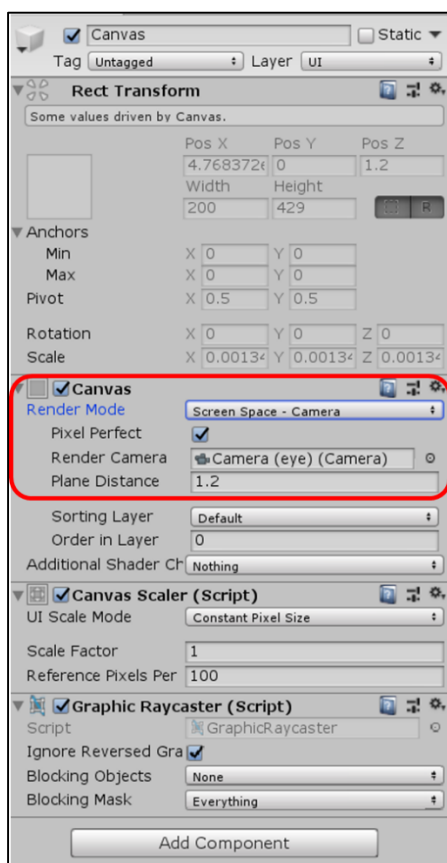


Figura 106. Settaggio della Canvas.

Dopodiché si è creato lo script che permettesse al testo di fornire in tempo reale il tempo durante la simulazione. Lo script opportunamente compilato è stato poi inserito all'interno

dell'Inspector della Camera (eye). Dentro al quale si è selezionato il testo di riferimento, selezionando il “Timer Text” presente nella Canvas.

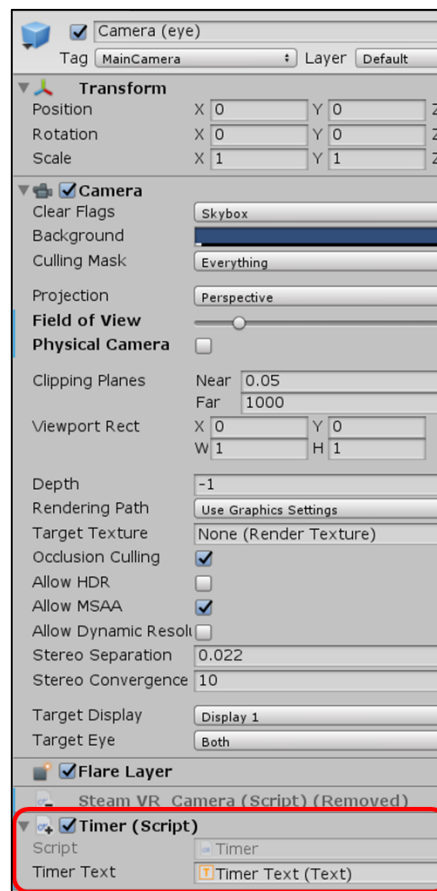


Figura 107. Inserimento dello script all'interno della camera.

Script per la visualizzazione del tempo all'interno del visore:

using System.Collections;

using UnityEngine;

using UnityEngine.UI;

```
public class Timer : MonoBehaviour
{
    public Text timerText;
    private float startTime;
    void Start ()
    {
        startTime = Time.time;
    }
    // Update is called once per frame
```

```

void Update ()
{
    float t = Time.time - startTime;

    string minutes = ((int) t / 60).ToString();
    string seconds = (t % 60).ToString("f2");
    timerText.text = minutes + ":" + seconds;
}
}

```

Animazione per apertura delle porte

È stata inoltre assegnata un'animazione alle porte in modo tale che quando l'utente si avvicina ad esse queste sono in grado di aprirsi nel senso dell'esodo. Per fare interagire le porte con l'utente è stato assegnato ad esse un "Box Collider", dopodiché all'interno dell'Inspector si è spuntata la voce "Is Trigger". Lo step successivo è stato quello di creare un'animazione per la porta; per far ciò occorre cliccare sulla porta da animare, poi in "Window" nella barra superiore e "Animation".

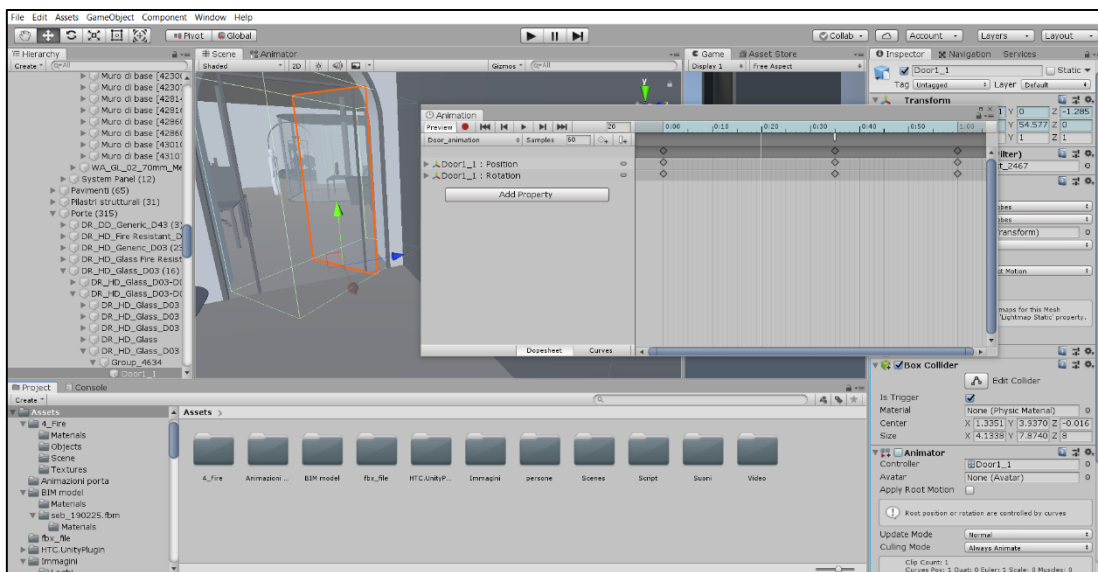


Figura 108. Creazione dell'animazione per una porta.

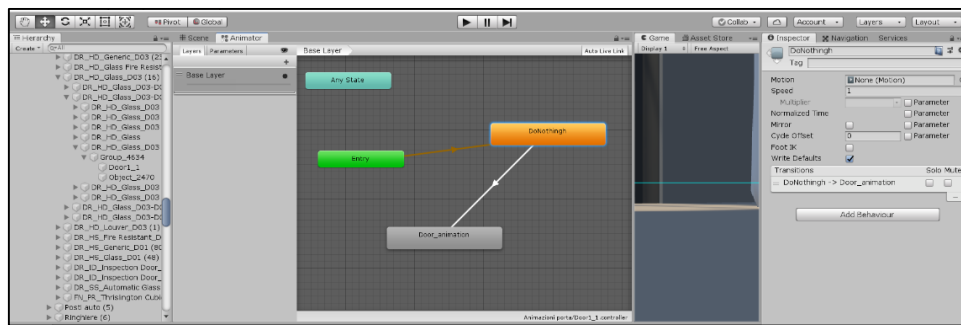


Figura 109. Assegnazione dell'animazione alla porta.

In ultima fase è stato assegnato lo script all'oggetto porta che permette alla porta di effettuare l'animazione di apertura nel momento in cui l'utente "collide" nel box collider della porta.

Di seguito viene riportato il testo dello script:

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;

public class DoorScript : MonoBehaviour
{
    Animator anim;
    // Use this for initialization
    void Start()
    {
        anim = GetComponent<Animator>();
    }
    // Update is called once per frame
    void Update()
    {
    }
    void OnTriggerEnter(Collider other)
    {
        anim.SetTrigger("OpenDoor");
    }
    void OnTriggerExit(Collider other)
    {
        anim.enabled = true;
    }
}
```



```

void pauseAnimationEvent()
{
    anim.enabled = false;
}
}

```

Inserimento dei fumi e modellazione dello scenario di incendio

Fumi

Dopo alcune ricerche si è riscontrato come in nessun modo sia possibile importare i risultati di output dei maggiori software di simulazione di incendio all'interno di Unity. Questo limite è stato risolto andando ad introdurre dei fumi fittizi creati direttamente nel programma. Per ricreare uno scenario di incendio più verosimile è stato inserito e successivamente modellato un prefabbricato per la rappresentazione dei fumi. Esso è stato posizionato per ogni livello a circa 2 metri di altezza in modo tale da ridurre la visibilità durante la fase di evacuazione. In particolare è stata impostata una geometria rettangolare delle stesse dimensioni della manica dell'edificio in cui l'utente inizia l'esodo. In questo modo si è ottenuto uno strato di fumo omogeneo per tutto il piano di riferimento.

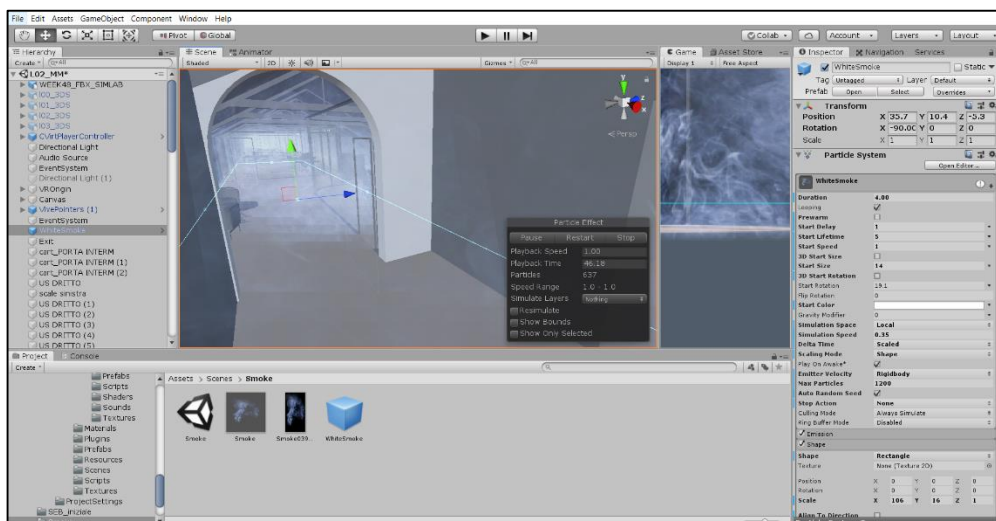


Figura 110. Inserimento dei fumi all'interno della scena.

Incendio

Si è inoltre inserito un prefabbricato rappresentante un focolaio in prossimità di una scrivania al piano terzo. In questo caso l'oggetto stato scaricato dall'Asset Store disponibile all'interno del software. Il posizionamento della fonte di innesco, insieme allo sviluppo dei fumi e l'emissione del suono dell'allarme antincendio, svolge la funzione di ricreare nel modo più

Importazione della simulazione di esodo

Questo step consiste nell'inserimento degli output delle simulazioni di esodo precedentemente eseguite mediante il software MassMotion all'interno dell'applicazione. Ciò permette di immergere l'utente all'interno di un vero e proprio scenario di esodo, in cui vi sono altri occupanti in cerca di una via di fuga. L'applicazione quindi non è solo fine a se stessa e alla sola esplorazione del modello, bensì la valutazione dell'efficienza del sistema di esodo assume un carattere significativo. Dalle ricerche eseguite è emerso come quasi nessun programma di simulazione dell'esodo risulti interoperabile con software di altri ambiti. Tuttavia si è riscontrato che MassMotion contempla l'esportazione dei risultati in formato Alembic (.abc). Quest'ultimo è un formato di dati che consente di salvare la geometria e i dati di animazione. Occorre inoltre evidenziare che le esportazioni da MassMotion tramite il formato .abc attualmente non includono la geometria della scena (pavimenti, muri, ecc.), ma solamente le animazioni degli occupanti. Di seguito si riportano le fasi procedurali al fine di inserire gli output all'interno dell'applicazione.

L'implementazione della simulazione all'interno di Unity prevede come primo step quello di esportare l'output da MassMotion.

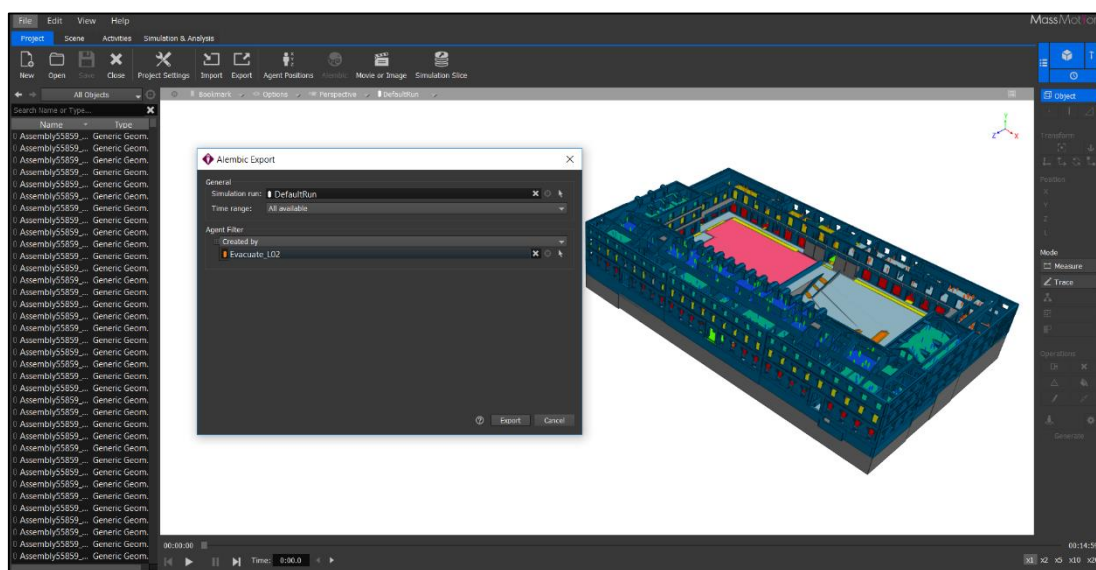


Figura 113. Esportazione del file alembic da MassMotion.

L'esportazione può essere svolta in riferimento a tutti gli occupanti della simulazione oppure esportando solo alcuni di essi, in funzione dell'"Evacuate" che li ha generati. Nel caso in esame si è preferito esportare gli occupanti in modo separato per ogni livello in modo da poter lavorare con file più leggeri in termini di megabyte.

Una volta ottenuti i file alembic sono stati importati in 3dsMax per poi essere salvati ed importati all'interno di Unity. Questo passaggio risulta essere obbligatorio, in quanto nel caso

in cui si importino direttamente i file in formato .abc all'interno di Unity, questi non verranno letti. Di seguito si riporta il risultato finale dell'importazione, con le sagome degli occupanti ubicate in ciascun livello dell'edificio.

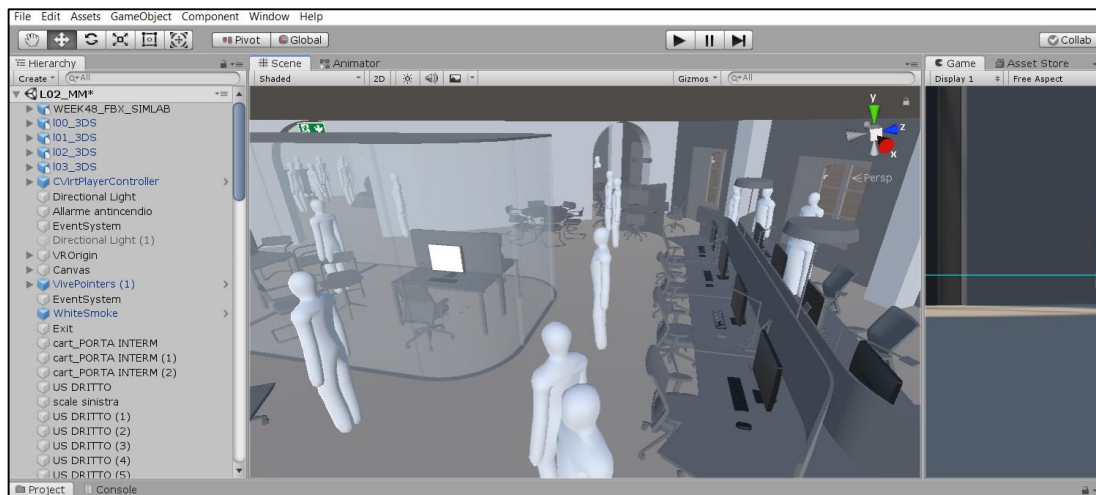


Figura 114. Importazione della simulazione di esodo in Unity.

Creazione dell'applicazione

L'ultima fase del processo è stata quella di creare la vera e propria applicazione, ovvero un file eseguibile col fine di rendere il lavoro disponibile e condivisibile. All'interno del menu della barra superiore, seguendo il percorso File→Build Settings, Unity fornisce diverse opzioni di creazione dell'applicativo, in funzione della piattaforma di destinazione. Tra esse vi sono ad esempio Pc, Smartphones Android o Apple, piattaforme Web, ecc.

Nel caso oggetto di studio si è creata un'applicazione selezionando la voce "PC, Mac & Linux Standalone". Sotto la voce "Scene In Build" occorre selezionare tutte le scene che si vogliono caricare all'interno dell'applicativo. Dopodiché l'applicazione è pronta per essere creata tramite il comando "Build".

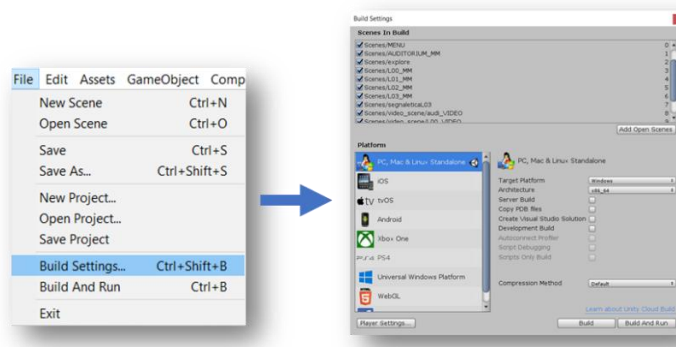


Figura 115. Creazione dell'applicazione.

Di seguito si riportano alcune immagini significative dell'applicazione creata.



Figura 116. Selezione della scena dal menu principale.



Figura 117. Esodo dal piano terzo.



Figura 118. Esodo dal piano secondo.

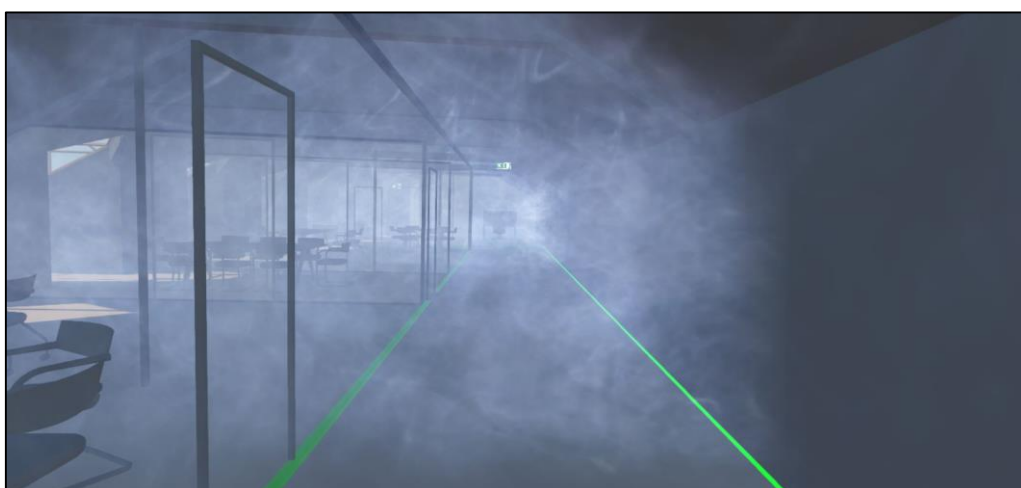


Figura 119. Test della segnaletica luminescente a pavimento.



Figura 120. Test della segnaletica luminescente posta perimetralmente alle porte di uscita.

Di seguito si riportano i QR code relativi ad alcune scene significative dell'applicazione realizzata.



Esodo dal piano terzo: uffici amministrativi.



Esodo dal piano secondo: uffici open-space.



Test della segnaletica luminescente a pavimento.

CAPITOLO 10

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il lavoro di tesi esposto si è posto l'obiettivo di trattare alcune delle dinamiche legate agli strumenti di supporto alla Fire Safety Engineering. L'elaborato ha affrontato più ambiti correlati tra loro, quali la salvaguardia della vita, l'inclusione, la modellazione delle simulazioni di esodo, ed infine proponendo l'utilizzo di strumenti innovativi di realtà virtuale applicati ai temi oggetto di studio. Un ruolo fondamentale è stato ricoperto dalla metodologia BIM, senza di essa infatti, non si sarebbero potuti raggiungere i risultati ottenuti nel lavoro di tesi. I grandi vantaggi riguardano la possibilità di poter importare diverse informazioni, non caratterizzate soltanto da aspetti qualitativi e puramente geometrici, ma bensì di poter attribuire a ciascun elemento la propria funzione (es. scala, pavimento, porta) già in una fase precedente a quella di modellazione con i software di esodo. Una criticità riscontrata riguarda il livello di interoperabilità, infatti, il formato IFC risulta ancora di difficile impiego per la maggior parte degli attuali software del settore.

Simulazioni di esodo

È emerso come gli strumenti di simulazione di esodo debbano necessariamente essere impiegati in ogni fase della progettazione, in quanto risultano efficaci ed al tempo stesso molto vincolanti nei confronti del progetto. Essi, infatti, restituiscono immediatamente al progettista un feedback sull'efficienza delle misure adottate.

Il progresso delle tecniche di modellazione di evacuazione appare evidente confrontando le loro capacità nel corso degli anni. Tuttavia, nel lavoro svolto, si sono riscontrati alcuni limiti. Ad esempio, negli attuali modelli, la velocità di movimento è influenzata principalmente dall'interazione con altri occupanti e con l'ambiente circostante, ma molto raramente vengono considerate variabili altresì significative come la percezione del rischio, lo sforzo fisico o la presenza dei prodotti della combustione e del fumo. Ad oggi i dati disponibili sulle

caratteristiche decisionali degli individui sono molto limitati. Attualmente i software gestiscono questi comportamenti in funzione del percorso più breve o più rapido. Tuttavia in futuro occorrerà implementare altre variabili, una fra tutte la possibilità di permettere all'edificio di fornire informazioni dinamiche agli occupanti. Un esempio è rappresentato dai sistemi di segnaletica luminescente ed i sistemi acustici. Altro elemento emerso durante la modellazione è legato al fatto che vi è la necessità di impartire un maggiore carattere inclusivo verso le disabilità. Infatti una corretta modellazione non può prescindere dal salvaguardare l'intera popolazione.

Realtà Virtuale

Queste tecnologie permettono ai progettisti di immergersi e cogliere eventuali criticità del modello che altrimenti non sarebbero emerse. La volontà di questo lavoro di tesi è quella fornire uno strumento alternativo e più completo rispetto a quelli attualmente disponibili, ai fini di immergere l'utente (il progettista ed il validatore) all'interno della simulazione stessa. Durante lo sviluppo dell'applicazione si sono manifestate diverse criticità, legate al fatto che questi software nascono principalmente per scopi ludici. Uno dei maggiori problemi riscontrati sta nel fatto che attualmente non vi è alcuna interoperabilità tra Unity3D ed i software di modellazione dell'incendio, perciò risulta ad oggi impossibile importare i risultati delle simulazioni.

Sviluppi futuri

Uno sviluppo futuro stimolante ed al tempo stesso attuale potrebbe consistere, sulla base dell'applicativo creato, sviluppare dei test su un campione di utenti che immersi nel modello dovranno raggiungere l'esterno dell'edificio. Potrebbe essere interessante ad esempio, monitorare gli aspetti psicofisici, come pressione e battito cardiaco, analizzando gli effetti ed i comportamenti in caso di emergenza. Altro sviluppo di notevole interesse potrebbe essere quello di fornire un'applicazione indirizzata ai dipendenti della struttura con l'obiettivo di educarli ed addestrarli all'esodo, creando una modalità alternativa alle reali prove di evacuazione. Un'altra possibilità analizzata nella tesi, che potrebbe essere approfondita riguarda la possibilità di consentire al progettista di progettare in "real time" il posizionamento della segnaletica luminescente e al tempo stesso la distribuzione interna degli ambienti. Un applicativo di questo tipo potrebbe essere fondamentale durante ogni step di progettazione, al fine di validare il progetto stesso dal punto di vista dell'antincendio e al tempo stesso fornire dei feedback agli altri attori del processo.

Riferimenti bibliografici

- [1] Usi innovativi degli strumenti di simulazione dell'esodo (2016).
- [2] Decreto Ministeriale 3 agosto 2015; Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139;
- [3] Decreto del Presidente della Repubblica del 1 agosto 2011, n. 151; Regolamento recante semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione degli incendi;
- [4] ISO/DTR 16738 – Fire-safety engineering - Technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people;
- [5] <https://www.fse-italia.eu>;
- [6] The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, NFPA, 4th ed.;
- [7] Fire Protection Handbook, NFPA, 20th ed;
- [8] M. Malizia, Il Codice di prevenzione incendi;
- [9] <http://www.vigilfuoco.it/sitiVVF/ascolipiceno/viewPage.aspx?s=85&p=4040> ;
- [10] Gissi (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;
- [11] Evacuation Modeling Trends 1st ed. 2016 Edition, Cuesta, Abreu, Alvear, Springer
- [12] Cascarino - "Introduzione alla prevenzione incendi", 1986;
- [13] www.ingegneri.info;
- [14] Villani - Tempi di evacuazione e modelli automatici di simulazione del movimento delle persone, September 2007;
- [15] NFPA - Emergency Evacuation Planning Guide for People with Disabilities (2016);
- [16] IMO - Guidelines for evacuation analysis for new and existing passenger ships (2007);
- [17] Hunt - Simulating hospital evacuation (2016);
- [18] Peacock, Kuligowski, Averill - Pedestrian and Evacuation Dynamics (2010);
- [19] Alonso, Ronchi - The simulation of assisted evacuation in hospitals (2016);

-
- [20] Thunderhead Engineering, Pathfinder - Technical Reference (2018);
- [21] Bernardini - Il processo di evacuazione nel Codice di Prevenzione Incendi: riflessioni sul tempo di pre-movimento (2016);
- [22] A. Hunt, E. R. Galea, P. J. Lawrence, and others, - An analysis of the performance of trained staff using movement assist devices to evacuate the non-ambulant (2012);
- [23] Tinaburri, Ponziani, Ricci – Agent based modelling of meta- communication with assisted people during emergency egress (2018);
- [24] Boyce, K. E., Shields, T. J. and Silcock, G.W.H. - Toward the Characterization of Building Occupancies for Fire Safety Engineering: Capabilities of Disabled People Moving Horizontally and on an Incline (1999);
- [25] BS PD 7974-6 (2004);
- [26] Fruin, J. J. - Pedestrian Planning and Design (1987);
- [27] Xiaoping, Tingkuan, Mengting - Modeling crowd evacuation of a building based of a seven methodological approaches (2007);
- [28] Vermuyeten, Belien, De Boeck, Reniers, Wauters - A review of optimisation models for pedestrian evacuation and design problems (2016);
- [29] Marsella, Sciarretta - La valutazione della sicurezza delle vie di esodo dal singolo edificio alla scala urbana;
- [30] Gissi - Soluzioni progettuali alternative per l'esodo, procedure analitiche di base e flessibilità progettuale;
- [31] Ronchi - A research roadmap for evacuation models used in fire safety engineering (2016);
- [32] Marsella, Sciarretta - Usi innovative degli strumenti di simulazione dell'esodo (2016);
- [33] Dossier esodo – Il ruolo delle vie di esodo nella Prevenzione Incendi.
- [34] Caira, Mangione, Bontempi – Comportamento umano in caso di incendio: modelli di evacuazione.
- [35] Kuligowski, Peacock, Hoskins – A review of building evacuation models, 2nd edition;
- [36] Zanut, Ronchi, Così - “Fuori tutti, c'è un incendio a scuola” ...ma è solo una simulazione virtuale;
- [37] <https://docs.unity3d.com/Manual/index.html>.