

POLITECNICO DI TORINO



Dipartimento Energia Galileo Ferraris
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

**IL COLLAUDO DEGLI IMPIANTI ELETTRICI E
SPECIALI NELLE OPERE PUBBLICHE:
ANALISI ED APPLICAZIONE AGLI IMPIANTI
IRAI E DPAS DEL PARCHEGGIO IPOGEO DI
PIAZZA BENGASI**

Relatore:
Prof. Paolo Di Leo

Candidato:
Simone Ausilio

Anno accademico 2025-2026

*Alla fatica e dedizione di mio padre,
mio più grande esempio di vita.*

*Alla positività e ai sacrifici di mia madre,
presenza costante in tutti questi anni.*

*A mia nonna Marina,
che dall'alto veglia su di me,
motivando il mio desiderio di eccellere.*

SOMMARIO

L'elaborato tratta il collaudo degli impianti elettrici nelle opere pubbliche, ricostruendone il quadro normativo (D.lgs. 36/2023, D.M. 37/2008, norme CEI e norme UNI), le procedure di verifica e la relativa documentazione, sviluppandone l'applicazione agli impianti di rivelazione e segnalazione allarme incendio (IRAI).

La trattazione si inquadra nell'integrazione tra approccio prescrittivo e prestazionale del D.M. 03/08/2015 (Codice di Prevenzione Incendi) e della RTV V.6, impiegando la metodologia della *Fire Safety Engineering* (FSE) per la determinazione dei tempi ASET e RSET a garanzia dell'esodo. L'analisi confluisce nel caso studio dell'autorimessa interrata di Piazza Bengasi a Torino, dove la prescrizione del Comando dei Vigili del Fuoco ha imposto, in luogo dell'IRAI tradizionale, l'adozione di un sistema dinamico e adattivo di gestione dell'esodo (DPAS). Vengono analizzate le motivazioni tecniche della scelta progettuale, nonché le specifiche simulazioni e le prove di collaudo funzionale del sistema.

ABSTRACT

This thesis addresses the commissioning and acceptance testing of electrical installations in public works, detailing the regulatory framework (Legislative Decree 36/2023, Ministerial Decree 37/2008, CEI/UNI standards) and compliance procedures, with a focus on Fire Detection and Alarm Systems (IRAI).

The research integrates the prescriptive and performance-based approaches of the Italian Fire Prevention Code (Ministerial Decree 03/08/2015) and RTV V.6, employing Fire Safety Engineering (FSE) to determine ASET and RSET values to ensure safe evacuation. The analysis focuses on the Piazza Bengasi underground parking facility (Turin), where local fire safety mandates required the adoption of an adaptive Dynamic Path Allocation System (DPAS) over traditional IRAI. The thesis investigates the technical rationale for this design, outlining the simulation models and functional testing protocols necessary to validate the system's operational efficiency.

INDICE

SOMMARIO	i
ABSTRACT.....	i
INDICE DELLE FIGURE.....	ix
INDICE DELLE TABELLE.....	xi
GLOSSARIO	xiii
INTRODUZIONE	1
1 - Regola d'arte e quadro normativo degli appalti pubblici.....	3
1.1 - Fondamento giuridico di regola d'arte.....	3
1.2.1 - Figure di Gestione e Controllo.....	4
1.2.2 - Figure istituzionali e specialistiche.....	9
1.3 - Iter procedurale negli appalti pubblici	9
1.4.1 - Contenuti del Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica	11
1.4.2 - Contenuti Tecnici del Progetto Esecutivo	12
1.4.3 - Dichiarazione di Conformità (DiCo)	14
1.4.5 - Documentazione tecnica e atti di collaudo	15
Certificazioni di sicurezza e conformità	15
Documentazione di verifica e di conformità dei componenti	16
Fascicoli per la sicurezza e manutenzione dell'opera	17
Certificato di collaudo finale.....	17
2 - Metodologie di verifica, tempistiche e procedure di collaudo	19
2.1 - Definizione e finalità del collaudo nelle opere pubbliche	19
2.2 - Codice degli Appalti Pubblici: D.lgs. 36/2023	20
2.3.1 - Classificazione e tipologie di collaudo	22
2.3.2 - Classificazione temporale delle prove di collaudo	24
2.4 - Metodologie di verifica e prove strumentali.....	25
3 - Impianti di rivelazione e allarme incendio (IRAI)	27

3.1 - Sistemi IRAI e le loro finalità	27
3.2 - Architettura e Componenti del Sistema IRAI	28
3.3 - Architettura dei sistemi IRAI: tradizionale ed indirizzabile	32
3.4 - Classificazione dei dispositivi di rivelazione d'incendio automatici	33
4 - Fire Safety Engineering (FSE) e D.M. 03/08/2015	39
4.1 - Indicazioni generali per la progettazione di impianti antincendio	40
4.2.1 - Valutazione del Rischio	41
4.2.2 - Soluzioni progettuali ed integrazione con le normative	42
4.2.3 - Calcolo dei profili di rischio R_{vita} , R_{beni} ed $R_{ambiente}$	43
4.3 - Assegnazione dei livelli di prestazione per reazione al fuoco	45
4.4.1 - Assegnazione dei livelli di prestazione per resistenza al fuoco	46
4.4.2 - Simbologia e classificazione delle prestazioni di resistenza al fuoco	49
4.4.3 - Classi temporali e gerarchia prestazionale	50
4.5 - Calcolo del carico di incendio specifico di progetto $q_{f,d}$	51
4.6.1 - La compartimentazione	53
4.6.2 - Chiusura dei varchi e continuità della compartimentazione	57
4.7 - Controllo dei fumi e calore ed inversione flussi dell'aria	58
5 - La progettazione del sistema d'esodo: criteri della RTV V.6 e gestione dinamico-adattiva	63
5.1.1 - Sistema d'esodo	63
5.1.2 - Sistemi di orientamento, segnaletica e illuminazione d'esodo	67
5.1.3 - Parametri di calcolo e requisiti per l'esodo	71
5.1.4 - Vie d'esodo ed uscite indipendenti, corridoi ciechi	73
5.1.5 - Dimensionamento e verifica di ridondanza delle vie d'esodo	75
5.2.1 - Progettazione della gestione sicurezza antincendio (GSA)	80
5.2.2 - GSA: manutenzione, registri e pianificazione dell'emergenza	82
5.3 - Controllo dell'incendio: livelli di prestazione e misure attive	84

5.4.1 - La Regola Tecnica Verticale V.6	86
5.4.2 - Applicazione delle misure antincendio della RTV V.6	89
Reazione al fuoco	89
Resistenza al fuoco	89
Compartimentazione	90
Esodo	90
Gestione sicurezza antincendio	90
Controllo dell'incendio	91
Controllo di fumi e calore	92
Metodi e scenari di incendio	92
6 - Sezione Metodi (M) del D.M. 03/08/2015	93
6.1 - Metodologia per l'ingegneria della sicurezza antincendio	93
6.2.1 - Scenari di incendio per la progettazione prestazionale	96
Fase di identificazione dei possibili scenari d'incendio	97
Selezione degli scenari d'incendio di progetto	97
Descrizione quantitativa degli scenari d'incendio di progetto	98
6.2.2 - Stima della curva RHR(t)	100
6.2.3 - Effetto dei sistemi di protezione attiva sulla curva RHR(t)	104
6.2.4 - Scenari d'incendio di progetto secondo la RTV V.6	106
6.3.1 - Il criterio per la salvaguardia della vita con la progettazione prestazionale	107
6.3.2 - Calcolo del parametro ASET	109
Metodo di calcolo avanzato	110
Metodo di calcolo semplificato	112
6.3.3 - Calcolo del parametro RSET	113
6.3.4 - Soglie di prestazione per la salvaguardia della vita	116
7 - Integrazione del sistema adattivo DPAS nell'autorimessa di Piazza Bengasi	119

7.1 - Inquadramento del caso studio reale di Piazza Bengasi.....	119
7.2.1 - Evoluzione dei sistemi SWGS: architettura adattiva DPAS	122
7.2.2 - Componenti del sistema DPAS	130
7.2.3 - Principi di funzionamento e quadro normativo del DPAS	133
7.3 - Integrazione del sistema DPAS: analisi criticità di Piazza Bengasi	135
8 - Valutazione prestazionale e validazione del sistema DPAS di Piazza Bengasi	145
8.1 - Sistemi di sicurezza antincendio nel caso studio	145
8.2 - Criteri di accettabilità della strategia d'esodo e d'intervento	149
Criteri di accettabilità oggettiva della strategia d'esodo e d'intervento	151
8.3 - Caratterizzazione del combustibile, dominio di calcolo e proprietà dei materiali	152
Caratterizzazione chimica del combustibile equivalente.....	152
Discretizzazione della griglia di calcolo (Mesh)	153
Proprietà termo-fisiche dei materiali e scambio termico.....	153
8.4.1 - Scenari d'incendio di progetto: individuazione e caratterizzazione	154
Analisi quantitativa e curva $RHR(t)$ di progetto.....	156
8.4.2 - Scenari d'esodo di progetto: individuazione e caratterizzazione.....	157
8.4.3 - Parametri caratterizzanti dei quattro scenari d'incendio	160
8.5.1 - Analisi prestazionale e cinematica d'esodo dello scenario L2-P2.....	163
Verifica criterio $ASET > RSET$ e margini di sicurezza	164
Analisi dei criteri di tenibilità e dell'azione della ventilazione (SEFFC)	164
Evoluzione dinamica dell'esodo e della visibilità nei plot temporali	165
Condizioni di tenibilità ambientale a lungo termine per le squadre di soccorso	168
Verifica squadre antincendio interne (non professionali)	170
8.5.2 - Codici di calcolo utilizzati e sensitività della mesh	171
8.6 - Attività di collaudo e prove funzionali sul DPAS	173

Verifiche funzionali e prove prestazionali in cantiere.....	174
Requisiti documentali e validazione prestazionale dell'impianto DPAS	176
CONCLUSIONI	179
RINGRAZIAMENTI.....	181
RIFERIMENTI NORMATIVI E LEGISLATIVI	183
Disposizioni Legislative (Leggi, Decreti, D.P.R.).....	183
Norme Tecniche e Specifiche (UNI, CEI, ISO, ZVEI)	183
SITOGRAFIA.....	187

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Iter progettuale negli appalti pubblici	11
Figura 2: Architettura e componenti principali di un sistema IRAI	29
Figura 3: Diagramma funzionale di un impianto IRAI.....	32
Figura 4: Rivelatore ottico puntiforme	34
Figura 5: Schema funzionale di un rivelatore ottico-lineare.....	35
Figura 6: Sistema ad aspirazione (ASD).....	35
Figura 7: Schema funzionale di un sistema ad aspirazione (ASD).....	36
Figura 8: Rivelatore di calore termovelocimetrico	36
Figura 9: Rivelatore di fiamma	37
Figura 10: Termocamere per aree di ricarica veicoli elettrici	38
Figura 11: Rivelatore di gas e vapori	38
Figura 12: Iter per la progettazione di impianti antincendio	41
Figura 13: Esempi di segnali di indicazione per le porte tagliafuoco.....	58
Figura 14: Classificazione delle vie d'esodo	66
Figura 15: Esempi di segnali posizionati lungo il percorso d'esodo	67
Figura 16: Esempio di segnale per indicare un'uscita finale	68
Figura 17: Principio di funzionamento di un segnale luminoso per sistema DPAS	69
Figura 18: Esempio di dispositivo di segnalazione luminosa dinamica a soffitto	69
Figura 19: Esempio di pittogramma multi-stato a parete	70
Figura 20: Esempio di segnalatore luminoso dinamico a pavimento	70
Figura 21: Esempi di vie d'esodo orizzontali ed uscite indipendenti	74
Figura 22: Esempio di schema di convergenza dei flussi d'esodo	80
Figura 23: Andamento delle curve RHR(t).....	100
Figura 24: Rappresentazione grafica del criterio $ASET > RSET$	108
Figura 25: Planimetria e settori del Piano Primo Interrato (Livello -1).....	120
Figura 26: Planimetria e settori del Piano secondo Interrato (Livello -2)	121
Figura 27: Classificazione sistemi di orientamento all'esodo – ZVEI 33013.....	125
Figura 28: Caso studio riportato nella linea guida ZVEI 33013.....	126
Figura 29: Comportamento del sistema passivo	127
Figura 30: Comportamento del sistema attivo	127
Figura 31: Comportamento del sistema dinamico	128
Figura 32: Comportamento del sistema adattivo - istante t_1	129

Figura 33: Comportamento del sistema adattivo - istante t_2	129
Figura 34: Mappa cromatica di attivazione del sistema SEFFC	140
Figura 35: Dettaglio planimetrico dell'area di ricarica EV al Piano Primo.....	142
Figura 36: Dettaglio planimetrico dei filtri a prova di fumo.....	143
Figura 37: Planimetria livello -1	145
Figura 38 : Planimetria livello -2	146
Figura 39: Suddivisione dei due livelli nelle 3 zone di rivelazione A, B, C	147
Figura 40: Planimetria livello -2 con evidenziazione dei portoni tagliafuoco	148
Figura 41: Posizione in pianta delle uscite di sicurezza.....	149
Figura 42: Localizzazione planimetrica dei focolai d'incendio di progetto	154
Figura 43: Curva RHR di progetto ridotta	156
Figura 44: Cronologia degli eventi emergenziali	157
Figura 45: Cronologia dell'esodo.....	158
Figura 46: Plot di visibilità scenario d'incendio L2-P2 - $t = 272s$	165
Figura 47: Analisi scenario L2-P2 - $t = 70s, t = 111s$ e $t = 130s$	167
Figura 48: Analisi dello scenario L2-P2 - $t = 190s$ e $t = RSET = 235s$	168
Figura 49: Analisi dello scenario d'incendio L2-P2 - $t = RSET2$ e $t = RSET$	169
Figura 50: Analisi dello scenario L2-P2 - $t = ASET, t = 2 \cdot RSET$ e $t = 954s$	169
Figura 51: Analisi dello scenario L2-P2 - $t = tend$ e curva $RHR(t)$	170
Figura 52: Plot di visibilità per lo scenario d'incendio L2-P2 - $t = 660s$	171
Figura 53: Analisi di sensitività della mesh	173

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Determinazione delle caratteristiche degli occupanti δ_{occ}	43
Tabella 2: Determinazione della velocità caratteristica di crescita dell'incendio δ_a	44
Tabella 3: Calcolo del profilo di rischio R_{vita}	44
Tabella 4: Determinazione del profilo di rischio R_{beni}	45
Tabella 5.1-5.2: Livelli di prestazione e criteri per la reazione al fuoco	46
Tabella 6: Livelli di prestazione per altri locali dell'attività.....	46
Tabella 7: Livelli di prestazione per la resistenza al fuoco	47
Tabella 8: Parametri per la definizione del fattore δ_{q1}	52
Tabella 9: Parametri per la definizione del fattore δ_{q2}	52
Tabella 10: Parametri per la definizione del fattore δ_{ni}	52
Tabella 11: Livelli di prestazione per la compartimentazione	53
Tabella 12: Attribuzione dei livelli di prestazione della compartimentazione.....	54
Tabella 13: Determinazione massima superficie lorda dei compartimenti.....	56
Tabella 14: Scelta delle prestazioni degli elementi di compartimentazione	57
Tabella 15: Livelli di prestazione del controllo dei fumi e calore	59
Tabella 16: Livelli di prestazione del controllo fumi e calore	59
Tabella 17: Tipologie di aperture di smaltimento	60
Tabella 18: Calcolo dell'affollamento massimo	72
Tabella 19: Soglie geometriche per vie d'esodo indipendenti	72
Tabella 20: Requisiti di massimo affollamento e lunghezza per i corridoi ciechi	75
Tabella 21: Valori della massima lunghezza d'esodo L_{es} in funzione di R_{vita}	76
Tabella 22: Larghezze unitarie per vie d'esodo orizzontali	77
Tabella 23: Larghezze minime per vie d'esodo orizzontali	77
Tabella 24: Criteri per la larghezza minima delle vie d'esodo verticali	78
Tabella 25: Larghezze unitarie per vie d'esodo verticali	79
Tabella 26: Norme e TS per impianti e attrezzature antincendio.....	83
Tabella 27: Livelli di prestazione del controllo dell'incendio	84
Tabella 28: Livelli di prestazione per controllo dell'incendio	85
Tabella 29: Classi di resistenza al fuoco per autorimesse non isolate - RTV V.6	89
Tabella 30: Caratteristiche della comunicazione tra compartimenti - RTV V.6	90
Tabella 31: Livelli di prestazione per il controllo dell'incendio - RTV V.6	91
Tabella 32: Parametri progettuali minimi per la rete idranti - RTV V.6	91

Tabella 33: Esempi di soglie di prestazione - metodo di calcolo avanzato	117
Tabella 34: Esempi di soglie di prestazione - metodo di calcolo semplificato	117
Tabella 35: Misure antincendio e livelli di prestazione di Piazza Bengasi	119
Tabella 36: Valori soglia per le condizioni ambientali D.M. 18/10/2019	150
Tabella 37: Parametri chimico-fisici del combustibile equivalente	153
Tabella 38: Proprietà termo-fisiche dei materiali strutturali	154
Tabella 39: Criteri di scelta per gli scenari di incendio	155
Tabella 40: Scenari d'incendio.....	155
Tabella 41: Scenari d'esodo	160
Tabella 42: Parametri caratterizzanti dei quattro scenari d'incendio	161
Tabella 43: Verifica del criterio $ASET > RSET$ per lo scenario L2-P2	164

GLOSSARIO

- **AFAC:** *Australian Fire Authorities Council*
- **APVR:** Autorespiratori a protezione delle vie respiratorie
- **ASD:** *Aspirating Smoke Detection*
- **ASET:** *Available Safe Egress Time*
- **CERT.IMP:** Certificazione di rispondenza e di corretto funzionamento dell'impianto
- **CFAST:** *Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport*
- **CFD:** *Computational Fluid Dynamics*
- **CIE:** *Control and Indicating Equipment*
- **CNVVF:** Corpo Nazionale Vigili del Fuoco
- **CO (CC):** Organo di collaudo o collaudatore (si precisa che la sigla comunemente utilizzata per il collaudatore è CO, tuttavia, nell'ambito degli appalti pubblici, può essere utilizzata anche la sigla “CC”, Commissione di collaudo, volta a sottolineare i casi in cui le operazioni di verifica siano affidate ad un collegio di collaudatori anziché ad una singola figura, in relazione alla complessità tecnica dell'intervento)
- **CRE:** Certificato di Regolare Esecuzione
- **CSE:** Coordinatore per la Sicurezza
- **DICH.IMP:** Dichiarazione corretta installazione e funzionamento dell'impianto
- **DiCo:** Dichiarazione di Conformità
- **Disegni *as-built*:** Elaborati grafici che documentano l'opera nelle sue condizioni finali di realizzazione, rispecchiando le eventuali varianti introdotte in corso d'opera rispetto al progetto esecutivo
- **DL:** Direttore dei Lavori (figura diversa dall'ufficio direzione lavori)
- **DPAS:** *Dynamic Path Allocation System*
- **ESFR:** *Early Suppression Fast Response*
- **EV:** *Electric Vehicle*
- **EVAC:** *Emergency Voice Alarm Communication*

- **FDS:** *Fire Dynamics Simulator*
- **FEC:** *Fractional effective concentration*
- **FED:** *Fractional effective dose*
- **FSE:** *Fire Safety Engineering*
- **GSA:** Gestione della Sicurezza Antincendio
- **IRAI:** Impianto di Rivelazione e di Allarme Incendio
- **NFPA:** *National Fire Protection Association*
- **PFTE:** Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica
- **PSC:** Piano di Sicurezza e Coordinamento
- **PSE:** *Power Supply Equipment*
- **RHR:** *Rate of heat release*
- **RSET:** *Required Safe Egress Time*
- **RTV:** Regole Tecniche Verticali
- **RUP:** Responsabile Unico di Progetto
- **SA:** Stazione Appaltante
- **SCIA:** Segnalazione Certificata di Inizio Attività
- **SEFC:** Sistemi di Evacuazione Fumo e Calore, suddivisi in:
- **SENF:** Sistemi per l'Evacuazione Naturale di Fumo e Calore
- **SEFFC:** Sistemi per l'Evacuazione Forzata di Fumo e Calore
- **SGSA:** Sistema per la Gestione della Sicurezza Antincendio
- **SVOF:** Sistemi di Ventilazione Orizzontale Forzata
- **SWGS:** *Safety Way Guidance Systems*
- **TR:** *Technical Report*
- **TS:** *Technical Specification*

INTRODUZIONE

L'incendio rappresenta una minaccia insidiosa per le infrastrutture pubbliche, capace di compromettere in pochi minuti l'incolumità delle persone e la funzionalità stessa dell'opera, determinando spesso interruzioni del servizio dagli elevati impatti socio-economici. La gestione del rischio incendio non si limita alla sola protezione dei beni materiali e della struttura, ma si estende alla salvaguardia delle persone, con sfide progettuali che si complicano drasticamente in ambito pubblico (ospedali, scuole, uffici, infrastrutture di trasporto). In edifici caratterizzati da planimetrie complesse, metrature estese e sviluppo ipogeo, la presenza di occupanti vulnerabili impone l'adozione di strategie di evacuazione che garantiscano rapidità e ordine in qualsiasi scenario emergenziale.

In questo contesto, la sicurezza antincendio rappresenta una delle sfide progettuali di maggiore complessità tecnica. L'evoluzione normativa decisiva si è verificata con l'introduzione del D.M. 03/08/2015 e s.m.i. (Codice di Prevenzione Incendi), in quanto ha validato la transizione da una progettazione principalmente prescrittiva — basata sull'applicazione rigida di norme — a un approccio prestazionale, incentrato sulla *Fire Safety Engineering* (FSE).

Tuttavia, l'approccio ingegneristico moderno richiede un ulteriore salto di qualità. In infrastrutture pubbliche complesse, i sistemi di rivelazione e allarme incendio (IRAI) tradizionali, basati su matrici di attivazione rigide e predeterminate, si rivelano spesso inadeguati a gestire l'evoluzione dinamica e imprevedibile di un evento incidentale. È in questo scenario che nasce l'esigenza di evolvere verso sistemi di gestione dell'esodo di tipo dinamico e adattivo (DPAS), capaci di ricalibrare i percorsi d'esodo in tempo reale, in funzione dello stato di agibilità degli ambienti.

In tale contesto, anche l'attività di collaudo non può più essere considerata solamente come un atto formale di verifica di conformità elettrica, ma deve trasformarsi in un rigoroso processo di validazione funzionale. Certificare l'idoneità di un impianto antincendio adattivo significa accertare che l'interazione logica tra i diversi sistemi (rivelazione, diffusione sonora EVAC, gestione fumi e calore SEFFC, instradamento dinamico gestito dal DPAS) garantisca l'effettiva salvaguardia della vita umana in ogni possibile scenario evolutivo dell'incendio.

La presente tesi analizza tale transizione dai sistemi statici a quelli adattivi, prendendo come riferimento il caso studio dell'autorimessa interrata di Piazza Bengasi a Torino. Il lavoro si articola in una prima fase dedicata alla ricostruzione del quadro normativo e procedurale, con particolare enfasi sulle figure coinvolte e sulla documentazione necessaria per la validazione dell'opera. Successivamente, si analizza nel dettaglio il D.M. 03/08/2015 e s.m.i., ponendo particolare attenzione alla *Fire Safety Engineering* (FSE) e focalizzando il discorso sui concetti di margine di sicurezza t_{marg} , ASET ed RSET. Infine, l'elaborato confluisce nell'analisi tecnica del sistema DPAS applicato al caso studio, descrivendo le motivazioni che hanno implicato l'adozione di tale sistema adattivo, nonché le specifiche simulazioni e le prove di collaudo necessarie per garantire la conformità dell'opera alla normativa vigente.

1 - Regola d'arte e quadro normativo degli appalti pubblici

Questo capitolo introduttivo viene incentrato sul collaudo, ponendo particolare attenzione sull'iter progettuale nelle opere pubbliche, sulle figure coinvolte in tale procedura e sulla documentazione necessaria per la sua validazione; esso rappresenta l'atto finale di accertamento, volto a certificare la rispondenza tecnica e la conformità normativa dell'opera eseguita rispetto alle previsioni progettuali.

La corretta comprensione di questo scenario normativo costituisce il prerequisito fondamentale per l'attività del collaudatore, fornendo i parametri di riferimento analitici rispetto ai quali verificare sul campo la conformità dell'opera.

1.1 - Fondamento giuridico di regola d'arte

Sancito dalla Legge n. 186/1968, il principio della 'regola d'arte' costituisce il cardine dell'intero settore elettrico. Tale norma stabilisce l'obbligo di realizzare ogni installazione — inclusi i relativi materiali utilizzati, apparecchiature e macchinari — a regola d'arte, definendo una presunzione di conformità³ qualora vengano rispettate le norme tecniche del Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI)⁴. In qualità di ente istituzionale riconosciuto dallo Stato e dall'Unione Europea, il CEI ha il compito di definire i requisiti fondamentali di sicurezza, affidabilità e qualità che i sistemi elettrici devono possedere. Le norme tecniche da esso emanate, inoltre, codificano il lessico e la simbologia necessari per garantire un'interpretazione univoca del progetto e della documentazione tecnica associata.

³ **Presunzione di conformità:** è un principio che semplifica il lavoro del progettista: se l'impianto è realizzato seguendo le norme tecniche CEI, la legge lo considera automaticamente 'a regola d'arte'; in pratica, l'ingegnere è tutelato perché non deve dimostrare ogni volta che le sue scelte sono sicure, in quanto la sicurezza è garantita dal fatto che ha rispettato gli standard. Chi invece sceglie di non seguire le norme deve dimostrare lui stesso, con calcoli molto complessi, che la sua soluzione alternativa è sicura quanto (o più) di quella ufficiale.

⁴ **CEI:** è il membro italiano che fa parte degli organismi di normazione europea (CENELEC) ed internazionale (IEC). L'adozione delle sue norme assicura che il progetto sia conforme agli standard di sicurezza e qualità a livello globale, evitando difformità tecniche rispetto ai parametri internazionali.

L'evoluzione dalla Legge n. 186/1968 si è concretizzata nel D.M. 37/2008, pilastro normativo per la disciplina delle attività di installazione. Tale regolamento specifica che la dimostrazione della conformità alla regola dell'arte è responsabilità del professionista, il quale è tenuto a operare in armonia con le disposizioni legislative e le norme tecniche applicabili al sistema installato.

In riferimento al caso studio preso in esame in questa tesi, relativo al cantiere di Piazza Bengasi, l'impianto elettrico⁵ viene configurato secondo la definizione fornita dalla norma CEI 64-8, ovvero come un insieme di componenti elettricamente associati, dotati di caratteristiche coordinate e finalizzati al perseguimento di scopi specifici. Il raggiungimento della regola d'arte nell'infrastruttura in esame è dunque subordinato a una progettazione che garantisca la protezione di persone e beni e quindi la piena funzionalità del sistema in conformità all'uso previsto. Ciò implica l'impiego di prodotti che rispondano pienamente alle relative norme di prodotto e l'adozione di criteri di installazione che permettano di validare l'intero sistema attraverso le verifiche di collaudo.

1.2.1 - Figure di Gestione e Controllo

Le figure cardine presenti all'interno di un cantiere sono le seguenti:

- Responsabile Unico di Progetto (RUP);
- Direttore dei Lavori (DL);
- Organo di Collaudo (CO);
- Esecutore (o impresa esecutrice).

Ai sensi dell'Art. 15 del D.lgs. 36/2023, il RUP risulta essere la figura centrale di coordinamento dell'intero cantiere, infatti, non ha solamente una funzione amministrativa, ma agisce anche come supervisore durante l'intero processo di realizzazione degli impianti elettrici.

⁵ Si precisa che il confine dell'impianto oggetto di collaudo è delimitato a monte dal punto di consegna dell'ente distributore (o dai morsetti di uscita del sistema di generazione) e a valle dai punti di utilizzazione finale, inclusi i sistemi di protezione e sezionamento.

Nello specifico, durante la fase di collaudo, i compiti del RUP possono essere elencati nei seguenti punti:

1. **Nomina dell'Organo di Collaudo:** il RUP, entro i termini previsti dal contratto, propone o nomina il collaudatore;
2. **Supervisione delle procedure:** il RUP monitora che le operazioni di collaudo inizino entro i termini di legge — solitamente entro 30 giorni dall'ultimazione lavori — e che il DL fornisca tutta la documentazione necessaria (as-built, DiCo, verbali di prova);
3. **Approvazione degli atti:** una volta che il collaudatore emette il Certificato di collaudo, è compito del RUP sottoporlo all'approvazione della Stazione Appaltante; senza l'emissione di questo certificato, l'impresa non può ricevere il pagamento finale, né recuperare le garanzie bancarie (dette fidejussioni⁶) versate all'inizio dei lavori;
4. **Gestione delle contestazioni:** qualora in fase di collaudo emergessero difformità tecniche negli impianti elettrici (es: mancato rispetto delle normative CEI o divergenze rispetto al Capitolato Speciale), il RUP interviene per mediare tra le riserve dell'impresa e le prescrizioni del collaudatore, decidendo eventuali detrazioni economiche o ordini di ripristino⁷.

In conformità a quanto previsto dall'Art. 114 del D.lgs. 36/2023 e dell'Allegato II.14, il DL è la figura che si occupa del controllo tecnico, contabile e amministrativo dell'esecuzione dell'intera opera; il suo ruolo è fondamentale per garantire la rispondenza delle opere ai requisiti del progetto esecutivo e alle norme di sicurezza vigenti.

Durante il processo di collaudo, le sue responsabilità risultano essere le seguenti:

⁶ **Fidejussioni:** è una garanzia economica fornita da una banca o un'assicurazione, la quale serve a proteggere la Stazione Appaltante (nel caso di Piazza Bengasi è il Comune di Torino) nel caso in cui l'impresa non rispetti il contratto o faccia errori; viene svincolata in seguito all'esito positivo dei collaudi.

⁷ **Ordini di ripristino:** sono provvedimenti formali emessi per obbligare l'impresa ad eliminare difetti o errori riscontrati durante i lavori o il collaudo. In pratica, si impone all'appaltatore di rifare o modificare le parti non conformi al progetto o alle norme tecniche, assicurando così che tutto sia eseguito a regola d'arte e senza costi aggiuntivi per il Comune.

1. **Accettazione dei materiali:** il DL verifica che i componenti elettrici installati (cavi, quadri, corpi illuminanti) siano conformi alle specifiche tecniche e che siano provvisti delle certificazioni necessarie (es: marcatura CE, conformità alle norme CEI);
2. **Documentazione tecnica e contabile:** ha l'obbligo di tenere aggiornato il giornale dei lavori⁸ e di produrre la contabilità finale. Ai fini del collaudo, il DL a deve consegnare all'organo di collaudo i disegni *as-built* e le DiCo emesse dall'impresa;
3. **Supporto alle operazioni di verifica:** il DL assiste attivamente il collaudatore durante le prove strumentali in campo, fornendo i chiarimenti necessari sulle scelte tecniche effettuate durante il cantiere e sulle eventuali varianti approvate.

Ai sensi dell'Art. 116 del D.lgs. 36/2023 e dall'Allegato II.14 (articoli 8, 14, 16-19), l'Organo di Collaudo agisce come garante della corretta esecuzione dell'opera, ponendosi in una posizione di assoluta autonomia rispetto ai soggetti coinvolti nella realizzazione dell'opera. Il tratto distintivo di questa figura è il requisito di terzietà ed indipendenza, infatti il CO deve possedere consolidate competenze tecniche e professionali, ma non deve aver partecipato in alcuna forma alla progettazione, alla direzione dei lavori, né all'esecuzione dell'intervento. Tale caratteristica è imprescindibile, in quanto assicura che il giudizio sulla sicurezza degli impianti elettrici e sulla conformità dell'opera sia oggettivo e privo di condizionamenti derivanti dalle decisioni prese in fase di cantiere.

Sebbene operi in autonomia, il CO deve seguire un iter di relazioni istituzionali rigorosamente normato, in particolare:

- **Verso il RUP:** il CO viene nominato dal RUP, al quale è tenuto a consegnare gli esiti delle verifiche e la documentazione finale di collaudo per la successiva approvazione formale; tale passaggio è fondamentale, in quanto è l'atto che autorizza la liquidazione della rata di saldo e lo svincolo delle garanzie fideiussorie prestate dall'esecutore;

⁸ **Giornale dei lavori:** documento contabile e cronologico obbligatorio in cui vengono annotati, giorno per giorno, tutti gli eventi salienti che riguardano l'esecuzione dell'opera; viene creato in formato digitale.

- **Verso il DL:** il CO riceve dal DL tutta la documentazione tecnica e contabile prodotta durante l'esecuzione, inoltre il DL ha l'obbligo di assistere il CO durante i sopralluoghi;
- **Verso l'Esecutore:** il CO esercita un potere di accertamento sull'operato dell'impresa, potendo impartire eventuali interventi correttivi qualora riscontri difformità rispetto agli standard richiesti;

Il CO assume una responsabilità di natura tecnica e amministrativa; il suo compito principale è quello di validare l'intero processo di realizzazione dell'opera, attestando se questa possa essere presa in consegna dall'Amministrazione. Tale funzione culmina con la sottoscrizione del Certificato di collaudo, atto che sancisce la fine della fase di esecuzione e l'inizio del periodo di garanzia dell'opera (Art. 19, All. II.14).

In conformità a quanto previsto dall'Art. 2 e dall'Allegato I.1 del D.lgs. 36/2023, l'Esecutore è l'operatore economico al quale viene affidato l'appalto, il quale assume l'incarico della realizzazione dell'opera in conformità al progetto esecutivo, al contratto e alle disposizioni impartite dall'Ufficio Direzione Lavori⁹, assumendo quindi la responsabilità tecnica dell'intero intervento.

Nell'ambito del processo di collaudo degli impianti elettrici, il ruolo dell'Esecutore è disciplinato principalmente dagli Art. 17 e 22 dell'Allegato II.14 e dal D.M. 37/2008, i quali delineano i suoi compiti operativi, ovvero:

- **Obblighi di assistenza e supporto tecnico:** (Art. 17, All. II.14) durante le operazioni di verifica, l'Esecutore non riveste un ruolo passivo, ma è tenuto a garantire un supporto attivo al CO; questo supporto si concretizza nella:
 - Messa a disposizione di personale e mezzi, infatti l'impresa deve fornire la manovalanza specializzata e le attrezzature necessarie per l'esecuzione

⁹ **Ufficio Direzione lavori:** ai sensi dell'Art. 114 del D.lgs. 36/2023, è il gruppo di supporto tecnico che deve affiancare il DL nella gestione e nel monitoraggio di cantieri più articolati; questo si compone dei Direttori Operativi (figure specialistiche che collaborano con il DL nella sorveglianza di parti impiantistiche specifiche dell'opera) e degli Ispettori di Cantiere (tecnici incaricati del controllo delle pose in opera, i quali verificano la conformità delle lavorazioni).

di prove e verifiche strumentali (es: prove di continuità, misure di isolamento e test sui sistemi di protezione)

- Fornitura della strumentazione, infatti l'Esecutore deve mettere a disposizione strumenti di misura idonei e provvisti di regolari certificati di taratura in corso di validità, necessari per validare le prestazioni dell'impianto elettrico;
- Garanzia della sicurezza, l'Esecutore deve assicurare che le prove, spesso effettuate in presenza di parti in tensione o in aree di cantiere complesse, avvengano nel pieno rispetto delle norme di sicurezza e del Piano di Sicurezza e Coordinamento¹⁰;
- **Responsabilità documentale e conformità:** (D.M. 37/2008) un pilastro fondamentale della funzione dell'Esecutore è la produzione della documentazione tecnica finale; egli è il solo responsabile del rilascio della DiCo, documento propedeutico e indispensabile per l'avvio delle operazioni di collaudo. Inoltre, l'Esecutore ha il dovere di collaborare con l'Ufficio Direzione Lavori per la redazione degli elaborati *as-built*, riportando fedelmente lo stato finale della rete elettrica, dei quadri di distribuzione e dei punti luce installati;
- **Onere dei ripristini e garanzia:** (Art. 22, All. II.14) l'Esecutore è tenuto a presenziare alle visite di collaudo e a sottoscrivere i relativi verbali, con la possibilità di iscrivere eventuali riserve¹¹. Qualora il collaudatore riscontri difformità, l'Esecutore ha l'obbligo di eseguire a proprie spese le varianti migliorative o i ripristini necessari per ricondurre l'opera alla regola d'arte. La sua responsabilità non si esaurisce con l'emissione del certificato, ma si estende per

¹⁰ **Piano di Sicurezza e Coordinamento (PSC):** ai sensi del D.lgs. 81/2008 (Testo Unico sulla Sicurezza), è il documento obbligatorio che contiene l'analisi dei rischi specifici del cantiere e definisce le misure di prevenzione e protezione atte a garantire l'incolumità dei lavoratori, con particolare riferimento alla gestione delle interferenze tra le diverse imprese esecutrici.

¹¹ **Riserve:** sono lo strumento con il quale l'impresa esecutrice contesta formalmente decisioni, rilievi tecnici o conteggi economici del Collaudatore o della Direzione Lavori. Vengono scritte sui verbali al momento della firma; se non inserite subito, l'Esecutore perde il diritto di richiedere rimborsi in futuro.

tutta la durata del periodo di garanzia, durante il quale resta obbligato alla rimozione di eventuali difetti rilevati.

1.2.2 - Figure istituzionali e specialistiche

1. **Stazione Appaltante (SA):** ai sensi del D.lgs. 36/2023 (Art. 1, All. I.1), è il soggetto pubblico titolare del contratto d'appalto. In ambito di collaudo, la SA riveste un ruolo di verifica finale e decisoria, in quanto riceve gli atti prodotti dal CO e, tramite l'approvazione del Certificato di collaudo, accetta formalmente l'opera, determinando lo svincolo delle garanzie fideiussorie ed il pagamento del saldo finale all'Esecutore;
2. **Progettista:** facendo riferimento all'Art. 41 del D.lgs. 36/2023 e, per la parte elettrica, all'Art. 5 del D.M. 37/2008, è la figura incaricata della redazione degli elaborati tecnici; definisce i calcoli di dimensionamento, gli schemi unifilari e i requisiti qualitativi dell'intervento che costituiscono il termine di paragone imprescindibile per il collaudatore; la sua funzione è dunque quella di fornire la base documentale necessaria per accertare la piena conformità tra quanto pianificato in fase di progetto e quanto effettivamente realizzato in cantiere;
3. **Coordinatore per la sicurezza (CSE):** secondo quanto definito dall'Art. 92 del D.lgs. 81/2008, è il soggetto incaricato dalla SA per garantire lo svolgimento dei compiti stabiliti; durante le fasi di collaudo elettrico, il CSE svolge un'attività di alta vigilanza, coordinando le procedure operative per prevenire i rischi e garantendo che le verifiche strumentali — specialmente quelle eseguite in presenza di parti in tensione — avvengano nel pieno rispetto del Piano di Sicurezza e Coordinamento (PSC).

1.3 - Iter procedurale negli appalti pubblici

La progettazione di impianti elettrici per infrastrutture pubbliche è un processo rigorosamente disciplinato, il quale deve garantire trasparenza, efficienza economica e sicurezza. Il riferimento primario è la Guida CEI 0-2, la quale definisce le modalità di redazione della documentazione necessaria per garantire l'univocità di interpretazione del sistema.

Sotto il profilo legislativo, l'obbligo di progettazione è sancito dall'Art. 5 del D.M. 37/2008, il quale impone la firma sul progetto da parte di un professionista iscritto all'Albo; questo vale non solo per utenze con potenza impegnata superiore a $6kW$ o con superficie maggiore di $200m^2$, ma anche per immobili provvisti di ambienti soggetti a normativa specifica, quali i locali ad uso medico, a maggior rischio di incendio o con pericolo di esplosione¹². In conformità all'aggiornamento della Guida CEI 0-2 del 2022 e al D.lgs. 36/2023, l'iter progettuale si articola in due fasi principali:

1. **Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica (PFTE):** fase decisionale volta a individuare la soluzione con il miglior rapporto qualità-prezzo e costi-benefici, definendo i requisiti funzionali e le prestazioni attese;
2. **Progetto Esecutivo:** costituisce la traduzione operativa delle scelte progettuali, definendo nel dettaglio ogni particolare impiantistico. Esso deve contenere almeno gli schemi d'impianto, i disegni planimetrici e una relazione tecnica sulla consistenza e sulla tipologia dell'installazione, con particolare riguardo alle caratteristiche dei materiali e ai componenti da utilizzare, nonché alle misure di prevenzione e di sicurezza da adottare. Qualora l'impianto subisca variazioni in fase realizzativa, l'Art. 5 del D.M. 37/2008 impone l'integrazione del progetto con la necessaria documentazione tecnica attestante le varianti, la quale diverrà parte integrante della documentazione finale a cui l'installatore dovrà fare riferimento nella DiCo. L'iter di definizione tecnica culmina con la validazione del progetto, atto che definisce i criteri oggettivi per le successive attività di verifica sul campo. In particolare, i dati contenuti nell'Esecutivo forniscono a base tecnica per i controlli di sicurezza e di funzionalità imposti dall'Art. 7 del decreto, i quali rappresentano il cardine delle operazioni di collaudo trattate nei capitoli successivi.

¹² Si precisa che sono state evidenziate solo le soglie dimensionali e le tipologie di ambiente più significative per il caso studio in esame; per un quadro completo di tutti gli obblighi di progettazione professionale, che includono anche impianti a gas, antincendio o lampade a catodo freddo, si rimanda al testo integrale dell'Art. 5 del D.M. 37/2008.



Figura 1: Iter procedurale negli appalti pubblici (si precisa che, ai sensi del D.Lgs. 36/2023, il Progetto Definitivo è stato abrogato, riducendo i livelli di progettazione a due, ovvero PFTE ed Esecutivo)

1.4.1 - Contenuti del Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica

Il PFTE rappresenta la fase preliminare di convergenza tra le necessità della committenza e la fattibilità tecnica. La documentazione associata ha l'obiettivo di definire l'impostazione generale dell'opera, verificandone la sostenibilità economica e ponendo le basi tecniche per lo sviluppo successivo del progetto esecutivo. Gli elaborati principali per la parte impiantistica comprendono:

1. **Relazione tecnica ed illustrativa:** descrive le soluzioni progettuali proposte, motivando le scelte tecniche e l'integrazione del sistema elettrico nella struttura;
2. **Schemi funzionali e layout di massima:** forniscono una visione d'insieme della struttura dell'impianto, identificando gli elementi principali (cabine di trasformazione, i quadri generali e le dorsali di distribuzione);
3. **Piano di sicurezza e coordinamento (PSC):** presenta un'analisi preliminare sui rischi di cantiere;
4. **Preventivo sommario della spesa:** viene indicata una stima dei costi basata su parametri o su un computo metrico di massima, necessaria per la realizzazione dell'opera;
5. **Relazione sulla sostenibilità (DNSH):** documento che attesta il rispetto del principio “Do No Significant Harm”, ovvero di non arrecare danno significativo all'ambiente. Tale relazione è fondamentale per garantire che l'impianto sia conforme ai criteri ambientali richiesti dai finanziamenti pubblici e dalle normative europee vigenti;
6. **Prime indicazioni sul piano di manutenzione:** indica i criteri generali per le attività di controllo e le revisioni periodiche del sistema, individuando le attività

manutentive essenziali per prevenire il degrado dei componenti e garantire la sicurezza degli utenti.

1.4.2 - Contenuti Tecnici del Progetto Esecutivo

Il Progetto Esecutivo definisce analiticamente ogni componente dell'impianto, trasformando le scelte strategiche del PFTE in prescrizioni tecniche di dettaglio per la realizzazione dell'opera. Esso stabilisce univocamente i parametri elettrici nominali ed i requisiti di sicurezza dell'opera, i quali costituiscono il riferimento tecnico rispetto al quale il collaudatore verificherà — tramite prove strumentali e analisi visive — la conformità e la funzionalità dell'impianto realizzato.

In conformità al D.lgs. 36/2023 e alla Guida CEI 0-2, la documentazione esecutiva si compone dei seguenti elaborati specialistici:

1. **Relazione tecnica specialistica:** descrive nel dettaglio la struttura dell'impianto, le modalità di posa delle condutture e le caratteristiche dei materiali scelti; specifica, inoltre, le misure di protezione contro i contatti diretti e indiretti (coordinamento con l'impianto di terra) e descrive le prestazioni attese dei sistemi di emergenza e sicurezza;
2. **Relazione di calcolo:** rappresenta il documento tecnico di riferimento per le attività di verifica strumentale, in quanto contiene il dimensionamento analitico di tutti i circuiti, riportando:
 - le correnti di impiego I_b e le relative portate dei cavi I_z
 - il calcolo delle cadute di tensione massime ammissibili ΔV
 - le correnti di cortocircuito I_{cc} minime e massime nei punti nodali, indispensabili per verificare il potere di interruzione degli interruttori e i tempi di intervento delle protezioni
3. **Schemi elettrici unifilari e funzionali:** indicano lo sviluppo della rete elettrica, specificando la configurazione dei collegamenti elettrici dai quadri generali ai carichi terminali. Per ogni dispositivo di protezione devono essere indicati i dati

di targa¹³ e le eventuali tarature delle soglie elettroniche; tali parametri verranno verificati dal collaudatore tramite prove di scatto;

4. **Planimetrie esecutive e particolari costruttivi:** riportano l'esatto posizionamento dei componenti e il percorso delle condutture. Costituiscono il riferimento necessario per accertare che il posizionamento dei componenti rispetti le distanze di sicurezza e i vincoli dimensionali imposti dalla norma CEI 64-8;
5. **Capitolato speciale d'appalto:** definisce i requisiti qualitativi dei materiali e le metodologie di posa dei componenti. Specifica le verifiche e i controlli obbligatori in corso d'opera a carico dell'Appaltatore, rappresentando la base di riferimento per l'accertamento della conformità in fase di collaudo;
6. **Piano di manutenzione esecutivo:** definisce il programma dei controlli periodici e le procedure per mantenere inalterati nel tempo i livelli di sicurezza e prestazione verificati in sede di collaudo;
7. **Computo metrico definitivo:** fornisce il dettaglio quantitativo di ogni componente installato; nonostante sia un documento economico, supporta il collaudatore nella verifica della corrispondenza tra quanto contabilizzato dall'impresa e quanto effettivamente installato in cantiere.

L'integrità e la coerenza dei documenti sopra citati sono requisiti essenziali per la validazione del progetto. Ogni variazione in corso d'opera deve essere integrata nei disegni *as-built*, i quali costituiranno — insieme al Progetto Esecutivo — il fascicolo tecnico finale da allegare alla Dichiarazione di Conformità (DiCo) ai sensi dell'Art. 5 del D.M. 37/2008.

¹³ **Dati di targa:** indicano le caratteristiche nominali dell'apparecchiatura dichiarate dal costruttore (es: tensione nominale, corrente nominale, potere di interruzione, grado di protezione IP); tali valori rappresentano i limiti operativi entro i quali il componente garantisce le prestazioni di sicurezza e funzionalità previste dal progetto.

1.4.3 - Dichiarazione di Conformità (DiCo)

La Dichiarazione di Conformità (DiCo) rappresenta l'atto di validazione finale del processo realizzativo dell'opera e l'assunzione formale di responsabilità legale — sia civile sia penale — da parte dell'impresa installatrice. Ai sensi del D.M. 37/2008, essa certifica che l'impianto è stato realizzato a regola d'arte, ovvero in piena osservanza del progetto esecutivo e delle norme tecniche vigenti.

Per infrastrutture di elevata complessità, la DiCo non si compone di un singolo modulo amministrativo, ma consiste in un fascicolo tecnico strutturato che comprende i seguenti allegati obbligatori:

- **Progetto finale *as-built*:** è l'insieme degli elaborati grafici e tecnici che descrivono la configurazione definitiva dell'opera, includendo le varianti approvate in fase di cantiere. Il riferimento alla documentazione *as-built* è una condizione necessaria affinché la DiCo mantenga la propria valenza tecnica e funga da base certa per le attività di collaudo;
- **Relazione tipologica dei materiali:** documento nel quale vengono descritte nel dettaglio le prestazioni dei componenti installati (cavi, quadri, dispositivi di protezione, corpi illuminanti). Specifica le caratteristiche dei materiali, garantendone l'idoneità rispetto alle sollecitazioni ambientali ed alle condizioni d'impiego previste dal progetto;
- **Schema di impianto:** costituisce la rappresentazione grafica e simbolica dell'architettura elettrica dell'intero sistema elettrico. Generalmente realizzato in schema unifilare, permette l'immediata identificazione della gerarchia delle protezioni, dei punti di sezionamento e manovra. Tale documento risulta fondamentale per l'attività di collaudo, in quanto consente di verificare la logica di selettività e la corretta suddivisione dei circuiti rispetto ai carichi serviti;
- **Attestazione dei requisiti tecnico-professionali:** consiste nella copia della visura camerale rilasciata dalla Camera di Commercio, Industria, Artigianato e Agricoltura (CCIAA) dell'impresa installatrice, in corso di validità. Tale documento è obbligatorio in quanto certifica che la ditta installatrice possiede

l'abilitazione legale — definita dalla 'Lettera A'¹⁴ del D.M. 37/2008 — per la realizzazione di impianti elettrici. In assenza di tale requisito, l'impresa non è autorizzata a rilasciare la DiCo, rendendo l'impianto privo di validità legale e non collaudabile.

La DiCo ha un ruolo chiave per il collaudatore, infatti costituisce il punto di partenza operativo; la firma del Responsabile Tecnico sul documento attesta che tutte le verifiche preliminari di sua competenza (prove di continuità, isolamento e scatto dei differenziali) sono state eseguite con esito positivo.

Il compito del collaudo tecnico — che verrà approfondito nel capitolo successivo — consiste nel validare quanto dichiarato dall'Impresa Esecutrice. Attraverso esame visivo e prove strumentali, il collaudatore accerta che la configurazione fisica dell'impianto rifletta fedelmente quanto riportato nella DiCo. La mancanza di uno solo degli allegati sopra citati o un'incompletezza nella descrizione dei materiali rende l'impianto non collaudabile e, di conseguenza, rende l'opera non conforme per la validazione finale.

1.4.5 - Documentazione tecnica e atti di collaudo

L'attività di collaudo si conclude con la verifica della documentazione di progetto e di installazione. Questa fase non ha lo scopo di essere un semplice passaggio burocratico, bensì costituisce la base documentale della sicurezza impiantistica e il punto di riferimento per ogni futura attività di manutenzione. In conformità alle disposizioni legislative vigenti, il fascicolo tecnico deve obbligatoriamente contenere la seguente documentazione:

Certificazioni di sicurezza e conformità

- **Dichiarazione di Conformità (DiCo):** ai sensi dell'Art. 7 del D.M. 37/2008, viene rilasciata dall'impresa installatrice e deve contenere tutti gli allegati obbligatori (vedere *Paragrafo 1.4.3*);

¹⁴ L'Art. 1 del D.M. 37/2008 classifica le abilitazioni tecniche di un'impresa in sette categorie: A (impianti elettrici e protezione scariche atmosferiche), B (impianti elettronici e radiotelevisivi), C (riscaldamento, climatizzazione e condizionamento), D (impianti idrici e sanitari), E (impianti per il trasporto e l'utilizzazione di gas), F (impianti di protezione antincendio), G (impianti di sollevamento di persone o cose, quali ascensori e montacarichi).

- **Omologazione degli impianti di terra:** documentazione che registra l'installazione dell'impianto di messa a terra agli enti competenti (INAIL e ARPA), come previsto dal D.P.R. 462/01;
- **Attestazioni antincendio:** sono fondamentali per chiudere la pratica della SCIA¹⁵; si tratta di compilare i modelli ministeriali DICH.IMP e CERT.IMP¹⁶ per tutti gli impianti speciali (come luci di emergenza, sistemi di continuità dell'alimentazione e rivelazione fumi), i quali assicurano la rispondenza dell'opera alle norme di sicurezza antincendio vigenti. Il riferimento normativo è il D.M. 03/08/2015, che regola la corretta posa e il funzionamento dei sistemi atti a garantire l'esodo e la sicurezza degli occupanti.

Documentazione di verifica e di conformità dei componenti

- **Rapporto di verifica:** regolato dalla norma CEI 64-8/6, è il documento tecnico che raccoglie gli esiti delle prove strumentali descritte nel paragrafo 3.4; deve riportare i valori misurati, i limiti di accettabilità normativi, la data delle prove e i dati identificativi della strumentazione utilizzata (completa di certificati di taratura in corso di validità);
- **Dichiarazioni di prestazione (DoP) e marchi di qualità:** verifica della marcatura CE — obbligatoria per la libera circolazione dei prodotti nell'UE — e degli eventuali marchi di qualità volontari (come IMQ); risulta molto importante la documentazione relativa ai cavi elettrici, i quali devono essere accompagnati

¹⁵ **Segnalazione Certificata di Inizio Attività (SCIA):** è il documento che, ai sensi del D.P.R. 151/2011, permette la messa in funzione dell'infrastruttura, la quale sarà soggetta ai controlli di prevenzione incendi. La procedura si basa sull'approvazione di un tecnico abilitato (professionista antincendio), il quale certifica sotto la propria responsabilità la conformità dell'opera alle norme di sicurezza vigenti, consentendo l'apertura dell'opera al pubblico. Tale atto viene presentato al Comando dei Vigili del Fuoco competente, a cui spetta il compito di effettuare i successivi controlli e accertamenti sulla veridicità di quanto dichiarato.

¹⁶ **DICH.IMP e CERT.IMP:** ai sensi del D.M. 07/08/2012, la prima è la Dichiarazione di corretta installazione e funzionamento dell'impianto rilasciata dall'impresa installatrice per attestare che l'opera è conforme al progetto e al principio di regola d'arte; la seconda è la Certificazione di rispondenza e di corretto funzionamento dell'impianto redatta da un professionista antincendio, che serve a validare le prestazioni e le logiche di funzionamento dei sistemi di sicurezza (come l'autonomia dei sistemi di continuità dell'alimentazione o le sequenze di allarme).

dalla DoP che ne attesti la classe di reazione al fuoco secondo il Regolamento CPR (UE) 305/11;

- **Verbali di prova:** servono per la registrazione immediata delle attività di collaudo; vengono firmati durante le prove svolte dal collaudatore e dalle ditte installatrici e servono per attestare la validità dei rilievi e la correttezza delle condizioni di misura. Rappresentano la base documentale che certifica formalmente le prestazioni dell'impianto.

Fascicoli per la sicurezza e manutenzione dell'opera

- **Fascicolo dell'opera:** ai sensi del D.lgs. 81/2008, contiene le informazioni necessarie per la prevenzione e la protezione dai rischi ai quali sono esposti i lavoratori durante i successivi interventi di manutenzione;
- **Manuale d'uso e piano di manutenzione:** sono le istruzioni operative per la corretta conduzione dell'impianto; includono il registro per le verifiche periodiche obbligatorie, il quale risulta indispensabile per mantenere l'efficienza dei sistemi, i requisiti di sicurezza e garantire la persistenza della regola d'arte nel tempo.

Certificato di collaudo finale

Rappresenta l'atto conclusivo e fondamentale dell'intera procedura. In questo documento il collaudatore, sulla base di tutte le verifiche documentali e strumentali effettuate, dichiara formalmente la collaudabilità dell'opera. Il certificato attesta che l'impianto è stato realizzato a regola d'arte, è conforme al progetto e può essere messo in esercizio in totale sicurezza.

2 - Metodologie di verifica, tempistiche e procedure di collaudo

Il presente capitolo analizza le procedure, le metodologie di verifica e i criteri di accettabilità che guidano l'esecuzione dei controlli sul campo. L'attenzione si focalizza sulla transizione dall'esame documentale all'ispezione visiva e strumentale diretta, in conformità ai requisiti imposti dall'Allegato II.14 del D.lgs. 36/2023 e dalla norma CEI 64-8/6. L'analisi di questo quadro metodologico fornisce al collaudatore gli strumenti quantitativi e i parametri fisici necessari per misurare le prestazioni reali del sistema e garantirne la conformità rispetto alla regola d'arte.

2.1 - Definizione e finalità del collaudo nelle opere pubbliche

Il collaudo è l'atto formale e obbligatorio, disciplinato dall'Art. 116 del D.lgs. 36/2023, tramite il quale la Pubblica Amministrazione¹⁷ accerta che l'opera sia stata realizzata a regola d'arte, in conformità alla documentazione tecnica e nel rispetto dei vincoli contrattuali; quindi, tale procedura rappresenta la fase conclusiva e imprescindibile dell'intero iter realizzativo di un'opera pubblica. Essa è finalizzata a garantire che l'interesse della collettività — rappresentato dalla SA — sia stato integralmente soddisfatto, assicurando l'affidabilità strutturale, la sicurezza operativa e la rispondenza funzionale dell'infrastruttura alle finalità di pubblico interesse per le quali è stata realizzata.

Le finalità del collaudo possono essere riassunte in tre obiettivi primari:

1. **Funzione tecnica:** consiste nella verifica della qualità dei materiali impiegati, della corretta esecuzione delle lavorazioni e del raggiungimento dei requisiti prestazionali minimi previsti per gli impianti. In questa fase, il collaudatore verifica che i parametri di sicurezza e funzionalità siano rispondenti alle normative tecniche di settore (norme CEI, UNI, EN);

¹⁷ **Pubblica Amministrazione (PA):** nel contesto degli appalti pubblici, la Pubblica Amministrazione agisce come Stazione Appaltante (SA). Corrisponde quindi alla figura del Committente, ovvero il cliente che finanzia l'opera e ne decide i vincoli, ed in questo caso specifico si identifica con gli enti responsabili della realizzazione dell'opera (Comune di Torino o soggetti delegati). Il suo ruolo è quello di tutelare l'interesse dei cittadini, verificando la corretta esecuzione dei lavori da parte dell'impresa prima di procedere all'erogazione del saldo finale.

2. **Funzione amministrativa:** ha lo scopo di validare il bilancio finale dell'appalto. Il collaudatore accerta che le quantità di lavoro contabilizzate dalla Direzione Lavori trovino riscontro oggettivo nelle opere effettivamente eseguite e che i prezzi applicati siano rigorosamente coerenti con l'offerta economica e le previsioni del computo metrico estimativo;
3. **Funzione giuridica:** il Certificato di collaudo è l'atto formale che determina l'accettazione dell'opera da parte della Stazione Appaltante; esso comporta il passaggio del rischio e della responsabilità dall'esecutore all'Amministrazione, fissando la decorrenza del periodo di garanzia contrattuale. Tale atto abilita, inoltre, lo svincolo delle garanzie fideiussorie e delle eventuali ritenute di garanzia¹⁸, nonché la liquidazione del saldo finale all'impresa esecutrice, estinguendo ogni vincolo reciproco tra le parti.

2.2 - Codice degli Appalti Pubblici: D.lgs. 36/2023

L'attività di collaudo delle opere pubbliche è attualmente disciplinata dal D.lgs. 36/2023, il quale ha introdotto una riforma del settore, rendendo così fondamentale il "Principio del Risultato" (Art. 1): l'intero ciclo dell'appalto deve essere orientato alla massima tempestività e alla piena funzionalità dell'opera, garantendo al contempo la sicurezza e la qualità delle prestazioni.

L'Art. 116 del Codice rappresenta il riferimento legislativo dell'attività di verifica finale: esso stabilisce che il collaudo ha lo scopo di accertare che l'opera sia stata eseguita in conformità al contratto e alle varianti approvate, che i dati contabili corrispondano alla realtà esecutiva e che i lavori siano stati realizzati a regola d'arte.

In merito all'iter procedurale e alle responsabilità, l'Art. 116 delinea i seguenti pilastri fondamentali:

- **Indipendenza e terzietà:** il collaudatore opera come organo di controllo tecnico-amministrativo indipendente, con la responsabilità di validare l'operato

¹⁸ **Ritenute di garanzia:** sono delle somme (di norma lo 0,5%) che l'Amministrazione trattiene da ogni pagamento dovuto all'impresa durante i lavori. Queste trattenute servono come cauzione per assicurare che l'impresa paghi regolarmente i contributi ai lavoratori e sistemi eventuali difetti; vengono restituite all'impresa solo ad opera ultimata, in seguito all'approvazione del collaudo.

dell'Esecutore e della Direzione Lavori, garantendo così completa oggettività sull'esito finale;

- **Tempistiche:** la procedura di collaudo deve concludersi entro sei mesi dall'ultimazione dei lavori, termine che può essere esteso ad un anno solo per opere di particolare complessità tecnica; segue che il collaudatore deve firmare il certificato entro i termini appena citati. Una volta emesso, questo viene trasmesso al RUP, il quale ha l'obbligo di sottoporlo all'approvazione dell'organo competente¹⁹ della stazione appaltante entro 30 giorni;
- **Valenza del certificato:** l'iter procedurale si conclude con l'emissione del Certificato di collaudo, documento formale di accertamento definitivo tramite il quale la Stazione Appaltante accetta l'intero operato dell'Esecutore e della Direzione Lavori, confermando la rispondenza dell'opera alle previsioni contrattuali.

Una delle innovazioni rilevanti del D.lgs. 36/2023 è il trasferimento delle norme operative negli Allegati; in particolare l'Allegato II.14 sostituisce le precedenti disposizioni e definisce nel dettaglio le attività del collaudatore:

1. **Esame documentale e contabile:** verifica della legittimità degli atti prodotti durante l'esecuzione e riscontro della coerenza economica tra l'offerta aggiudicata e l'importo finale;
2. **Verifiche in sito:** obbligo di ispezione delle opere realizzate per accertare la qualità dei materiali e la corrispondenza dimensionale;
3. **Prove prestazionali:** l'Allegato II.14 impone la verifica strumentale del corretto funzionamento degli impianti, la quale risulta essere requisito necessario per

¹⁹ **Organo competente:** è il "capo" o l'ufficio della Pubblica Amministrazione che ha il potere di firma finale (ad esempio un dirigente o un direttore generale); mentre il collaudatore verifica che l'impianto funzioni, l'organo competente rende esecutivo il certificato di collaudo: senza la sua approvazione, il collaudo non è valido per la legge e l'impresa non può ricevere il pagamento finale né riavere indietro le garanzie economiche fideiussorie.

l'attestazione della collaudabilità²⁰ dell'opera e la successiva emissione del certificato finale.

Il Codice degli Appalti Pubblici rimanda alla normativa tecnica per la definizione dei requisiti prestazionali di dettaglio, la quale diventa il criterio unico per l'accertamento della conformità degli impianti:

- **Norme CEI:** costituiscono il riferimento per la sicurezza e la funzionalità degli impianti elettrici e speciali;
- **Norme UNI ed EN (Ente Italiano di Normazione):** definiscono i protocolli di prova per le componenti meccaniche, le strutture e i sistemi di sollevamento;
- **D.M. 37/2008:** impone l'obbligo di acquisizione e verifica della Dichiarazione di Conformità (DiCo), documento mediante il quale l'impresa installatrice attesta, sotto la propria responsabilità, il rispetto delle norme tecniche vigenti.

Si evince che il collaudatore funge da garante dell'integrazione tra il D.lgs. 36/2023, che impone il controllo, e le normative tecniche vigenti CEI/UNI, che definiscono i parametri oggettivi di accettabilità dell'opera.

2.3.1 - Classificazione e tipologie di collaudo

L'ordinamento italiano, attraverso il D.lgs. 36/2023 e il D.P.R. 380/2001, definisce tre principali tipologie di verifica finale, distinte in base all'ambito di applicazione ed in base alle finalità:

1. **Collaudo tecnico-amministrativo:** viene disciplinato dall'Art. 116 del D.lgs. 36/2023 e il suo ambito di applicazione riguarda i contratti di lavori pubblici (intesi come attività di costruzione, trasformazione o manutenzione). La finalità è di certificare il rispetto delle caratteristiche tecniche, economiche e qualitative dell'opera, accertando che la stessa sia stata eseguita a regola d'arte e in conformità al contratto ed alle eventuali varianti approvate. Tale procedura

²⁰ **Attestazione di collaudabilità:** è bene distinguere la collaudabilità dal certificato di collaudo, trattandosi di atti distinti. La dichiarazione di collaudabilità è un atto di competenza del Direttore dei Lavori che attesta l'ultimazione delle opere e la loro idoneità ad essere sottoposte a verifica. Il certificato di collaudo rappresenta invece l'atto finale e conclusivo redatto dal collaudatore.

include la verifica della contabilità finale e l'accertamento della funzionalità tecnica degli impianti (componente impiantistica);

2. **Collaudo statico:** i suoi riferimenti normativi sono l'Art. 67 del D.P.R. 380/2001 e le NTC²¹ 2018. Questo collaudo riguarda esclusivamente le strutture portanti, con specifico riferimento alle opere in conglomerato cementizio armato (normale o precompresso) e aventi struttura metallica. La finalità è di garantire la sicurezza strutturale e la stabilità dell'opera, in modo da garantire la sicurezza dei cittadini. Si configura come un atto autonomo e obbligatorio, necessario per l'emissione del collaudo tecnico-amministrativo finale. Per legge, deve essere eseguito da un ingegnere o un architetto iscritto all'albo da almeno dieci anni e che non sia intervenuto in alcun modo nella progettazione, direzione o esecuzione dell'opera stessa;
3. **Verifica di conformità:** viene definita dall'Art. 116 del D.lgs. 36/2023, e viene applicata agli appalti di servizi e forniture. Rappresenta l'equivalente del collaudo tecnico-amministrativo per tutte le prestazioni che non rientrano nella categoria dei lavori; il suo fine è quello di accertare che i beni o i servizi forniti corrispondano esattamente alle specifiche tecniche, qualitative e temporali stabilite nel contratto.

Ai sensi dell'Art. 116 del D.lgs. 36/2023, per lavori di importo inferiore a 1 milione di euro, è possibile velocizzare il procedimento di verifica e consegna definitiva dell'opera. La Stazione Appaltante ha infatti la facoltà di sostituire il collaudo tecnico-amministrativo (o la verifica di conformità) con il Certificato di Regolare Esecuzione (CRE), emesso direttamente dal Direttore dei Lavori. Il CRE consente di snellire l'iter procedurale, affidando l'accertamento al DL — anziché a un collaudatore terzo esterno — e riducendo i tempi di emissione del certificato a 90 giorni dall'ultimazione dei lavori. Si precisa che tale semplificazione non può mai riguardare il collaudo statico, il quale rimane sempre obbligatorio in presenza di opere strutturali.

²¹ **Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC):** definiscono i requisiti minimi di sicurezza e stabilità delle opere civili. In ambito di collaudo, esse rappresentano il parametro tecnico per la verifica delle strutture portanti, distinguendosi dalle specifiche normative di settore (come le norme CEI) dedicate invece alla funzionalità e alla sicurezza degli impianti elettrici.

2.3.2 - Classificazione temporale delle prove di collaudo

Oltre alla precedente distinzione giuridica tra le diverse tipologie di collaudo, risulta necessario classificare tali attività in base alle tempistiche di esecuzione e all'oggetto specifico della verifica. Tale distinzione, disciplinata dall'Allegato II.14 del D.lgs. 36/2023, permette di declinare l'attività di controllo lungo l'intero arco di vita del cantiere, garantendo la verifica di quegli elementi che, a opera ultimata, non risulterebbero più ispezionabili. Nello specifico, si distinguono le seguenti modalità:

1. **Collaudo in corso d'opera:** disciplinato dall'Art. 21, All. II.14 del D.lgs. 36/2023, questa fase si svolge in concomitanza all'esecuzione dei lavori ed è obbligatoria nei casi di particolare complessità o qualora siano presenti le opere occulte²². In ambito impiantistico, il collaudo in corso d'opera è fondamentale per accertare la corretta posa di componenti che verranno successivamente inglobati nelle strutture edili; la verifica tempestiva evita che eventuali errori esecutivi rimangano celati, rendendo impossibili o estremamente onerosi i successivi interventi di ripristino.
2. **Collaudo finale:** definito dal D.lgs. 36/2023 (Art. 116), rappresenta la verifica conclusiva effettuata a lavori ultimati e viene svolta, di norma, entro sei mesi dall'ultimazione. In questa fase, il collaudatore accerta la rispondenza complessiva dell'opera al progetto e alle eventuali varianti approvate. Tale fase costituisce la sintesi conclusiva degli esiti ottenuti dagli accertamenti intermedi — svolti durante l'esecuzione dei lavori — e si conclude con la stesura del Certificato di collaudo.
3. **Collaudo tecnico-specialistico impiantistico:** disciplinato dal D.M. 37/2008 e dalle norme CEI, si focalizza sulla verifica delle prestazioni energetiche, meccaniche ed elettriche e sulla sicurezza degli impianti installati. A differenza del collaudo amministrativo, questa fase prevede l'esecuzione di misure strumentali dirette (come prove di continuità, resistenza di isolamento e test sui tempi di intervento delle protezioni) volte a garantire il rispetto degli standard di

²² **Opere occulte:** si intendono tutte quelle parti dell'impianto o della costruzione che, con il progredire dei lavori, vengono coperte e non sono più visibili o ispezionabili (come condutture sottotraccia, passaggi nei solai o sistemi di dispersione a terra interrati).

sicurezza per l'utente finale. Tale attività serve a confermare quanto dichiarato dall'impresa nella DiCo e assicura che l'impianto sia pronto per l'esercizio.

2.4 - Metodologie di verifica e prove strumentali

L'attività di verifica e di collaudo degli impianti elettrici e speciali è un processo regolato da un apparato normativo che ne definisce i requisiti, le modalità, i risultati ed i parametri di accettabilità. Per un approccio rigoroso, è necessario distinguere le diverse metodologie di controllo, le quali però operano in sincronia per garantire la conformità dell'opera al progetto e al principio di regola d'arte.

Ai sensi del D.lgs. 36/2023 e del D.M. 37/2008, il collaudatore è tenuto a seguire i protocolli definiti dagli enti di normazione nazionale e internazionale (CEI, UNI, EN, ISO); nello specifico, le attività di verifica si suddividono in:

- **Verifiche non strumentali (esame a vista):** costituiscono la prima fase imprescindibile di ogni procedura di collaudo; in conformità alla norma CEI 64-8/6, l'esame a vista ha lo scopo di accertare che i componenti dell'impianto siano stati scelti correttamente e installati secondo le prescrizioni del produttore e del progettista. Con queste prove si vuole verificare:
 - la conformità dei materiali e delle apparecchiature ai marchi di qualità e sicurezza (es: CE e IMQ);
 - l'adeguatezza delle protezioni meccaniche e dei gradi di protezione (IP e IK) in relazione all'ambiente di installazione;
 - la corretta identificazione dei circuiti e dei conduttori mediante codici cromatici standardizzati e siglatura alfanumerica univoca, garantendo la corrispondenza con gli schemi elettrici di progetto;
- **Prove e misure strumentali:** questa categoria riguarda la rilevazione di grandezze fisiche tramite l'uso di strumentazione dedicata; è fondamentale che ogni misura sia effettuata con strumenti conformi alla norma CEI EN 61557 e dotati di regolare certificato di taratura, in modo da assicurare l'accuratezza e la ripetibilità dei risultati. Tali verifiche servono a validare oggettivamente le condizioni di sicurezza (protezione dai contatti diretti e indiretti) e l'efficienza dei sistemi di distribuzione dell'energia elettrica, riducendo le perdite e garantendo la

qualità del servizio; è bene precisare che le prove strumentali vengono distinte in due fasi:

- prove con impianto fuori tensione (finalizzate ad accertare l'integrità dei circuiti prima della loro attivazione);
- prove con impianto in tensione (necessarie per validare il comportamento delle protezioni e i parametri di esercizio);

Il riferimento principale per gli impianti elettrici di bassa tensione è la norma CEI 64-8/6, che impone una sequenza logica di prove (continuità, isolamento, resistenza di terra, parametri di scatto delle protezioni).

- **Verifiche funzionali e logiche del sistema:** oltre alla sicurezza elettrica di base, il collaudo deve accertare il funzionamento logico dei sistemi integrati. Queste verifiche si basano sull'esecuzione di specifiche sequenze operative atte a verificare la risposta dell'impianto a precise sollecitazioni o condizioni di emergenza. Tali attività vengono svolte sui sistemi di rivelazione incendio (in conformità alla norma UNI 11224), sui sistemi di alimentazione di emergenza — gruppi elettrogeni ed UPS — in modo da garantire la continuità di servizio dei carichi privilegiati e sicuri, e sulle logiche di interblocco e automazione presenti nei quadri elettrici di potenza.
- **Verifiche prestazionali e illuminotecniche:** servono a quantificare la qualità delle prestazioni finali dell'impianto in condizioni di normale funzionamento. Queste prove si focalizzano sulla validazione dei parametri illuminotecnici e sulla qualità dell'energia erogata (*power quality*), verificando che l'infrastruttura rispetti i requisiti di comfort, sicurezza visiva ed efficienza energetica definiti nel progetto e nelle normative di settore (UNI EN 12464-1 e UNI EN 1838).

3 - Impianti di rivelazione e allarme incendio (IRAI)

Al fine di poter effettuare le varie prove di collaudo e verifica strumentale sull'impianto IRAI integrato con il sistema adattivo DPAS nel caso studio di Piazza Bengasi, risulta necessario esporre, a priori, la logica di funzionamento e la componentistica di tale sistema elettrico speciale.

Il presente capitolo analizza l'architettura, le componenti tecnologiche e i riferimenti normativi che regolano la progettazione e l'installazione dei sistemi IRAI. Attraverso l'esame approfondito delle prescrizioni tecniche delle serie UNI 9795:2021 e UNI EN 54, vengono esposte le logiche di interconnessione distribuita tra l'unità di controllo (CIE), i dispositivi di rivelazione precoce e i dispositivi attivi di segnalazione per l'esodo.

3.1 - Sistemi IRAI e le loro finalità

L'impianto di rivelazione e segnalazione allarme incendio — che nelle normative viene indicato con l'acronimo IRAI (*Impianto di Rivelazione e Allarme Incendio*) — costituisce l'infrastruttura sensoriale attiva atta a garantire la sicurezza delle persone e la salvaguardia dei beni presenti nell'edificio nel quale viene installato. In conformità alla norma UNI 9795:2021, l'obiettivo primario di questo sistema è l'individuazione precoce di fenomeni di combustione, al fine di attivare tempestivamente le procedure di emergenza, l'evacuazione degli occupanti e l'attivazione dei sistemi di protezione attiva e passiva.

Come specificato nel D.M. 03/08/2015 (Codice di Prevenzione Incendi), l'impianto IRAI non ha la sola funzione di rivelazione dei fenomeni della combustione, ma integra anche logiche e dispositivi di segnalazione ed allarme atti a guidare gli occupanti verso un luogo sicuro. Nel contesto di sistemi evoluti, l'IRAI si interfaccia direttamente con i sistemi di diffusione sonora (EVAC) e di instradamento dinamico dell'esodo (DPAS²³).

Secondo la norma UNI 9795:2021, le finalità primarie di un sistema IRAI sono gerarchicamente così disposte:

²³ **DPAS:** acronimo di *Dynamic Path Allocation System*; si tratta di una tipologia di sistema antincendio adattivo per la gestione intelligente delle vie d'esodo, il cui funzionamento di dettaglio e le cui logiche di interconnessione verranno approfonditi nel *Capitolo 7*.

1. **Salvaguardia della vita umana:** garantire che gli occupanti possano abbandonare l'edificio o raggiungere un luogo sicuro prima che l'ambiente diventi insostenibile (superamento dei tempi di ASET)²⁴;
2. **Rivelazione precoce:** individuare il focolaio nella fase di cova²⁵ minimizzando i tempi di intervento;
3. **Attivazione delle strategie di protezione:** interfacciare il sistema con i dispositivi di protezione attiva (sistemi di estinzione, evacuatori di fumo) e passiva (compartimentazioni, chiusura porte REI);
4. **Gestione dinamica dell'esodo:** tramite l'integrazione con sistemi tipo DPAS (*Dynamic Path Allocation System*), ottimizzare i flussi di evacuazione in funzione della posizione reale del pericolo, evitando che gli occupanti percorrano vie di fuga compromesse dal fumo, dal calore o danneggiate.

3.2 - Architettura e Componenti del Sistema IRAI

La progettazione e la definizione dell'architettura dell'IRAI si fondano sui principi stabiliti dalle norme UNI EN 54-1 ed UNI 9795; tali documenti definiscono i criteri generali, il glossario e, in particolare, la gerarchia funzionale del sistema, strutturando l'impianto in componenti discreti ma interconnessi, il cui scopo è garantire affidabilità, selettività e tempestività di intervento. Le caratteristiche prestazionali ed i compiti di ogni dispositivo che compone l'impianto sono approfonditi all'interno della serie normativa UNI EN 54.

²⁴ **ASET:** è l'acronimo di *Available Safe Egress Time*; tale concetto viene trattato nel dettaglio nel Paragrafo 6.3.1.

²⁵ **Fase di cova:** è quel periodo di tempo in cui la combustione avviene in modo lento, spesso senza la presenza di fiamme libere visibili. In questa fase il calore prodotto è relativamente basso, ma avviene una significativa decomposizione termica dei materiali (pirolisi) che genera fumi, gas tossici e vapori.

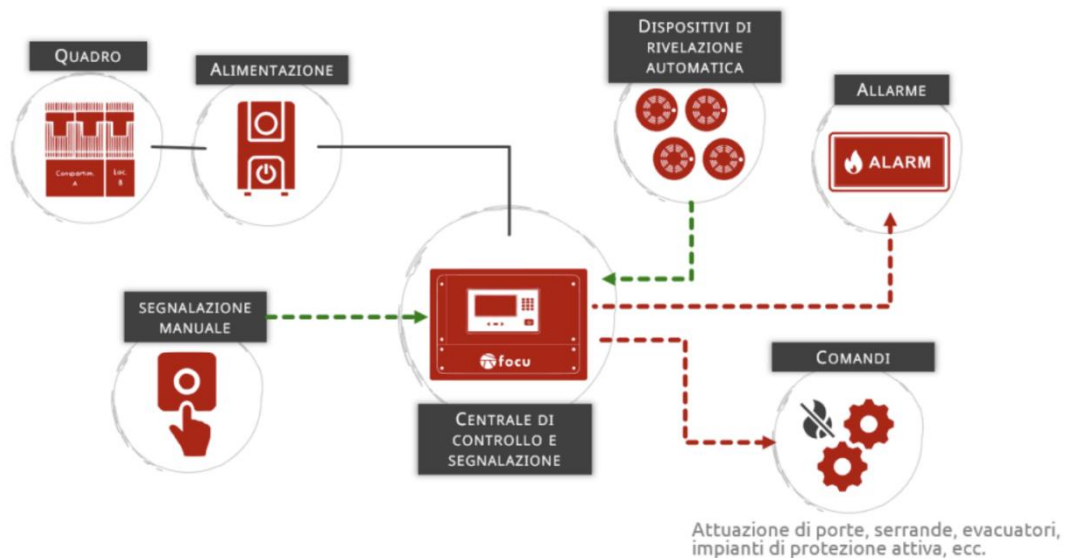


Figura 2: Architettura e componenti principali di un sistema IRAI

Come schematizzato nel diagramma funzionale della norma in seguito riportato, un sistema IRAI si configura come un'architettura distribuita, nella quale è possibile identificare le seguenti macro-categorie principali di componenti:

1. **Centrale di controllo e segnalazione:** indicata con l'acronimo CIE (*Control and Indicating Equipment*) e rappresentata con lettera B in Figura 3, rappresenta l'unità logica e decisionale dell'intero sistema IRAI. In conformità ai requisiti della norma UNI EN 54-2, è progettata per garantire:
 - la ricezione e l'analisi dei segnali, infatti riceve, elabora e valida i segnali di allarme e di guasto provenienti dai rivelatori di incendio e dai punti di chiamata manuale posizionati sul campo;
 - monitoraggio dell'integrità dei circuiti, infatti supervisiona costantemente lo stato dei circuiti di interconnessione, rilevando e segnalando tempestivamente anomalie elettriche (quali il circuito aperto, il cortocircuito o la dispersione verso terra);
 - attivare la sequenza gerarchica di allarme, determinando se le condizioni rilevate richiedano l'intervento manuale o l'attivazione automatica delle procedure di esodo e contenimento (allarme d'incendio);
2. **Dispositivi di rivelazione incendio automatici e ad attivazione manuale:** l'acquisizione di segnali relativi alla presenza di un potenziale incendio all'interno dell'edificio è affidata a dispositivi distinti che comunicano con la CIE tramite un

circuito, detto loop di comunicazione, solitamente realizzato tramite topologia ad anello chiuso, in modo da assicurare la ridondanza delle vie di comunicazione e garantire la trasmissione dati anche in presenza di un'interruzione fisica lungo la linea. Questi dispositivi sono:

- **Rivelatori di incendio automatici:** indicati in *Figura 3* dalla lettera A, sono dispositivi progettati per misurare costantemente i parametri fisici o chimici associati alla combustione (es: fumo, calore, variazioni ottiche); al fine di garantire la rivelazione precoce, vengono installati sensori ottici a diffusione di luce e sistemi di rivelazione fumi ad aspirazione (ASD), i quali permettono l'identificazione dell'evento nella fase di fase di cova;
 - **Pulsanti di allarme manuale:** indicati in *Figura 3* dalla lettera D, sono dispositivi ad azionamento umano che permettono a chiunque di inoltrare in modo inequivocabile la presenza di un pericolo imminente; l'attivazione di un pulsante manuale genera un segnale prioritario che, nella logica della CIE, determina l'allarme immediato, escludendo le logiche di ritardo o di conferma associate ai rivelatori automatici;
3. **Infrastruttura di segnalazione ed allarme:** la funzione di allarme per gli occupanti, essenziale per rispettare il tempo disponibile per l'esodo (ASET), viene gestita da:
- **Dispositivi di allarme antincendio:** indicati in *Figura 3* dalla lettera C, sono i componenti dedicati alla segnalazione ottico-acustica diffusa negli ambienti (quali sirene e pannelli luminosi conformi alle norme UNI EN 54-3 ed EN 54-23), progettati per garantire la percettibilità del segnale anche in condizioni ambientali avverse o in presenza di rumore di fondo;
 - **Interfaccia per sistemi vocali:** indicati dalla lettera M, qualora l'infrastruttura venga equipaggiata con sistemi di allarme vocale per scopi d'emergenza (detti sistemi EVAC o *Emergency Voice Alarm Communication*, conformi alla norma UNI ISO 7240-19), la CIE trasmette gli input logici per l'attivazione di messaggi preregistrati, atti a guidare gli occupanti verso i percorsi di esodo sicuri indicati dalla CIE;
4. **Apparecchiatura di alimentazione:** indicata con l'acronimo PSE (*Power Supply Equipment*) e rappresentata con lettera L in *Figura 3*, serve a garantire la

continuità di servizio; l'impianto è supportato da un'unità di alimentazione ausiliaria — conforme alla UNI EN 54-4 — dotata di accumulatori, dimensionati per supportare il carico nominale sia in condizioni di stand-by (tipicamente 24 o 72 ore), sia durante l'intero arco temporale dell'emergenza attiva. I cablaggi del sistema devono essere realizzati in conformità alla normativa CEI 20-105, la quale impone l'utilizzo di conduttori con specifiche caratteristiche di resistenza al fuoco. L'adozione di tali cavi serve per garantire che la trasmissione dei dati avvenga anche sotto l'effetto di elevate sollecitazioni termiche, assicurando che il sistema mantenga le proprie funzioni di monitoraggio e controllo durante il verificarsi dell'incendio;

5. **Terminali di comando e gestione dell'emergenza:** nell'ambito delle moderne strategie di *Fire Safety Engineering*²⁶, l'IRAI evolve da sistema di sola segnalazione, ad unità di coordinamento centrale dell'infrastruttura. Attraverso specifici dispositivi di attuazione, il sistema decide la risposta automatica e sincronizzata delle componenti impiantistiche, garantendo una gestione dinamica e tempestiva dell'emergenza. Questo processo si realizza tramite:

- **Apparecchiature di controllo della protezione antincendio:** indicate in *Figura 3* dalla lettera G, rappresentano i dispositivi preposti a trasmettere i segnali di attivazione ai sistemi di sicurezza. In particolare, esse gestiscono il comando porte, la compartimentazione della struttura e la gestione dell'esodo dinamico (sistema DPAS);
- **Sistemi di protezione antincendio:** indicati dalla lettera H, sono gli impianti sussidiari — come i sistemi automatici di estinzione o gli evacuatori di fumo e calore — che intervengono per limitare la propagazione dell'incendio dopo aver ricevuto il segnale dalla CIE;
- **Apparecchiature di trasmissione allarme e guasto:** indicate in *Figura 3* dalla lettera J, sono i dispositivi che si occupano di inoltrare automaticamente il segnale di emergenza a centri di monitoraggio esterni o a stazioni di soccorso. La loro funzione è cruciale per ridurre i tempi di

²⁶ **Fire Safety Engineering:** spesso indicato con la sigla FSE, è un approccio ingegneristico di tipo prestazionale basato sull'impiego di modelli analitici e calcoli fisici per la valutazione della sicurezza antincendio; l'argomento viene trattato nel dettaglio nel *Capitolo 4*.

risposta dei soccorritori, garantendo che l'allarme venga ricevuto anche in assenza di personale che possa effettuare una chiamata manuale.

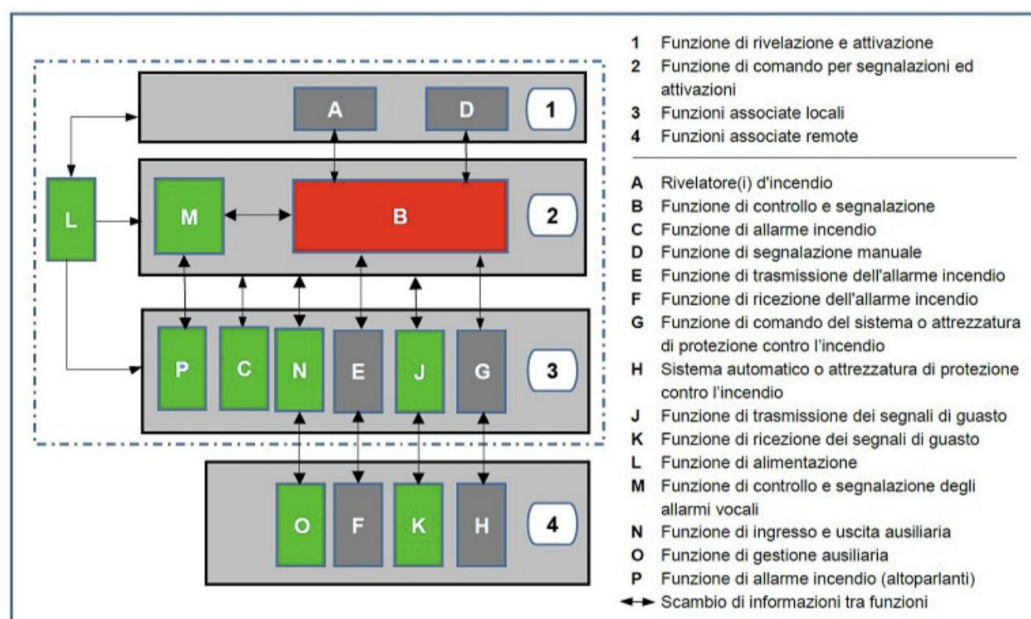


Figura 3: Diagramma funzionale di un impianto IRAI secondo norma UNI EN 54-1 (in verde sono rappresentate le funzioni che riguardano l'impianto EVAC)

3.3 - Architettura dei sistemi IRAI: tradizionale ed indirizzabile

L'architettura di comunicazione tra la centrale di controllo ed i dispositivi periferici è definita dalla norma UNI 9795:2021, e la sua scelta è determinante per garantire l'efficacia del monitoraggio e la rapidità di intervento. Ne esistono due tipologie:

1. **Sistemi convenzionali:** i dispositivi sono collegati in parallelo su linee che definiscono distinte zone di rivelazione; in caso di evento, la centrale segnala l'allarme riferito all'intera zona, senza poter identificare il singolo rivelatore attivato. Come sancito dalla norma UNI 9795, questa architettura presenta limiti sulla superficie massima coperta e sul numero di punti per linea, risultando idonea solo per strutture di piccole dimensioni o con compartimentazioni semplici;
2. **Sistemi indirizzabili:** definiti anche come sistemi a protocollo indirizzato, ogni componente possiede un indirizzo univoco che lo identifica singolarmente all'interno del sistema. La centrale comunica con i dispositivi tramite un loop di comunicazione ad anello chiuso, permettendo uno scambio di dati bidirezionale e

continuo. Questa configurazione, standard per le grandi infrastrutture interrato, offre significativi vantaggi:

- **Localizzazione puntuale:** permette di individuare l'esatta posizione della sorgente di incendio, accelerando le operazioni di soccorso;
- **Interazione con i sistemi di protezione attiva:** consente di attuare logiche di comando selettive (es: attivazione dei soli sistemi di estrazione fumi o delle porte tagliafuoco dei compartimenti interessati) evitando così l'attivazione dell'intero impianto;
- **Efficienza manutentiva:** in conformità alla UNI 11224, il sistema trasmette dati diagnostici in tempo reale, segnalando preventivamente la necessità di pulizia o anomalie sui singoli sensori;
- **Affidabilità elettrica:** la struttura ad anello garantisce la continuità della comunicazione anche in caso di guasto accidentale del cavo in un punto della linea.

3.4 - Classificazione dei dispositivi di rivelazione d'incendio automatici

I dispositivi di rivelazione d'incendio sono i componenti fondamentali del sistema IRAI ed hanno il compito di monitorare costantemente i parametri ambientali per individuare tempestivamente i fenomeni fisici o chimici associati ad una possibile sorgente di incendio. La loro classificazione e i requisiti prestazionali sono definiti dalla serie normativa UNI EN 54, mentre i criteri per il loro corretto posizionamento e dimensionamento sono dettati dalla norma UNI 9795:2021. In base al fenomeno rilevato, i dispositivi si classificano nelle seguenti categorie principali:

- **Rivelatori di fumo:** sono la tecnologia principale per garantire una rivelazione precoce; ne esistono di più tipologie:
 - **Rivelatori ottici puntiformi:** normati dalla UNI EN 54-7, questi dispositivi basano il proprio funzionamento sul principio della diffusione

luminosa, noto come *effetto Tyndall*²⁷. All'interno di una camera ottica oscurata, un emettitore LED a infrarossi e un ricevitore — che in genere è un fotodiodo — sono posizionati in modo da non essere allineati; in condizioni normali, il raggio luminoso non colpisce il sensore. L'ingresso di particelle di fumo nella camera provoca la deviazione dei raggi luminosi che, rimbalzando sulle particelle, colpiscono il fotodiodo attivando così il segnale di allarme;



Figura 4: Rivelatore ottico puntiforme

- **Rivelatori ottici-lineari:** normati dalla UNI EN 54-12, funzionano creando un fascio di luce infrarossa che viene inviato da un trasmettitore ad un ricevitore (o ad un'unità riflettente). Il sistema monitora costantemente l'integrità del segnale, in quanto se il fumo attraversa il raggio, ne provoca un'attenuazione; quando l'intensità della luce che arriva al ricevitore scende sotto una soglia stabilita per un tempo impostato, il dispositivo fa scattare l'allarme. È la soluzione standard per gli atrii delle stazioni, dove un singolo sensore a soffitto sarebbe inefficace per l'altezza eccessiva della struttura;

²⁷ **Effetto Tyndall:** consiste nella diffusione della luce da parte di piccole particelle sospese nell'aria; è il principio che permette ai sensori di rilevare la presenza di fumo, in quanto questo devia il raggio luminoso verso il sensore interno, attivando così l'allarme.

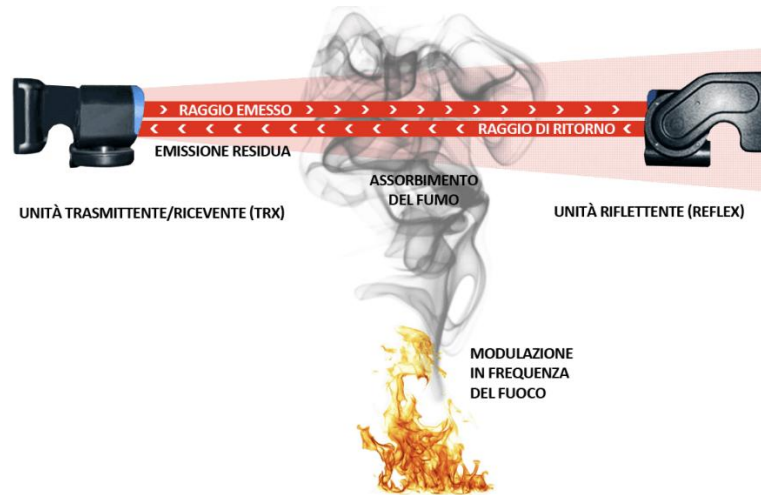


Figura 5: Schema funzionale di un rivelatore ottico-lineare

- **Sistemi ad aspirazione:** indicati con la sigla ASD (*Aspirating Smoke Detection*) e normati dalla UNI EN 54-20, questi dispositivi operano tramite il campionamento continuo dell'aria. Una ventola interna aspira l'aria dall'area protetta attraverso una rete di tubazioni, per convogliarla verso un sensore laser capace di rilevare eventuali particelle di combustione. È possibile scegliere il grado di sensibilità tra Classe A, B e C in funzione dello scenario d'incendio. Sono la scelta privilegiata per le infrastrutture di trasporto, in quanto possono essere posizionati in un locale tecnico, facilitando la manutenzione senza interferire con l'esercizio della stazione;

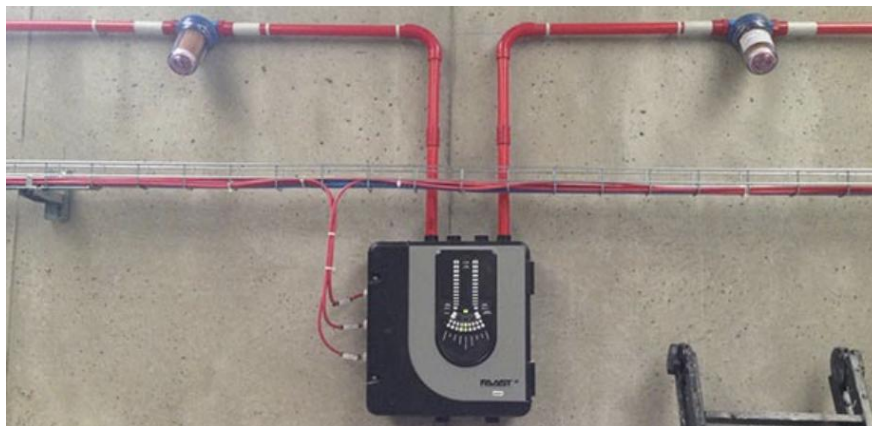


Figura 6: Sistema ad aspirazione (ASD)

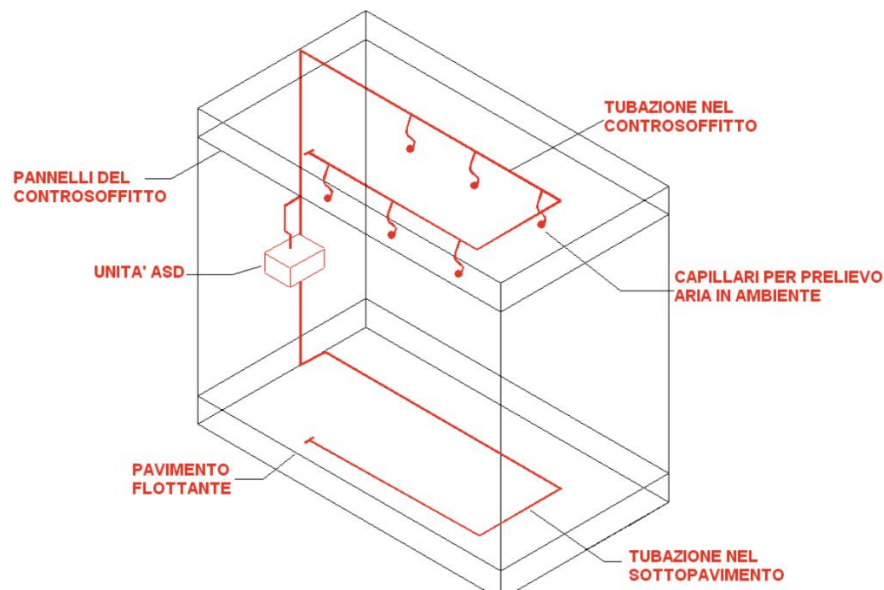


Figura 7: Schema funzionale di un sistema ad aspirazione (ASD)

- **Rivelatori di calore:** normati dalla UNI EN 54-5, vengono utilizzati in ambienti dove la presenza di polveri o vapori renderebbe inaffidabile la rivelazione ottica; si distinguono in:
 - **Termostatici:** intervengono al superamento di una soglia di temperatura fissa, generalmente impostata tra i 54°C e i 65°C;
 - **Termovelocimetrici:** analizzano la velocità di incremento della temperatura (espressa in °C/min) dell'ambiente nel quale vengono installati, garantendo una risposta più rapida in caso di incendio;



Figura 8: Rivelatore di calore termovelocimetrico

- **Rivelatori di fiamma:** normati dalla UNI EN 54-10, sono dei sistemi ottici progettati per rilevare le radiazioni elettromagnetiche emesse dai combustibili durante la fase di fiamma. Operano nelle frequenze dell'infrarosso, dell'ultravioletto o in combinazione multi-spettro per minimizzare i falsi allarmi dovuti a fonti luminose esterne (come i riflessi solari o l'illuminazione artificiale);



Figura 9: Rivelatore di fiamma

- **Rivelatori multi-sensore:** normati dalla UNI EN 54-29, sono dispositivi avanzati che integrano in un unico corpo una camera ottica e un elemento termico. La logica di analisi del dispositivo elabora contemporaneamente entrambi i segnali, consentendo di distinguere un incendio reale da fenomeni di disturbo ambientale, aumentando significativamente l'affidabilità del sistema;
- **Termocamere per aree di ricarica veicoli elettrici:** normate dalla UNI EN 54-10, sono impiegate per la protezione specifica delle postazioni di ricarica dei veicoli elettrici. Questi sistemi analizzano lo spettro infrarosso per rilevare anomalie termiche sulle batterie dei veicoli prima ancora che si sviluppi fumo visibile;



Figura 10: Termocamere per aree di ricarica veicoli elettrici

- **Rivelatori di gas e vapori:** normati dalle UNI EN 50545-1 ed UNI EN 60079-29-1, pur non essendo propriamente sensori d'incendio, sono integrati nel sistema di controllo per monitorare le concentrazioni di monossido di carbonio (CO) e vapori di benzina. Questi dispositivi sono essenziali nelle strutture interrato per attivare le strategie di ventilazione e garantire sia l'igiene ambientale sia la prevenzione di atmosfere esplosive.



Figura 11: Rivelatore di gas e vapori

4 - Fire Safety Engineering (FSE) e D.M. 03/08/2015

L'Ingegneria della Sicurezza Antincendio, internazionalmente nota come *Fire Safety Engineering* (FSE), rappresenta l'applicazione di principi ingegneristici, regole e giudizi esperti basati sulla valutazione del fenomeno della combustione e dei suoi effetti. A differenza dell'approccio deterministico tradizionale, la FSE mira a garantire la salvaguardia della vita, dei beni e dell'ambiente attraverso una progettazione di tipo prestazionale.

Le procedure della FSE sono regolate da norme e decreti specifici che indicano i passaggi tecnici da seguire; i riferimenti di maggior rilevanza sono:

- **D.M. 03/08/2015:** anche detto Codice di Prevenzione Incendi, è il documento fondamentale che legittima l'uso dell'approccio prestazionale attraverso la Sezione M (Metodi), definendo i criteri e le modalità per l'impiego dell'ingegneria antincendio in alternativa alle soluzioni conformi;
- **D.M. 18/10/2019:** rappresenta il principale aggiornamento tecnico del D.M. 03/08/2015, che ha reso l'applicazione dei metodi prestazionali ancora più integrata, semplificando la scelta delle strategie da applicare;
- **UNI ISO 23932-1:** è la norma internazionale che stabilisce i requisiti generali e il processo iterativo per una corretta progettazione ingegneristica, garantendo che l'analisi sia condotta secondo criteri scientifici riconosciuti;
- **Linee guida del CNVVF:** circolari e note tecniche, emanate dal Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, che forniscono indicazioni pratiche sull'uso dei software di simulazione e sui criteri di accettazione dei risultati ottenuti.

All'interno precedente elenco, il D.M. 03/08/2015 risulta essere il documento cardine, il quale è fondato su due ipotesi concettuali definite nel Capitolo G.2:

- **Unicità dell'innescò:** in condizioni ordinarie, si assume che l'incendio si sviluppi a partire da un solo punto di origine. Questa ipotesi semplifica la modellazione degli scenari senza compromettere la sicurezza complessiva;
- **Impossibilità del rischio nullo:** si riconosce esplicitamente che il rischio d'incendio non può essere azzerato. Pertanto, l'obiettivo delle misure di prevenzione, protezione e gestione incendi non è l'eliminazione totale del

pericolo, ma la sua minimizzazione (in termini di probabilità e conseguenze) entro soglie di accettabilità predefinite.

4.1 - Indicazioni generali per la progettazione di impianti antincendio

Come definito nel Capitolo G.2 del D.M. 03/08/2015, la progettazione della sicurezza antincendio si configura come un processo iterativo finalizzato alla mitigazione del rischio attraverso un approccio sistematico. Tale iter costituisce la base metodologica per la sicurezza di ogni opera e trova applicazione universale, indipendentemente dalla destinazione d'uso dell'attività o dalla disponibilità di specifiche regole tecniche verticali (RTV) dedicate.

La progettazione si articola in sei fasi sequenziali che possono essere ripercorse fino al raggiungimento degli obiettivi prefissati:

1. **Definizione dello scopo:** descrizione qualitativa e quantitativa dell'attività, del suo contesto e dei vincoli operativi;
2. **Individuazione degli obiettivi:** definizione dei traguardi di sicurezza relativi alla salvaguardia della vita, dell'incolumità delle persone e della tutela dei beni e dell'ambiente;
3. **Valutazione del rischio d'incendio:** analisi specifica atta ad individuare le ipotesi d'incendio più severe, ma credibili, e le relative conseguenze per gli occupanti e la struttura;
4. **Attribuzione dei profili di rischio:** definizione degli indicatori R_{vita} , R_{beni} ed $R_{ambiente}$ ²⁸;
5. **Definizione della strategia antincendio:** scelta delle misure preventive, protettive e gestionali, con attribuzione dei relativi livelli di prestazione;
6. **Verifica di compatibilità:** fase di controllo finale in cui si valuta se la strategia adottata garantisce il raggiungimento degli obiettivi; nel caso in cui il progetto non garantisca il raggiungimento degli obiettivi inizialmente definiti, il progettista

²⁸ R_{vita} , R_{beni} ed $R_{ambiente}$: questi indicatori vengono trattati nel dettaglio nel *Paragrafo 4.2.3*.

deve iterare nuovamente le fasi della strategia antincendio per trovare nuove soluzioni progettuali idonee.

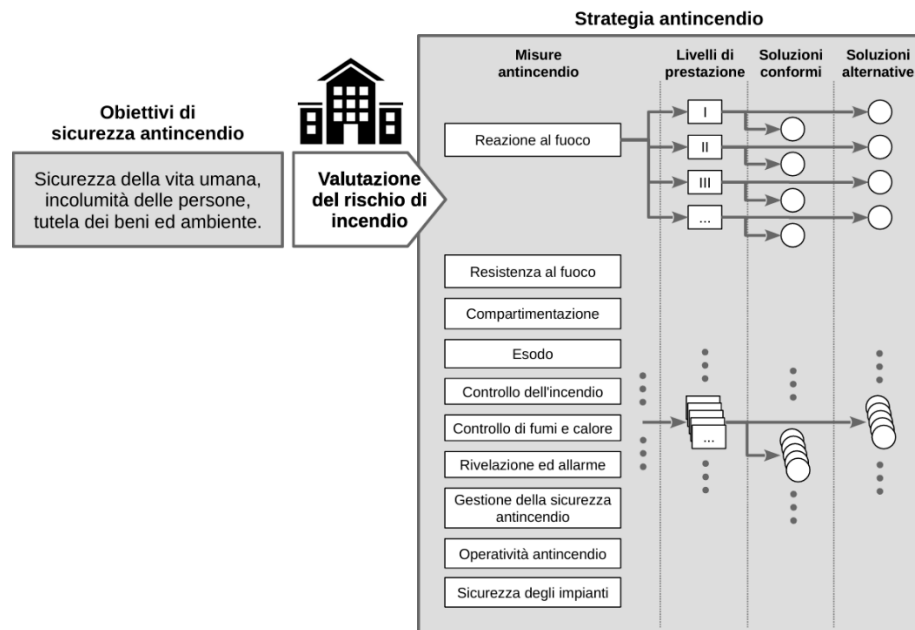


Figura 12: Schematizzazione dell'iter per la progettazione di impianti per la sicurezza antincendio

4.2.1 - Valutazione del Rischio

La valutazione del rischio rappresenta il cuore tecnico della progettazione antincendio, infatti questa deve considerare i seguenti aspetti:

- **Identificazione dei pericoli d'incendio:** analisi delle sorgenti d'innesco, valutazione del carico d'incendio e delle potenziali interazioni tra i materiali combustibili presenti;
- **Descrizione del contesto:** definizione delle caratteristiche geometriche dell'infrastruttura, dei sistemi di compartimentazione e delle condizioni di ventilazione (naturale o meccanica) dei locali;
- **Analisi degli esposti all'incendio:** quantificazione e tipologia degli occupanti e dei beni che si devono proteggere in caso d'incendio.

I risultati di questa analisi permettono al progettista di determinare i profili di rischio R_{vita} , R_{beni} ed $R_{ambiente}$, i quali servono a loro volta per la scelta dei livelli di

prestazione per le diverse misure antincendio (come ad esempio reazione al fuoco, rilevazione ed allarme, controllo fumi e calore).

4.2.2 - Soluzioni progettuali ed integrazione con le normative

Per ogni livello di prestazione individuato, il progettista può adottare differenti soluzioni progettuali, come definito dalla sezione G del Codice:

- **Soluzioni conformi:** fornite direttamente dalla sezione S del D.M. 03/08/2015, non richiedono alcuna dimostrazione;
- **Soluzioni alternative:** richiedono l'impiego dei metodi della FSE, infatti il progettista deve dimostrare il raggiungimento del livello di prestazione richiesto attraverso modelli fisici o fluidodinamici, garantendo la conformità agli obiettivi di sicurezza;
- **Soluzioni in deroga:** vengono adottate quando non è possibile applicare né le soluzioni conformi né quelle alternative e richiedono un'approvazione specifica da parte del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco (CNVVF).

A prescindere della soluzione adottata, l'implementazione delle misure antincendio deve avvenire in accordo con il principio di regola d'arte. In particolare, per i sistemi attivi di protezione, i riferimenti normativi essenziali rimangono:

- **UNI 9795 e Serie UNI EN 54:** per i sistemi di rivelazione e segnalazione allarme incendio (sistema IRAI);
- **UNI ISO 23932-1:** per l'applicazione dei protocolli di ingegneria della sicurezza antincendio;
- **Norma CEI 64-8:** per i requisiti di sicurezza, installazione e continuità di servizio degli impianti elettrici.

Una volta definita la strategia antincendio, il progetto deve essere sottoposto a valutazione presso il Comando territoriale del CNVVF. Tale fase di verifica è finalizzata a validare la congruenza delle soluzioni adottate — con particolare attenzione a quelle di tipo alternativo — rispetto ai traguardi di sicurezza prefissati. L'integrazione delle osservazioni dell'organo di controllo risulta propedeutica per ottenere il parere

favorevole²⁹ del progetto, atto necessario per procedere con la successiva fase di cantierizzazione, installazione e collaudo dei sistemi.

4.2.3 - Calcolo dei profili di rischio R_{vita} , R_{beni} ed $R_{ambiente}$

La valutazione del rischio d'incendio viene descritta attraverso la definizione di tre profili fondamentali:

1. R_{vita} : profilo di rischio relativo alla salvaguardia della vita umana;
2. R_{beni} : profilo di rischio relativo alla salvaguardia dei beni economici;
3. $R_{ambiente}$: profilo di rischio relativo alla tutela dell'ambiente.

Il profilo R_{vita} è il parametro che definisce il potenziale pericolo per le persone; questo si determina tramite una tabella basata su due variabili qualitative trasformate in indici tecnici, ovvero:

- **Caratteristiche degli occupanti δ_{occ}** : valuta lo stato di veglia degli occupanti e la loro familiarità con l'ambiente (come, ad esempio, persone sveglie e che conoscono i luoghi, come in un ufficio, o persone che non conoscono l'ambiente, come in un centro commerciale);

Tabella 1: Determinazione delle caratteristiche degli occupanti δ_{occ}

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

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

²⁹ **Parere favorevole:** ai sensi del D.P.R. 151/2011, rappresenta l'atto con cui il Comando del CNVVF convalida la conformità tecnica del progetto prima della sua realizzazione. Esso costituisce il presupposto necessario per il successivo rilascio della DiCo da parte dell'installatore; quest'ultima, infatti, deve attestare la rispondenza delle opere realizzate al progetto preventivamente validato dall'organo di controllo.

- **Velocità caratteristica di crescita dell'incendio δ_a :** valuta quanto rapidamente si propagano fiamme ed i fumi in base ai materiali presenti.

Tabella 2: Determinazione della velocità caratteristica di crescita dell'incendio δ_a

δ_a	t_a [1]	Criteri
1	600 s lenta	Ambiti di attività con carico di incendio specifico $q_f \leq 200 \text{ MJ/m}^2$, oppure ove siano presenti prevalentemente materiali o altri combustibili che contribuiscono in modo trascurabile all'incendio.
2	300 s media	Ambiti di attività ove siano presenti prevalentemente materiali o altri combustibili che contribuiscono in modo moderato all'incendio.
3	150 s rapida	Ambiti con presenza di significative quantità di materiali plastici impilati, prodotti tessili sintetici, apparecchiature elettriche e elettroniche, materiali combustibili non classificati per reazione al fuoco (capitolo S.1). Ambiti ove avvenga impilamento verticale di significative quantità di materiali combustibili con $3,0 \text{ m} < h \leq 5,0 \text{ m}$ [2]. Stoccaggi classificati HHS3 oppure attività classificate HHP1, secondo la norma UNI EN 12845. Ambiti con impianti tecnologici o di processo che impiegano significative quantità di materiali combustibili. Ambiti con contemporanea presenza di materiali combustibili e lavorazioni pericolose ai fini dell'incendio.
4	75 s ultra-rapida	Ambiti ove avvenga impilamento verticale di significative quantità di materiali combustibili con $h > 5,0 \text{ m}$ [2]. Stoccaggi classificati HHS4 oppure attività classificate HHP2, HHP3 o HHP4, secondo la norma UNI EN 12845. Ambiti ove siano presenti o in lavorazione significative quantità di sostanze o miscele pericolose ai fini dell'incendio, oppure materiali plastici cellulari/espansi o schiume combustibili non classificati per la reazione al fuoco.

A meno di valutazioni più approfondite da parte del progettista (es. dati di letteratura, misure dirette, ...), si ritengono *non significative* ai fini della presente classificazione almeno le quantità di materiali nei compartimenti con carico di incendio specifico $q_f \leq 200 \text{ MJ/m}^2$.

[1] Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio.
[2] Con h altezza d'impilamento.

Incrociando questi due indici, facendo riferimento alla *Tabella 3*, si ottiene il profilo di rischio R_{vita} associato alla struttura.

Tabella 3: Calcolo del profilo di rischio per la salvaguardia della vita umana R_{vita}

Caratteristiche prevalenti degli occupanti δ_{occ}		Velocità caratteristica prevalente dell'incendio δ_a			
		1 lenta	2 media	3 rapida	4 ultra-rapida
A	Gli occupanti sono in stato di veglia ed hanno familiarità con l'edificio	A1	A2	A3	A4
B	Gli occupanti sono in stato di veglia e non hanno familiarità con l'edificio	B1	B2	B3	Non ammesso [1]
C	Gli occupanti possono essere addormentati: [2]	C1	C2	C3	Non ammesso [1]
Ci	• in attività individuale di lunga durata	Ci1	Ci2	Ci3	Non ammesso [1]
Cii	• in attività gestita di lunga durata	Cii1	Cii2	Cii3	Non ammesso [1]
Ciii	• in attività gestita di breve durata	Ciii1	Ciii2	Ciii3	Non ammesso [1]
D	Gli occupanti ricevono cure mediche	D1	D2	Non ammesso [1]	Non ammesso
E	Occupanti in transito	E1	E2	E3	Non ammesso [1]

[1] Per raggiungere un valore ammesso, δ_a può essere ridotto di un livello come specificato nel comma 3 del paragrafo G.3.2.1.

[2] Quando nel presente documento si usa il valore C1 la relativa indicazione è valida per Ci1, Cii1 e Ciii1. Se si usa C2 l'indicazione è valida per Ci2, Cii2 e Ciii2. Se si usa C3 l'indicazione è valida per Ci3, Cii3 e Ciii3.

Il profilo di rischio R_{beni} è finalizzato a salvaguardare il patrimonio economico e viene determinato in funzione del carattere strategico dell'attività, oltre all'eventuale valore storico, culturale, architettonico o artistico della struttura e dei beni in essa contenuti; questo viene determinato facendo riferimento alla *Tabella 4*³⁰.

Tabella 4: Determinazione del profilo di rischio relativo alla salvaguardia dei beni economici R_{beni}

		Attività o ambito vincolato	
		No	Sì
Attività o ambito strategico	No	$R_{beni} = 1$	$R_{beni} = 2$
	Sì	$R_{beni} = 3$	$R_{beni} = 4$

Il profilo di rischio $R_{ambiente}$ descrive il potenziale danno ambientale conseguente a un incendio. Tale profilo assume un valore di tipo binario (significativo o non significativo) e la sua valutazione è condotta dal progettista analizzando l'interazione tra l'ubicazione dell'attività e i potenziali bersagli sensibili esterni, tenendo conto del carico d'incendio specifico e della tossicità dei prodotti della combustione. Ai sensi del Capitolo G.3 del D.M. 03/08/2015, esso è considerato non significativo nel caso di attività civili — cioè strutture sanitarie, scolastiche, alberghiere o infrastrutture di trasporto — e in ambiti protetti da sistemi automatici di estinzione ad alta affidabilità e disponibilità superiore.

4.3 - Assegnazione dei livelli di prestazione per reazione al fuoco

La reazione al fuoco è una misura di protezione passiva, i cui effetti principali si manifestano nella fase di innesco e nel primo sviluppo dell'incendio. L'obiettivo primario di tale misura è limitare la partecipazione dei materiali alla combustione, contenendo la propagazione delle fiamme e la velocità di rilascio del calore. La reazione al fuoco valuta il comportamento dei materiali nelle effettive condizioni di posa in opera, determinandone l'inflammabilità e la produzione di fumi o detriti incandescenti mediante prove standardizzate. In conformità al Capitolo S.1 del D.M. 03/08/2015, l'attribuzione dei requisiti di reazione al fuoco avviene attraverso specifici livelli di prestazione e

³⁰ È bene precisare che, nella *Tabella 4*, un ambito risulta essere vincolato se l'edificio o i beni al suo interno sono tutelati per legge per il loro valore storico o artistico; risulta essere strategico se è fondamentale per i soccorsi o se il proprietario ne vuole garantire il funzionamento anche dopo il verificarsi di un incendio.

specifici criteri di attribuzione, i quali sono riportati nella *Tabella 5.1*, *Tabella 5.2* e *Tabella 6*.

Tabella 5.1: Livelli di prestazione per la reazione al fuoco

Livello di prestazione	Descrizione
I	Il contributo all'incendio dei materiali non è valutato
II	I materiali contribuiscono in modo significativo all'incendio
III	I materiali contribuiscono in modo moderato all'incendio
IV	I materiali contribuiscono in modo quasi trascurabile all'incendio

Per *contributo all'incendio* si intende l'energia rilasciata dai materiali che influenza la crescita e lo sviluppo dell'incendio in condizioni pre e post incendio generalizzato (flashover) secondo EN 13501-1.

Tabella 5.2: Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione per le vie d'esodo dell'attività

Livello di prestazione	Criteri di attribuzione
I	Vie d'esodo [1] non ricomprese negli altri criteri di attribuzione.
II	Vie d'esodo [1] dei compartimenti con profilo di rischio R_{vita} in B1.
III	Vie d'esodo [1] dei compartimenti con profilo di rischio R_{vita} in B2, B3, Cii1, Cii2, Cii3, Ciii1, Ciii2, Ciii3, E1, E2, E3.
IV	Vie d'esodo [1] dei compartimenti con profilo di rischio R_{vita} in D1, D2.

[1] Limitatamente a vie d'esodo verticali, percorsi d'esodo (corridoi, atri, filtri, ...) e spazi calmi.

Tabella 6: Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione per altri locali dell'attività

Livello di prestazione	Criteri di attribuzione
I	Locali non ricompresi negli altri criteri di attribuzione.
II	Locali di compartimenti con profilo di rischio R_{vita} in B2, B3, Cii1, Cii2, Cii3, Ciii1, Ciii2, Ciii3, E1, E2, E3.
III	Locali di compartimenti con profilo di rischio R_{vita} in D1, D2.
IV	Su specifica richiesta del committente, previsti da capitolati tecnici di progetto, richiesti dalla autorità competente per costruzioni destinate ad attività di particolare importanza.

4.4.1 - Assegnazione dei livelli di prestazione per resistenza al fuoco

La finalità della resistenza al fuoco è garantire la capacità portante delle strutture in caso di incendio³¹ e l'efficacia dei sistemi di compartimentazione per un intervallo temporale sufficiente al raggiungimento degli obiettivi di sicurezza primaria. Tale misura è volta a prevenire il collasso strutturale, agevolare l'esodo degli occupanti e consentire l'intervento

³¹ **Capacità portante in caso di incendio:** è l'attitudine di un elemento strutturale a conservare la propria stabilità meccanica in presenza dei carichi eccezionali dovuti a un incendio, garantendo la sicurezza fino al raggiungimento del tempo limite fissato dallo scenario di progetto.

dei soccorritori in condizioni di sicurezza. In conformità al D.M. 03/08/2015, vengono definiti cinque livelli di prestazione per le opere da costruzione, differenziati in base alla complessità dell'opera e al profilo di rischio, i quali vengono riportati nella *Tabella 7*.

Tabella 7: Livelli di prestazione per la resistenza al fuoco

Livello di prestazione	Descrizione
I	Assenza di conseguenze esterne per collasso strutturale
II	Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo sufficiente all'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro all'esterno della costruzione.
III	Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo congruo con la durata dell'incendio.
IV	Requisiti di resistenza al fuoco tali da garantire, dopo la fine dell'incendio, un limitato danneggiamento della costruzione.
V	Requisiti di resistenza al fuoco tali da garantire, dopo la fine dell'incendio, il mantenimento della totale funzionalità della costruzione stessa.

Per garantire il soddisfacimento dei livelli di prestazione prefissati, il D.M. 03/08/2015 definisce delle soluzioni progettuali conformi ed alternative; la scelta della strategia dipende dal profilo di rischio e dalle caratteristiche dell'opera, in particolare si ha che:

- **Livelli I e II:** i requisiti di sicurezza si basano sulla scelta di distanze di separazione adeguate agli spazi a cielo libero, limitando la propagazione dell'incendio verso altre opere e senza richiedere prestazioni di resistenza al fuoco specifiche per il compartimento interno;
- **Livello III:** rappresenta lo standard progettuale per la maggior parte delle attività; in questo caso la verifica delle prestazioni si basa su incendi convenzionali e la classe minima di resistenza al fuoco viene ricavata in funzione del carico d'incendio specifico di progetto $q_{f,d}$ ³²;
- **Livelli IV e V:** sono destinati a infrastrutture con requisiti di sicurezza superiori o con finalità di continuità operativa. Questi livelli introducono criteri di controllo del danneggiamento strutturale molto stringenti, infatti, oltre alla stabilità, è necessario verificare i limiti di deformabilità degli elementi portanti — come, ad

³² **Carico d'incendio specifico di progetto $q_{f,d}$:** tale concetto viene spiegato nel dettaglio nel Paragrafo 4.5.

esempio, il rapporto $\frac{\delta_{v,max}}{L} = \frac{1}{100}$ per travi e solai³³ — e garantire la tenuta ai fumi degli elementi di chiusura. Il livello V è il più elevato, in quanto estende tali verifiche anche agli impianti significativi ed assicura la piena resilienza dell'opera anche a seguito dell'evento termico.

La verifica della resistenza al fuoco per il soddisfacimento dei livelli di prestazione può essere svolta scegliendo tra due approcci, i quali si differenziano per il modello termico adottato:

- **Curve nominali di incendio:** è l'approccio convenzionale utilizzato per le soluzioni conformi; queste curve si basano su incendi “standard” definiti matematicamente e indipendenti dalle caratteristiche reali del compartimento. La curva principale è la nominale standard (ISO 834), la cui espressione è la seguente:

$$\vartheta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1)$$

dove ϑ_g rappresenta la temperatura media dei gas caldi all'interno del compartimento espressa in [°C], mentre t indica il tempo di esposizione all'incendio e viene espresso [min]. Questo modello viene applicato a un singolo compartimento³⁴ alla volta, tuttavia, nel caso di edifici multipiano, la presenza di elementi orizzontali di separazione con adeguata resistenza al fuoco consente di considerare il carico d'incendio dei singoli piani separatamente, evitando di sommare i carichi dell'intera struttura. È bene precisare che con questo approccio si ottiene una verifica cautelativa e semplificata della stabilità strutturale;

- **Curve naturali di incendio:** è l'approccio prestazionale impiegato per lo sviluppo di soluzioni alternative nell'ambito della FSE. Tali curve descrivono l'andamento reale delle temperature in funzione dei parametri fisici specifici, ovvero la ventilazione, la geometria ed il carico d'incendio effettivo del

³³ Si precisa che la formula indicata è contenuta nelle prescrizioni delle NTC 2018 (norme tecniche per le costruzioni), dove $\delta_{v,max}$ indica il massimo spostamento verticale (definito inflessione) subito dall'elemento strutturale per effetto dei carichi, mentre L rappresenta la luce di calcolo dell'elemento considerato, ovvero la distanza tra i relativi appoggi.

³⁴ **Compartimento:** tale concetto viene spiegato nel dettaglio nel *Paragrafo 4.6.1*.

compartimento q_f . A differenza del modello nominale, questo approccio permette di simulare l'intero sviluppo dell'incendio, includendo anche la fondamentale fase di raffreddamento.

4.4.2 - Simbologia e classificazione delle prestazioni di resistenza al fuoco

All'interno del D.M. 03/08/2015 viene spiegato come, per definire le prestazioni di resistenza al fuoco, si utilizzi un elenco di simboli per gli elementi costruttivi o strutturali; tra questi, quelli più comuni impiegati nella progettazione antincendio sono i seguenti:

- **R (capacità portante):** indica la capacità di un elemento strutturale di portare i carichi presenti in condizioni di incendio normalizzato, per un certo periodo di tempo;
- **E (tenuta):** indica la capacità di un elemento costruttivo o strutturale di impedire il passaggio di fiamme e gas caldi per un certo periodo di tempo, in condizioni di incendio normalizzate;
- **I (isolamento):** indica la capacità di un elemento costruttivo o strutturale di impedire il passaggio del calore di un incendio normalizzato per un certo periodo di tempo;
- **C (dispositivo automatico di chiusura):** indica la capacità di chiusura di un varco da parte di un elemento costruttivo in condizioni normalizzate;
- **S (tenuta di fumo):** indica la capacità di un elemento di chiusura di limitare o ridurre il passaggio di gas o fumi in condizioni di prova normalizzate;

Oltre alle precedenti lettere principali, la norma individua ulteriori parametri specifici, di cruciale importanza per le infrastrutture più complesse e per la gestione dinamica dell'esodo:

- **W (irraggiamento):** indica la capacità di un elemento costruttivo di limitare l'irraggiamento termico dalla parte della superficie non esposta;
- **M (azione meccanica):** indica la capacità di un elemento di resistere all'impatto da parte di altri elementi senza perdere i requisiti di resistenza al fuoco;

- **P o PH (continuità di corrente o segnale):** indica la capacità di un cavo di mantenere inalterata la trasmissione di corrente o di segnali ottici in condizioni di incendio;
- **F e B (funzionalità degli evacuatori):** indica la capacità degli evacuatori di fumo motorizzati (F) o naturali (B) di conservare i propri requisiti di funzionamento durante il verificarsi di un incendio.

4.4.3 - Classi temporali e gerarchia prestazionale

È bene precisare che, oltre alla simbologia, il decreto definisce i principi per l'attribuzione delle classi di resistenza al fuoco, intese come l'intervallo di tempo (espresso in minuti) per il quale l'elemento garantisce la prestazione richiesta. Nello specifico, si evidenziano le seguenti regole di attribuzione:

1. Ai fini della resistenza al fuoco, i prodotti non marchiati CE possono essere classificati secondo i seguenti intervalli temporali discreti: 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 360 minuti; è fondamentale precisare che la classificazione ottenuta per un dato intervallo di tempo è sempre automaticamente estendibile a tutte le classi temporali inferiori;
2. L'attribuzione di una prestazione superiore implica automaticamente il soddisfacimento dei requisiti di prestazione inferiori per lo stesso intervallo di tempo, di conseguenza:
 - la classificazione REI-M comprende automaticamente anche le prestazioni REI, RE e R;
 - la classificazione EI-M comprende automaticamente anche le prestazioni EI e la prestazione singola E;
 - il requisito di isolamento termico I include automaticamente anche il requisito di limitazione dell'irraggiamento W.

4.5 - Calcolo del carico di incendio specifico di progetto $q_{f,d}$

Il carico d'incendio specifico di progetto, indicato con il simbolo $q_{f,d}$, è il parametro fondamentale per la determinazione della classe di resistenza al fuoco dei compartimenti antincendio. Questa grandezza rappresenta il potenziale termico per unità di superficie lorda, il cui valore viene corretto in funzione dei rischi specifici e delle misure di protezione adottate.

In conformità alla sezione S.2.9 del D.M. 03/08/2015, il suo valore viene espresso in $[\frac{MJ}{m^2}]$ e si ottiene applicando la seguente formula:

$$q_{f,d} = \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \cdot q_f$$

Si può notare che per il calcolo di $q_{f,d}$ compaiono i seguenti parametri:

- δ_{q1} : è il fattore adimensionale che tiene conto del rischio di incendio in relazione alla dimensione del compartimento; i suoi valori sono riportati nella *Tabella 8*;
- δ_{q2} : è il fattore adimensionale che tiene conto del rischio di incendio in relazione al tipo di attività svolta nel compartimento; i suoi valori sono riportati nella *Tabella 9*;
- δ_n : è il fattore adimensionale che tiene conto delle differenti misure antincendio del compartimento; questo si calcola come produttoria dei singoli fattori δ_{ni} (i cui valori vengono riportati nella *Tabella 10*) tramite la seguente formula:

$$\delta_n = \prod_i \delta_{ni}$$

- q_f : è il valore nominale del carico d'incendio specifico di un singolo compartimento espresso in $[\frac{MJ}{m^2}]$, il quale si calcola con la seguente formula:

$$q_f = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \cdot H_i \cdot m_i \cdot \psi_i}{A}$$

In particolare, g_i è la massa dell' i -esimo materiale combustibile espressa in [kg], H_i è il potere calorifico inferiore dell' i -esimo materiale combustibile espresso in $[\frac{MJ}{kg}]$, m_i è il fattore adimensionale di partecipazione alla combustione dell' i -esimo materiale combustibile (pari a 0,80 per il legno e altri materiali di natura cellulosica e 1,00 per tutti gli altri materiali), ψ_i è il fattore adimensionale di

limitazione della partecipazione alla combustione dell'i-esimo materiale combustibile (pari a 0 per i materiali contenuti in contenitori appositamente progettati per resistere al fuoco per un tempo congruente con la classe di resistenza al fuoco, 0,85 per i materiali contenuti in contenitori non combustibili, 1 in tutti gli altri casi), mentre A è la superficie lorda del piano del compartimento o, nel caso degli incendi localizzati, è la superficie lorda effettiva di distribuzione del carico di incendio e viene espressa in $[m^2]$.

Tabella 8: Parametri per la definizione del fattore δ_{q1}

Superficie lorda del compartimento $[m^2]$	δ_{q1}	Superficie lorda del compartimento $[m^2]$	δ_{q1}
$A < 500$	1,00	$2500 \leq A < 5000$	1,60
$500 \leq A < 1000$	1,20	$5000 \leq A < 10000$	1,80
$1000 \leq A < 2500$	1,40	$A \geq 10000$	2,00

Tabella 9: Parametri per la definizione del fattore δ_{q2}

Classi di rischio	Descrizione	δ_{q2}
I	Aree che presentano un basso rischio di incendio in termini di probabilità di innesco, velocità di propagazione delle fiamme e possibilità di controllo dell'incendio da parte delle squadre di emergenza	0,80
II	Aree che presentano un moderato rischio di incendio in termini di probabilità d'innesco, velocità di propagazione di un incendio e possibilità di controllo dell'incendio stesso da parte delle squadre di emergenza	1,00
III	Aree che presentano un alto rischio di incendio in termini di probabilità d'innesco, velocità di propagazione delle fiamme e possibilità di controllo dell'incendio da parte delle squadre di emergenza	1,20

Tabella 10: Parametri per la definizione del fattore δ_{ni}

Misura antincendio minima		δ_{ni}
Controllo dell'incendio di livello di prestazione III (capitolo S.6)	rete idranti con protezione interna	δ_{n1} 0,90
	rete idranti con protezione interna ed esterna	δ_{n2} 0,80
Controllo dell'incendio di livello di prestazione IV (capitolo S.6)	sistema automatico ad acqua o schiuma e rete idranti con protezione interna	δ_{n3} 0,54
	altro sistema automatico e rete idranti con protezione interna	δ_{n4} 0,72
	sistema automatico ad acqua o schiuma e rete idranti con protezione interna ed esterna	δ_{n5} 0,48
	altro sistema automatico e rete idranti con protezione interna ed esterna	δ_{n6} 0,64
Gestione della sicurezza antincendio di livello di prestazione II [1] (capitolo S.5)		δ_{n7} 0,90
Controllo di fumi e calore di livello di prestazione III (capitolo S.8)		δ_{n8} 0,90
Rivelazione ed allarme di livello di prestazione III (capitolo S.7)		δ_{n9} 0,85
Operatività antincendio di livello di prestazione IV (capitolo S.9)		δ_{n10} 0,81

[1] Gli addetti antincendio devono garantire la presenza continuativa durante le 24 ore.

4.6.1 - La compartimentazione

La compartimentazione rappresenta il pilastro fondamentale della protezione passiva contro l'incendio. Essa consiste nella suddivisione volumetrica dell'opera in più spazi tra loro isolati — definiti compartimenti — tramite l'impiego di elementi costruttivi (es: pareti, solai, sistemi di chiusura) dotati di specifica resistenza al fuoco, certificata secondo i criteri della norma UNI EN 13501-2. L'obiettivo primario è limitare la propagazione dei prodotti della combustione, garantendo per un tempo prestabilito l'incolumità degli occupanti lungo le vie di esodo e la stabilità strutturale dell'edificio.

In accordo con le prescrizioni del Capitolo S.3 del D.M. 03/08/2015, la finalità della compartimentazione è di limitare la propagazione dell'incendio e dei suoi effetti sia verso altre strutture, sia all'interno della struttura stessa; tale misura strategica viene realizzata nella pratica tramite:

- Compartimenti antincendio situati all'interno della stessa struttura;
- L'interposizione di distanze di separazione, tra la struttura stessa ed altre strutture adiacenti o altri bersagli combustibili, anche nel caso in cui questi siano locati in spazio a cielo libero.

Ai fini di una corretta strategia antincendio, la scelta della compartimentazione richiede l'individuazione di uno specifico livello di prestazione per l'intera struttura, il quale viene assegnato attraverso l'applicazione di precisi criteri di attribuzione riportati nella *Tabella 11* e nella *Tabella 12*:

Tabella 11: Livelli di prestazione per la compartimentazione

Livello di prestazione	Descrizione
I	Nessun requisito
II	È contrastata per un periodo congruo con la durata dell'incendio: • la propagazione dell'incendio verso altre attività; • la propagazione dell'incendio all'interno della stessa attività.
III	È contrastata per un periodo congruo con la durata dell'incendio: • la propagazione dell'incendio verso altre attività; • la propagazione dell'incendio e dei fumi freddi all'interno della stessa attività.

Tabella 12: Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione della compartimentazione

Livello di prestazione	Criteri di attribuzione
I	Non ammesso nelle attività soggette
II	Attività non ricomprese negli altri criteri di attribuzione
III	In relazione alle risultanze della valutazione del rischio nell'ambito e in ambiti limitrofi della stessa attività (es. attività con elevato affollamento, attività con geometria complessa o piani interrati, elevato carico di incendio specifico q_i , presenza di sostanze o miscele pericolose in quantità significative, presenza di lavorazioni pericolose ai fini dell'incendio, ...). Si può applicare in particolare ove sono presenti compartimenti con profilo di rischio R_{vita} compreso in D1, D2, Cii2, Cii3, Ciii2, Ciii3, per proteggere gli occupanti che dormono o che ricevono cure mediche.

Dopo aver definito il livello di prestazione dell'intera opera, il progettista deve applicare le soluzioni strutturali idonee a garantire l'isolamento richiesto, in particolare si ha che:

1. **Livello I:** non richiede alcuna specifica soluzione progettuale;
2. **Livello II:** la propagazione dell'incendio — sia verso le attività adiacenti che all'interno della struttura stessa — deve essere limitata applicando almeno una di queste due strategie:
 - Creazione di compartimenti antincendio fisici (es: pareti, solai);
 - Interposizione di adeguate distanze di sicurezza a cielo libero;
3. **Livello III:** richiede l'applicazione delle medesime strategie del Livello II, ma introduce l'obbligo tassativo di impiegare elementi costruttivi a tenuta di fumo (S_a) per la chiusura dei compartimenti.

Nel caso in cui le soluzioni standard (conformi) non siano applicabili, il Codice ammette per qualsiasi livello l'adozione di soluzioni alternative; in questo caso, il progettista è obbligato a dimostrare il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza ricorrendo ai metodi di calcolo analitico della *Fire Safety Engineering* (FSE).

Per completare la strategia di protezione passiva e garantire la sicurezza delle vie d'esodo, il Codice definisce alcune configurazioni speciali:

1. **Spazio scoperto:** è un volume a cielo libero o grigliato che, pur non essendo un compartimento, funge da separazione passiva tra le strutture; per essere considerato tale, lo spazio deve rispettare precisi vincoli geometrici:
 - Una superficie lorda minima in pianta non inferiore a tre volte l'altezza della parete più bassa che lo delimita;

- Una distanza minima tra le pareti verticali di almeno 3,50m;
 - In caso di copertura grigliata, rapporto tra la superficie utile e la superficie lorda totale della griglia $\geq 75\%$;
2. **Compartimento a prova di fumo:** è un volume protetto in cui è fisicamente impedito l'ingresso dei fumi provenienti dai locali adiacenti. Questo requisito imprescindibile per l'esodo sicuro si ottiene isolando il compartimento tramite filtri, spazi scoperti, oppure mediante soluzioni impiantistiche attive — come i sistemi a pressione differenziale progettati secondo norma UNI EN 12101-6 o i Sistemi di Evacuazione Fumo e Calore (indicati con la sigla SEFC);
3. **Filtro:** è un compartimento di transizione a basso rischio, concepito per separare in sicurezza aree diverse. Per essere classificato come tale, il locale non deve contenere lavorazioni o materiali pericolosi e deve rispettare parametri normativi stringenti:
- Classe di resistenza al fuoco minima di 30 minuti;
 - Sistemi di chiusura varchi (es: porte tagliafuoco) con prestazioni minime pari a E 30-S_a;
 - Carico d'incendio specifico limitato a $q_f \leq 50 \frac{MJ}{m^2}$;
4. **Filtro a prova di fumo:** unisce le caratteristiche del filtro standard alla capacità di bloccare totalmente l'infiltrazione dei gas di combustione. Per farlo, oltre ai requisiti del filtro normale, deve possedere almeno una di queste dotazioni:
- Un sistema di sovrappressione che mantenga il locale a un differenziale di almeno 30Pa (secondo UNI EN 12101-6);
 - Un camino per lo smaltimento dei fumi con sezione $\geq 0,10m^2$;
 - Aperture di aerazione permanentemente aperte verso l'esterno con superficie $\geq 1m^2$;
5. **Integrità delle chiusure esterne:** l'impiego di specifiche tecnologie di involucro non deve in alcun modo vanificare le compartimentazioni orizzontali e verticali della struttura; infatti, il progettista è tenuto a verificare che le facciate non offrano percorsi alternativi al fuoco (fenomeno noto come *effetto bypass*), impedendo così la propagazione dell'incendio tra i diversi compartimenti.

La corretta progettazione della compartimentazione impone una rigida separazione tra le specifiche aree dell'edificio, in modo da garantire il confinamento dell'incendio. Secondo il Codice, devono essere inseriti in compartimenti distinti:

- Ciascun piano, sia interrato che fuori terra;
- Le aree caratterizzate da profili di rischio differenti;
- Eventuali altre attività presenti nella medesima struttura.

La normativa ammette anche la realizzazione di compartimenti multipiano unicamente nel rispetto di precise condizioni compensative. In ogni caso, il dimensionamento planimetrico è vincolato, infatti la superficie lorda di ciascun compartimento non deve mai superare i limiti massimi imposti dalla *Tabella 13*, determinati in funzione della quota e del profilo di rischio.

Tabella 13: Determinazione massima superficie lorda dei compartimenti

R_{vita}	Quota del compartimento								
	< -15 m	< -10 m	< -5 m	< -1 m	≤ 12 m	≤ 24 m	≤ 32 m	≤ 54 m	> 54 m
A1	2000	4000	8000	16000	[1]	32000	16000	8000	4000
A2	1000	2000	4000	8000	64000	16000	8000	4000	2000
A3	[na]	1000	2000	4000	32000	4000	2000	1000	[na]
A4	[na]	[na]	[na]	[na]	16000	[na]	[na]	[na]	[na]
B1	[na]	2000	8000	16000	64000	16000	8000	4000	2000
B2	[na]	1000	4000	8000	32000	8000	4000	2000	1000
B3	[na]	[na]	1000	2000	16000	4000	2000	1000	[na]
Cii1, Ciii1	[na]	[na]	[na]	2000	16000	8000	8000	8000	4000
Cii2, Ciii2	[na]	[na]	[na]	1000	8000	4000	4000	2000	2000
Cii3, Ciii3	[na]	[na]	[na]	[na]	4000	2000	2000	1000	1000
D1	[na]	[na]	[na]	1000	2000	2000	1000	1000	1000
D2	[na]	[na]	[na]	1000	2000	1000	1000	1000	[na]
E1	2000	4000	8000	16000	[1]	32000	16000	8000	4000
E2	1000	2000	4000	8000	[1]	16000	8000	4000	2000
E3	[na]	[na]	2000	4000	16000	4000	2000	[na]	[na]

La massima superficie lorda è ridotta del 50% per i compartimenti con $R_{ambiente}$ significativo.

[na] Non ammesso

[1] Senza limitazione

A chiusura della strategia di confinamento, e in alternativa o integrazione alle barriere fisiche appena descritte, il Codice ammette l'impiego della distanza di separazione a cielo libero. Il principio alla base di questa misura di protezione consiste nel distanziare a livello planimetrico i bersagli per garantire che l'irraggiamento termico emesso dall'incendio decada al di sotto della soglia di innesco, evitando così il coinvolgimento di altre opere adiacenti.

4.6.2 - Chiusura dei varchi e continuità della compartimentazione

Le chiusure dei varchi, comunemente chiamate porte tagliafuoco, sono fondamentali per garantire che la compartimentazione funzioni correttamente. Infatti, la resistenza al fuoco di un intero locale protetto dipende direttamente dalla tenuta dei suoi punti di passaggio, che hanno il compito di sigillare le aperture in caso di emergenza.

Mentre per le strutture portanti e separanti si impiega la classe REI, per gli elementi separanti non portanti — come le porte tagliafuoco o i setti in cartongesso — si assegna la classe EI. In ambito progettuale, la prestazione di tenuta ai fumi (classe S) ha pari importanza rispetto all'isolamento termico (classe I), in quanto la stratificazione e la propagazione dei fumi rappresentano la principale causa di ostacolo all'esodo degli occupanti.

In base al D.M. 03/08/2015, la scelta delle prestazioni di queste chiusure deve essere effettuata considerando i criteri della *Tabella 14*. Al fine di non annullare l'efficacia della compartimentazione, ogni porta tagliafuoco deve possedere requisiti prestazionali, espressi in classe EI, pari o superiori a quelli previsti per le pareti che separano i due compartimenti, assicurando così la totale continuità dell'azione di confinamento. Inoltre, tali porte devono rimanere permanentemente chiuse oppure essere dotate di un dispositivo di auto-chiusura.

Tabella 14: Criteri di scelta delle principali prestazioni degli elementi di compartimentazione

Simbolo	Prestazione	Criterio di impiego
R	Capacità portante	Per prodotti ed elementi costruttivi portanti
E	Tenuta	Contenimento di fumi caldi, gas caldi e fiamme
I	Isolamento	Limitare la possibilità di propagazione dell'incendio per contatto tra materiale combustibile e faccia dell'elemento di compartimentazione non esposta all'incendio.
W	Irraggiamento	Limitare la possibilità di propagazione dell'incendio per irraggiamento dalla faccia dell'elemento di compartimentazione non esposta all'incendio verso materiale combustibile.
M	Azione meccanica	Limitare la possibilità di perdita di compartimentazione per effetto di azioni meccaniche accidentali.
S	Tenuta di fumo	Contenimento di fumi e gas freddi

Lungo le principali vie di passaggio, per evitare che le chiusure ostacolino il normale flusso quotidiano delle persone, il Codice invita all'uso di fermi elettromagnetici che mantengono le porte aperte. Dal punto di vista impiantistico, in conformità alla norma UNI EN 1155, tali dispositivi devono operare secondo un meccanismo di sgancio a diseccitazione, il quale si basa sul principio della mancanza di tensione.

In condizioni di ordinario esercizio, l'elettromagnete è costantemente alimentato e trattiene l'anta della porta, contrastando la forza del dispositivo meccanico di auto-chiusura. In caso di emergenza, non appena l'IRAI rileva un'anomalia, la CIE interviene interrompendo istantaneamente l'alimentazione al fermo elettromagnetico. Mancando la tensione di alimentazione, si annulla il campo magnetico, permettendo così alla molla di richiamo di agire e chiudere la porta. Questa logica garantisce che il varco venga tempestivamente sigillato, ripristinando l'efficacia della compartimentazione, anche nell'eventualità di un blackout elettrico o di un danneggiamento dei cavi causato dall'incendio stesso.

Per i varchi che collegano un compartimento con le vie di esodo della stessa attività, la normativa prevede una regola specifica: non è normalmente richiesto il requisito di isolamento termico (I) o di irraggiamento (W), ma è sufficiente garantire la tenuta al fuoco (E) e la tenuta ai fumi freddi (S_a).

Infine, per garantire una corretta gestione della sicurezza, ogni porta deve essere chiaramente contrassegnata su entrambi i lati con il segnale normato dalla UNI EN ISO 7010-F007; tale cartello deve riportare il messaggio “Porta tagliafuoco tenere chiusa” oppure, se l'infisso è dotato del fermo elettromagnetico, la dicitura “Porta tagliafuoco a chiusura automatica”.



Figura 13: Esempi di segnali di indicazione per le porte tagliafuoco

4.7 - Controllo dei fumi e calore ed inversione flussi dell'aria

Nel Capitolo S.8 del D.M. 03/08/2015 vengono definite le misure antincendio necessarie per il controllo, l'evacuazione o lo smaltimento dei prodotti della combustione. L'obiettivo primario è quello di gestire la propagazione dei fumi per agevolare l'esodo, garantire la

sicurezza delle squadre di soccorso e limitare i danni alle strutture. Sono definiti tre Livelli di Prestazione, i quali vengono assegnati sulla base della valutazione dei rischi del compartimento, come riportato nella *Tabella 15*.

Tabella 15: Livelli di prestazione del controllo dei fumi e calore

Livello di prestazione	Descrizione
I	Nessun requisito
II	Deve essere possibile smaltire fumi e calore dell'incendio dai compartimenti al fine di facilitare le operazioni delle squadre di soccorso.
III	Deve essere mantenuto nel compartimento uno strato libero dai fumi che permetta: - la salvaguardia degli occupanti e delle squadre di soccorso, - la protezione dei beni, se richiesta. Fumi e calore generati nel compartimento non devono propagarsi ai compartimenti limitrofi.

Tabella 16: Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione del controllo fumi e calore

Livello di prestazione	Criteri di attribuzione
I	Compartimenti dove siano verificate <i>tutte</i> le seguenti condizioni: - carico di incendio specifico $q_f \leq 600 \text{ MJ/m}^2$; - per compartimenti con $q_f > 200 \text{ MJ/m}^2$: superficie lorda $\leq 25 \text{ m}^2$; - per compartimenti con $q_f \leq 200 \text{ MJ/m}^2$: superficie lorda $\leq 100 \text{ m}^2$; - non si detengono o trattano sostanze o miscele pericolose in quantità significative; - non si effettuano lavorazioni pericolose ai fini dell'incendio.
II	Compartimento non ricompreso negli altri criteri di attribuzione.
III	In relazione alle risultanze della valutazione del rischio nell'ambito e in ambiti limitrofi della stessa attività (es. attività con elevato affollamento, attività con geometria complessa o piani interrati, elevato carico di incendio specifico q_f , presenza di sostanze o miscele pericolose in quantità significative, presenza di lavorazioni pericolose ai fini dell'incendio, ...).

A livello progettuale, il soddisfacimento di questi requisiti si traduce nell'impiego di specifiche soluzioni impiantistiche, in particolare si ha che:

- **Livello I:** non richiede alcuna soluzione progettuale specifica;
- **Livello II:** secondo il Codice, all'interno di ogni compartimento deve essere garantita la possibilità di effettuare lo smaltimento d'emergenza di fumo e calore. In alternativa o in aggiunta alle tradizionali aperture di smaltimento, è ammessa l'installazione di Sistemi di Ventilazione Orizzontale Forzata (SVOF); l'impiego di tali sistemi risulta particolarmente indicato all'interno di attività complesse — come i piani interrati — dove diventa prioritario garantire la sicurezza delle squadre di soccorso, realizzando una via di accesso mantenuta libera dai fumi fino all'effettiva posizione dell'incendio;

- **Livello III:** da normativa, è richiesta l'installazione di Sistemi per l'Evacuazione di Fumo e Calore (SEFC), i quali possono essere di due tipologie, ovvero sistemi naturali SENFC (progettati secondo la norma UNI 9494-1) o sistemi forzati SEFFC (progettati secondo la norma UNI 9494-2).

A tal proposito, per quanto riguarda le tradizionali aperture di smaltimento d'emergenza, la normativa ne classifica le diverse tipologie in funzione della loro operatività; come schematizzato dal Codice, esse variano da soluzioni permanentemente aperte (tipo SEa) fino a infissi dotati di elementi di chiusura non permanenti o fusibili (tipi SEd e SEe). Tuttavia, nell'ottica di una gestione dinamica della sicurezza, assumono particolare rilevanza ingegneristica le aperture di tipo SEb, dotate di un sistema automatico di apertura interfacciato con l'IRAI. Questa specifica tipologia rappresenta un primo livello di interfaccia tra le logiche di smaltimento e il controllo attivo dell'emergenza.

Tabella 17: Tipologie di aperture di smaltimento

Tipo di impiego	Descrizione
SEa	Permanentemente aperte
SEb	Dotate di sistema automatico di apertura con attivazione asservita ad IRAI
SEc	Provviste di elementi di chiusura (es. infissi, ...) ad apertura comandata da posizione protetta e segnalata
SEd	Provviste di elementi di chiusura non permanenti (es. infissi, ...) apribili anche da posizione non protetta
SEe	Provviste di elementi di chiusura permanenti (es. lastre in polimero PMMA, policarbonato, ...) per cui sia possibile l'apertura nelle effettive condizioni d'incendio (es. condizioni termiche generate da incendio naturale sufficienti a fondere efficacemente l'elemento di chiusura, ...) o la possibilità di immediata demolizione da parte delle squadre di soccorso.

Il Codice ammette l'adozione di soluzioni alternative per tutti i livelli di prestazione, a condizione che venga oggettivamente dimostrato il raggiungimento del livello prestazionale richiesto.

Negli ambienti sotterranei, in assenza di aperture verso l'esterno, gli SVOF assumono un ruolo cruciale. Diversamente dai SEFC, questi sistemi non hanno lo scopo di preservare la stratificazione dei fumi³⁵, ma intervengono per creare una via di accesso

³⁵ **Stratificazione dei fumi:** è un fenomeno fluidodinamico determinato dalla spinta di Archimede; i gas caldi prodotti dalla combustione, essendo caratterizzati da una minore densità rispetto all'aria pulita circostante, tendono a concentrarsi nella parte alta del compartimento. Tale naturale separazione garantisce il mantenimento di una fascia inferiore di aria respirabile e con adeguata visibilità, definita dalla normativa

sicura e pulita per i soccorritori; affinché questo avvenga, è fondamentale la gestione dinamica e l'eventuale inversione del flusso dell'aria.

In condizioni ordinarie, i sistemi di ventilazione meccanica seguono percorsi ottimizzati per il ricambio igienico. Al manifestarsi di un incendio, tuttavia, il regime di ventilazione ordinario deve essere interrotto a favore di una riconfigurazione dinamica delle portate: il sistema deve invertire o deviare i flussi d'aria per spingere i fumi lontano dalle vie d'accesso e confinarli verso i punti di estrazione meccanica. Dal momento che l'attivazione forzata dei flussi distrugge inevitabilmente la naturale stratificazione dei gas caldi verso il soffitto, il Codice prescrive che gli SVOF debbano essere attivati solo dopo l'evacuazione degli occupanti dal compartimento di primo innesco.

Tale complessa gestione dei flussi d'aria deve essere necessariamente interfacciata con l'IRAI, il quale assume il ruolo di centrale direttiva dell'emergenza; è fondamentale sottolineare, però, che nell'approccio classico l'IRAI governa queste attivazioni attraverso matrici rigide, incapaci di adattarsi dinamicamente in tempo reale all'effettiva evoluzione dell'incendio.

tecnica 'strato libero dai fumi' (UNI 9494), e di una fascia superiore nella quale si accumulano i fumi della combustione e l'aria non respirabile.

5 - La progettazione del sistema d'esodo: criteri della RTV V.6 e gestione dinamico-adattiva

Il presente capitolo analizza i criteri di progettazione del sistema d'esodo e l'integrazione delle misure di protezione attiva e gestionale, ponendo a confronto l'approccio ordinario del Codice con le specificità della Regola Tecnica Verticale (RTV) V.6 per le autorimesse. Attraverso l'analisi dei parametri geometrici e dei requisiti di ridondanza, vengono esposti i presupposti teorici e normativi necessari per salvaguardare la vita umana lungo le vie di fuga. L'attenzione si focalizza sul superamento dei vincoli statici tradizionali della segnaletica attraverso l'integrazione di soluzioni avanzate a logica adattiva — implementate nei sistemi DPAS — e sulla pianificazione della GSA, elementi che costituiscono il fulcro operativo per garantire l'efficacia dell'evacuazione in infrastrutture complesse, ponendo le basi per il successivo sviluppo dell'approccio prestazionale.

5.1.1 - Sistema d'esodo

Il Capitolo S.4 del D.M. 03/08/2015 definisce i requisiti fondamentali e le strategie progettuali per la realizzazione del sistema d'esodo all'interno delle attività. La finalità primaria di tale sistema è garantire che gli occupanti possano raggiungere un luogo sicuro, o permanere in sicurezza sul posto, in totale autonomia o con adeguata assistenza, prima che l'incendio determini condizioni incapacitanti³⁶ negli ambienti in cui si trovano. È principio cardine dell'ingegneria antincendio che il sistema d'esodo debba assicurare la prestazione richiesta a prescindere dall'intervento dei Vigili del Fuoco; le infrastrutture devono essere progettate per gestire l'emergenza in modo indipendente dalle squadre di soccorso, le quali, intervenendo in un secondo momento, potranno eventualmente sfruttare gli spazi calmi per assistere gli occupanti in difficoltà nel completamento dell'evacuazione verso un luogo sicuro.

In funzione della complessità dell'attività, del profilo di rischio e delle caratteristiche geometriche dell'edificio, vengono definite quattro differenti modalità di esodo:

³⁶ **Condizioni incapacitanti:** la normativa le definisce come quelle situazioni in cui l'esposizione ai prodotti della combustione — quali gas tossici, calore radiante e oscuramento dovuto ai fumi — rende gli occupanti inabili a mettersi in salvo autonomamente. Tale concetto viene spiegato nel dettaglio nella Sezione M (Metodi) del Codice.

1. **Esodo simultaneo:** prevede l'evacuazione contemporanea di tutti gli occupanti verso un luogo sicuro;
2. **Esodo per fasi:** l'evacuazione avviene in successione programmata per specifici compartimenti. È una strategia adottata frequentemente in infrastrutture complesse quali edifici di grande altezza, strutture ospedaliere, multisala e centri commerciali;
3. **Esodo orizzontale progressivo:** prevede lo spostamento degli occupanti in un compartimento adiacente sicuro situato al medesimo piano; è una procedura tipica dei reparti di degenza ospedalieri;
4. **Protezione sul posto:** gli occupanti vengono messi in sicurezza all'interno del compartimento in cui si trovano, protetti dagli effetti dell'incendio per un tempo predeterminato.

Il soddisfacimento degli obiettivi di sicurezza viene garantito tramite l'attribuzione di specifici Livelli di Prestazione; in particolare il Codice individua due livelli principali per la misura antincendio dell'esodo, ovvero:

- **Livello I:** gli occupanti raggiungono un luogo sicuro prima che l'incendio causi condizioni incapacitanti negli ambiti dell'attività attraversati durante l'esodo; questo livello rappresenta il criterio di attribuzione generalmente accettato per la quasi totalità delle attività. A livello progettuale, il rispetto di tale livello ammette l'adozione di soluzioni conformi attraverso un iter sequenziale. Il processo si sviluppa per iterazioni successive, partendo dalla definizione dei dati di ingresso — ovvero il profilo di rischio R_{vita} e l'affollamento — per giungere al dimensionamento geometrico delle vie di fuga, quali lunghezze e larghezze d'esodo, numero di uscite e corridoi ciechi;
- **Livello II:** gli occupanti sono protetti dagli effetti dell'incendio nello stesso luogo in cui si trovano; questo livello viene attribuito in via residuale esclusivamente a quegli ambiti per i quali non sia possibile assicurare la prestazione di Livello I, ad esempio a causa di particolari vincoli architettonici, dimensioni, ubicazione o per specifiche abilità fisiche o cognitive degli occupanti. Un aspetto di fondamentale rilevanza ingegneristica è la totale assenza di soluzioni conformi predefinite per il suo soddisfacimento; di conseguenza, gli obiettivi di sicurezza devono essere garantiti tramite l'applicazione dell'approccio prestazionale della FSE.

Risulta essenziale richiamare le definizioni formali della componentistica architettonica e concettuale che costituisce il sistema d'esodo, tra le quali:

- **Sistema d'esodo:** è l'insieme delle misure di salvaguardia della vita (luoghi sicuri, vie d'esodo, uscite, illuminazione e segnaletica di sicurezza) che consentono agli occupanti di raggiungere un luogo sicuro o di permanere al sicuro, autonomamente o con assistenza, prima del verificarsi di condizioni incapacitanti negli ambienti nei quali si trovano;
- **Luogo sicuro:** è un luogo in cui è permanentemente trascurabile il rischio d'incendio per gli occupanti che vi stazionano o vi transitano, durante il verificarsi di un evento incidentale all'interno della struttura; si identificano come luoghi sicuri la pubblica via o ogni altro spazio a cielo libero sicuramente collegato alla pubblica via in ogni condizione d'incendio, che non sia investito dai prodotti della combustione, in cui il massimo irraggiamento dovuto all'incendio sugli occupanti sia limitato a $2,5 \frac{kW}{m^2}$, in cui non vi sia pericolo di crolli, che sia idoneo a contenere gli occupanti che lo impiegano durante l'esodo;
- **Luogo sicuro temporaneo:** è un luogo in cui il rischio d'incendio è trascurabile solo in via temporanea durante le fasi dell'esodo, in riferimento a un incendio verificatosi in ambiti specificati dell'attività e separati dal luogo considerato; si considera luogo sicuro temporaneo qualsiasi altro compartimento o spazio scoperto, che può essere attraversato dagli occupanti per raggiungere il luogo sicuro tramite il sistema d'esodo senza rientrare nel compartimento in esame;
- **Spazio calmo:** è un particolare luogo sicuro temporaneo all'interno del quale gli occupanti — tipicamente soggetti con ridotte capacità motorie — possono attendere in sicurezza e ricevere l'assistenza necessaria da parte dei soccorritori per completare l'esodo verso un luogo sicuro; in ogni spazio calmo deve essere presente un sistema di comunicazione bidirezionale per permettere agli occupanti di segnalare la loro presenza e richiedere assistenza ai soccorritori;
- **Via d'esodo:** è un percorso privo di ostacoli, facente parte integrante del sistema d'esodo, che consente agli occupanti di raggiungere un luogo sicuro partendo dal punto in cui si trovano nel momento dell'emergenza; nella struttura delle vie d'esodo, non devono essere considerati i seguenti elementi: scale portatili,

ascensori, rampe con pendenza superiore al 20%, scale e marciapiedi mobili non progettati secondo specifiche indicazioni prescritte dal Codice. Le vie d'esodo possono essere suddivise in:

- **protetta:** è un percorso d'esodo inserito all'interno di vani protetti, le cui scale d'esodo devono condurre direttamente in un luogo sicuro o, in alternativa, tramite un percorso avente le stesse caratteristiche di protezione;
- **A prova di fumo:** è un percorso d'esodo inserito all'interno di vani conformati a prova di fumo, in cui le scale devono immettere in un luogo sicuro per via diretta o attraverso un percorso d'esodo anch'esso dotato di tale caratteristica;
- **Esterna:** è un percorso d'esodo completamente esterno alla struttura che, durante l'evacuazione degli occupanti, garantisce un irraggiamento dovuto all'incendio non superiore a $2,5 \frac{kW}{m^2}$ e non è esposto ai prodotti della combustione;
- **Senza protezione:** è un qualsiasi percorso d'esodo che non rientra in nessuna delle precedenti tre categorie;

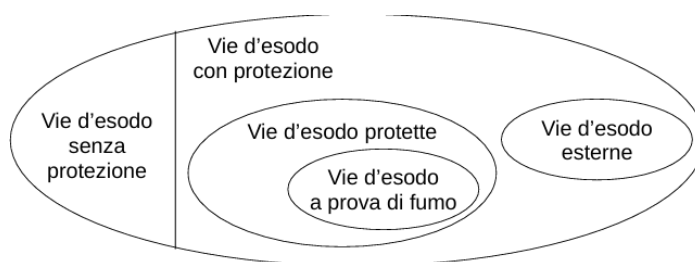


Figura 14: Classificazione delle vie d'esodo in funzione delle caratteristiche di protezione

- **Percorso d'esodo:** è una specifica parte della via d'esodo che permette di condurre gli occupanti dall'uscita dei locali dell'attività fino all'uscita finale; tale percorso non comprende gli ambienti operativi, ma è tipicamente costituito da corridoi, atri, scale e rampe;
- **Uscita finale:** è il varco finale del sistema d'esodo, situato al piano di riferimento, la cui funzione è garantire il deflusso degli occupanti direttamente all'esterno verso un luogo sicuro o un luogo sicuro temporaneo;

- **Corridoio cieco (o percorso unidirezionale):** porzione del sistema d'esodo che offre agli occupanti un'unica direzione di fuga, senza la possibilità di scegliere percorsi alternativi.

5.1.2 - Sistemi di orientamento, segnaletica e illuminazione d'esodo

L'efficacia del sistema d'esodo è direttamente legata alla sua immediata percezione e accessibilità da parte degli occupanti. Per assicurare un rapido riconoscimento dei percorsi di salvataggio, il D.M. 03/08/2015 sancisce che il sistema d'esodo deve essere supportato da un'adeguata segnaletica e da precise strategie di orientamento della folla (*wayfinding*). Il soddisfacimento di tale requisito si ottiene tramite l'impiego di segnali direzionali e identificativi, conformi alla norma UNI EN ISO 7010, integrati, ove necessario, da indicatori tattili e visivi.



Figura 15: Esempi di segnali conformi alla norma UNI EN ISO 7010 posizionati lungo il percorso d'esodo

In funzione delle specifiche caratteristiche geometriche e volumetriche della struttura, risulta necessaria l'installazione a ogni piano di planimetrie di emergenza semplificate. Tali supporti informativi, redatti in conformità alla norma UNI ISO 23601, devono essere orientati in modo coerente con la visuale dell'osservatore — indicando la posizione con la voce “Voi siete qui” — e illustrare chiaramente il layout del sistema d'esodo, includendo vie di fuga, spazi calmi e luoghi sicuri.

Lungo le vie d'esodo è obbligatoria l'installazione di un impianto di illuminazione di sicurezza qualora l'illuminazione ordinaria possa risultare, anche solo occasionalmente, insufficiente a garantire un deflusso sicuro (es: per attività operative in orari serali o prive di illuminazione naturale). Durante la fase di emergenza, l'impianto deve intervenire per assicurare un illuminamento orizzontale al suolo non inferiore a 1lx lungo la linea centrale della via d'esodo, in modo da garantire quanto stabilito dalla norma illuminotecnica UNI EN 1838.

Anche le uscite finali, le quali devono essere progettate per consentire un deflusso rapido verso l'esterno, devono essere opportunamente contrassegnate per garantirne la costante fruibilità e l'assenza di ostacoli.



Figura 16: Esempio di segnale per indicare un'uscita finale

Si precisa che l'approccio puramente statico della segnaletica tradizionale, regolato dalla norma UNI EN ISO 7010, mostra evidenti limiti intrinseci qualora applicato a infrastrutture complesse o interrato, entro le quali l'evoluzione dinamica dell'incendio può compromettere specifiche vie d'esodo, rendendole inagibili. Per superare tale criticità, l'approccio prestazionale del Codice di Prevenzione Incendi consente l'integrazione di sistemi di segnaletica dinamica e adattiva. Tali dispositivi evoluti, interfacciati direttamente con l'impianto IRAI e governati da logiche software dedicate, sono in grado di variare in tempo reale il messaggio visivo dei pittogrammi, indicando chiaramente agli occupanti se la via di fuga è ancora sicura oppure se è stata compromessa dai prodotti della combustione.

Nella *Figura 17*, viene illustrato il principio di funzionamento logico di un segnale luminoso adattivo asservito a un sistema DPAS. In condizioni ordinarie (pittogramma a sinistra), il dispositivo fornisce un'indicazione di instradamento attivo verso una via d'esodo sicura. Qualora l'evoluzione dello scenario emergenziale comprometta tale percorso, la centrale di gestione ed elaborazione comanda l'interdizione della via di fuga modificando in tempo reale la segnaletica (pittogramma centrale) tramite la proiezione di una croce rossa di sbarramento. Infine, al variare delle dinamiche dell'incendio e sulla base delle matrici di attivazione specifiche del sistema di rivelazione, il dispositivo è in grado di ripristinare la segnalazione originaria (pittogramma a destra), restituendo agli occupanti la disponibilità del percorso d'esodo una volta che l'area è tornata in condizioni di sicurezza.



Figura 17: Principio logico di funzionamento a due stati di un segnale luminoso adattivo asservito a un sistema DPAS

Dal punto di vista realizzativo e dell'installazione impiantistica, la flessibilità logica del sistema DPAS si traduce nell'impiego di dispositivi speciali a matrice LED programmabile, tipicamente installati a soffitto o a parete lungo le vie d'esodo. A differenza dei pannelli tradizionali, tali apparecchi sono in grado di modificare la configurazione luminosa in base ai segnali ricevuti dalla centrale di controllo. Come mostrato nelle figure successive, tale tecnologia hardware consente al singolo pittogramma di segnalazione non solo di attivare la croce rossa di sbarramento quando richiesto, ma anche di variare dinamicamente l'orientamento delle frecce direzionali, in funzione del percorso d'esodo sicuro individuato in tempo reale dall'algoritmo di controllo.



Figura 18: Esempio di dispositivo di segnalazione luminosa dinamica a soffitto per la gestione adattiva e direzionale delle vie d'uscita



Figura 19: Esempio di pittogramma multi-stato a parete per la gestione adattiva e direzionale delle vie d'uscita

Oltre ai dispositivi sopra descritti, i sistemi DPAS più all'avanguardia integrano anche segnali luminosi di sicurezza direzionale a pavimento (come illustrato nella *Figura 20*), elementi essenziali per il *wayfinding* soprattutto in condizioni di emergenza caratterizzate da accumulo di fumi. In tali scenari, la visibilità dei segnali a parete e a soffitto può risultare compromessa dalla stratificazione dei prodotti della combustione, fenomeno particolarmente critico nelle strutture ipogee; il posizionamento a pavimento di questi indicatori garantisce pertanto una guida continua verso l'uscita di sicurezza, mantenendo l'efficacia della segnaletica d'esodo anche quando il compartimento risulta invaso dal fumo.



Figura 20: Esempio di segnalatore luminoso dinamico a pavimento per la gestione adattiva e direzionale delle vie d'uscita

5.1.3 - Parametri di calcolo e requisiti per l'esodo

La modellazione e il dimensionamento geometrico del sistema d'esodo sono subordinati alla preventiva definizione dei parametri di calcolo e dei requisiti minimi d'isolamento fissati dal D.M. 03/08/2015. Questa procedura analitica viene applicata a prescindere dalla successiva modalità di evacuazione adottata nel piano di emergenza (simultanea, progressiva o per fasi), in quanto si configura come un iter propedeutico e univoco volto a determinare la massima capacità portante delle vie di fuga in relazione all'affollamento massimo ipotizzabile e alle caratteristiche costruttive dell'opera.

L'intera progettazione si basa sull'individuazione di due parametri fondamentali:

1. **Profilo di rischio R_{vita}** : è il parametro di riferimento per ciascun compartimento. Ogni componente del sistema d'esodo deve essere dimensionato in funzione del valore più gravoso tra i profili di rischio dei compartimenti da esso serviti;
2. **Affollamento massimo dei locali**: ai sensi della normativa vigente, il calcolo del massimo affollamento di ciascun ambito³⁷ può essere definito applicando uno dei seguenti criteri metodologici:
 - Moltiplicando la densità di affollamento riportata nella tabella del Codice per la superficie lorda del locale stesso;
 - Applicando i criteri specifici per tipologia di attività indicati nella *Tabella 18*;
 - Seguendo le indicazioni fornite dalla specifica regola tecnica verticale (RTV)³⁸ di riferimento.

Nel caso specifico delle autorimesse pubbliche, la norma impone l'applicazione del secondo punto dell'elenco, prescrivendo un valore di affollamento pari a 2 persone per ogni veicolo parchato. Il valore così ricavato definisce il massimo affollamento di progetto

³⁷ **Ambito**: con questo termine la normativa definisce l'intero volume dell'attività o una sua specifica porzione delimitata — come un singolo locale, un compartimento o un intero piano — caratterizzata da profili di rischio e parametri geometrici omogenei.

³⁸ **Regola Tecnica Verticale (RTV)**: tale concetto viene spiegato nel *Paragrafo 5.4.1*.

che il responsabile dell'attività è tenuto a rispettare in ogni condizione d'esercizio e che costituisce la base vincolante per le successive verifiche della capacità di deflusso.

Tabella 18: Criteri per il calcolo dell'affollamento massimo in funzione della tipologia di attività

Tipologia di attività	Criteri
Autorimesse pubbliche	2 persone per veicolo parchato
Autorimesse private	1 persona per veicolo parchato
Degenza	1 degente e 2 accompagnatori per posto letto + addetti
Ambiti con posti a sedere o posti letto (es. sale riunioni, aule scolastiche, dormitori, ...)	Numero posti + addetti
Altri ambiti	Numero massimo presenti (addetti + pubblico)

Definito il flusso teorico degli occupanti, il Codice impone precisi vincoli strutturali finalizzati a prevenire la propagazione dei prodotti della combustione verso i percorsi di evacuazione, con particolare attenzione allo sviluppo verticale e ipogeo dell'opera. Tra questi requisiti si collocano le soglie geometriche per le vie d'esodo indipendenti: in base alle specifiche soglie altimetriche stabilite dalla *Tabella 19*, la presenza di piani d'attività situati a quote critiche vincola l'opera all'obbligo di essere servita da almeno due vie d'esodo indipendenti. Per i piani interrati — fatta eccezione per specifici profili di rischio ad elevata densità d'affollamento — tale soglia limite è fissata a una quota inferiore a -5 m rispetto al piano di riferimento.

Tabella 19: Soglie geometriche per vie d'esodo indipendenti

R _{vita}	Piani a quota inferiore	Piani a quota superiore
B1, B2, B3	< -5 m	> 32 m
B1 [1], B2 [1], B3 [1], D1, D2	< -1 m	> 12 m
Cii1, Cii2, Cii3, Ciii1, Ciii2, Ciii3	< -1 m	> 32 m
Altri casi	< -5 m	> 54 m

[1] Ambiti con densità d'affollamento > 0,4 p/m²

Infine, si precisa che la configurazione geometrica del sistema deve essere definita in modo da assecondare i flussi naturali di movimento. Pertanto, la convergenza dei flussi provenienti da percorsi differenti non deve essere ostacolata da arredi o restringimenti planimetrici e, nei punti in cui si prevedano condizioni di elevato affollamento, devono essere implementati accorgimenti progettuali atti a evitare il controflusso tra gli occupanti in uscita e le squadre di soccorso in ingresso.

5.1.4 - Vie d'esodo ed uscite indipendenti, corridoi ciechi

La configurazione del sistema d'esodo deve essere progettata in modo da minimizzare la probabilità che le vie di fuga risultino contemporaneamente inaccessibili dagli effetti di un incendio. Questo aspetto viene garantito dal principio di ridondanza, il quale impone che le vie d'esodo e le relative uscite vengano progettate secondo criteri di indipendenza funzionale e strutturale, garantendo percorsi alternativi agli occupanti.

Le vie d'esodo, o le uscite, si definiscono indipendenti quando sia minimizzata la probabilità che possano essere contemporaneamente rese inaccessibili a causa degli effetti dell'incendio. In conformità con i requisiti del Capitolo S.4 del Codice, è obbligatorio prevedere almeno due vie d'esodo indipendenti per ogni compartimento considerato.

Per prevenire fenomeni di sovraffollamento localizzato in prossimità dei varchi di uscita, il numero minimo di uscite indipendenti da ciascun locale o spazio dell'attività deve essere determinato in funzione del profilo di rischio R_{vita} e del massimo affollamento previsto per l'ambito considerato. Il rispetto di tale requisito assicura che anche la capacità di deflusso venga proporzionata al massimo affollamento, evitando così strozzature nei flussi d'esodo. Il numero minimo di uscite è definito come segue:

- **Attività con affollamento superiore a 500 occupanti:** è richiesto un numero minimo di 2 uscite indipendenti, a prescindere dal profilo di rischio;
- **Profili di rischio B1, B2, B3 con affollamento superiore a 200 occupanti:** è richiesto un numero minimo di 3 uscite indipendenti;
- **Casi residui:** è prevista la dotazione di almeno 2 uscite indipendenti, riducibili a 1 esclusivamente qualora la configurazione del percorso sia ammessa come corridoio cieco secondo specifiche prescrizioni.

L'applicazione di tali soglie numeriche costituisce la base per il successivo dimensionamento geometrico delle larghezze utili dei varchi, assicurando che il sistema d'esodo mantenga adeguati margini di sicurezza anche in condizioni di massimo affollamento di progetto.

Ai fini della progettazione del sistema d'esodo, si considerano indipendenti le coppie di vie d'esodo, o le coppie di uscite da un locale o da uno spazio a cielo libero, per le quali sia verificata almeno una delle condizioni di indipendenza previste per i percorsi

orizzontali o verticali. In particolare, per le vie d'esodo orizzontali e per le relative uscite, deve essere soddisfatta almeno una delle seguenti condizioni:

- L'angolo formato dai percorsi rettilinei di fuga deve essere $\geq 45^\circ$;
- Tra i percorsi esista una separazione di adeguata resistenza al fuoco a tutta altezza³⁹, con caratteristiche non inferiori a EI 30.

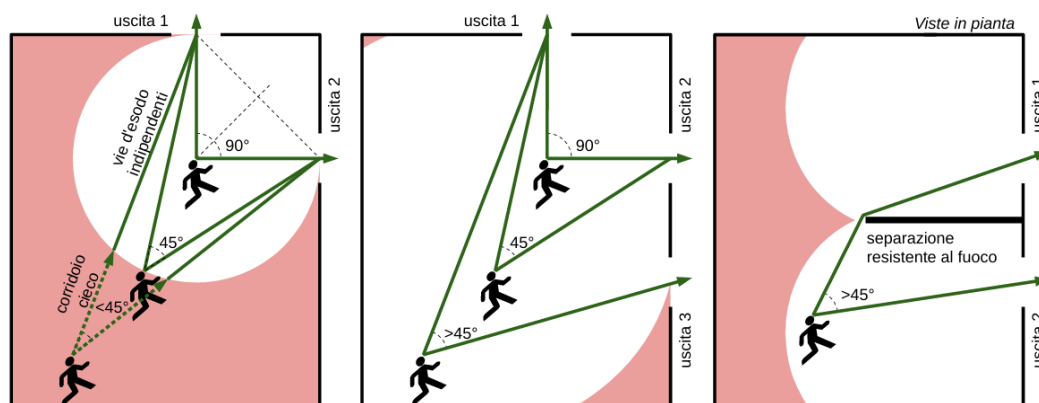


Figura 21: Esempi di vie d'esodo orizzontali ed uscite indipendenti

Le coppie di vie d'esodo verticali sono ritenute indipendenti se inserite in compartimenti distinti, oppure nel caso in cui almeno una delle due sia configurata come via d'esodo esterna. È ammesso considerare indipendenti coppie di vie d'esodo verticali non protette, inserite nello stesso compartimento, esclusivamente al soddisfacimento delle seguenti condizioni:

1. Ciascuna via sia impiegata da un numero di occupanti non superiore a 100;
2. Nessun piano servito si trovi a una quota inferiore a $-1m$;
3. Nei percorsi collegati a monte e a valle non sia presente alcun corridoio cieco.

In tale configurazione, il dislivello massimo tra tutti i piani serviti dalle vie d'esodo verticali non protette del compartimento deve risultare inferiore a $7m$.

³⁹ **A tutta altezza:** espressione utilizzata per indicare che l'elemento di protezione antincendio non è un semplice muro che si ferma al controsoffitto, ma si estende ininterrottamente dal pavimento del piano (il solaio inferiore) fino alla struttura superiore (il solaio o la copertura); ciò è necessario per impedire il passaggio dei fumi e del calore attraverso le intercapedini che si formerebbero tra controsoffitto e solaio, garantendo così l'effettiva tenuta della classe di resistenza al fuoco (EI).

Un ulteriore elemento critico da considerare è il corridoio cieco; sebbene, in fase di progettazione, sia preferibile evitare la realizzazione di tali percorsi, qualora la configurazione distributiva dell'attività li rendesse necessari, la loro progettazione deve essere rigorosamente verificata. Per ogni corridoio cieco devono essere soddisfatte le seguenti condizioni, definite in funzione del profilo di rischio R_{vita} di riferimento:

- **Limitazione dell'affollamento:** al fine di contenere il numero degli occupanti potenzialmente bloccati dall'incendio, l'affollamento complessivo degli ambiti serviti dal corridoio cieco non deve superare i valori massimi previsti, i quali sono riportati nella *Tabella 20*;
- **Limitazione della lunghezza L_{cc} :** per ridurre la probabilità che gli occupanti siano bloccati dall'incendio, la lunghezza del corridoio cieco L_{cc} non deve superare i valori massimi indicati nella *Tabella 20*⁴⁰.

Tabella 20: Requisiti di massimo affollamento e lunghezza per i corridoi ciechi

R_{vita}	Max affollamento	Max lunghezza L_{cc}	R_{vita}	Max affollamento	Max lunghezza L_{cc}
A1	≤ 100 occupanti	≤ 45 m	B1, E1	≤ 50 occupanti	≤ 25 m
A2		≤ 30 m	B2, E2		≤ 20 m
A3		≤ 15 m	B3, E3		≤ 15 m
A4	≤ 50 occupanti	≤ 10 m	Cii1, Ciii1		≤ 20 m
D1		≤ 20 m	Cii2, Ciii2		≤ 15 m
D2		≤ 15 m	Cii3, Ciii3		≤ 10 m

5.1.5 - Dimensionamento e verifica di ridondanza delle vie d'esodo

In generale, la capacità di deflusso e la fluidità dei flussi d'esodo dipendono direttamente dalle caratteristiche dimensionali dei percorsi, che devono garantire spazi liberi da ingombri ed essere adeguati all'affollamento previsto.

La lunghezza d'esodo rappresenta la distanza che l'occupante deve percorrere dal punto in cui si trova fino a raggiungere un luogo sicuro o un luogo sicuro temporaneo. La sua verifica è essenziale per limitare il tempo necessario agli occupanti per abbandonare

⁴⁰ Bisogna precisare che i valori delle massime lunghezze di corridoio cieco L_{cc} riportate in *Tabella 20* possono essere incrementati in relazione a requisiti antincendio aggiuntivi, secondo la metodologia esposta nel dettaglio nel paragrafo S.4.10 del Codice.

il compartimento sede dell'innescò. Per garantire un'evacuazione tempestiva, devono essere rispettate le seguenti prescrizioni:

- **Massima lunghezza d'esodo L_{es} :** almeno una delle lunghezze d'esodo determinate a partire da qualsiasi punto dell'attività non deve superare i valori massimi L_{es} previsti dalla *Tabella 21*, in funzione del profilo di rischio R_{vita} di riferimento; tale verifica non è richiesta né per le vie d'esodo esterne né per i percorsi verticali con caratteristiche di filtro, in quanto tali elementi offrono condizioni di sicurezza superiori, le quali rendono superfluo il controllo sulla lunghezza;
- **Verifica sui corridoi ciechi:** nel caso in cui la prima parte della via d'esodo sia costituita da un corridoio cieco, la verifica deve essere condotta contemporaneamente sia sulla lunghezza totale del percorso L_{es} , sia sui limiti specifici stabiliti al *Paragrafo 5.1.4* per i percorsi unidirezionali.

Tabella 21: Valori della massima lunghezza d'esodo L_{es} in funzione di R_{vita}

R_{vita}	Max lunghezza d'esodo L_{es}	R_{vita}	Max lunghezza d'esodo L_{es}
A1	≤ 70 m	B1, E1	≤ 60 m
A2	≤ 60 m	B2, E2	≤ 50 m
A3	≤ 45 m	B3, E3	≤ 40 m
A4	≤ 30 m	Cii1, Ciii1	≤ 40 m
D1	≤ 30 m	Cii2, Ciii2	≤ 30 m
D2	≤ 20 m	Cii3, Ciii3	≤ 20 m

L'altezza minima delle vie d'esodo è fissata pari a $2m$; sono ammesse deroghe per altezze inferiori esclusivamente per brevi tratti segnalati, in ambiti caratterizzati dalla presenza esclusiva di personale specificamente formato, o in locali di servizio — quali depositi o vani impianti — con presenza occasionale e limitata di occupanti. Eventuali ulteriori eccezioni devono essere supportate da una specifica valutazione del rischio.

La larghezza delle vie d'esodo deve essere intesa come la misura minima del varco utile, calcolata dal piano di calpestio fino all'altezza di $2m$, sottraendo l'ingombro di eventuali elementi sporgenti (con l'esclusione di estintori, corrimano e dispositivi di apertura delle porte con sporgenza $\leq 80mm$); il valore di tale parametro deve essere garantito lungo tutto il percorso.

A tale proposito, bisogna precisare che le uscite finali, le vie d'esodo orizzontali e verticali devono essere progettate considerando il valore di larghezza minima, la quale si calcola con criteri specifici a seconda dell'elemento considerato:

- **Larghezza minima della via d'esodo orizzontale L_O :** (es: corridoio, porta, uscita, ...) viene determinata analiticamente tramite la relazione

$$L_O = L_U \cdot n_O$$

dove L_O è la larghezza minima della via d'esodo orizzontale in [mm], L_U è la larghezza unitaria per le vie d'esodo orizzontali, espressa in [mm/persona] e determinata attraverso la *Tabella 22* in funzione del profilo di rischio R_{vita} di riferimento, mentre n_O è il numero degli occupanti che impiegano la specifica via d'esodo orizzontale nelle condizioni d'esodo più gravose. La larghezza complessiva L_O può essere suddivisa tra più percorsi alternativi; tuttavia, per limitare la probabilità che si sviluppi un sovraffollamento localizzato — in particolare dove gli occupanti si distribuiscano in modo imprevisto — la larghezza di ciascun singolo percorso deve rispettare i criteri minimi geometrici della *Tabella 23*, oppure essere oggetto di una specifica valutazione del rischio da parte del progettista;

Tabella 22: Larghezze unitarie per vie d'esodo orizzontali

R_{vita}	Larghezza unitaria	Δt_{coda}	R_{vita}	Larghezza unitaria	Δt_{coda}
A1	3,40	330 s	B1, C1, E1	3,60	310 s
A2	3,80	290 s	B2, C2, D1, E2	4,10	270 s
A3	4,60	240 s	B1 [1], B2 [1], B3, C3, D2, E3	6,20	180 s
A4	12,30	90 s			

I valori delle larghezze unitarie sono espressi in mm/persona ed assicurano una durata dell'attesa in coda, per gli occupanti che impiegano la specifica via d'esodo, non superiore a Δt_{coda} .

Tabella 23: Larghezze minime per vie d'esodo orizzontali

Larghezza	Criterio
≥ 1200 mm	Affollamento dell'ambito servito > 1000 occupanti oppure > 200 occupanti prevalentemente in piedi e densità d'affollamento $> 0,7$ p/m ²
≥ 1000 mm	Affollamento dell'ambito servito > 300 occupanti
≥ 900 mm	Affollamento dell'ambito servito ≤ 300 occupanti Larghezza adatta anche a coloro che impiegano ausili per il movimento
≥ 800 mm	Varchi da ambito servito con affollamento ≤ 50 occupanti
≥ 700 mm	Varchi da ambito servito con affollamento ≤ 10 occupanti (es. singoli uffici, camere d'albergo, locali di abitazione, appartamenti, ...)
≥ 600 mm	Ambito servito ove vi sia esclusiva presenza di personale specificamente formato, oppure occasionale e di breve durata di un numero limitato di occupanti (es. locali impianti o di servizio, piccoli depositi, ...).

L'affollamento dell'ambito servito corrisponde al totale degli occupanti che impiegano ciascuna delle vie d'esodo che si dipartono da tale ambito.

- **Larghezza minima della via d'esodo verticale L_V :** (es: scale, rampe, ...) il suo valore dipende direttamente dalla modalità d'esodo pianificata per l'attività. La larghezza complessiva può essere suddivisa tra più percorsi paralleli, a condizione che ciascun singolo elemento rispetti i criteri geometrici minimi definiti dalla *Tabella 24* o sia supportato da una specifica valutazione del rischio, riducendo così la probabilità di sovraffollamenti localizzati causati da distribuzioni impreviste dei flussi;

Tabella 24: Criteri per la larghezza minima delle vie d'esodo verticali

Larghezza	Criterio
≥ 1200 mm	Affollamento dell'ambito servito > 1000 occupanti oppure > 200 occupanti prevalentemente in piedi e densità d'affollamento $> 0,7$ p/m ²
≥ 1000 mm	Affollamento dell'ambito servito > 300 occupanti
≥ 900 mm	Affollamento dell'ambito servito ≤ 300 occupanti
≥ 600 mm	Ambito servito ove vi sia esclusiva presenza di personale specificamente formato, oppure occasionale e di breve durata di un numero limitato di occupanti (es. locali impianti o di servizio, piccoli depositi, ...).

L'affollamento dell'ambito servito corrisponde al totale degli occupanti che impiegano ciascuna delle vie d'esodo che si dipartono da tale ambito.

- **Esodo simultaneo:** il calcolo analitico della larghezza si effettua tramite la relazione

$$L_V = L_U \cdot n_V$$

dove L_V è la larghezza minima della via d'esodo verticale espressa in [mm], il parametro L_U rappresenta la larghezza unitaria — espressa in [mm/persona] — ricavata dalla *Tabella 25* in funzione del profilo di rischio R_{vita} di riferimento e del numero complessivo di piani serviti dalla via d'esodo, mentre il fattore n_V esprime il numero totale degli occupanti provenienti da tutti i piani che utilizzano il percorso verticale nelle condizioni d'esodo più gravose;

- **Esodo per fasi:** la larghezza minima viene calcolata applicando la stessa relazione applicata per l'esodo simultaneo

$$L_V = L_U \cdot n_V$$

dove L_U — espressa in [mm/persona] — si ricava dalla *Tabella 25* imponendo pari a due il numero totale dei piani serviti dalla via d'esodo verticale per convenzione, mentre il parametro n_V è pari al numero totale degli occupanti che impiegano il percorso verticale provenienti dai due piani serviti — anche se non

consecutivi — che presentano il maggiore affollamento, valutati nelle condizioni di ridondanza più gravose;

Tabella 25: Larghezze unitarie per vie d'esodo verticali

R_{vita}	Numero totale dei piani serviti dalla via d'esodo verticale										Δt_{coda}
	1	2 [F]	3	4	5	6	7	8	9	> 9	
A1	4,00	3,60	3,25	3,00	2,75	2,55	2,40	2,25	2,10	2,00	330 s
B1, C1, E1	4,25	3,80	3,40	3,10	2,85	2,65	2,45	2,30	2,15	2,05	310 s
A2	4,55	4,00	3,60	3,25	3,00	2,75	2,55	2,40	2,25	2,10	290 s
B2, C2, D1, E2	4,90	4,30	3,80	3,45	3,15	2,90	2,65	2,50	2,30	2,15	270 s
A3	5,50	4,75	4,20	3,75	3,35	3,10	2,85	2,60	2,45	2,30	240 s
B1 [1], B2 [1], B3, C3, D2, E3	7,30	6,40	5,70	5,15	4,70	4,30	4,00	3,70	3,45	3,25	180 s
A4	14,60	11,40	9,35	7,95	6,90	6,10	5,45	4,95	4,50	4,15	90 s

I valori delle larghezze unitarie sono espressi in mm/persona ed assicurano una durata dell'attesa in coda, per gli occupanti che impiegano la specifica via d'esodo, non superiore a Δt_{coda} .

I valori delle larghezze unitarie devono essere incrementati per le *scale* secondo le indicazioni della tabella S.4-30, oppure per le *rampe* secondo le indicazioni della tabella S.4-31.

[F] Impiegato anche nell'esodo per fasi

[1] Per occupanti prevalentemente in piedi e densità d'affollamento $> 0,7$ p/m².

- **Larghezza minima delle uscite finali L_F :** il calcolo di tale parametro si effettua sommando i contributi delle singole larghezze delle vie d'esodo orizzontali e verticali che portano ad essa, secondo la relazione

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

dove L_F rappresenta la larghezza minima dell'uscita finale espressa in [mm], $L_{O,i}$ è la larghezza della i-esima via d'esodo orizzontale che conduce all'uscita stessa — calcolata secondo la metodologia precedentemente descritta — e $L_{V,j}$ è la larghezza della j-esima via d'esodo verticale concorrente, determinata in funzione della modalità d'esodo. La larghezza complessiva L_F può essere ripartita tra più varchi, a condizione che ciascun percorso rispetti i limiti dimensionali minimi fissati dalla Tabella 23. Nel caso in cui almeno due vie d'esodo convergano verso la stessa uscita finale e siano impiegate contemporaneamente da più di 50 persone ciascuna, è necessario garantire una distanza $\geq 2m$ tra l'uscita finale e lo sbarco di tutte le vie d'esodo che vi confluiscono, come mostrato nella Figura 22.

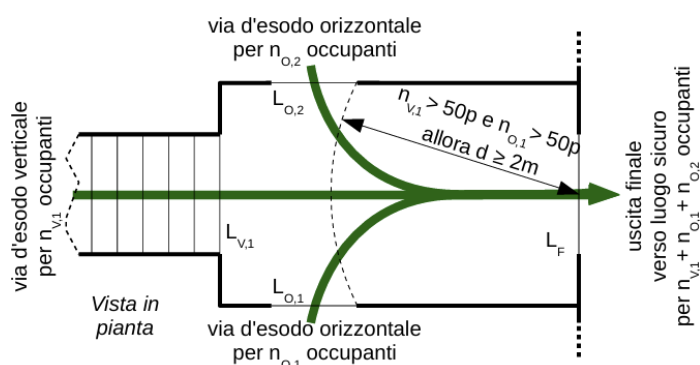


Figura 22: Esempio di schema di convergenza dei flussi d'esodo orizzontali e verticali verso l'uscita finale con applicazione del vincolo di distanza $d \geq 2m$

Un concetto fondamentale che il progettista deve tenere a mente è il principio di ridondanza, il quale garantisce la sicurezza dell'evacuazione anche nel caso in cui l'incendio renda inaccessibile una parte del sistema d'esodo. Per gli ambiti serviti da più vie di fuga, la verifica prevede di rendere indisponibile una via d'esodo alla volta, accertando che le restanti vie indipendenti abbiano una larghezza complessiva sufficiente a smaltire l'intero affollamento; in questa fase, eventuali percorsi non indipendenti tra loro vanno esclusi contemporaneamente. Si devono inoltre considerare sempre disponibili le vie d'esodo a prova di fumo con caratteristiche di filtro (es. scale protette a prova di fumo), le quali non richiedono la verifica di ridondanza, a differenza dei corridoi non protetti che conducono a queste. Si precisa, infine, che in tale verifica non occorre effettuare un ulteriore controllo dei corridoi ciechi e delle lunghezze d'esodo.

5.2.1 - Progettazione della gestione sicurezza antincendio (GSA)

Come indicato nel Capitolo S.5 del Codice, la Gestione della Sicurezza Antincendio (GSA) rappresenta la misura organizzativa e gestionale dell'attività finalizzata a garantire nel tempo un adeguato livello di sicurezza. In generale, le misure di prevenzione degli incendi devono essere individuate già nella prima fase della valutazione del rischio, e per ogni elemento riconosciuto come pericoloso ai fini antincendio, il progettista è tenuto a valutare se esso possa essere eliminato, ridotto, sostituito, separato o protetto rispetto ad altre parti dell'attività.

La GSA si attua attraverso specifiche azioni elementari di prevenzione, come ad esempio la pulizia e l'ordine dei luoghi, la riduzione e il controllo delle sorgenti di innesco, la riduzione del carico di incendio globale, la sostituzione dei materiali combustibili

caratterizzati da una velocità di propagazione dell'incendio particolarmente rapida con altri aventi una velocità di sviluppo decisamente più contenuta o nulla.

Tutte le misure di prevenzione e le procedure gestionali identificate in fase di valutazione del rischio hanno valore vincolante per l'intero esercizio dell'attività: esse costituiscono un obbligo che deve essere rispettato dal datore di lavoro e dai responsabili della gestione della sicurezza, in quanto si configurano come i pre-requisiti operativi su cui si basa la validità stessa degli scenari d'esodo.

Nell'ambito della progettazione della sicurezza, la relazione tecnica deve documentare e rendere vincolanti i seguenti aspetti strategici:

- **Limitazioni d'esercizio dell'attività:** i vincoli operativi assunti come ipotesi della progettazione (massimo affollamento, tipologia degli occupanti, caratteristiche degli arredi, massimo carico d'incendio);
- **Misure specifiche e manutenzione:** l'elenco dei presidi antincendio necessari e il programma dei controlli periodici per mantenerli sempre efficienti e funzionanti;
- **Formazione personale:** il livello di addestramento richiesto per il personale. Tali prescrizioni sono cruciali in caso di esodo per fasi, dove gli addetti devono essere specificamente formati per assistere l'evacuazione, o laddove sia prevista l'attivazione manuale di sistemi di protezione attiva;
- **Indicazioni per la gestione dell'emergenza:** le misure antincendio, l'individuazione dei locali più pericolosi con le relative protezioni, la guida pratica su come coordinare l'evacuazione delle persone, spegnere i primi focolai e proteggere la struttura dai danni del fumo e del calore.

In conformità al Capitolo S.5 del D.M. 03/08/2015, la progettazione della GSA si fonda su una stretta collaborazione tra il progettista e il responsabile dell'attività (o il committente, nel caso in cui il primo non sia noto in fase di progetto). Tale interazione prevede che il responsabile fornisca i dati di input sui pericoli d'incendio e contribuisca alla definizione della strategia complessiva; il progettista, invece, ha il compito di definire la GSA e documentare le limitazioni e le modalità d'esercizio necessarie. Questo scambio continuo di informazioni è indispensabile affinché le misure preventive e le procedure di

emergenza definite dal progettista vengano correttamente attuate dal responsabile durante l'esercizio dell'attività.

5.2.2 - GSA: manutenzione, registri e pianificazione dell'emergenza

La corretta GSA durante l'esercizio dell'attività è fondamentale, in quanto permette di garantire nel tempo l'efficacia di tutte le altre misure di protezione adottate all'interno dell'attività. Tale gestione operativa si articola obbligatoriamente su tre pilastri preventivi:

- La riduzione della probabilità di insorgenza di incendi tramite adeguate misure di prevenzione;
- Il controllo e la manutenzione periodica degli impianti e delle attrezzature antincendio;
- La preparazione alla gestione dell'emergenza, assicurata tramite la pianificazione delle azioni correttive, esercitazioni antincendio e prove di evacuazione periodiche.

A supporto di tali adempimenti, il responsabile dell'attività ha l'obbligo di predisporre e mantenere costantemente aggiornato il Registro dei controlli; all'interno di questo documento, che deve rimanere sempre disponibile per gli organi di controllo, devono essere annotati tutti gli interventi di verifica e manutenzione sui sistemi antincendio, le attività di informazione, formazione e addestramento del personale e l'esito delle prove di evacuazione eseguite.

Infine, se previsto dalla soluzione progettuale individuata, il responsabile deve curare la predisposizione di un dettagliato piano per il mantenimento del livello di sicurezza antincendio. Basato sulla specifica valutazione del rischio, il piano definisce le attività di sorveglianza (incluse le vie di esodo e la segnaletica), la programmazione della formazione e l'informazione mirata agli occupanti. Esso norma, inoltre, le procedure per l'esecuzione delle manutenzioni ordinarie e straordinarie o delle modifiche strutturali, indicando anche l'assegnazione formale delle responsabilità operative.

In generale, i documenti della GSA devono essere oggetto di revisione periodica a cadenza stabilita e, in ogni caso, devono essere aggiornati in tempo reale in occasione di eventuali modifiche dell'attività.

Il controllo e la manutenzione periodica degli impianti e delle attrezzature antincendio devono essere eseguiti in conformità alla seguente documentazione:

1. Norme tecniche UNI e CEI;
2. Specifiche TS e rapporti tecnici TR⁴¹;
3. Prescrizioni contenute nel manuale d'uso e manutenzione dell'impianto, che deve essere redatto secondo la regolamentazione applicabile e fornito al responsabile dell'attività.

Le operazioni di verifica e la loro specifica cadenza temporale sono vincolate a tali documenti tecnici e devono essere affidate esclusivamente a personale esperto in materia, il quale garantisce la corretta esecuzione delle procedure e il mantenimento dell'efficienza dei presidi; viene in seguito riportata la *Tabella 26*, presa dal Codice, che indica le norme e le TS per verifica, controllo e manutenzione per alcuni impianti e attrezzature antincendio.

Tabella 26: Norme e TS per verifica, controllo e manutenzione di impianti e attrezzature antincendio

Impianto o attrezzatura antincendio	Norme e TS per verifica, controllo, manutenzione
Estintori	UNI 9994-1
RI	UNI 10779, UNI EN 671-3, UNI EN 12845
SPK	UNI EN 12845
IRAI	UNI 11224
SEFC	UNI 9494-3
Sistemi a pressione differenziale	UNI EN 12101-6
Sistemi a polvere	UNI EN 12416-2
Sistemi a schiuma	UNI EN 13565-2
Sistemi spray ad acqua	UNI CEN/TS 14816
Sistema estinguente ad aerosol condensato	UNI ISO 15779
Sistemi a riduzione di ossigeno	UNI EN 16750
Porte e finestre apribili resistenti al fuoco	UNI 11473
Sistemi di spegnimento ad estinguente gassoso	UNI 11280

⁴¹ **Specifiche TS e rapporti tecnici TR:** le TS (*Technical Specification*) e le TR (*Technical Report*) sono dei documenti emessi dagli enti di normazione (es: UNI, CEI); in particolare, le prime sono specifiche tecniche applicate a settori per i quali non è ancora disponibile una norma standard, mentre le seconde sono rapporti di natura puramente informativa e non prescrittiva, che forniscono ai tecnici linee guida esplicative, chiarimenti applicativi e dati sullo stato dell'arte.

La documentazione a supporto dell'emergenza deve includere planimetrie e istruzioni dettagliate per l'esodo degli occupanti, con particolare attenzione alle misure di assistenza destinate alle persone con specifiche necessità. Infine, in prossimità degli accessi di ciascun piano dell'attività, vi è l'obbligo di esporre le planimetrie esplicative del sistema d'esodo, l'ubicazione delle attrezzature antincendio e le istruzioni comportamentali da seguire in caso di incendio.

5.3 - Controllo dell'incendio: livelli di prestazione e misure attive

In conformità al Capitolo S.6 del Codice, il controllo dell'incendio è una misura di protezione che ha come scopo l'individuazione dei presidi da installare nell'attività per la protezione nei confronti di un focolaio iniziale, per la protezione manuale o automatica finalizzata all'inibizione o al controllo dell'incendio, e per la protezione mediante completa estinzione dello stesso. All'interno dei presidi rientrano gli estintori e i sistemi di protezione attiva, quali la rete di idranti e gli impianti manuali o automatici di inibizione, controllo o estinzione, ad acqua o ad altri agenti estinguenti.

I livelli di prestazione che si possono attribuire agli ambiti dell'attività sono cinque e sono definiti dalla *Tabella 27*, la quale prevede, per il raggiungimento di ciascun obiettivo di protezione, la possibilità di adottare sia soluzioni conformi sia soluzioni alternative.

Tabella 27: Livelli di prestazione del controllo dell'incendio

Livello di prestazione	Descrizione
I	Nessun requisito
II	Estinzione di un principio di incendio
III	Controllo o estinzione manuale dell'incendio
IV	Inibizione, controllo o estinzione dell'incendio con sistemi automatici estesi a porzioni di attività
V	Inibizione, controllo o estinzione dell'incendio con sistemi automatici estesi a tutta l'attività

Si precisa che all'interno del Codice vengono anche indicati i criteri di attribuzione di ciascun livello di prestazione allo specifico ambito dell'attività, i quali vengono riportati nella *Tabella 28*.

Tabella 28: Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione per controllo dell'incendio

Livello di prestazione	Criteri di attribuzione
I	Non ammesso nelle attività soggette
II	Ambiti dove siano verificate <i>tutte</i> le seguenti condizioni: • profili di rischio: ◦ R_{vita} compresi in A1, A2, B1, B2, Cii1, Cii2, Ciii1, Ciii2; ◦ R_{beni} pari a 1, 2; ◦ $R_{ambiente}$ non significativo; • tutti i piani dell'attività situati a quota compresa tra -5 m e 32 m; • carico di incendio specifico $q_f \leq 600 \text{ MJ/m}^2$; • per compartimenti con $q_f > 200 \text{ MJ/m}^2$: superficie lorda $\leq 4000 \text{ m}^2$; • per compartimenti con $q_f \leq 200 \text{ MJ/m}^2$: superficie lorda qualsiasi; • non si detengono o trattano sostanze o miscele pericolose in quantità significative; • non si effettuano lavorazioni pericolose ai fini dell'incendio.
III	Ambiti non ricompresi negli altri criteri di attribuzione.
IV	In relazione alle risultanze della valutazione del rischio nell'ambito e in ambiti limitrofi della stessa attività (es. ambiti di attività con elevato affollamento, ambiti di attività con geometria complessa o piani interrati, elevato carico di incendio specifico q_f , presenza di sostanze o miscele pericolose in quantità significative, presenza di lavorazioni pericolose ai fini dell'incendio, ...).
V	Su specifica richiesta del committente, previsti da capitolati tecnici di progetto, richiesti dalla autorità competente per costruzioni destinate ad attività di particolare importanza, previsti da regola tecnica verticale.

Nel Capitolo S.6 del Codice vengono normate le misure di protezione attiva finalizzate al controllo e al contenimento dei focolai, con lo scopo di salvaguardare l'incolumità degli occupanti e proteggere la struttura dell'edificio; questa strategia si attua principalmente attraverso i seguenti tre elementi:

- **Estintori d'incendio:** presidi manuali di primo intervento, classificati in base all'agente estinguente più idoneo — come polvere, CO_2 o schiuma — e classificati in base al tipo di fuoco da spegnere: Classi A, B, C (per solidi, liquidi e gas infiammabili), Classe D (per i metalli) e Classe F (specifica per oli e grassi da cucina); in generale, la carica degli estintori non può essere superiore a 6 kg o 6 l , infatti estintori con cariche superiori sono utilizzabili solo negli ambienti destinati ad attività di processo non accessibili al pubblico.
- **Reti di idranti (RI):** sistemi idrici fissi — composti da idranti a muro, naspi o idranti esterni — progettati per fornire acqua con portata e pressione adeguate, consentendo sia l'intervento immediato del personale interno sia l'azione successiva dei Vigili del Fuoco. Sotto il profilo normativo, la rete idranti si considera conforme se viene progettata, installata ed esercitata in conformità alla norma UNI 10779. Nel caso in cui, oltre alla rete di idranti, vengano installati altri sistemi antincendio di protezione attiva (come gli impianti sprinkler), deve essere garantito il corretto funzionamento simultaneo, escludendo interferenze reciproche sia nella fase di attivazione sia in quella di spegnimento; all'interno di

ambiti protetti da sistemi automatici di estinzione in cui sia prevista esclusivamente una presenza occasionale e di breve durata di personale addetto — come ad esempio nei magazzini automatizzati — non è necessaria l'installazione della RI.

- **Sistemi automatici di inibizione, controllo o estinzione dell'incendio:** spesso chiamati impianti sprinkler (SPK), sono sistemi fissi ad attivazione automatica basati su vari agenti estinguenti — acqua nebulizzata, gas, schiuma, polvere — o sull'inibizione tramite deplezione di ossigeno. Gli SPK sono composti da alimentazione idrica, tubazioni e valvole, e rilevano il calore tramite erogatori che si attivano solo a temperature predeterminate in prossimità del fuoco, estinguendolo sul nascere o contenendolo per facilitare l'intervento dei soccorsi. La scelta dell'impianto deve considerare l'eventuale incompatibilità dell'agente estinguente con i materiali presenti negli ambiti di installazione e gli effetti della sua scarica sulla salute degli occupanti; per quanto appena detto, l'uso degli sprinkler è vietato in tutte le zone in cui l'acqua costituisce una potenziale fonte di pericolo.

5.4.1 - La Regola Tecnica Verticale V.6

Le Regole Tecniche Verticali, spesso indicate con la sigla RTV, consistono in disposizioni normative complementari e integrative rispetto alla Regola Tecnica Orizzontale (RTO) del D.M. 03/08/2015. Mentre la RTO stabilisce i criteri generali validi per qualsiasi tipologia di opera, le RTV introducono prescrizioni specifiche, vincoli geometrici e requisiti tecnici applicabili a particolari destinazioni d'uso, caratterizzate da profili di rischio specifici. La normativa antincendio prevede infatti moduli verticali dedicati a molteplici ambiti civili e industriali, tra i quali vi sono le attività d'ufficio, le strutture turistico-alberghiere, gli edifici scolastici, i locali commerciali, le strutture sanitarie e i complessi storici o espositivi. Ciascuna di queste categorie presenta logiche di sviluppo dell'incendio ed esigenze di salvaguardia della vita umana profondamente differenti, che richiedono l'applicazione di soglie prestazionali differenziate.

All'interno di questo panorama normativo, il presente paragrafo si concentra specificamente sulla Regola Tecnica Verticale V.6, dedicata alle attività di autorimessa⁴². Le autorimesse — soprattutto se sviluppate in ambito ipogeo e multipiano come il parcheggio di Piazza Bengasi — richiedono un approccio progettuale estremamente rigoroso a causa delle criticità legate al confinamento dei fumi, all'elevato carico d'incendio potenziale dei veicoli e alle difficoltà di evacuazione e di intervento da parte dei soccorritori. Per mitigare tali rischi, la RTV V.6 modula le strategie antincendio imponendo severi limiti geometrici per le lunghezze d'esodo e per i corridoi ciechi all'interno dell'area di parcheggio, garantendo anche che le vie di fuga verticali siano isolate tramite filtri a prova di fumo, capaci di mantenere l'ambiente di risalita completamente sterile rispetto ai prodotti della combustione.

In particolare, la Regola Tecnica Verticale V.6 si applica a tutte le autorimesse caratterizzate da una superficie complessiva $> 300m^2$; al fine di indicare i requisiti di sicurezza in funzione del reale livello di rischio, la norma introduce un sistema di classificazione integrativo rispetto alla RTO, nello specifico:

1. Rispetto alle caratteristiche prevalenti degli occupanti

- **SA:** occupanti che hanno familiarità con l'attività;
- **SB:** ambiti in cui vi è presenza di pubblico privo di familiarità;
- **SC:** strutture adibite ad autosilo⁴³;

2. Rispetto alla superficie lorda A

- **AA:** superfici comprese nell'intervallo $300m^2 < A \leq 1000m^2$;
- **AB:** superfici comprese nell'intervallo $1000m^2 < A \leq 5000m^2$;

⁴² **Autorimessa:** ai sensi del D.M. 03/08/2015, si definisce autorimessa un'area coperta, con servizi annessi e pertinenze, destinata al ricovero, alla sosta e alla manovra di veicoli; il Codice specifica che non sono considerate autorimesse le aree coperte in cui: (a) ciascun posto auto sia accessibile direttamente da spazio scoperto con un percorso massimo inferiore a due volte l'altezza del piano di parcheggio; (b) il ricovero sia destinato all'esposizione, alla vendita o al deposito di veicoli aventi quantitativi limitati di carburante per la sola movimentazione nell'area (es: autosaloni).

⁴³ **Autosilo:** compartimento destinato al ricovero, alla sosta ed alla manovra di veicoli, esclusivamente per mezzo di sistemi automatizzati.

- **AC:** superfici comprese nell'intervallo $5000m^2 < A \leq 10000m^2$;
- **AD:** superfici $A > 10000m^2$;

3. Rispetto alla quota di tutti i piani h

- **HA:** piani con quote comprese nell'intervallo $-1m \leq h \leq 6m$;
- **HB:** piani con quote comprese nell'intervallo $-5m \leq h \leq 12m$;
- **HC:** piani con quote comprese nell'intervallo $-10m \leq h \leq 24m$;
- **HD:** tutti i casi non rientranti nelle classificazioni precedenti.

Ai fini di una corretta compartimentazione, la norma identifica le differenti aree dell'attività in base alla loro specifica funzione, in particolare:

- **TA:** aree destinate al ricovero, alla sosta e alla manovra di veicoli;
- **TB:** aree destinate ai servizi annessi all'autorimessa, come stazioni di lavaggio o guardiania;
- **TM1:** depositi di materiale combustibile non pericoloso, con carico di incendio specifico $q_f \leq 300 MJ/m^2$ e superficie lorda $A \leq 25m^2$;
- **TM2:** depositi di materiale combustibile con carico di incendio specifico $q_f \leq 1200 MJ/m^2$ e superficie lorda $A \leq 300m^2$;
- **TT:** locali tecnici rilevanti ai fini della sicurezza antincendio, quali cabine elettriche, centrali termiche o gruppi elettrogeni;
- **TZ:** altre aree residue non classificate.

Per quanto riguarda la progettazione della sicurezza antincendio, si deve attuare la metodologia generale di valutazione del rischio già trattata nel *Capitolo 4*. In conformità con i criteri di semplificazione stabiliti dal Codice, nel caso in cui i piani di parcheggio siano limitati a due, tutti i riferimenti generali della RTO relativi alla soglia critica dei $-5m$ devono intendersi formalmente sostituiti dal limite di $-6m$. Infine, a differenza delle zone di sosta e dei servizi in cui le misure protettive sono date in funzione dei profili di rischio standard, le aree TZ sono subordinate a una valutazione del rischio dedicata, finalizzata alla definizione di strategie antincendio specifiche.

5.4.2 - Applicazione delle misure antincendio della RTV V.6

In merito alla strategia antincendio da applicare, la RTV V.6 impone che:

- Sia prevista l'adozione di tutte le misure previste dalla RTO, attribuendo i relativi livelli di prestazione secondo i criteri ordinari, facendo eccezione per le indicazioni complementari o sostitutive introdotte nei paragrafi successivi⁴⁴;
- Nelle autorimesse progettate e gestite secondo la presente RTV è ammesso omettere le valutazioni relative alle aree a rischio per atmosfere esplosive esposte nel Capitolo V.2 del Codice, in quanto le eventuali perdite non prevedibili di combustibile dai veicoli parchati determinano la formazione di zone in cui si ritiene trascurabile la presenza di un'atmosfera esplosiva, classificate come zone NP (non pericolose).

Reazione al fuoco

All'interno delle aree TA destinate al ricovero, alla sosta e alla manovra dei veicoli non è consentito il livello di prestazione I, con la sola eccezione delle pavimentazioni, dalle quali restano esclusi i rivestimenti a pavimento quali parquet, mattonelle o moquette.

Resistenza al fuoco

La resistenza al fuoco prevede che la classe minima delle strutture non possa essere inferiore ai valori prestabiliti dalla *Tabella 29*, con la facoltà di non rispettare tali minimi esclusivamente per le autorimesse isolate⁴⁵.

Tabella 29: Classi minime di resistenza al fuoco per autorimesse non isolate secondo la RTV V.6

Autorimessa	Autorimessa SA; SB	
	Aperta	Chiusa
HA	30 [1]	60 [2]
HB	60	60 [2]
HC	60	90
HD	60	90

[1] Classe 60 in caso di altezza antincendi dell'opera da costruzione di cui fa parte l'autorimessa > 24 m

[2] Classe 90 in caso di altezza antincendi dell'opera da costruzione di cui fa parte l'autorimessa > 24 m

⁴⁴ Si precisa che, allo stesso modo, devono essere integrate anche le prescrizioni della RTV V.1 relative alle aree a rischio specifico e le disposizioni delle altre RTV, qualora applicabili.

⁴⁵ **Autorimessa isolata:** struttura adibita solo al parcheggio dei veicoli, che non condivide funzioni o elementi strutturali con gli edifici adiacenti destinati ad altre attività.

Compartimentazione

In merito alla compartimentazione, si ha che i locali classificati come TM1, TM2, TT e SC devono costituire un compartimento distinto, ad eccezione delle aree TM1 nel caso in cui siano inserite in compartimenti di tipo SA, AB e HB. Le comunicazioni verso l'esterno e tra i compartimenti interni dell'autorimessa sono regolate in base alle caratteristiche minime individuate dalla *Tabella 30*.

Tabella 30: Caratteristiche minime della comunicazione tra compartimenti secondo la RTV V.6⁴⁶

Tipologia autorimessa	Verso le pertinenze dell'autorimessa	Verso compartimenti di altre attività		Vie d'esodo comuni con altre attività	
	TM1 [1]; TM2; TT; TZ	In prevalenza non aperti al pubblico	In prevalenza aperti al pubblico	In prevalenza aperte al pubblico	In prevalenza non aperte al pubblico
SA, AB, HB [2]	Protetta come da paragrafo V.6.5.2	Filtro [3] [5]	Filtro	[4]	Filtro [5]
Altre	Come da paragrafo V.6.5.2	Filtro [3]	Filtro	[4]	
SC	Protetta come da capitolo S.2	Filtro [3]	A prova di fumo	Non ammessa alcuna comunicazione	

[1] Solo se l'area TM1 è inserita in compartimento distinto.

[2] In caso di altezza antincendi dell'opera da costruzione di cui fa parte l'autorimessa ≤ 24 m.

[3] Il requisito S_a per le porte non è richiesto.

[4] Via d'esodo a prova di fumo proveniente dall'autorimessa.

[5] Per autorimesse AA la comunicazione può avvenire mediante porta E 30.

Esodo

Per quanto riguarda la gestione dell'esodo, la RTV impone che nei compartimenti classificati come SC non sia consentita la presenza di occupanti, fatta eccezione per l'accesso occasionale e di breve durata da parte del personale addetto alle operazioni di servizio o manutenzione.

Gestione sicurezza antincendio

All'interno delle autorimesse vige inoltre l'obbligo di individuare chiaramente i posti auto suddividendoli per tipologia di veicolo (es: autovetture, motocicli, ...) e segnalando l'eventuale presenza di infrastrutture di ricarica per veicoli elettrici. Infine, l'intera attività deve essere dotata di idonea segnaletica di sicurezza finalizzata a rendere chiaramente visibili gli specifici divieti e gli obblighi da osservare.

⁴⁶ Si precisa che per gli autosilo (SC), il collegamento verso le pertinenze dell'attività richiede una comunicazione protetta in conformità al Capitolo S.2 del Codice, i cui criteri sono stati precedentemente esposti nel *Paragrafo 4.4.1*.

Controllo dell'incendio

La strategia relativa al controllo dell'incendio impone che l'attività sia provvista delle adeguate misure di protezione attiva, attribuendo i livelli di prestazione per ciascun compartimento in funzione dei parametri definiti dalla *Tabella 31*.

Tabella 31: Livelli di prestazione per il controllo dell'incendio secondo la RTV V.6

Autorimessa	Autorimessa								SC
	SA				SB				
	AA	AB	AC	AD	AA	AB	AC	AD	
HA	II	II [1]	III [1]	IV	II	III	III [1]	IV	IV
HB		III							
HC; HD	IV				IV				

[1] Incremento di un livello di prestazione per autorimesse chiuse.

Ai fini dell'eventuale dimensionamento della rete idranti secondo la norma UNI 10779, il progettista deve fare riferimento ai parametri minimi di progettazione stabiliti dalla *Tabella 32*. Qualora la valutazione del rischio o i livelli di prestazione impongano l'installazione di un impianto automatico di controllo o estinzione dell'incendio di tipo sprinkler, progettato in conformità alla norma UNI EN 12845, l'alimentazione idrica a servizio del sistema deve essere almeno di tipo singolo superiore⁴⁷.

Tabella 32: Parametri progettuali minimi per la rete idranti secondo la RTV V.6

Classificazione attività		Livello di pericolosità	Protezione esterna	Caratteristiche alimentazione idrica (UNI EN 12845)
Superficie lorda	Quota dei piani			
AA	HA, HB	---	---	---
	HC, HD	1	Non richiesta	Singola [1]
AB	HA, HB, HC	1	Non richiesta	Singola [1]
	HD	2	Non richiesta	Singola superiore [2]
AC	HA, HB, HC	2	Sì [3]	Singola
	HD	2	Sì [3]	Singola superiore
AD	Qualsiasi	3	Sì [4]	Singola superiore

[1] Per le autorimesse SA è ammessa l'alimentazione promiscua.

[2] Per le autorimesse SA è ammessa l'alimentazione singola.

[3] Protezione esterna non richiesta se si adotta livello di pericolosità 3.

[4] Protezione esterna non richiesta per autorimesse isolate e completamente interrato se si adotta livello di pericolosità 3.

⁴⁷ **Tipo singolo superiore:** sistema di pompaggio antincendio molto affidabile che utilizza una vasca d'acqua e due pompe indipendenti (una elettrica e una diesel); in questo modo, se una pompa si guasta o si interrompe la corrente, l'altra garantisce comunque il funzionamento dell'impianto.

Controllo di fumi e calore

La regolamentazione sancita dalla RTV V.6 impone:

- **Superficie utile minima:** ciascuna apertura di smaltimento deve avere una superficie utile minima proporzionata alla superficie lorda del compartimento e, in ogni caso, non inferiore a $0,2m^2$;
- **Tipologia delle aperture:** almeno il 10% della superficie utile totale delle aperture di smaltimento SE deve essere di tipologia SEa, SEb o SEc;
- **Uniforme distribuzione:** l'uniforme distribuzione delle aperture di smaltimento all'interno del compartimento può essere verificata applicando un raggio di influenza $R_{offset} = 30m$; nel caso di autorimesse dotate esclusivamente di aperture di tipo SEa e aventi un'altezza media dei locali $h_m \leq 3,50m$, il raggio R_{offset} può essere calcolato tramite la formula:

$$R_{offset} = 30 + 10 \cdot (h_m - 3,50) \quad \text{con } h_m \leq 5m$$

- **Sistemi forzati (SVOF):** nel caso in cui sia previsto un sistema di ventilazione orizzontale forzata del fumo e del calore, si considera soluzione conforme un impianto progettato e installato in conformità alla specifica tecnica prCEN/TS 12101-11 o equivalente;
- **Prescrizioni per i box auto:** in presenza di box auto privi di proprie aperture di smaltimento, i serramenti di chiusura devono essere provvisti di aperture di aerazione in alto e in basso. La superficie utile complessiva di tali aperture non deve essere minore di 1/100 della superficie lorda del box stesso.

Metodi e scenari di incendio

A conclusione della trattazione della RTV V.6, la norma introduce specifiche disposizioni in merito ai metodi e agli scenari per la verifica della capacità portante delle strutture in caso di incendio. Tuttavia, al fine di garantire un'esposizione organica e coerente con la struttura del Codice, tali criteri di approccio prestazionale verranno approfonditi e trattati nel dettaglio all'interno del successivo *Capitolo 6*, dedicato interamente alla metodologia dell'ingegneria della sicurezza antincendio.

6 - Sezione Metodi (M) del D.M. 03/08/2015

L'applicazione dei principi della *Fire Safety Engineering* (FSE) consente di definire soluzioni idonee al raggiungimento degli obiettivi progettuali mediante analisi di tipo quantitativo. Il progettista specifica gli obiettivi di sicurezza da garantire, traducendoli in parametri misurabili, identifica gli scenari d'incendio di progetto più gravosi e, tramite strumenti di modellazione analitici o numerici, ne calcola gli effetti in relazione alla soluzione ipotizzata. Se i risultati conservano un adeguato margine di sicurezza rispetto alle soglie stabilite, la configurazione del sistema d'esodo è considerata accettabile. La valutazione non richiede necessariamente l'impiego di modelli fluidodinamici complessi — come FDS o CFAST⁴⁸ — infatti, se le condizioni lo consentono, il progettista può basarsi su strumenti semplificati legati al Codice, ricorrendo alla normativa tecnica e alla regola d'arte per gli aspetti non esplicitamente normati.

Il presente capitolo declina questo quadro metodologico in conformità alla Sezione M del D.M. 03/08/2015, analizzando le fasi sequenziali dell'analisi preliminare e quantitativa. Vengono approfonditi i criteri di stima analitica delle curve di rilascio termico RHR(t) e l'applicazione degli scenari standardizzati imposti dalla RTV V.6 per le autorimesse. La trattazione si focalizza, infine, sulla validazione del sistema d'esodo attraverso la quantificazione deterministica dei parametri ASET ed RSET, definendo le soglie limite di tolleranza necessarie a garantire la salvaguardia della vita umana in infrastrutture complesse.

6.1 - Metodologia per l'ingegneria della sicurezza antincendio

La metodologia prestazionale si articola in due fasi sequenziali:

- **Analisi preliminare:** individua i passaggi atti a determinare le condizioni di rischio dell'attività e le soglie di prestazione correlate agli obiettivi da soddisfare;

⁴⁸ FDS o CFAST: FDS (*Fire Dynamics Simulator*) è un software di modellazione fluidodinamica computazionale (CFD) specifico per lo studio tridimensionale del trasporto di calore e fumi generati da un incendio; CFAST (*Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport*) è un modello numerico a zone utilizzato per calcolare l'evoluzione temporale dei gas e della temperatura all'interno di ambienti confinati suddivisi in due macro-volumi (strato caldo superiore e strato freddo inferiore)

- **analisi quantitativa:** esegue la modellazione degli effetti dell'incendio, confronta i risultati con le soglie individuate e definisce il progetto da sottoporre ad approvazione definitiva.

In merito alla fase di analisi preliminare, questa si articola in quattro sotto-fasi sequenziali:

1. **Definizione del progetto (*Define project scope*):** viene formalizzato lo scopo della progettazione antincendio. Il progettista definisce la destinazione d'uso dell'attività, le finalità del progetto prestazionale, i vincoli normativi o specifici del sito, i pericoli intrinseci, le condizioni al contorno e le caratteristiche degli occupanti;
2. **Identificazione degli obiettivi di sicurezza antincendio (*Identify goals*):** vengono specificati qualitativamente gli obiettivi fondamentali da raggiungere in relazione alle esigenze dell'attività, quali la salvaguardia della vita umana, il massimo danno tollerabile all'attività e al suo contenuto e la continuità d'esercizio a seguito di un evento incidentale;
3. **Definizione delle soglie di prestazione (*Develop performance criteria*):** gli obiettivi qualitativi vengono tradotti in soglie di prestazione quantitative e qualitative, necessarie per definire in modo oggettivo le soluzioni progettuali che soddisfano gli obiettivi antincendio. Ai fini della salvaguardia della vita si stabiliscono:
 - Le soglie di prestazione per la vita (*life safety criteria*), superate le quali gli occupanti esposti al fuoco ed ai suoi effetti perdono l'autonomia di esodo;
 - Le soglie per il mantenimento della capacità portante delle strutture.
4. **Individuazione degli scenari di incendio di progetto (*Develop fire scenarios*):** consiste nella schematizzazione dei più gravosi eventi che possono verosimilmente verificarsi nell'attività (*credible worst-case scenarios*), determinati in relazione alle caratteristiche del focolaio, dell'edificio e degli occupanti.

Tutte le scelte e i parametri definiti in questa fase vengono indicati nel Sommario Tecnico, il documento di sintesi che deve essere condiviso e firmato con il Comando dei Vigili del

Fuoco prima di avviare la fase di analisi quantitativa. Al suo interno vengono individuati i soggetti coinvolti, le finalità del metodo prestazionale e il processo di scelta degli scenari e delle soglie di prestazione.

Per quanto riguarda la fase quantitativa, questa si compone di alcune sotto-fasi necessarie per effettuare le verifiche di sicurezza degli scenari individuati nella fase precedente, ovvero:

1. **Elaborazione delle soluzioni progettuali (*Develop trial designs*):** il progettista elabora una o più soluzioni progettuali per l'attività, in linea con le finalità già definite nell'analisi preliminare, da sottoporre alla successiva verifica per il soddisfacimento degli obiettivi di sicurezza antincendio;
2. **Valutazione delle soluzioni progettuali (*Evaluate trial designs*):** il progettista valuta, per ciascuna soluzione precedentemente ipotizzata, gli effetti che gli scenari d'incendio di progetto andrebbero a causare nell'attività. A tale scopo vengono utilizzati modelli di calcolo analitici o numerici, la cui applicazione fornisce i risultati quantitativi che consentono di descrivere l'evoluzione dell'incendio e dei suoi effetti sulle strutture, sugli occupanti e sull'ambiente. Gli esiti della modellazione vengono successivamente impiegati per verificare il rispetto delle soglie di prestazione per ogni scenario; le soluzioni che non rispettano tutte le soglie stabilite vengono scartate;
3. **Selezione delle soluzioni progettuali idonee (*Select final design*):** il progettista seleziona la soluzione finale tra quelle che hanno avuto esito positivo rispetto a tutti gli scenari d'incendio di progetto analizzati.

Tutto ciò che riguarda la fase di analisi quantitativa viene invece sintetizzato nella Relazione Tecnica, la quale descrive il percorso progettuale e i risultati numerici dell'analisi (espressi tramite tabelle, grafici e immagini), esplicitando i modelli di calcolo adottati, i parametri di input giustificati e il confronto diretto tra i riscontri della modellazione e le soglie prefissate.

Il professionista seleziona i modelli di calcolo in base alla complessità del progetto; lo stato dell'arte offre diverse categorie strumentali, utilizzabili anche contemporaneamente:

- **Modelli analitici:** formule matematiche, come ad esempio le *fire plumes* di Zukoski e Heskestad per stime accurate di effetti specifici in ambiti definiti (es: tempo di *flashover*);
- **Modelli numerici a zone:** codici per ambienti confinati che approssimano a un unico valore le proprietà fisiche dei gas in macro-volumi (es: CFAST);
- **Modelli numerici di campo (CFD):** simulazioni fluidodinamiche tridimensionali per l'analisi complessa e tempo-variabile della combustione e dei fumi (es: FDS);
- **Modelli di simulazione dell'esodo:** strumenti dinamici per la valutazione dei tempi di evacuazione degli occupanti (es: FDS+EVAC);
- **Modelli di analisi termo-strutturale:** codici specialistici per la verifica della capacità portante (es: Ansys).

Il D.M. 03/08/2015 impone l'esecuzione di un'analisi di sensibilità per i parametri di input più rilevanti, dimostrando che i risultati non dipendano significativamente da scelte discrezionali (come, ad esempio, dalla dimensione della griglia di calcolo).

A conclusione dell'iter, la documentazione a corredo del progetto deve comprendere il Sistema per la Gestione della Sicurezza Antincendio (SGSA): questo definisce le misure gestionali — ai sensi del Capitolo S.5 del Codice — necessarie per monitorare e mantenere nel tempo le ipotesi e le limitazioni d'esercizio su cui si basano i dati di ingresso della progettazione (es: organizzazione del personale, pianificazione dell'emergenza, manutenzione dei sistemi).

6.2.1 - Scenari di incendio per la progettazione prestazionale

La progettazione antincendio basata sulla *Fire Safety Engineering* — ovvero il Capitolo M.2 del Codice — si fonda sulla definizione degli scenari di incendio di progetto. Questa procedura si articola in tre fasi sequenziali: identificazione, selezione e descrizione quantitativa degli eventi incidentali che possono verosimilmente verificarsi nell'attività durante la sua vita utile. Ciascuno scenario rappresenta la schematizzazione di un incendio reale, determinata dall'interazione dinamica di tre fattori:

- Caratteristiche del focolaio;
- Configurazione geometrico-impiantistica dell'edificio;

- Profilo comportamentale degli occupanti.

Fase di identificazione dei possibili scenari d'incendio

La prima sotto-fase di identificazione richiede l'analisi sistematica di tutte le condizioni di esercizio ragionevolmente prevedibili per l'opera. Il progettista deve considerare sia l'assetto ordinario sia le condizioni variabili o transitorie, quali la presenza di allestimenti temporanei, differenti configurazioni del carico d'incendio o modifiche nei flussi di affollamento. Per mappare tali variabili, l'approccio ingegneristico prevede lo sviluppo di un'analisi ad albero degli eventi (*event tree analysis*) a partire da ogni scenario d'innesco ritenuto credibile, procedendo in modo qualitativo o, nel caso in cui si disponga di dati statistici autorevoli, in termini quantitativi.

Ogni scenario deve essere descritto in modo univoco, esplicitando se la dinamica evolutiva sia relativa a una condizione di *pre-flashover* (orientata alla salvaguardia della vita in fase di esodo) o di *post-flashover* (focalizzata sul mantenimento della capacità portante delle strutture).

Nella fase di identificazione degli scenari, il progettista deve tenere conto anche dell'analisi storica di attività simili e deve descrivere:

- L'evento iniziatore (focolaio e condizioni ambientali al contorno);
- La propagazione del fronte di fiamma e dei prodotti della combustione nei volumi confinati;
- L'azione degli impianti tecnologici e dei sistemi di protezione attiva;
- L'intervento delle squadre aziendali dedicate alla lotta antincendio;
- La distribuzione spaziale e il comportamento degli occupanti esposti.

Selezione degli scenari d'incendio di progetto

Lo scopo della fase di selezione consiste nel ridurre al minimo numero l'insieme dei possibili scenari di incendio identificati nella fase precedente, semplificando e ottimizzando l'onere computazionale della successiva analisi quantitativa. Il progettista estrae, dal modello ad albero, il sottoinsieme degli scenari d'incendio di progetto, esplicitando formalmente nella documentazione progettuale i criteri di esclusione adottati per le configurazioni scartate.

Il criterio cardine della selezione si basa sull'individuazione degli eventi più gravosi tra quelli ritenuti credibili (*credible worst-case scenarios*); gli scenari di progetto selezionati rappresentano i casi più severi per l'attività, pertanto, dimostrando che le soluzioni progettuali soddisfano le soglie di prestazione, si garantisce — per via deduttiva — la sicurezza dell'opera anche nei confronti di tutti gli scenari meno gravosi esclusi dal calcolo.

Il processo di selezione risulta strettamente legato all'obiettivo di sicurezza antincendio perseguito. Nel caso in cui la finalità primaria risieda nella salvaguardia della vita umana durante la fase di evacuazione, le configurazioni di progetto vengono identificate prediligendo gli scenari a maggiore tossicità o a rapida cinetica di sviluppo, tra i quali:

- Un focolaio caratterizzato da una breve durata, ma da una rapida velocità di crescita della potenza termica, associato a un'elevata produzione di fumo e gas di combustione (es: la combustione di arredi imbottiti); tale fenomeno risulta maggiormente critico per l'esodo rispetto a un incendio con curva di rilascio termico superiore, ma a crescita lenta, anche se quest'ultimo comporta sollecitazioni termiche più severe per gli elementi costruttivi;
- Un incendio di limitate dimensioni, che però si sviluppa in prossimità delle vie di esodo di un locale ad alta densità di affollamento; questo può risultare più pericoloso di un evento a maggiore potenza termica, ma che si origina in un ambiente confinato e che si trova lontano dalle zone dove è prevista la presenza di occupanti.

Descrizione quantitativa degli scenari d'incendio di progetto

Una volta conclusa la fase di selezione degli scenari, si procede con la caratterizzazione quantitativa di ognuno di essi. In questa sotto-fase il progettista traduce la descrizione qualitativa degli scenari d'incendio di progetto, già elaborata nel primo passo, in dati numerici di input appropriati per la metodologia di calcolo scelta per la verifica delle ipotesi progettuali; in relazione alle finalità dell'analisi, il professionista antincendio specifica i seguenti dati di input:

1. **Attività:** le caratteristiche dell'attività influenzano l'esodo degli occupanti, lo sviluppo dell'incendio e la diffusione dei prodotti della combustione. A seconda dell'obiettivo dell'analisi, la descrizione dell'attività comprende:

- **Caratteristiche architettoniche e strutturali:** localizzazione e geometria dell'attività, dimensioni e distribuzione degli ambienti interni; descrizione strutturale e caratteristiche degli elementi costruttivi portanti e separanti;
 - **Impiantistica:** impianti di protezione attiva contro l'incendio, impianti di rivelazione, di segnalazione e di allarme incendio;
 - **Aspetti gestionali ed operativi:** destinazione d'uso dell'attività e processi produttivi;
 - **Fattori ambientali:** parametri esterni che influenzano le prestazioni antincendio, quali temperature esterne, ventosità dell'area e livello di rumore che ha impatto sulla percezione dell'allarme;
2. **Occupanti:** il professionista antincendio descrive le caratteristiche degli occupanti in relazione all'impatto che esse possono avere sullo scenario di incendio, tenendo conto dei seguenti aspetti se rilevanti:
- Affollamento complessivo e distribuzione degli occupanti negli ambienti dell'attività;
 - Tipologia degli occupanti (es: lavoratori, visitatori occasionali, anziani, bambini, degenti);
 - Familiarità degli occupanti con l'attività e con il sistema d'esodo;
 - Stato di veglia o sonno degli occupanti;
3. **Incendio:** la descrizione dell'incendio consiste nella caratterizzazione quantitativa del focolare, in quanto sorgente di energia termica e di prodotti della combustione, secondo i seguenti parametri:
- Localizzazione del focolare e tipologia (covante o con fiamma);
 - Quantità, qualità e distribuzione spaziale del materiale combustibile e fonti d'innescio;
 - Curva $RHR(t)$ ⁴⁹;

⁴⁹ **Curva RHR(t):** tale concetto viene spiegato nel dettaglio nel *Paragrafo 6.2.2.*

- Generazione dei prodotti della combustione presi in considerazione (es: monossido di carbonio (CO), particolato).

In particolare, deve essere descritta nel dettaglio la sequenza di evoluzione dell'incendio per un intervallo di tempo che, come istante di tempo iniziale, considera l'evento iniziatore e come istante di tempo finale il raggiungimento dell'obiettivo finale (es: salvaguardia della vita degli occupanti oppure dei soccorritori, mantenimento della capacità portante della struttura).

6.2.2 - Stima della curva RHR(t)

La curva RHR(t) (*rate of heat release*) rappresenta la potenza termica prodotta dal focolare al variare del tempo. La definizione quantitativa delle varie fasi dell'incendio si riferisce alla curva qualitativa avente l'andamento riportato nella *Figura 23*.

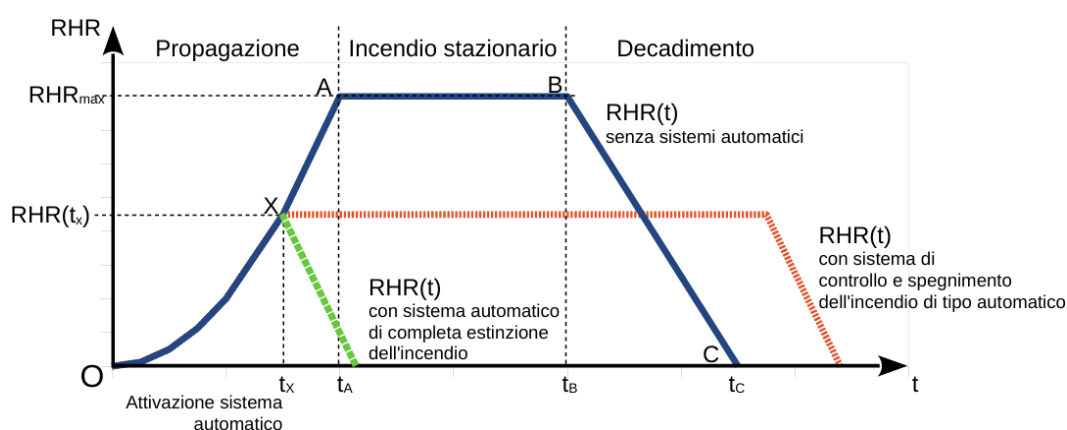


Figura 23: Andamento delle curve RHR(t) con identificazione delle fasi dell'incendio

Come si può vedere dalla *Figura 23*, è possibile suddividere la durata complessiva dell'incendio in tre fasi principali, ovvero:

1. Fase di propagazione dell'incendio

Durante questa fase, la curva RHR(t) può essere rappresentata dalla seguente legge quadratica

$$RHR(t) = 1000 \cdot \left(\frac{t}{t_\alpha}\right)^2 \quad \text{con } t < t_\alpha$$

dove RHR(t) è la potenza termica rilasciata dall'incendio espressa in [kW], t è il tempo espresso in [s] e t_alpha è il tempo necessario affinché la potenza termica

rilasciata raggiunga il valore di $1000kW$. Per alcune attività t_α può essere ricavato dai prospetti dell'appendice E dell'Eurocodice 1, UNI EN 1991-1-2, mentre per le altre il suo valore può essere determinato sulla base di considerazioni per analogia.

2. Fase dell'incendio stazionario

Nella maggioranza dei casi l'energia termica contenuta nel compartimento antincendio è sufficiente a produrre la condizione di *flashover*⁵⁰, in particolare, si ipotizza che la curva cresca con andamento proporzionale a t^2 fino al tempo t_A , punto che corrisponde alla massima potenza RHR_{max} rilasciata nel compartimento considerato. A partire dall'istante t_A inizia la fase stazionaria dell'incendio, durante la quale il valore di $RHR(t)$ rimane costante e si possono considerare le seguenti casistiche:

- Se nell'attività non sono previsti impianti di controllo o estinzione automatica, si suppone che dal tempo t_A fino al tempo t_B la potenza termica prodotta si stabilizzi al valore massimo RHR_{max} , il cui valore può essere calcolato come

$$RHR(t) = RHR_{max} \quad \text{con } t_A \leq t < t_B$$

dove è bene precisare che il calcolo del valore di RHR_{max} dipende dalle condizioni di aerazione del compartimento;

- Se lo sviluppo dell'incendio è controllato dal combustibile, il valore di RHR_{max} viene calcolato come

$$RHR_{max} = RHR_f \cdot A_f$$

dove RHR_f è la potenza termica massima rilasciata per unità di superficie lorda espressa in $[kW/m^2]$, mentre A_f è la superficie lorda del compartimento in $[m^2]$ nel caso di distribuzione uniforme del carico d'incendio (oppure è la superficie lorda effettivamente occupata dal

⁵⁰ **Flashover:** transizione rapida dall'incendio localizzato all'incendio completamente sviluppato in un compartimento chiuso; si verifica quando il calore accumulato dai gas sotto il soffitto supera i $500-600^\circ C$, generando un irraggiamento verso il pavimento pari a circa $20kW/m^2$; tale energia termica causa l'autoaccensione simultanea di tutti i materiali combustibili esposti nella stanza.

combustibile oppure anche l'area operativa di sistemi automatici di controllo dell'incendio). Questo scenario si verifica principalmente all'aperto o in edifici con elevata superficie di ventilazione;

- Se lo sviluppo dell'incendio è limitato dal valore della ventilazione (come generalmente accade in edifici con superficie di ventilazione ordinaria), allora il valore di RHR_{max} deve essere ridotto in funzione della quantità di comburente disponibile che può affluire dalle superfici di ventilazione presenti nella fase di *post-flashover*. In tal caso, se le pareti del compartimento presentano solo aperture verticali, è possibile determinare il valore di RHR_{max} ridotto tramite l'espressione semplificata

$$RHR_{max} = 0,1 \cdot m \cdot H_u \cdot A_V \cdot \sqrt{h_{eq}}$$

dove m è il fattore di partecipazione alla combustione (già trattato nel *Paragrafo 4.5*), $H_u = 17500 \text{ kJ/kg}$ è il potere calorifico inferiore del legno, A_V è l'area totale delle aperture verticali su tutte le pareti del compartimento espressa in $[m^2]$, mentre h_{eq} è l'altezza equivalente delle aperture verticali espressa in $[m]$; in particolare, h_{eq} si calcola con la seguente formula

$$h_{eq} = \frac{\sum_i A_{V,i} \cdot h_i}{\sum_i A_{V,i}}$$

dove $A_{V,i}$ è l'area dell'apertura verticale i-esima espressa in $[m^2]$, mentre h_i è l'altezza dell'apertura verticale i-esima espressa in $[m]$. Se invece le pareti del compartimento presentano anche aperture orizzontali (es: SEFC), l'eventuale riduzione del valore di RHR_{max} deve essere valutata con modelli più sofisticati, come ad esempio i modelli di campo di simulazione dell'incendio, considerando tutte le superfici di ventilazione aperte a partire dall'innesco dell'incendio.

A questo punto, noto il valore di RHR_{max} , il tempo t_A di inizio della fase di incendio stazionario si calcola con la seguente espressione

$$t_A = \sqrt{RHR_{max} \cdot \frac{t_\alpha^2}{1000}}$$

dove t_A è il tempo di inizio della fase di incendio stazionario in [s]. La fase di incendio stazionario termina al tempo t_B — il quale rappresenta l'istante di tempo iniziale della fase di decadimento — momento in cui il 70% dell'energia termica inizialmente disponibile $q_f \cdot A_f$ è stata rilasciata nel compartimento antincendio. Il valore del carico d'incendio specifico q_f è valutato in conformità alle indicazioni già esposte nel *Paragrafo 4.5*.

Per il calcolo del tempo t_B , se l'energia termica inizialmente disponibile è sufficiente affinché l'incendio superi la fase di propagazione e raggiunga la potenza massima RHR_{max} , cioè

$$70\% \cdot q_f \cdot A_f \geq \frac{1}{3} \cdot \frac{1000}{t_\alpha^2} \cdot t_A^3$$

allora il tempo t_B — che indica l'istante finale della fase di incendio stazionario — si calcola con la seguente espressione

$$t_B = t_A + \frac{70\% \cdot q_f \cdot A_f - \frac{1}{3} \cdot \frac{1000}{t_\alpha^2} \cdot t_A^3}{RHR_{max}}$$

Invece, se l'energia termica inizialmente disponibile non è sufficiente affinché l'incendio superi la fase di propagazione, la curva $RHR(t)$ raggiunge il valore massimo RHR_{max} per qualche istante, per poi passare direttamente alla fase di decadimento.

3. Fase di decadimento

La fase finale dell'incendio è rappresentata dal decadimento, durante il quale la potenza termica rilasciata dalle fiamme si riduce progressivamente fino ad annullarsi completamente nell'istante di tempo t_C . Durante questa fase viene consumato il restante 30% dell'energia termica inizialmente disponibile nel compartimento, di conseguenza il tempo t_C viene determinato attraverso la seguente espressione:

$$t_C = t_B + \frac{2 \cdot 30\% \cdot q_f \cdot A_f}{RHR_{max}}$$

dove t_C è l'istante temporale in cui la potenza termica si annulla. È bene precisare che, durante la fase di decadimento, l'andamento della potenza prodotta

dall'incendio è lineare, quindi la curva $RHR(t)$ in questa fase viene descritta dalla relazione

$$RHR(t) = RHR_{max} \cdot \frac{t_c - t}{t_c - t_B} \quad \text{con } t_B \leq t \leq t_c$$

6.2.3 - Effetto dei sistemi di protezione attiva sulla curva $RHR(t)$

L'adozione di sistemi di protezione attiva all'interno del compartimento comporta sostanziali modifiche nell'evoluzione naturale della curva della potenza termica rilasciata $RHR(t)$.

Qualora nell'attività vengano installati sistemi di controllo dell'incendio di tipo automatico (es: impianto sprinkler), l'andamento della potenza termica rilasciata non raggiunge il valore massimo teorico RHR_{max} che si sarebbe sviluppato in funzione delle specifiche condizioni del combustibile e delle condizioni ambientali. In questo caso, infatti, la potenza termica può essere assunta costante e pari al valore $RHR(t_x)$, dove t_x è l'istante di tempo in cui entra in funzione l'impianto automatico; tale valore di plateau $RHR(t_x)$ permane per un intervallo di tempo pari alla durata di alimentazione prevista per l'impianto stesso, entro il quale si presume che l'incendio controllato venga definitivamente estinto tramite il successivo intervento manuale.

Invece, se nell'attività è prevista l'installazione di sistemi automatici di estinzione completa dell'incendio (es: ESFR⁵¹), il loro effetto deve essere valutato caso per caso in relazione alla loro efficacia e all'affidabilità di funzionamento.

In ogni caso, il progettista è tenuto ad attuare le misure e le limitazioni d'esercizio previste all'interno della Gestione della Sicurezza Antincendio (GSA) per i sistemi automatici di protezione attiva considerati in fase di progetto, al fine di evitare il rischio che possa verificarsi una riduzione del livello di sicurezza originariamente assicurato, in conformità a quanto prescritto nel Capitolo M.1 del Codice. Inoltre, è bene mettere in evidenza il fatto che — a differenza dell'attivazione dei sistemi antincendio automatici — l'intervento effettuato dalle squadre antincendio non può essere in alcun modo

⁵¹ **ESFR (Early Suppression Fast Response)**: sistema sprinkler automatico a risposta rapida e soppressione anticipata, progettato per l'estinzione precoce dell'incendio anziché per il solo controllo delle fiamme.

considerato in fase progettuale ai fini della modifica o della riduzione dell'andamento della curva della potenza termica rilasciata.

Qualora il modello della fase di propagazione della curva RHR(t) basato esclusivamente sul tempo caratteristico t_α non fosse ritenuto rappresentativo della reale evoluzione dell'incendio — scenario frequente, in particolare, all'interno degli edifici civili — diventa necessaria una definizione più dettagliata della curva RHR(t). In questi contesti, l'attenzione deve essere focalizzata sulla propagazione dell'incendio e dei prodotti della combustione, in quanto fenomeni di maggiore interesse per la salvaguardia della vita umana. Il progettista può valutare la propagazione dell'incendio verso altri elementi combustibili attraverso un'apposita valutazione del rischio da giustificare⁵².

In linea con questo approccio, la curva RHR(t) complessiva può essere ricostruita seguendo i seguenti passaggi:

1. Ipotizzare il materiale combustibile iniziatore dell'incendio;
2. Valutare la sequenza temporale con la quale i diversi elementi combustibili presenti nell'ambiente vengono progressivamente coinvolti dalle fiamme;
3. Calcolare la curva RHR(t) globale come somma algebrica dei contributi nel tempo dei singoli oggetti, i cui tassi di rilascio termico specifici sono documentati e reperibili nella letteratura tecnica di settore.

Infine, si specifica che il D.M. 03/08/2015 permette di considerare focolari predefiniti — i cui parametri standardizzati sono riportati nella Tabella M.2-2 del Codice — nel caso in cui si intenda omettere la descrizione analitica del focolaio reale; tale approccio semplificato resta tuttavia escluso qualora gli scenari attesi nel compartimento risultino più gravosi.

⁵² Si precisa che vi sono standard internazionali — come le norme NFPA 92 e NFPA 555 — che forniscono un supporto metodologico, riportando correlazioni utili a verificare se l'irraggiamento termico emesso da un oggetto sia sufficiente a innescare quelli adiacenti in base alla tipologia dei materiali e alla distanza di separazione tra essi.

6.2.4 - Scenari d'incendio di progetto secondo la RTV V.6

Ai fini dell'applicazione dei metodi FSE per la verifica della capacità portante⁵³, la RTV V.6 individua tre scenari d'incendio di progetto standardizzati, indicati con S1, S2 ed S3, le cui curve RHR(t) sono definite da punti già noti riportati nelle tabelle del Codice. Questi scenari analizzano diverse configurazioni di innesco e propagazione in corrispondenza degli elementi strutturali critici:

1. **Scenario S1:** prevede l'incendio isolato di un autoveicolo commerciale posizionato in mezzeria di una trave o di un solaio;
2. **Scenario S2:** ipotizza la propagazione simmetrica del focolaio a partire da un veicolo centrale verso gli elementi adiacenti, con un ritardo di innesco pari a 12 minuti, fino a coinvolgere complessivamente 7 veicoli; tra questi deve essere prevista la presenza di almeno un autoveicolo commerciale posto al centro o di fianco al primo autoveicolo innescato;
3. **Scenario S3:** si considera un incendio che coinvolge 4 veicoli posti intorno ad una colonna, il quale si avvia da uno di essi; dopo 12 minuti si propaga verso i due veicoli adiacenti al primo e dopo ulteriori 12 minuti si propaga all'ultimo veicolo; almeno uno dei veicoli considerati deve essere un autoveicolo commerciale.

È bene precisare che gli scenari d'incendio di progetto appena citati possono essere utilizzati per analizzare solamente le autorimesse aventi almeno una delle seguenti caratteristiche:

- Autorimesse aperte le cui aperture di smaltimento costituiscano almeno il 50% della superficie complessiva della facciata su cui sono attestate;
- Autorimesse con compartimenti fuori terra con assenza di box auto.

La norma specifica inoltre che, in presenza di sistemi automatici di controllo dell'incendio, è consentito ridurre fino al 50% la potenza termica massima delle curve di progetto e, allo stesso tempo, escludere del tutto gli effetti di propagazione del focolaio verso gli altri autoveicoli presenti nel compartimento.

⁵³ **Capacità portante:** si precisa che tale concetto viene trattato nel dettaglio nel *Paragrafo 4.4.1.*

6.3.1 - Il criterio per la salvaguardia della vita con la progettazione prestazionale

Nell'applicazione del metodo prestazionale alla sicurezza antincendio per la salvaguardia della vita, ai sensi del D.M. 03/08/2015, il professionista antincendio è tenuto a soddisfare obbligatoriamente i seguenti obiettivi cardine:

1. La dimostrazione diretta ed esplicita della possibilità per tutti gli occupanti dell'attività di raggiungere o permanere in un luogo sicuro, senza che ciò sia impedito da un'eccessiva esposizione agli effetti nocivi e incapacitanti dell'incendio;
2. La dimostrazione della possibilità per i soccorritori e le squadre di emergenza di operare in condizioni di sicurezza all'interno del compartimento, secondo le specifiche soglie di tolleranza ambientale e termica stabilite nella *Tabella 33* e nella *Tabella 34*.

Al fine di validare analiticamente il rispetto di entrambi i requisiti, la progettazione deve seguire procedure e metodologie standardizzate e riconosciute a livello internazionale (es: standard ISO o norme NFPA), atte a mappare e quantificare la posizione, l'affollamento e lo stato psicofisico degli occupanti durante l'intera evoluzione temporale degli scenari d'incendio previsti per l'attività.

Da un punto di vista prettamente teorico, la progettazione ideale di un sistema d'esodo dovrebbe assicurare a tutti gli occupanti la possibilità di raggiungere un luogo sicuro o di permanervi senza mai entrare in contatto con i prodotti della combustione. Sebbene questo criterio debba rappresentare il traguardo prioritario per la maggior parte delle aree dell'attività, esistono situazioni in cui tale principio non è applicabile, nello specifico per gli occupanti che si trovano nel compartimento di primo innesco. In tali volumi, l'interazione iniziale con gli effetti dell'incendio è parzialmente inevitabile, quindi risulta necessaria l'introduzione di un criterio di valutazione quantitativo e discretizzato nel tempo. Quindi, al fine di risolvere le criticità appena citate, la normativa introduce un criterio di verifica analitico basato sul confronto di due intervalli temporali specifici, il quale viene rappresentato per via grafica nella *Figura 24*.

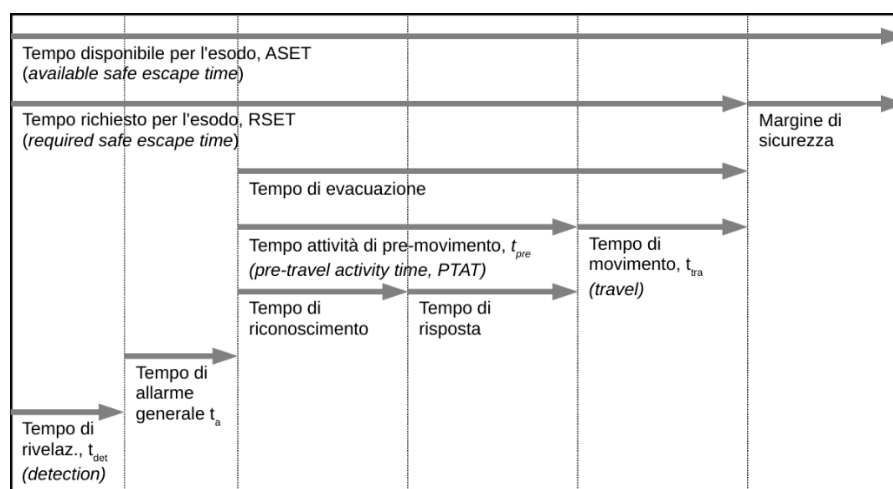


Figura 24: Rappresentazione grafica del criterio $ASET > RSET$

In particolare, ASET ed RSET sono due specifici intervalli temporali discreti, calcolati a partire dall'istante di innesco t_0 :

- **ASET (Available Safe Egress Time):** è il tempo disponibile per l'esodo, definito come l'intervallo temporale entro il quale nel compartimento permangono condizioni ambientali non incapacitanti per gli occupanti in termini di visibilità, temperatura, irraggiamento e tossicità dei gas;
- **RSET (Required Safe Egress Time):** è il tempo richiesto per l'esodo, inteso come il tempo totale necessario affinché gli occupanti completino l'evacuazione verso un luogo sicuro.

Il sistema di vie d'esodo si considera efficace se viene dimostrato che il tempo in cui l'ambiente si mantiene sostenibile per gli occupanti è superiore al tempo richiesto per completare l'esodo verso un luogo sicuro, ovvero $ASET > RSET$.

La differenza tra ASET ed RSET, ovvero tra il tempo disponibile e il tempo richiesto, definisce il margine di sicurezza della progettazione prestazionale per la salvaguardia della vita t_{marg} :

$$t_{marg} = ASET - RSET$$

Nello sviluppo del progetto e nella ricerca tra diverse soluzioni strutturali o impiantistiche, il professionista antincendio opera al fine di massimizzare il valore t_{marg} . Questa grandezza può essere vista come un coefficiente di sicurezza, il cui scopo è assorbire gli errori di approssimazione legati sia ai parametri fisici del focolaio (es: curve

di potenza termica), sia ai modelli computazionali usati per stimare le curve d'esodo e il comportamento degli occupanti. In generale, il quadro normativo vincola il calcolo del margine di sicurezza secondo soglie minime:

- **Approccio standard:** in assenza di specifiche, si assume un margine di sicurezza non inferiore al 100% del tempo richiesto per l'esodo, ovvero

$$t_{\text{marg}} \geq 100\% \cdot RSET$$

- **Approccio ottimizzato:** nel caso in cui vengano condotte specifiche e valutazioni sull'affidabilità dei dati di input impiegati — supportate da dati di letteratura scientifica o da fonti di normazione tecnica — è consentito ridurre il margine fino alla seguente soglia limite

$$t_{\text{marg}} \geq 10\% \cdot RSET$$

- **Limite minimo:** indipendentemente dalla percentuale adottata o dai risultati dei modelli di calcolo, la norma impone un vincolo minimo sul margine di sicurezza che deve sempre essere rispettato, ovvero

$$t_{\text{marg}} \geq 30s$$

L'applicazione di questo set di vincoli garantisce la presenza di un fattore di sicurezza idoneo a tutelare la vita umana anche in scenari caratterizzati da curve d'esodo estremamente rapide.

6.3.2 - Calcolo del parametro ASET

La determinazione del tempo ASET dipende fortemente dalle interazioni che si instaurano all'interno del sistema incendio-edificio-occupanti. Nel momento in cui il focolaio si innesca, la propagazione delle fiamme e la conseguente diffusione dei prodotti della combustione (fumi e calore) investono i volumi dell'edificio; questi fumi a loro volta vengono però contrastati dalle misure protettive installate all'interno della struttura — sia di tipo attivo che passivo — come gli impianti di spegnimento, le compartimentazioni e i sistemi di controllo di fumi e calore. In questo contesto dinamico, l'esposizione delle persone alle conseguenze dell'incendio è strettamente legata all'attività svolta, alla loro posizione all'interno della struttura, alle caratteristiche geometriche del percorso d'esodo e alle proprie condizioni psico-fisiche.

Si può quindi capire che ciascun individuo possiede un proprio valore specifico di ASET; tale complessità viene risolta dal professionista antincendio ricorrendo a considerazioni statistiche, a modelli di calcolo numerici oppure seguendo un calcolo semplificato. In particolare, il Codice permette di quantificare l'andamento temporale delle variabili biologiche e termofisiche appena citate attraverso due differenti approcci:

- Metodo di calcolo avanzato;
- Metodo di calcolo semplificato.

Metodo di calcolo avanzato

Questo metodo è indispensabile nel caso di strutture aventi geometria complessa, in cui gli occupanti si trovano a dover transitare all'interno del fumo, richiedendo la stima analitica — risolta nel tempo tramite modelli fluidodinamici (CFD) — delle concentrazioni di gas tossici, delle temperature e della densità ottica⁵⁴ dell'aria.

In questa situazione, il riferimento internazionale più autorevole è costituito dalla norma ISO 13571, la quale definisce l'ASET globale del compartimento come il valore minimo in ordine cronologico tra gli ASET calcolati secondo i seguenti quattro modelli di riferimento:

1. Modello dei gas tossici

Si fonda sui concetti di dose inalata (*exposure dose*) e di dose frazionaria efficace FED (*fractional effective dose*). La prima rappresenta la quantità di gas tossico presente nell'aria per inalazione e viene calcolata attraverso l'integrale della curva concentrazione-tempo della sostanza lungo l'intervallo di esposizione, invece la FED esprime il rapporto tra questa dose accumulata e la dose critica che determina effetti incapacitanti sul soggetto medio esposto. Al raggiungimento di una FED pari a 1, si assume convenzionalmente l'incapacitazione dell'individuo.

2. Modello dei gas irritanti

È incentrato sul concetto di concentrazione frazionaria efficace FEC (*fractional effective concentration*), definita come il rapporto tra la concentrazione di un gas

⁵⁴ **Densità ottica:** grandezza che serve per misurare il grado di opacità e oscuramento dell'aria invasa dal fumo; nei modelli fluidodinamici è il parametro fisico fondamentale utilizzato per calcolare la riduzione della visibilità per gli occupanti in caso di esodo.

irritante presente nell'aria e la concentrazione limite dello stesso gas che determina effetti incapacitanti sul soggetto medio esposto. Il Codice permette di omettere la verifica di questo modello qualora, negli scenari d'incendio, non siano presenti nel focolare materiali combustibili che possano essere sorgente di gas irritanti (es: sostanze pericolose, abbondanza di cavi elettrici).

3. Modello del calore ed effetti termici

Questo metodo tiene conto sia del calore irraggiato sia di quello convettivo attraverso la seguente equazione basata sulla FED:

$$X_{FED} = \sum_{t_1}^{t_2} \left(\frac{1}{t_{Irad}} + \frac{1}{t_{Iconv}} \right) \cdot \Delta t$$

dove t_{Irad} e t_{Iconv} sono rispettivamente i tempi di incapacitazione per calore radiante e calore convettivo espressi in $[min]$, i quali vengono calcolati — in funzione della condizione di abbigliamento dei soggetti — in conformità della norma ISO 13571, mentre Δt rappresenta l'intervallo di tempo discreto di campionamento espresso in $[min]$. In alternativa, tale criterio può essere verificato se il modello è caratterizzato dall'avere irraggiamento sugli occupanti $\leq 2,5 \frac{kW}{m^2}$ e temperatura ambiente alla quale sono esposti gli occupanti $\leq 60^\circ C$; tali valori corrispondono ad un ASET superiore a 30 minuti per qualsiasi condizione di abbigliamento considerata.

4. Modello dell'oscuramento della visibilità da fumo

Si basa sul concetto del minimo contrasto percettibile, cioè la minima differenza di luminosità visibile tra un oggetto e lo sfondo. I codici di calcolo fluidodinamici implementati con tale modello utilizzano la seguente formula — applicata ad ogni punto del dominio di calcolo — per legare il valore della visibilità L espressa in $[m]$ alla massa volumica dei fumi ρ_{smoke} espressa in $\left[\frac{g}{m^3}\right]$:

$$C = \sigma \cdot \rho_{smoke} \cdot L$$

dove C è una costante adimensionale pari a 3 nel caso di segnaletica di esodo riflettente non illuminata o pari a 8 nel caso di segnaletica retroilluminata, mentre

$\sigma = 8,7 \frac{m^2}{g}$ è il coefficiente massico di estinzione della luce (può anche avere valore differente se giustificato dal progettista).

Si precisa che i valori di FED, $FEC = 1$ sono convenzionalmente associati al manifestarsi di effetti incapacitanti su occupanti di media sensibilità agli effetti dei prodotti dell'incendio. Tuttavia, all'interno di un'attività reale, sono presenti anche categorie più deboli o più sensibili della popolazione (es: anziani, bambini, ...) le quali risultano incapacitate prima del raggiungimento teorico di FED, $FEC = 1$. Per risolvere tale criticità e garantire un idoneo fattore di sicurezza, la norma ISO 13571 impone l'adozione del valore di 0,1 come soglia di prestazione ammissibile per i calcoli di FED e FEC. Così facendo, si restringe la porzione di occupanti potenzialmente esposta al rischio di subire effetti incapacitanti all'1,1%; la norma lascia comunque la facoltà al progettista di selezionare e giustificare analiticamente il valore di soglia più adatto in relazione alla reale tipologia di popolazione coinvolta e alla specifica destinazione d'uso dei locali.

Metodo di calcolo semplificato

La linea guida ISO/TR 16738 prevede la possibilità di utilizzare l'ipotesi semplificativa dell'esposizione zero (*zero exposure*). Invece di procedere alla verifica di tutti i modelli analitici previsti con il modello di calcolo avanzato, il progettista può impiegare le seguenti soglie di prestazione molto conservative:

- Altezza minima dello strato dei fumi dal piano di calpestio pari a $2m$, al di sotto della quale permane uno strato d'aria indisturbata;
- Temperatura media dello strato dei fumi caldi $\leq 200^{\circ}C$.

Questi criteri garantiscono che gli occupanti possano completare l'esodo in condizioni di aria pulita, non inquinata dai prodotti della combustione e con un valore dell'irraggiamento termico proveniente dai fumi $< 2,5 \frac{kW}{m^2}$. In questo modo risultano automaticamente soddisfatti tutti e quattro i modelli precedentemente descritti e l'analisi si semplifica notevolmente; risulta infatti sufficiente valutare l'altezza dello strato dei fumi in fase pre-flashover nell'edificio, calcolandola analiticamente o attraverso modelli numerici a zone o di campo.

Il metodo di calcolo semplificato è applicabile solo se la potenza del focolare, rapportata alla geometria dell'ambiente, è sufficiente a garantire la formazione e la

stabilità dello strato di fumi caldi superiore; tale condizione deve essere preventivamente verificata dal professionista antincendio.

6.3.3 - Calcolo del parametro RSET

Il valore di RSET corrisponde all'intervallo temporale calcolato a partire dall'istante di innesco dell'incendio t_0 fino al momento in cui tutti gli occupanti dell'edificio raggiungono un luogo sicuro. Analogamente all'ASET, anche la determinazione di RSET dipende dalle interazioni dinamiche che si instaurano all'interno del sistema incendio-edificio-occupanti; infatti, i flussi di evacuazione e la fuga delle persone sono fortemente condizionati dalle caratteristiche geometriche della struttura e risultano progressivamente rallentati dagli effetti termo-fisici e ottici dell'incendio.

Il documento internazionale di riferimento per il calcolo analitico di tale parametro è la guida ISO/TR 16738, secondo la quale RSET viene determinato come la sommatoria di più componenti temporali attraverso la seguente formula:

$$RSET = t_{det} + t_a + t_{pre} + t_{tra}$$

All'interno dell'equazione appena citata, sono presenti i seguenti intervalli temporali tutti espressi in [s] o in [min]:

1. **Tempo di rivelazione t_{det} (*detection time*):** è determinato dalla tipologia di impianto di rivelazione installato e dalle caratteristiche cinetiche dello scenario di incendio di progetto. Rappresenta l'intervallo temporale necessario affinché i dispositivi automatici rilevino i prodotti della combustione. La quantificazione del valore di tale parametro viene effettuata per via analitica o mediante specifiche modellazioni numeriche in grado di simulare l'attivazione dei sensori in funzione dello sviluppo del focolaio.
2. **Tempo di allarme generale t_a :** tiene definito come l'intervallo che intercorre tra la rilevazione dell'incendio e la diffusione del segnale di emergenza agli occupanti; t_a può assumere due valori diversi, ovvero:
 - Pari a zero, nel caso in cui il sistema di rivelazione comandi l'attivazione automatica dell'allarme generale dell'edificio;

- Pari al ritardo temporale — stimato e giustificato dal professionista antincendio — nel caso in cui la segnalazione allerti una centrale di gestione e controllo dell'emergenza per la verifica dell'evento, prima di procedere con l'attivazione manuale delle procedure antincendio;
3. **Tempo di pre-movimento t_{pre} (*pre-travel activity time*):** indica l'intervallo temporale necessario agli occupanti per svolgere la serie di azioni che precedono il movimento vero e proprio verso un luogo sicuro; evidenze pratiche dimostrano che questa fase spesso occupa la quota maggioritaria del tempo totale di esodo. Il tempo t_{pre} viene suddiviso in due sotto-fasi sequenziali:
- **Tempo di riconoscimento (*recognition time*):** periodo in cui gli occupanti tendono a proseguire le attività ordinarie che stavano svolgendo prima della diffusione dell'allarme, fino all'istante in cui percepiscono la reale esigenza di rispondere al segnale di emergenza;
 - **Tempo di risposta (*response time*):** fase in cui gli occupanti interrompono le attività svolte per dedicarsi esclusivamente ad attività legate allo sviluppo dell'emergenza, quali: raccolta di informazioni sull'evento, arresto e messa in sicurezza delle apparecchiature, raggruppamento del proprio gruppo lavorativo o familiare, lotta all'incendio, ricerca e determinazione della via d'esodo appropriata (*wayfinding*) ed altre attività a volte anche errate ed inappropriate.

In relazione allo specifico scenario comportamentale di progetto, la durata di tali dinamiche può estendersi anche per alcune decine di minuti. Per la definizione dei valori di questi intervalli, il professionista antincendio può fare riferimento ai valori standardizzati indicati nella linea guida ISO/TR 16738; resta comunque valida la possibilità di adottare valori differenti, i quali devono essere giustificati o supportati dalle risultanze delle prove di evacuazione periodicamente registrate all'interno del registro dei controlli antincendio dell'attività.

4. **Tempo di movimento t_{tra} (*travel time*):** è l'intervallo temporale impiegato dagli occupanti per raggiungere un luogo sicuro, calcolato a partire dal termine delle attività di pre-movimento. Sotto il profilo analitico, la determinazione del t_{tra} è legata a tre variabili principali:

- **Distanza di esodo:** è la lunghezza reale del percorso che separa gli occupanti dalle uscite del piano o d'emergenza;
- **Velocità di esodo:** è un parametro che dipende dalla tipologia degli occupanti, dalle loro interazioni con l'ambiente circostante e dagli effetti dell'incendio;
- **Portata delle vie d'esodo:** è la capacità di deflusso del sistema di vie di fuga, influenzata da dimensioni, restringimenti, dislivelli (come le rampe di scale) ed eventuali ostacoli;

Nelle condizioni reali, soprattutto all'interno di edifici densamente affollati, la cinematica dell'esodo può generare lunghe file nei restringimenti, oltre al fatto che alcuni percorsi possono anche diventare impercorribili o bloccati; nel calcolo del t_{tra} si deve necessariamente tenere conto di tali dinamiche attraverso l'uso di specifici modelli di calcolo, classificati in due macro-famiglie: modelli idraulici e modelli *agent-based*. I primi predicono in maniera abbastanza accurata alcuni aspetti del movimento degli occupanti visti come un unico blocco, ma non includono importanti fattori del comportamento umano (es: familiarità con l'edificio, interazioni persona-persona, l'effetto del fumo sul movimento, ...); i secondi, invece, non assimilano la folla a un fluido continuo, ma modellano ogni singolo occupante come un "agente" autonomo ed eterogeneo, dotato di specifiche caratteristiche fisiche (es: ingombro geometrico, velocità di camminamento) e cognitive (es: familiarità con i luoghi, comportamento in emergenza). La simulazione traccia le mutue interazioni tra i singoli agenti e l'ambiente circostante colpito dall'incendio, consentendo di prevedere in modo realistico fenomeni complessi come la formazione di code locali, i tempi di accodamento alle uscite e le deviazioni dei flussi dovute alla ridotta visibilità per la presenza di fumo.

Ai fini di una corretta quantificazione dell'RSET, il professionista antincendio ha l'obbligo di considerare lo scenario comportamentale di progetto più realistico e cautelativo per il caso specifico. Le attività di pre-movimento e le relative velocità di esodo dipendono principalmente dalla tipologia di popolazione considerata e dalle modalità d'impiego dell'edificio; i parametri di calcolo variano in modo significativo se gli occupanti sono svegli e caratterizzati da un'ottima familiarità con i luoghi (es: scuola

o azienda) oppure se si trovano in stato di sonno e non conoscono la disposizione spaziale della struttura (es: albergo o ospedale). Di conseguenza, emerge come ogni singolo occupante possieda un proprio valore di RSET, che deve essere valutato dal progettista attraverso considerazioni statistiche o modelli di calcolo numerici.

6.3.4 - Soglie di prestazione per la salvaguardia della vita

Le soglie di prestazione per la salvaguardia della vita definiscono i limiti quantitativi oltre i quali si manifesta l'incapacitazione degli occupanti e dei soccorritori qualora si trovino direttamente sottoposti agli effetti termo-fisici, tossici o ottici generati dall'incendio. Sotto il profilo progettuale, il professionista antincendio ha l'onere di selezionare i parametri di soglia più idonei per la specifica attività in esame. Tale scelta deve essere effettuata in funzione degli scenari di incendio di progetto determinati e, in particolar modo, facendo anche riferimento alle caratteristiche degli occupanti.

Il rispetto di tali soglie deve essere verificato secondo i seguenti criteri di localizzazione spaziale e funzionale:

- **Per gli occupanti:** la verifica deve essere effettuata in tutte le zone e i compartimenti dell'attività in cui si riscontri la contemporanea presenza degli occupanti — in condizioni stanziali o in fase di movimento lungo le vie d'esodo — e degli effetti diretti o indiretti dell'incendio;
- **Per i soccorritori:** l'obbligo di verifica è previsto solamente nel caso in cui il personale di soccorso riveste un ruolo operativo definito e strutturato all'interno della pianificazione d'emergenza dell'attività. In tale eventualità, il rispetto dei limiti deve essere accertato in tutte le zone dell'attività dove esiste contemporanea presenza di soccorritori — stanziali o in movimento — e degli effetti dell'incendio.

Per una completa trattazione ingegneristica, vengono riportate la *Tabella 33* e la *Tabella 34*, prese dal Codice, che indicano le specifiche soglie di prestazione di riferimento per la salvaguardia della vita di occupanti e soccorritori, rispettivamente declinate in funzione dei metodi di calcolo avanzato e semplificato precedentemente descritti.

Tabella 33: Esempi di soglie di prestazione utilizzabili con il metodo di calcolo avanzato

Modello	Prestazione	Soglia di prestazione	Riferimento
Oscuramento della visibilità da fumo	Visibilità minima di pannelli riflettenti, non retroilluminati, valutata ad altezza 1,80 m dal piano di calpestio	Occupanti: 10 m Occupanti in locali di superficie lorda < 100m ² : 5 m	ISO 13571:2012
		Soccorritori: 5 m Soccorritori in locali di superficie lorda < 100m ² : 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% la porzione di occupanti incapaci al raggiungimento della soglia
		Soccorritori: nessuna valutazione	-
Calore	Temperatura massima di esposizione	Occupanti: 60°C	ISO 13571:2012
		Soccorritori: 80°C	[1]
Calore	Irraggiamento termico massimo da tutte le sorgenti (incendio, effluenti dell'incendio, struttura) di esposizione degli occupanti	Occupanti: 2,5 kW/m ²	ISO 13571:2012, per esposizioni inferiori a 30 minuti
		Soccorritori: 3 kW/m ²	[1]

[1] Ai fini di questa tabella, per soccorritori si intendono i componenti delle squadre aziendali opportunamente protetti ed addestrati alla lotta antincendio, all'uso dei dispositivi di protezione delle vie aeree, ad operare in condizioni di scarsa visibilità. Ulteriori indicazioni possono essere desunte ad esempio da documenti dell'Australian Fire Authorities Council (AFAC) per hazardous conditions.

Tabella 34: Esempi di soglie di prestazione utilizzabili con il metodo di calcolo semplificato

Prestazione	Soglia di prestazione	Riferimento
Altezza minima dei fumi stratificati dal piano di calpestio al di sotto del quale permanga lo strato d'aria indisturbata	Occupanti: 2 m	Ridotto da ISO/TR 16738:2009, section 11.2
	Soccorritori: 1,5 m	[1]
Temperatura media dello strato di fumi caldi	Occupanti: 200°C	ISO/TR 16738:2009, section 11.2
	Soccorritori: 250°C	[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.

7 - Integrazione del sistema adattivo DPAS nell'autorimessa di Piazza Bengasi

Il presente capitolo espone l'applicazione e l'integrazione impiantistica del sistema *Dynamic Path Allocation System* (DPAS) all'interno del caso studio del parcheggio pubblico interrato di Piazza Bengasi a Torino. Attraverso l'inquadrimento geometrico e architettonico della struttura ipogea e l'analisi dei limiti intrinseci ai presidi rigidi tradizionali, vengono analizzati i fattori ambientali e normativi che impongono l'adozione di un sistema d'esodo di tipo adattivo.

Per facilitare la lettura del capitolo, si sintetizzano nella *Tabella 35* le misure antincendio di prevenzione, protezione e gestione adottate per l'intera autorimessa, in relazione al profilo di rischio attribuito.

Tabella 35: Sintesi delle misure antincendio e dei relativi livelli di prestazione attribuiti al caso studio di Piazza Bengasi

Misura antincendio	Rif. C.P.I.	Rif. RTV	Autorimessa Rvita B1		
			Livello Prestazione	Livello attribuito	
				C	A
Reazione al Fuoco	Cap. S1	V.6.5.1	Vie d'esodo	III	X
			Altri locali	II	X
Resistenza al Fuoco	Cap. S2	V.6.5.2		III	X
Compartimentazione	Cap. S3	V.6.5.3		II	X
Esodo	Cap. S4	--		I	X
Gestione Sicurezza Antincendio	Cap. S5	V.6.5.5		III	X
Controllo dell'incendio	Cap. S6	V.6.5.6		V	X
Rilevazione ed allarme	Cap. S7	---		IV	X
Controllo fumi e calore	Cap. S8	V.6.5.7		III	X
Operatività antincendio	Cap. S9	---		IV	X
Sicurezza Impianti Tecnologici	Cap. S10	V.6.5.8		I	X
Aree a rischio specifico	Cap. V1	---		--	
Aree a rischio atm. esplosive	Cap. V2(*)			--	
Vani degli ascensori	Cap. V3			--	

7.1 - Inquadrimento del caso studio reale di Piazza Bengasi

Il caso studio reale preso in esame per l'applicazione dei concetti trattati in questa tesi è il nuovo parcheggio pubblico interrato situato in Piazza Bengasi a Torino, posizionato in una zona strategica di interscambio modale al confine con il Comune di Moncalieri. L'opera è stata commissionata dalla Città di Torino (Divisione Infrastrutture Mobilità -

Servizio Suolo Parcheggio) ed è inserita nel quadro delle infrastrutture collegate al prolungamento della Linea 1 della metropolitana.

Sotto il profilo amministrativo ed economico, si tratta di un'opera pubblica caratterizzata dall'avere una base d'appalto pari a circa 32.000.000€ complessivi, ripartiti tra opere civili strutturali e impianti tecnologici speciali. La gestione operativa, la manutenzione e lo sfruttamento economico della struttura a regime sono affidati a GTT S.p.A. (Gruppo Torinese Trasporti); l'infrastruttura è presidiata da un operatore esclusivamente in specifiche fasce orarie diurne (lunedì-sabato, 7:30 - 19:30), mentre nelle restanti ore l'attività è monitorata in remoto dalla 'Centrale Operativa Parcheggio GTT'.

Sotto il profilo architettonico, l'infrastruttura ha sviluppo interamente ipogeo ed è delimitata da paratie strutturali in calcestruzzo armato; in particolare, questa si sviluppa su due livelli:

- **Piano Primo Interrato:** avente quota media pari a $-4m$ rispetto al livello 0 di riferimento, una superficie di $9470m^2$ e presenta quattro rampe⁵⁵ che lo collegano al Piano Terra; questo è stato suddiviso in tre settori (denominati -1A, -1B, -1C);

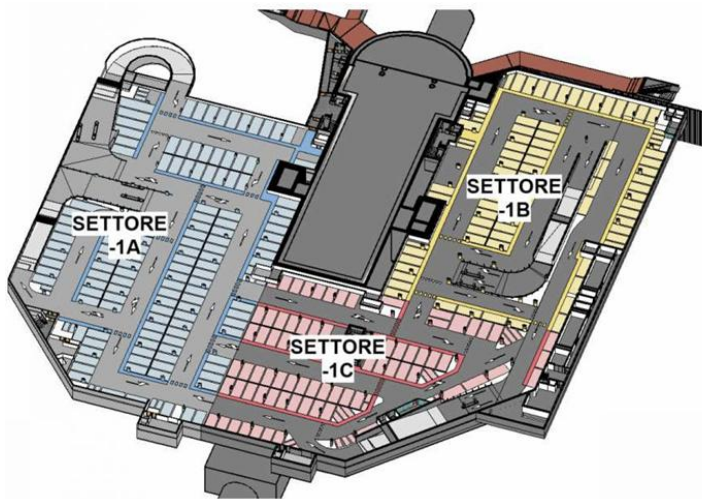


Figura 25: Planimetria e settori del Piano Primo Interrato (Livello -1)

⁵⁵ Si precisa che, sotto il profilo strutturale, l'infrastruttura presenta solo due rampe fisiche per ciascun livello; tuttavia, ai fini della compartimentazione antincendio, ciascuna rampa viene scomposta in due corsie di flusso indipendenti (rispettivamente per la salita e la discesa), per un totale analitico di quattro elementi rampa per piano.

- **Piano Secondo Interrato:** avente quota media pari a $-7m$ rispetto al livello 0 di riferimento, una superficie di $7990m^2$ e presenta quattro rampe che lo collegano al Piano Primo Interrato; anche questo è stato suddiviso in tre settori (denominati -2A, -2B, -2C), ma in più su questo piano vi sono due varchi che collegano il parcheggio con la stazione “Metropolitana Bengasi”.

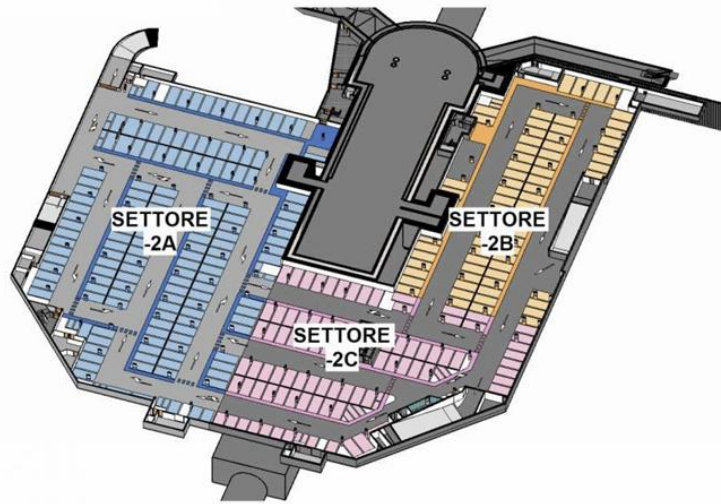


Figura 26: Planimetria e settori del Piano secondo Interrato (Livello -2)

Si conclude che l'autorimessa ha una superficie complessiva superiore a $10.000 m^2$ e, per quanto stabilito dalla regola tecnica verticale RTV V.6, viene classificata come tipologia AD. Lo spostamento dei veicoli tra i piani è assicurato da un sistema di rampe carrabili elicoidali, mentre i collegamenti verticali dedicati esclusivamente alle persone sono costituiti da quattro corpi scala indipendenti e isolati dal volume di parcheggio, denominati convenzionalmente Scala A, B, C e D.

Sotto il profilo organizzativo, il layout dell'autorimessa è stato ottimizzato per massimizzare la capacità di sosta. È necessario evidenziare come la capienza complessiva di autoveicoli non coincida numericamente con l'affollamento massimo, in quanto il calcolo dei flussi d'esodo prevede coefficienti di contemporaneità basati sulla potenziale presenza di più persone per singolo mezzo. Per convenzione, per calcolare il massimo affollamento possibile, si considera un numero di persone per autoveicolo pari a due per ogni posto auto e pari a uno per ogni posto moto; di conseguenza, si determina una popolazione massima simultanea di 1277 utenti teorici, in quanto i posti fisici sono così suddivisi tra i due livelli:

- **Posti auto standard:** la struttura ospita 605 stalli (290 al livello -1 e 315 al livello -2) di sosta ordinari aventi dimensioni $2,50 \times 5,00m$ e corsie di manovra con larghezza minima di $6m$ per garantire il raggio di volta dei veicoli;
- **Stalli riservati e mobilità ridotta:** su ciascun piano sono distribuiti in modo simmetrico 8 posti auto riservati alle persone con disabilità (per un totale di 16 stalli complessivi nell'opera), posizionati a ridosso dei filtri d'accesso dei quattro corpi scala. Ad essi sono associati gli spazi calmi per l'attesa assistita, dimensionati per ospitare contemporaneamente un massimo di sette occupanti a mobilità ridotta per ciascun livello interrato;
- **Stalli per veicoli a due ruote:** sono previsti 67 posti dedicati esclusivamente ai motocicli (38 al livello -1 e 29 al livello -2), concentrati in prossimità delle zone d'angolo e delle rampe in modo da ottimizzare gli spazi geometrici residui della struttura;
- **Infrastruttura di ricarica:** il layout include 15 stalli dedicati alla sosta e alla ricarica di vetture elettriche (10 per auto e 5 per motocicli) collocati esclusivamente al livello -1, dotati di colonnine di alimentazione collegate direttamente alle relative cabine elettriche di trasformazione e quadri di distribuzione dedicati situati nei locali tecnici isolati.

7.2.1 - Evoluzione dei sistemi SWGS: architettura adattiva DPAS

La progettazione dei sistemi di esodo all'interno delle attività complesse si fonda sui requisiti grafici e di installazione definiti dalla norma UNI EN ISO 16069:2019, la quale disciplina i *Safety Way Guidance Systems* (SWGS). Tali sistemi di segnalazione e orientamento visivo sono volti a garantire l'evacuazione guidata e sicura degli occupanti verso i luoghi sicuri, anche in condizioni di visibilità degradata. All'interno di questa macro-categoria si collocano, con complessità e reattività incrementali, sia i tradizionali presidi statici e passivi sia i più moderni dispositivi di protezione attiva.

Nell'ambito della *Fire Safety Engineering* e della protezione attiva finalizzata alla salvaguardia della vita umana, assumono notevole rilevanza i sistemi di gestione adattiva delle vie di fuga denominati *Dynamic Path Allocation System*, i quali vengono indicati con la sigla DPAS. Questa specifica tipologia di architettura SWGS supera la rigidità dei

presidi tradizionali statici, in quanto agisce direttamente sulla segnaletica di sicurezza permettendo di instradare i flussi degli occupanti in maniera dinamica. Ciò garantisce che i percorsi di fuga vengano ricalibrati in tempo reale in funzione dei parametri ambientali segnalati dai vari rivelatori installati nella struttura, ottimizzando i tempi di esodo ed evitando le zone rese inagibili dai prodotti della combustione.

Alla base dello sviluppo del DPAS vi è l'esigenza di superare l'intrinseca rigidità della segnaletica di emergenza di tipo statico-passiva che caratterizza gran parte dei sistemi di esodo interfacciati con gli impianti IRAI convenzionali. All'interno di volumetrie complesse, ipogee o caratterizzate da disposizioni geometriche articolate, un cartello di segnalazione tradizionale presuppone uno scenario emergenziale fisso e immutabile. Qualora un corridoio, un filtro, un corpo scala o una qualsiasi parte di una struttura vengano compromessi dalla stratificazione dei fumi o dall'innalzamento delle temperature, la segnaletica statica continua a indirizzare i flussi verso quella specifica direzione. In tali circostanze, tale presidio passivo perde la propria funzione di salvaguardia e protezione delle persone e si tramuta in un grave fattore di rischio, in quanto induce la popolazione a confluire verso aree già compromesse dall'incendio.

Al fine di inquadrare correttamente la tecnologia del sistema DPAS dal punto di vista della FSE e delle prestazioni impiantistiche, è necessario fare riferimento alla classificazione tecnica internazionale stabilita dalle linee guida ZVEI 33013 (*Explanatory Leaflet - Adaptive Escape Routing*), emanate a supporto della norma UNI ISO 16069:2019. Sulla base di queste fonti, i dispositivi di evacuazione vengono classificati secondo quattro macro-categorie di sistemi a complessità incrementale, ovvero:

1. **Sistema statico o passivo (*passive o static*):** rappresenta l'approccio tradizionale della segnaletica di emergenza. I dispositivi di protezione — come i cartelli classici — presentano un pittogramma fisso e geometricamente immutabile; tale livello, pertanto, risulta privo di qualsiasi capacità di interazione rispetto alle modifiche dinamiche e ai pericoli dello scenario reale.
2. **Sistema attivo (*active*):** costituisce il primo livello di evoluzione elettronicamente assistita della segnaletica di sicurezza. Durante il normale funzionamento, i componenti rimangono in stato di riposo e passano allo stato operativo esclusivamente su input fornito dall'impianto IRAI; ciò si verifica nell'istante in cui viene rilevata l'emergenza, attuando una commutazione di tipo acceso/spento

(ON/OFF). Con la propagazione dell'allarme, il sistema comanda l'accensione degli apparecchi di retroilluminazione dei cartelli, l'eventuale attivazione delle guide luminose a pavimento e l'avvio dei messaggi preregistrati del sistema di evacuazione vocale (EVAC). Tuttavia, il limite più severo di questa tecnologia risiede nel fatto che l'intero pacchetto di attivazioni fa riferimento unicamente a uno scenario d'incendio predefinito in fase di progettazione; di conseguenza, il sistema è incapace di considerare l'evoluzione reale e dinamica del pericolo. Tale presidio presenta quindi il rischio di non preservare l'incolumità degli occupanti nel medio termine, in quanto tende a indirizzare i flussi di persone proprio verso un compartimento che, sebbene inizialmente sicuro, può essere successivamente compromesso dai prodotti della combustione.

3. **Sistema dinamico (*dynamic*):** rappresenta un significativo passo avanti rispetto ai sistemi attivi; in caso di emergenza, infatti, i dispositivi non solo si attivano elettricamente, ma sono in grado di indirizzare i flussi della popolazione verso differenti direzioni di fuga, modificando ad esempio la freccia direzionale del pittogramma. Il limite strutturale di questa tecnologia risiede nella sua staticità logica temporale (definita *one-off*): la via di fuga ottimale viene calcolata e impostata una sola volta, facendo riferimento alle condizioni misurate nell'istante di segnalazione d'allarme, rimanendo poi bloccata in quella specifica configurazione fino al termine dell'esodo, senza alcuna possibilità di rivalutare e aggiornare il percorso.
4. **Sistema adattivo (*adaptive*):** costituisce il massimo livello di sviluppo ingegneristico della protezione attiva, all'interno del quale si colloca il sistema DPAS. I dispositivi adattivi si attivano in caso di emergenza e indicano vie di esodo variabili in funzione delle grandezze e dei parametri ambientali rilevati e comunicati in tempo reale dai sensori dell'impianto IRAI. A differenza dei sistemi dinamici descritti al punto precedente, essi possiedono la capacità fondamentale di modificare e riprogrammare il pittogramma in modo continuo e dinamico durante l'intero sviluppo dell'incendio.

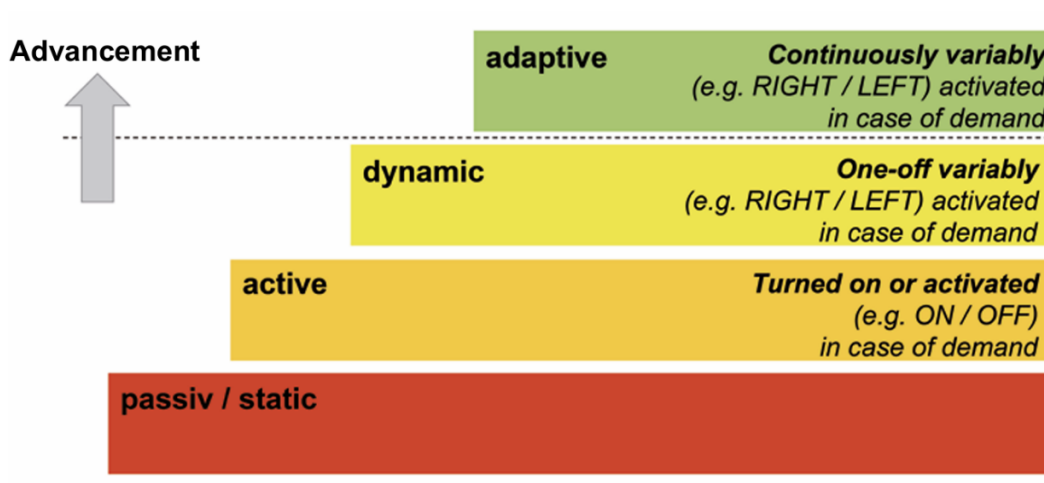


Figura 27: Livelli incrementali di complessità dei sistemi di orientamento all'esodo secondo la linea guida internazionale ZVEI 33013

Come evidenziato dalle specifiche tecniche internazionali, l'adozione del sistema adattivo DPAS introduce un requisito operativo fondamentale: il monitoraggio e la sorveglianza costante delle vie di esodo in relazione alla loro effettiva accessibilità. Attraverso questo flusso continuo di dati (rilevazione dei parametri ambientali da parte dei sensori interfacciata con gli impianti IRAI, elaborazione logica della centrale dell'impianto e attuazione sui pannelli LED), il sistema si configura come l'unica tecnologia in grado di governare attivamente l'esodo all'interno di scenari evolutivi complessi, garantendo il mantenimento dei margini di sicurezza attraverso la continua deviazione dei flussi dai compartimenti progressivamente compromessi dall'azione del fuoco.

Al fine di evidenziare l'efficacia e le differenze operative dei quattro sistemi SWGS appena descritti, risulta essenziale analizzarne l'applicazione pratica all'interno di un modello geometrico standardizzato. Nello specifico, le linee guida internazionali ZVEI 33013 propongono un caso studio caratterizzato da una configurazione planimetrica articolata e suddivisa in quattro compartimenti indipendenti; all'interno di tale layout viene studiata l'evoluzione di uno scenario emergenziale dinamico dovuto alla propagazione dei fumi e dei prodotti della combustione. L'assetto planimetrico della struttura dell'esempio normativo viene illustrato nella *Figura 28*.

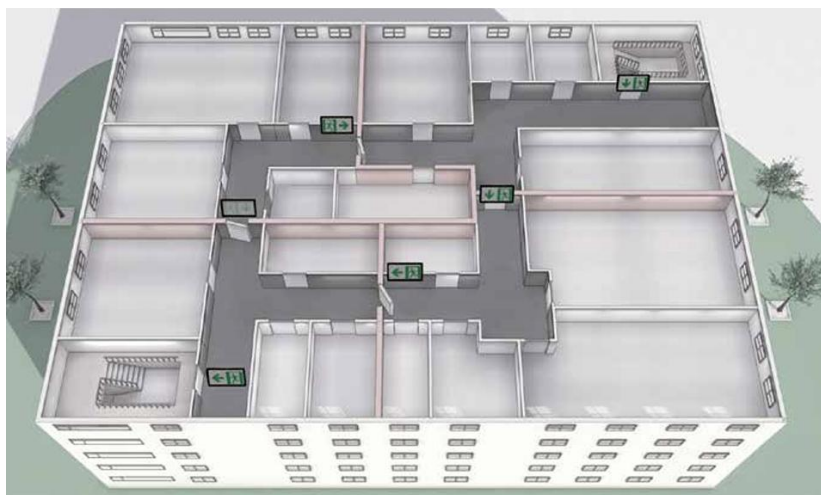


Figura 28: Suddivisione nei quattro compartimenti e relativi percorsi di esodo ordinari del caso studio riportato nella linea guida ZVEI 33013

Nei sistemi tradizionali (ovvero statici e attivi), la risposta dei dispositivi di segnalazione risulta completamente indipendente dalle reali condizioni ambientali dei compartimenti, determinando gravi criticità per la salvaguardia della vita umana; nello specifico:

1. **Sistema statico o passivo:** nel caso in cui uno scenario d'incendio provochi l'inagibilità del compartimento superiore destro, questo presidio continua a indirizzare i flussi verso la via d'esodo geometricamente più vicina, sebbene quest'ultima risulti fisicamente compromessa. In questa circostanza, l'assenza totale di reattività trasforma il presidio di sicurezza in un elemento di rischio indotto, instradando gli occupanti direttamente verso l'area satura dai prodotti della combustione.

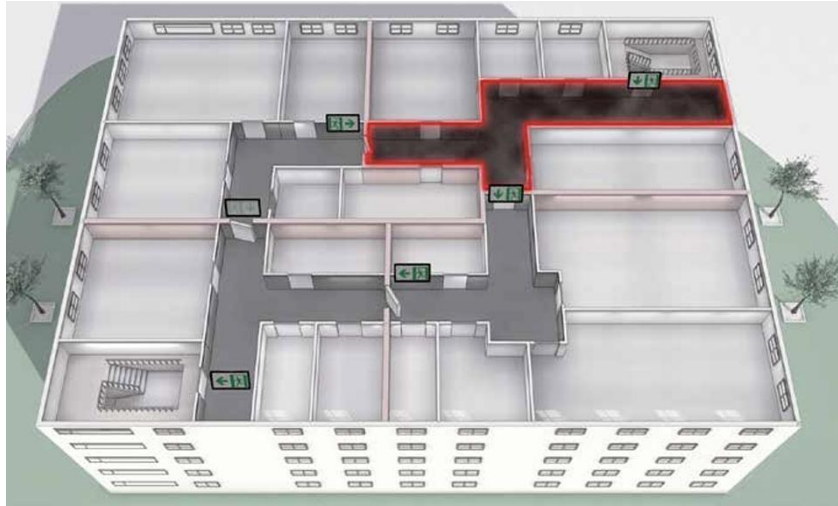


Figura 29: Comportamento del sistema passivo in presenza di prodotti della combustione nel compartimento superiore destro

2. **Sistema attivo:** come illustrato nella *Figura 30*, il sistema attivo garantisce un funzionamento corretto solo se l'emergenza reale coincide esattamente con lo scenario statico ipotizzato in fase di progetto, in questo caso un incendio nel compartimento superiore destro. Nell'ipotesi in cui l'incendio dovesse espandersi — invadendo i compartimenti adiacenti — il sistema non è in grado di modificare la configurazione delle vie d'esodo. Esso continua a mantenere attiva la segnaletica secondo i parametri rigidi del dimensionamento iniziale, guidando gli occupanti verso i percorsi ormai compromessi dai fumi.

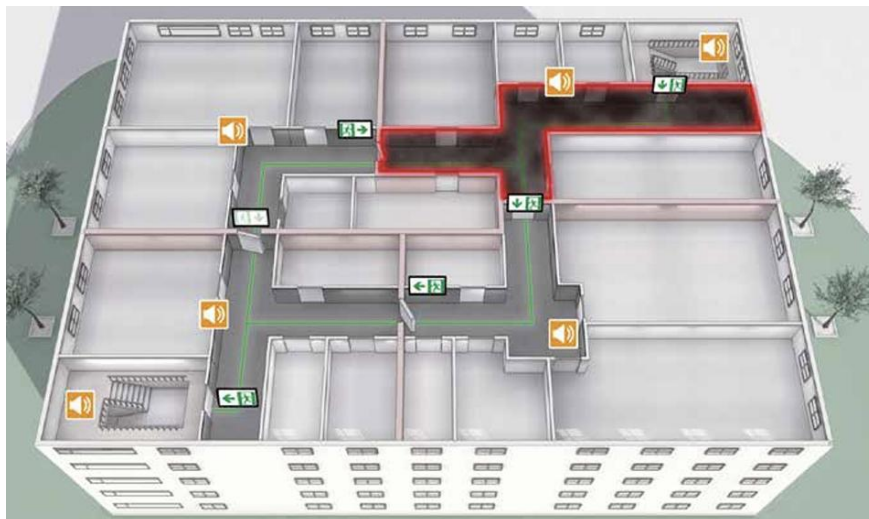


Figura 30: Comportamento del sistema attivo in presenza di prodotti della combustione nel compartimento superiore destro

Un parziale superamento della rigidità direzionale dei sistemi appena descritti si ottiene con l'installazione dei sistemi dinamici, infatti:

3. **Sistema dinamico:** nell'istante in cui viene generato il segnale di allarme a causa di un incendio nel compartimento superiore destro, il sistema modifica i pittogrammi aggirando la via compromessa tramite segnaletica opportuna — ad esempio con una “X” di divieto — e direzionando gli occupanti verso le restanti vie d'uscita sicure. Il limite intrinseco di questa tecnologia risiede nella natura *one-off* dell'attivazione: l'algoritmo elabora lo scenario calcolando i percorsi di fuga unicamente sulla base delle condizioni iniziali misurate nell'istante di invio dell'allarme. Di conseguenza, la configurazione della segnaletica rimane invariata da quel momento, risultando incapace di adattarsi alle successive evoluzioni (nel caso in cui il fronte di fiamma e i fumi dovessero propagarsi ulteriormente).

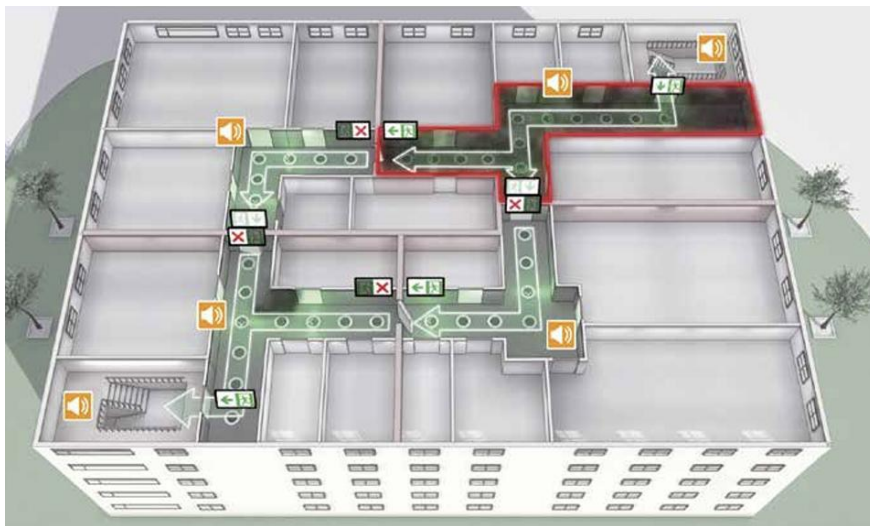


Figura 31: Comportamento del sistema dinamico in presenza di prodotti della combustione nel compartimento superiore destro

Il massimo livello prestazionale, nel quale si colloca l'architettura del sistema DPAS, viene descritto attraverso l'analisi temporale degli istanti t_1 e t_2 , evidenziando il concetto di flessibilità e monitoraggio continuo.

4. **Sistema adattivo:** nell'istante iniziale dell'emergenza t_1 (Figura 32), il sistema rileva l'inagibilità del primo compartimento, cioè quello superiore sinistro, attivando i dispositivi di segnalazione ottica e acustica per impedire l'accesso all'area compromessa. Nel caso in cui, all'istante di tempo t_2 , lo scenario subisca una modifica spaziale — dovuta alla propagazione dei fumi o delle fiamme —

verso un secondo compartimento dell'edificio (*Figura 33*), il sistema DPAS rielabora istantaneamente il percorso d'esodo. Con tale tecnologia, sia i segnali ottici sia le indicazioni acustiche direzionali della messaggistica EVAC vengono ricalibrati in tempo reale, evitando i percorsi precedentemente considerati sicuri nel caso in cui questi fossero diventati inagibili, modificando la disposizione della segnaletica di blocco e ricalcolando automaticamente un percorso alternativo verso i luoghi sicuri.

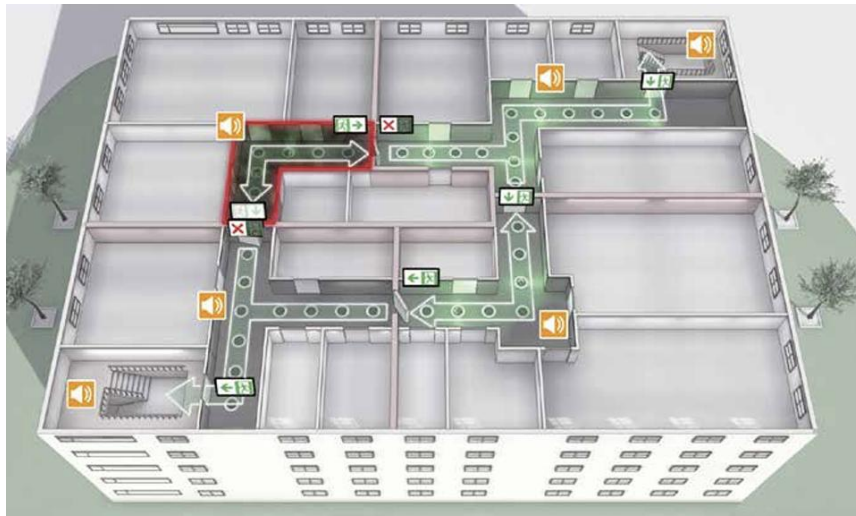


Figura 32: Comportamento del sistema adattivo in presenza di prodotti della combustione nel compartimento superiore sinistro — istante t_1

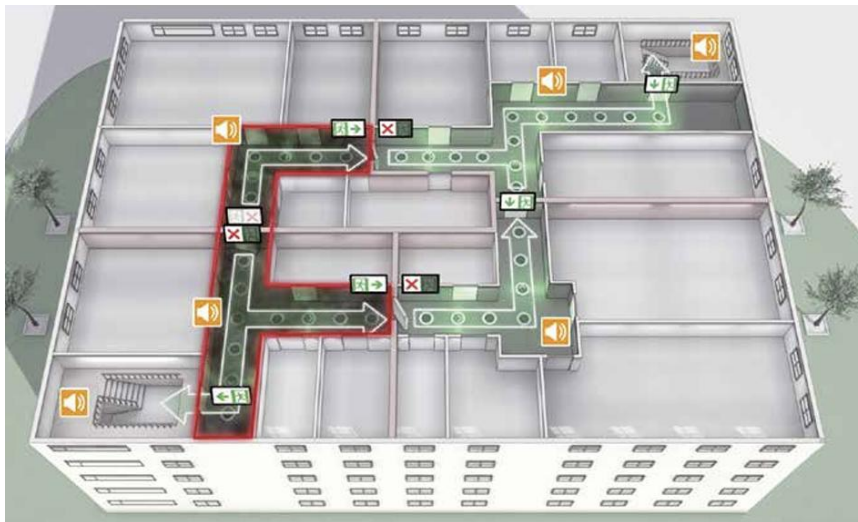


Figura 33: Comportamento del sistema adattivo in presenza di prodotti della combustione nel compartimento superiore sinistro ed inferiore sinistro — istante t_2

7.2.2 - Componenti del sistema DPAS

Sotto il profilo impiantistico, il sistema DPAS non opera in modo isolato, ma si configura come un'estensione funzionale dell'impianto IRAI. Esso agisce in sincronia con gli altri presidi di protezione attiva presenti nell'infrastruttura, al fine di coordinare l'evacuazione degli occupanti in base allo specifico scenario di pericolo rilevato. Gli elementi principali che costituiscono tale sistema sono:

1. **Unità centrale a logica programmabile:** rappresenta l'hardware di controllo centrale del DPAS per la gestione in tempo reale delle vie d'esodo. Sotto il profilo costruttivo e tecnologico, questa unità può essere realizzata secondo due differenti configurazioni d'impianto:
 - **Programmable Logic Controller (PLC) dedicato:** si utilizza un controllore hardware per l'automazione industriale, conforme alla norma CEI EN 61131, che viene programmato da zero. In questo caso il progettista deve sviluppare un software su misura per decidere come il sistema deve interfacciarsi con l'IRAI e l'algoritmo di commutazione dei singoli cartelli LED in funzione del compartimento interessato dall'incendio;
 - **centrale di gestione a scenari SWGS dedicata:** si tratta di una centralina creata in fabbrica appositamente per gestire l'esodo. Questa soluzione non richiede la scrittura di un codice, in quanto il dispositivo ha già un suo sistema operativo interno. Il compito del progettista si limita quindi alla configurazione della matrice degli scenari, collegando in modo grafico — tramite il software del produttore — i segnali di allarme in input dall'IRAI ai rispettivi cartelli LED che si devono attivare;

A prescindere dalla tecnologia scelta, l'unità centrale gestisce l'intera rete periferica tramite un cablaggio ad anello chiuso (*closed loop*) che parte e ritorna in centrale. Questa architettura consente il monitoraggio elettrico continuo e la supervisione della linea: qualora l'azione del fuoco dovesse tranciare il cavo o causare un cortocircuito in un punto dell'anello, la centrale rileva istantaneamente l'interruzione e provvede a inviare i comandi di commutazione su entrambi i rami dell'anello. In questo modo viene garantita una tolleranza ai guasti e la continuità operativa dei cartelli LED.

Nel caso specifico di Piazza Bengasi è stato implementato un PLC dedicato, il quale comunica direttamente con la centrale dell'impianto IRAI di Livello III. In caso di emergenza, il PLC riceve l'input di allarme e, decodificando l'esatta posizione del focolaio all'interno dello specifico compartimento o piano della struttura, esegue istantaneamente la strategia d'esodo programmata in fase di installazione, instradando gli occupanti verso le vie di fuga sicure e non compromesse

2. **Sistemi di interfaccia:** rappresentano gli elementi elettronici che collegano fisicamente l'unità centrale del DPAS agli altri presidi di protezione attiva e di sicurezza dell'opera. Al fine di garantire una gestione coordinata dell'emergenza, il PLC si interfaccia con:

- **Sistemi di evacuazione vocale (EVAC):** per sincronizzare i messaggi acustici di evacuazione con le indicazioni visive direzionali fornite dai cartelli LED;
- **Sistemi di controllo del fumo e del calore (SEFFC):** per ricevere lo stato di funzionamento degli estrattori di fumo; sapendo quali serrande si sono aperte per evacuare i gas tossici, la centrale DPAS individua le aree contaminate e spegne i cartelli LED che portano verso quel pericolo;
- **Dispositivi di sezionamento elettrico d'emergenza:** per monitorare la messa in sicurezza elettrica dei settori e garantire che l'alimentazione delle linee preferenziali del DPAS rimanga attiva;
- **Dispositivi di sgancio per gli elettromagneti delle porte tagliafuoco:** per verificare l'effettiva chiusura dei varchi tra compartimenti sani e compromessi;
- **Impianto di spegnimento automatico a sprinkler (SPK):** per rilevare l'apertura degli ugelli sul soffitto; il passaggio dell'acqua nei tubi attiva un sensore meccanico dotato di contatto elettrico (chiamato flussostato) che segnala alla centrale l'esatta stanza in cui è scoppiato il fuoco, permettendo al DPAS di cambiare la segnaletica di conseguenza;
- **Terminali visivi dinamici:** costituiscono i terminali visivi distribuiti all'interno della struttura, installati in corrispondenza delle vie d'esodo e

delle uscite di sicurezza che immettono verso i compartimenti antincendio isolati o i filtri a prova di fumo. Ai sensi della norma UNI ISO 16069, ciascun cartello si configura come un nodo intelligente della rete, dotato di un ricetrasmittitore locale che garantisce uno scambio bidirezionale continuo di dati e auto-diagnosi con l'unità centrale. La matrice luminosa a LED è progettata per modulare luminanza e contrasto in modo da garantire l'efficacia visiva anche in presenza di parziale stratificazione dei fumi; il dispositivo è inoltre in grado di variare dinamicamente la propria simbologia, passando da freccia direzionale a simbolo di sbarramento, ovvero una "X" rossa, per impedire l'accesso ai rami di esodo resi inagibili dall'incendio.

- **Sistemi di interconnessione e cabling:** in generale, l'infrastruttura di collegamento di un qualsiasi sistema DPAS deve garantire due requisiti fondamentali per la sicurezza della vita umana, ovvero l'integrità del segnale (garantisce che i comandi di commutazione inviati dalla centrale del DPAS arrivino ai cartelli LED senza essere alterati o distorti) e la resistenza al fuoco: garantisce la capacità fisica dei cavi di sopravvivere all'azione diretta delle fiamme e del calore, assicurando il funzionamento dell'intero sistema per tutta la durata dell'esodo degli occupanti.

Per soddisfare il primo requisito, il mezzo fisico utilizzato nei sistemi DPAS è la linea bus schermata a coppie intrecciate (*twisted pair*). Questa tipologia di cavo rappresenta la soluzione standard in quanto l'intreccio dei conduttori annulla i disturbi elettromagnetici di fondo, mentre la schermatura metallica esterna blocca le interferenze, rendendo affidabile la comunicazione tra la Logica Master e le periferiche LED. Per soddisfare il secondo requisito, l'intera rete di distribuzione deve prevedere l'impiego esclusivo di cavi resistenti al fuoco rispondenti alla normativa CEI 20-105 (sia per le linee dati che per quelle di alimentazione), in grado di mantenere attiva la trasmissione dati anche in presenza di elevate sollecitazioni termiche.

3. **Sistema di alimentazione sicura per i servizi d'emergenza:** è costituito da un sistema di soccorritori centralizzato (*Central Power Supply System*, spesso indicato con la sigla CPSS), dimensionato in conformità alla norma UNI EN

50171; questo apparato assicura che, in caso di totale mancanza di alimentazione elettrica o di sezionamenti d'emergenza comandati dall'impianto IRAI, la Logica Master e l'intera rete di terminali visivi LED mantengano l'assoluta continuità di funzionamento, evitando il reset delle logiche software e garantendo l'operatività del DPAS per tutto il tempo necessario a completare l'evacuazione degli occupanti in sicurezza.

7.2.3 - Principi di funzionamento e quadro normativo del DPAS

Come sancito dalle linee guida internazionali ZVEI, la transizione da un sistema di guida dell'esodo di tipo statico o dinamico a uno adattivo (come il DPAS) non dipende dalle caratteristiche del singolo componente hardware, bensì dal coordinamento logico e dall'interazione sistemica dei suoi elementi. Il nucleo fondamentale di tale architettura risiede nel principio del ciclo chiuso (*feedback loop*): l'unità di controllo del DPAS esegue una valutazione costante dello scenario, incrociando i dati ambientali in input provenienti dai rivelatori d'incendio dell'IRAI con i segnali di stato provenienti dai presidi di sbarramento, ottenuti dai contatti magnetici di posizione delle porte tagliafuoco. Tale interazione impiantistica assicura che la segnaletica d'esodo si adegui istantaneamente all'evoluzione dinamica del pericolo, rimodulando i flussi d'esodo in tempo reale ed escludendo il rischio di indirizzare gli occupanti verso compartimenti compromessi dall'incendio.

Sotto il profilo strettamente impiantistico, il funzionamento di un sistema DPAS è basato su un modello logico strutturato avente tre livelli funzionali interconnessi⁵⁶:

1. **Livello di rilevazione (input):** è costituito dai componenti hardware dell'IRAI — progettato e installato in conformità alla norma UNI 9795 e alla serie UNI EN 54 — e integrato da eventuali sensori ausiliari facenti parte dello stesso sistema DPAS. Questo stadio acquisisce in tempo reale i parametri fisici legati allo

⁵⁶ Si precisa che tale modello logico viene definito dai criteri di progettazione tedeschi espressi nella specifica tecnica DIN VDE V 0108-111 — la quale disciplina l'architettura dei sistemi di guida ottica di sicurezza adattivi — e risulta perfettamente coerente con i requisiti prestazionali richiesti a livello nazionale dalla UNI ISO 16069:2019.

sviluppo dei focolai, quali la concentrazione di particolato, le curve di rilascio termico, l'opacità e la stratificazione dei fumi;

2. **Livello di elaborazione:** è rappresentato dall'unità centrale a logica programmabile (PLC o SWGS) che opera come “unità Master” del sistema. Questo livello ha il compito di elaborare istantaneamente le informazioni provenienti dal campo e mappare l'evoluzione spaziale dell'incendio. Applicando le specifiche matrici di correlazione, determinate in fase di progetto, l'unità Master valuta l'eventuale stato di compromissione delle vie d'esodo e decide la strategia di evacuazione da adottare;
3. **Livello di attuazione:** è composto dai terminali grafici a tecnologia LED ad alta visibilità che agiscono come “unità periferiche Slave”, prive di logica decisionale autonoma, ma programmate per eseguire i comandi ricevuti dal Master. In conformità ai requisiti fotometrici e colorimetrici prescritti dalle norme UNI ISO 3864 e UNI ISO 16069, tali dispositivi modificano la propria simbologia in tempo reale su comandi dell'unità Master.

Sotto il profilo legislativo e normativo, è fondamentale evidenziare che non esiste un unico decreto o una singola norma che regoli autonomamente il sistema DPAS. Trattandosi di un impianto complesso, il suo funzionamento e la sua progettazione dipendono dall'applicazione obbligatoria di un insieme di più norme e decreti differenti, ognuno dedicato a disciplinare una parte specifica dell'opera (la prevenzione incendi, la sicurezza dei lavoratori, l'impiantistica elettrica e l'illuminazione di emergenza). All'interno di questo pacchetto legislativo sono compresi i seguenti principali riferimenti:

- **D.M. 03/08/2015 (Codice di prevenzione incendi):** l'impiego della tecnologia adattiva si colloca pienamente all'interno dell'approccio prestazionale della *Fire Safety Engineering* regolata dal Capitolo G.2, mirata alla verifica del margine di sicurezza della vita umana espresso dal criterio $RSET < ASET$. Nello specifico, il Capitolo S.4 (Esodo), ammette esplicitamente l'adozione di segnaletica di tipo polifunzionale o dinamica, imponendo che, qualora una via d'esodo sia resa indisponibile dalla propagazione dei fumi, il sistema sia in grado di variare l'indicazione per impedire l'accesso degli occupanti al pericolo;
- **UNI ISO 16069:2019:** recepimento nazionale dello standard internazionale ISO 16069:2017 (*Safety Way Guidance Systems – SWGS*), è la norma che disciplina i

criteri metodologici, di visibilità e di interconnessione dei sistemi di guida attivi per le vie di sicurezza. Essa definisce i requisiti standardizzati secondo i quali i cartelli devono variare le frecce direzionali o attivare simboli di sbarramento (come la "X" rossa) per inibire l'accesso a un compartimento compromesso;

- **Norme CEI EN 50172 e UNI EN 1838:** rappresentano il cardine normativo per l'illuminazione e la segnaletica di sicurezza negli edifici. Regolano i parametri illuminotecnici minimi, i tempi di commutazione dei dispositivi e l'autonomia delle sorgenti luminose in emergenza. Il sistema DPAS si integra in questo quadro garantendo che i supporti digitali e i segnali dinamici mantengano la piena operatività e i corretti livelli di contrasto e luminanza anche in scenari di guasto della rete elettrica ordinaria;
- **Specifiche CEI 20-105 e norma UNI 9795:** il sistema DPAS opera asservito all'IRAI, la cui progettazione e logica di interfacciamento sono regolate dalla norma UNI 9795 per garantire il corretto invio dei segnali di emergenza. Per assicurare la continuità di servizio di questo flusso di informazioni e l'alimentazione dell'infrastruttura anche sotto l'azione diretta del fuoco, la progettazione prevede l'impiego obbligatorio di cavi conformi alla norma CEI 20-105, scelti specificamente per le loro proprietà di resistenza al fuoco;
- **D.lgs. 9 aprile 2008, n. 81 (Testo unico sulla sicurezza):** il sistema deve rispettare rigorosamente i requisiti cromatici e i pittogrammi standardizzati prescritti dalla normativa sulla tutela e sicurezza nei luoghi di lavoro (sfondo verde e icone bianche per l'esodo, contrasti rossi per i divieti). Il DPAS opera una digitalizzazione dei supporti fisici che non altera i codici visivi convenzionali, garantendo l'immediata riconoscibilità da parte degli occupanti.

7.3 - Integrazione del sistema DPAS: analisi criticità di Piazza Bengasi

La transizione da un sistema statico a uno dinamico per la gestione dell'esodo all'interno del parcheggio ipogeo di Piazza Bengasi non deriva da una formalità di adeguamento normativo, ma risponde a una rigorosa necessità ingegneristica. L'obiettivo fondamentale di tale modifica è quello di superare i limiti intrinseci dei sistemi di protezione attiva tradizionali applicati a opere caratterizzate da elevata complessità volumetrica, strutturale

e gestionale, validando le scelte progettuali tramite i metodi della *Fire Safety Engineering* (FSE). Pertanto, viene di seguito presentata l'analisi dettagliata dei diversi fattori cinematici, impiantistici e ambientali che hanno imposto l'installazione di un sistema DPAS rispetto a un impianto IRAI tradizionale.

1. Geometria e caratteristiche dell'attività

Ai fini della protezione passiva, l'opera è caratterizzata da:

- **Reazione al fuoco (Misura S.1):** si è scelto il Livello di prestazione II, che impone l'impiego di materiali appartenenti al gruppo GM3⁵⁷ sia lungo le vie d'esodo sia negli altri locali dell'attività;
- **Resistenza al fuoco (Misura S.2):** si è adottato il Livello di prestazione III, garantendo una classe di resistenza al fuoco minima delle strutture portanti R 90 ed EI 90, elevata a EI 120 per le compartimentazioni dei locali tecnici;
- **Compartimentazione (Misura S.3):** si è deciso il Livello di prestazione II, configurando ciascuno dei due piani interrati come un compartimento autonomo, delimitato da elementi separanti e sistemi di chiusura aventi caratteristiche non inferiori a EI 90.

Trattandosi di un'opera interamente confinata, a sviluppo ipogeo (classificazione HC, con quote comprese tra $-10m$ e $24m$) e priva di illuminazione zenitale naturale, l'esodo di tipo statico e pre-calcolato risulta estremamente vulnerabile a causa della perdita dei punti di riferimento esterni da parte degli occupanti.

A questa criticità si somma l'assenza di un *wayfinding* naturale; infatti, la configurazione planimetrica dell'opera presenta una forte asimmetria e fitte maglie di pilastrate che occludono la visuale diretta delle uscite di sicurezza (costituite da quattro scale a prova di fumo isolate, denominate A, B, C, D). La relazione tecnica FSE evidenzia inoltre che, in prossimità delle rampe, vi è un restringimento volumetrico del comparto. Un sistema statico non ha la capacità di valutare l'accumulo localizzato di fumo in queste "strozzature" geometriche,

⁵⁷ **GM3:** sigla che definisce i requisiti minimi di reazione al fuoco per i materiali d'arredo e di rivestimento secondo il D.M. 03/08/2015.

rischiando di indirizzare i flussi d'esodo proprio verso i punti critici in cui si verifica un accumulo dei gas caldi.

2. Profilo di rischio R_{vita} e strategia di declassamento

L'affollamento teorico finale di progetto — già calcolato nel *Paragrafo 7.1* — è pari a 1277 utenti simultanei, risultante dalla somma di 618 occupanti al livello -1 e 659 al livello -2. La popolazione è eterogenea, non addestrata, in stato di veglia, ma priva di familiarità con l'edificio, di conseguenza, le caratteristiche degli occupanti sono classificate come tipologia SB (occupanti che non hanno familiarità con l'attività). Considerando le caratteristiche degli utenti appena citate e assumendo una velocità di crescita dell'incendio “media” (ovvero $\delta_\alpha = 2$), l'applicazione delle soluzioni conformi del Codice impone l'assegnazione di un profilo di rischio R_{vita} pari a B2.

Al fine di ottimizzare la distribuzione delle lunghezze dei percorsi d'esodo — i quali, a causa dei vincoli geometrici della struttura ipogea, presentano distanze superiori ai limiti prescrittivi tradizionali — i progettisti hanno sviluppato una soluzione alternativa basata sulla FSE, prescrivendo un livello di protezione attiva superiore che combina:

- un impianto di spegnimento automatico sprinkler a protezione dell'intera attività con Livello di prestazione V per la misura S.6;
- Un sistema di controllo del fumo e del calore SEFFC avente Livello di prestazione III per la misura S.8;
- Un sistema IRAI avente funzione di rivelazione ed allarme integrale⁵⁸ caratterizzato da un Livello di prestazione IV per la misura S.7;

Attraverso l'adozione di tali misure impiantistiche, è stato possibile declassare il profilo di rischio R_{vita} dell'attività da B2 a B1 esclusivamente per il solo dimensionamento dei compartimenti.

⁵⁸ **Sistema integrale:** con il termine “integrale” si definisce una configurazione impiantistica che garantisce la sorveglianza su tutta la superficie e su tutti i volumi dell'attività (in conformità alla norma UNI 9795). Nel caso di opera sotterranea, la rivelazione automatica di fumo e calore non si limita alle sole corsie e aree di parcheggio, ma si estende a tutti i locali tecnici, alle intercapedini, ai vani scala e ai relativi filtri a prova di fumo, senza escludere alcuna zona.

Questo declassamento al profilo B1, lavorando in combinazione con l'azione dei sistemi IRAI e SEFFC, permette di sbloccare parametri di evacuazione più flessibili e di estendere le lunghezze massime dei corridoi ciechi e dei percorsi d'esodo fino al 35% in più rispetto ai limiti standard. Tale estensione geometrica viene validata analiticamente nel progetto esecutivo attraverso il soddisfacimento del criterio prestazionale fondamentale $RSET < ASET$. Al contempo, però, l'estensione dei percorsi d'esodo in un ambiente ipogeo e confinato impone che le vie di fuga siano gestite in modalità dinamica, ovvero che siano capaci di adattarsi in tempo reale sia alla progressiva propagazione dei fumi sia all'attivazione dei sistemi SEFFC. In questo specifico scenario, l'integrazione di un sistema DPAS si configura come una scelta ingegneristica imprescindibile per garantire l'incolumità degli occupanti.

3. Integrazione con la FSE e parametri ASET/RSET

Attraverso la simulazione fluidodinamica Agent-Based eseguita con i software FDS (per l'approccio ingegneristico utilizzato) e Pathfinder (per l'esodo), sono stati calcolati i valori di ASET ed RSET. Il sistema DPAS è l'unico componente impiantistico in grado di garantire il mantenimento del margine di sicurezza normativo obbligatorio t_{marg} (pari al 10% di RSET, quindi $t_{marg} = 10\% \cdot RSET$).

4. Interazione e logica di cascata con l'impianto SEFFC

A seguito delle prescrizioni stabilite dai VVF, la strategia di gestione dei prodotti della combustione è passata da uno smaltimento statico a una misura alternativa prestazionale avente Livello III della misura S.8. Ciascun piano del parcheggio è stato suddiviso in 3 macro-aree di rivelazione (aree denominate A, B, C), interfacciate con un impianto di evacuazione forzata composto da 14 griglie dotate di ventilatori reversibili, capaci di garantire una portata complessiva di $250.000 \frac{m^3}{h}$ sia in estrazione sia in immissione forzata. All'attivazione del primo rivelatore ottico di fumo, l'IRAI attiva la logica di emergenza in cascata sequenziale: mette in modalità estrazione le griglie della macro-area investita dall'incendio e commuta in modalità immissione le griglie delle aree adiacenti,

creando un gradiente di pressione protettivo che confina i fumi⁵⁹. Il sistema DPAS si coordina istantaneamente con questa temporizzazione meccanica: i cartelli indicatori e le frecce direzionali modificano la loro configurazione ottico-luminosa per allontanare i flussi di persone dalla macro-zona investita dall'incendio — dove il SEFFC esegue l'estrazione attiva dei fumi — e dirigerli in sicurezza attraverso le macro-zone adiacenti in sovrappressione, evitando così interferenze tra l'esodo dei civili e i flussi generati dal sistema di ventilazione.

⁵⁹ Si precisa che tale strategia si basa sulla creazione di un gradiente di pressione differenziale: la macro-area investita dall'incendio viene posta in depressione tramite l'estrazione attiva per confinare i fumi, mentre le aree adiacenti sane vengono poste in sovrappressione mediante l'immissione forzata di aria pulita. Questo sbilanciamento genera un “effetto barriera” che impedisce fisicamente al fumo di migrare verso le zone sicure. Tale configurazione rappresenta una soluzione prestazionale tipica dell'ingegneria antincendio applicata alle autorimesse complesse o a sviluppo ipogeo (in conformità alla RTV V.6), dove i sistemi tradizionali risulterebbero inefficaci

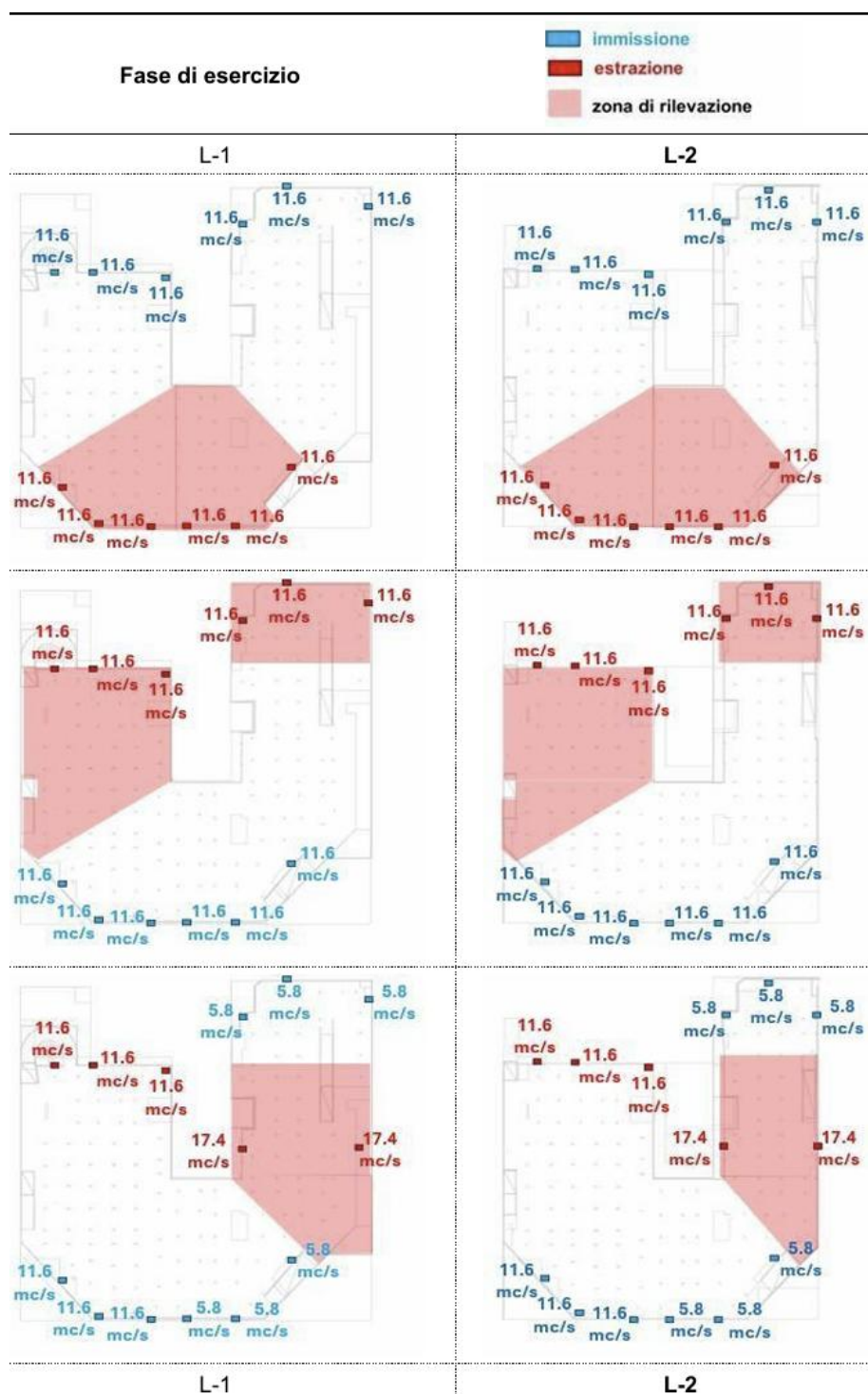


Figura 34: Mappa cromatica di attivazione del sistema SEFFC

5. Presenza di aree a rischio specifico (aree ricarica EV)

Il progetto esecutivo include stalli dedicati alla ricarica di veicoli elettrici (aree ricarica EV), i quali, per ragioni di sicurezza e facilità di intervento da parte dei soccorritori, sono stati posizionati esclusivamente al Piano Primo Interrato (Livello -1). Gli incendi che coinvolgono vetture con batterie al litio presentano

curve di rilascio termico RHR aventi crescita molto rapida, fenomeni di *thermal runaway*⁶⁰ e fumi tossici ad altissima densità e opacità; a queste criticità si sommano i rischi di natura elettrica, come i cortocircuiti, i quali possono generare calore intenso e scintille, innescando potenzialmente un focolaio. Per mitigare tale rischio specifico e garantire la massima sicurezza d'insieme, l'infrastruttura è stata dotata di presidi impiantistici sia di protezione attiva sia passiva. Nello specifico, sono state previste termocamere fisse e rilevatori combinati ad alta granularità (ottici, termovelocimetrici e a CO) a cui si associano le protezioni elettriche dell'infrastruttura di ricarica: sono infatti installati dispositivi di protezione contro le sovracorrenti (fusibili, interruttori magnetotermici) e contro i cortocircuiti. Inoltre, ogni stazione di ricarica sarà dotata di un dispositivo di comando di sgancio di emergenza, opportunamente segnalato ed accessibile anche ai soccorritori, che blocchi istantaneamente l'alimentazione della stazione stessa. Un impianto IRAI tradizionale basato su scenari rigidi non offrirebbe la flessibilità necessaria per gestire un innesco di questo tipo. Invece, il DPAS consente di interdire tempestivamente i percorsi di fuga adiacenti ai locali tecnici e all'area di ricarica EV non appena le termocamere registrano un gradiente termico anomalo, ricalcolando il percorso degli occupanti prima dell'oscuramento dei sensori ottici dei rivelatori standard (a causa del fumo generato dall'incendio)

⁶⁰ **Thermal runaway:** è un fenomeno degenerativo tipico delle batterie agli ioni di litio, in cui un aumento anomalo della temperatura interna innesca reazioni chimiche esotermiche auto-alimentate. Questo effetto a catena genera un elevato e repentino rilascio termico, con conseguente emissione violenta di fiamme e gas tossici.

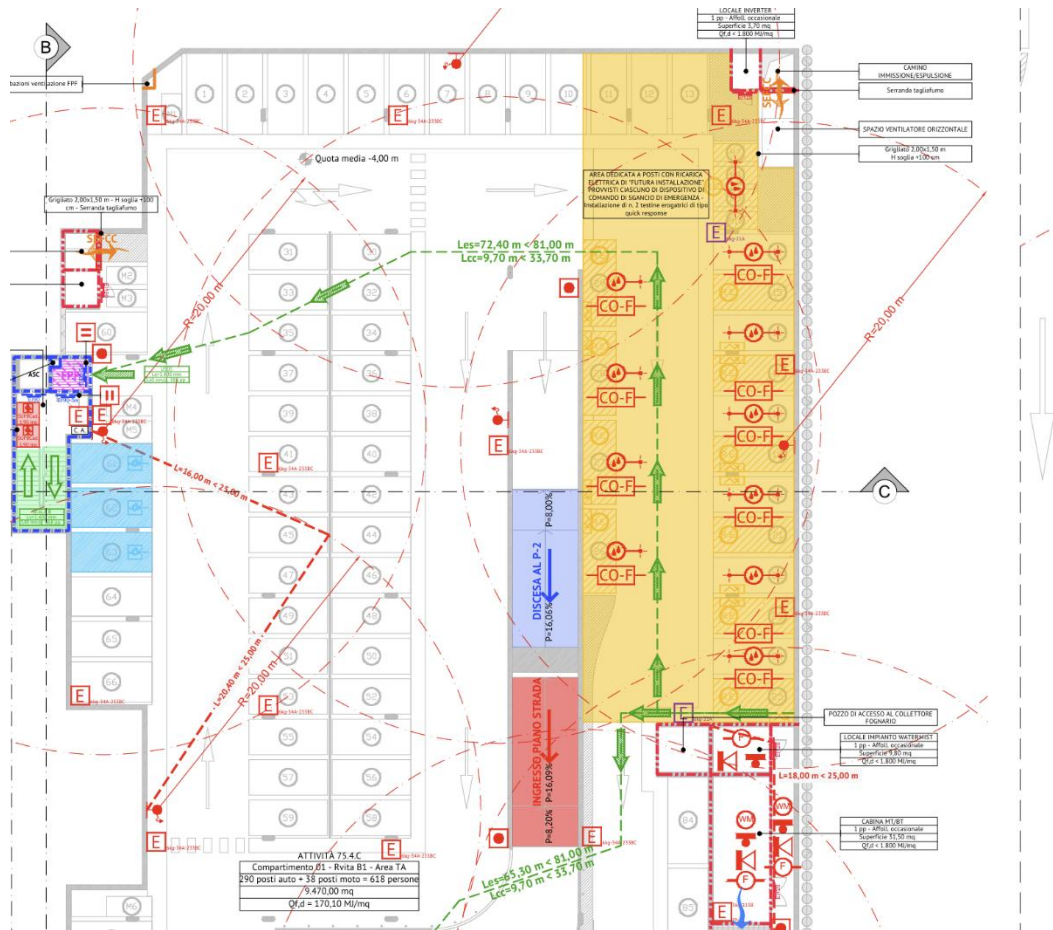


Figura 35: Dettaglio planimetrico dell'area di ricarica EV (in giallo) al Piano Primo Interrato

6. Interferenza strutturale e gestionale con la metropolitana

Al Piano Secondo Interrato dell'infrastruttura sono presenti due collegamenti diretti con la fermata della “Metropolitana Bengasi”; tali comunicazioni avvengono tramite filtri a prova di fumo pressurizzati. Questa interconnessione richiede l'implementazione di un piano di emergenza coordinato e bidirezionale illustrato all'interno del SGSA.

Un incendio all'interno della stazione metropolitana deve attivare i sistemi di protezione del parcheggio e viceversa, comandando la chiusura dei serramenti tagliafuoco e la sovrappressione dei filtri di comunicazione.

Nel caso di chiusura automatica del collegamento, la segnaletica statica tradizionale continuerebbe ingannevolmente a indicare tale via come un percorso di fuga agibile, inducendo gli occupanti a dirigersi verso un'uscita di fatto non disponibile. Il sistema DPAS risolve questa criticità escludendo istantaneamente

le uscite di interconnessione in stato di blocco e guidando gli occupanti verso le quattro uscite finali (scale A, B, C, D) distribuite su Piazza Bengasi.

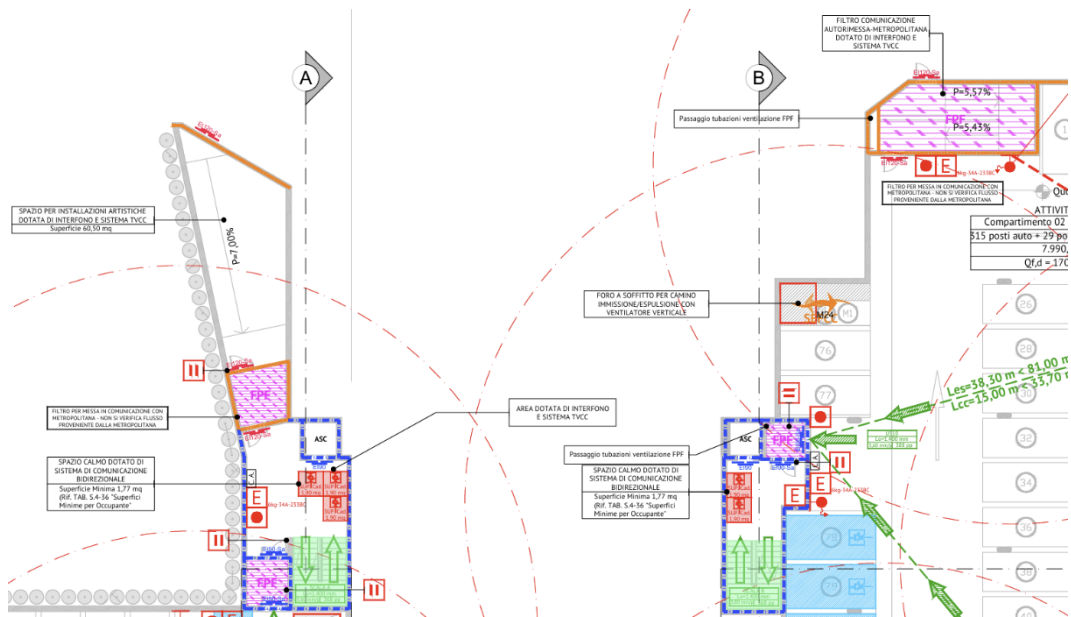


Figura 36: Dettaglio planimetrico dei filtri a prova di fumo (in rosa) di interconnessione con la Metropolitana

7. Gestione della Sicurezza Antincendio (GSA)

In termini di gestione della sicurezza, la simulazione prestazionale dimostra come tale struttura sia caratterizzata da un $ASET = 660s$. Inoltre, per assistere gli occupanti con ridotte capacità motorie presenti negli spazi calmi — i quali possono essere al più sette per piano — in totale assenza di visibilità e di squadre di soccorso dei VVF, l'evacuazione non può essere affidata esclusivamente a cartelli passivi o all'azione umana degli occupanti stessi e del personale in servizio (non sempre presente). Il sistema deve necessariamente basarsi su automatismi integrati, di conseguenza, il DPAS si configura come la soluzione tecnologica più idonea, in quanto opera in sinergia con l'impianto di diffusione sonora (EVAC di Categoria 4), coordinando i messaggi vocali direzionali con la segnaletica dinamica luminosa. Tale integrazione garantisce, inoltre, di fornire ai soccorritori una chiara indicazione dei percorsi sicuri dal piano strada fino al centro dell'infrastruttura ipogea.

In conclusione, come già evidenziato in chiusura del *Paragrafo 4.7*, emerge chiaramente come un impianto IRAI tradizionale presenti diverse limitazioni, tali da non permettere il

soddisfacimento dei requisiti di sicurezza antincendio richiesti. Tale sistema, infatti, opera sulla base di matrici di attivazione rigide e predeterminate in fase di progetto e durante l'analisi degli scenari d'incendio. Secondo tale logica di funzionamento, l'attivazione dell'allarme da parte della centrale determina, in modo automatico e predefinito, un'unica configurazione della segnaletica, ignorando se le vie di fuga indicate siano ancora sicure o se siano state isolate dalle compartimentazioni antincendio. Questo approccio presenta un limite estremamente critico negli scenari complessi ed evolutivi che caratterizzano il caso studio considerato: qualora la dinamica termo-fluidodinamica determini la propagazione dei gas tossici verso la via d'esodo inizialmente considerata sicura, la segnaletica rigida continuerà a indirizzare gli occupanti verso il compartimento compromesso, trasformandosi da presidio di sicurezza in fattore di rischio. Da queste premesse nasce l'esigenza ingegneristica del DPAS, sistema dinamico capace di elaborare in tempo reale i dati della rete dei sensori installati per rimodulare istantaneamente l'indirizzamento dei flussi verso i compartimenti agibili.

8 - Valutazione prestazionale e validazione del sistema DPAS di Piazza Bengasi

In questo capitolo viene esposta la validazione prestazionale del sistema *Dynamic Path Allocation System* (DPAS) integrato nell'autorimessa interrata di Piazza Bengasi a Torino. Attraverso l'analisi dei risultati emersi dalle simulazioni sugli scenari d'incendio e d'esodo di progetto, viene verificato il soddisfacimento dei criteri di tenibilità ambientale per la salvaguardia della vita umana e per l'operatività delle squadre di soccorso. La trattazione approfondisce nel dettaglio i dati numerici delle simulazioni, delineando l'interazione logica del sistema DPAS con gli impianti IRAI e SEFFC.

Il capitolo si conclude con la descrizione delle verifiche funzionali e delle prove strumentali previste in fase di collaudo sul campo, delineando infine il set documentale necessario alla validazione finale del sistema.

8.1 - Sistemi di sicurezza antincendio nel caso studio

Sotto il profilo geometrico e strutturale, l'infrastruttura di Piazza Bengasi si sviluppa su due livelli interrati, con accesso e uscita carrabile garantiti attraverso un sistema di rampe perimetrali dedicate, come mostrato nella *Figura 37*.

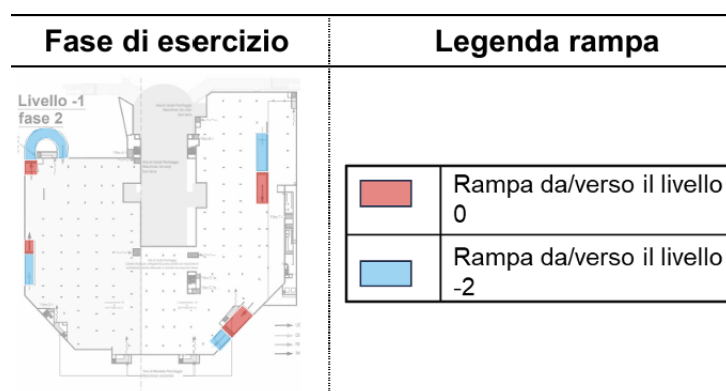


Figura 37: Planimetria livello -1 con evidenziazione delle rampe carrabili perimetrali



Figura 38 : Planimetria livello -2 con evidenziazione delle rampe carrabili perimetrali

In conformità ai criteri di classificazione del D.M. 03/08/2015, il profilo di rischio dell'intera opera per la salvaguardia della vita umana è fissato come $R_{vita} = B2$. Sulla base delle specificità geometriche e della destinazione d'uso, l'attività ricade nell'ambito di applicazione della Regola Tecnica Verticale per le autorimesse, ovvero la RTV V.6; di conseguenza, l'approccio prestazionale impone l'adozione del Livello di Prestazione III per la misura antincendio S.8 (Controllo di fumi e calore), garantito dall'azione combinata e reversibile del sistema di evacuazione forzata SEFFC.

Al fine di garantire il raggiungimento degli obiettivi prioritari di sicurezza antincendio — volti alla salvaguardia della vita umana, all'agevolazione delle operazioni di soccorso dei Vigili del Fuoco e alla protezione strutturale dell'opera contro gli effetti termici della combustione — il progetto esecutivo prevede un'infrastruttura tecnologica integrata da molteplici sistemi di protezione attiva, ovvero:

1. **IRAI:** presente in modo capillare su tutti i livelli dell'autorimessa, il sistema si avvale di una rete di rivelatori ad attivazione di tipo ottico per garantire il tempestivo intercettamento dei focolari in fase di innesco;
2. **Impianto sprinkler di estinzione automatica ad acqua:** l'autorimessa è protetta da un impianto automatico a pioggia del tipo a secco, dimensionato con testine erogatrici aventi una temperatura di attivazione nominale pari a 68°C e disposte secondo una spaziatura regolare di 4m ;
3. **Impianto di ventilazione meccanica (SEFFC):** l'impianto di estrazione e immissione meccanica è a servizio di entrambi i livelli e opera in modalità reversibile, regolando dinamicamente l'azione di smaltimento forzato e diluizione dei fumi in funzione della localizzazione plano-altimetrica dell'incendio. In

condizioni emergenziali, il sistema convoglia un flusso d'aria bilanciato esclusivamente al livello interessato dall'innescò, con una portata d'aria pari a $70 \frac{m^3}{s} = 250.000 \frac{m^3}{h}$ sia per il circuito di estrazione sia per quello di immissione meccanica.

I flussi di diluizione e controllo dei fumi sono regolati attraverso serrande collegate a canali di ventilazione serviti da ventilatori reversibili. Dal punto di vista della logica di attivazione, la superficie utile dei due livelli è suddivisa in tre zone di rilevazione indipendenti, denominate zona A, B e C, la cui disposizione viene mostrata in *Figura 39*.



Figura 39: Suddivisione dei due livelli nelle 3 zone di rivelazione A, B, C

In base all'input fornito dall'IRAI, il sistema seleziona lo schema di ventilazione idoneo a perseguire l'obiettivo prioritario della misura S.8, ovvero il confinamento e la stagnazione dei fumi all'interno della sola macro-area originaria dell'incendio; in particolare, la disposizione dell'impianto SEFFC è riportata nella *Figura 34*.

La compartimentazione tra i due livelli interrati è strutturalmente preservata tramite l'installazione di quattro portoni tagliafuoco, disposti in corrispondenza dei varchi di accesso alle rampe carrabili del Livello -2. Al verificarsi dell'allarme generato dall'impianto IRAI, tali presidi di sbarramento si chiudono automaticamente per gravità tramite lo sgancio di magneti elettromagnetici di ritenuta, sigillando e separando fisicamente i volumi dei due piani.

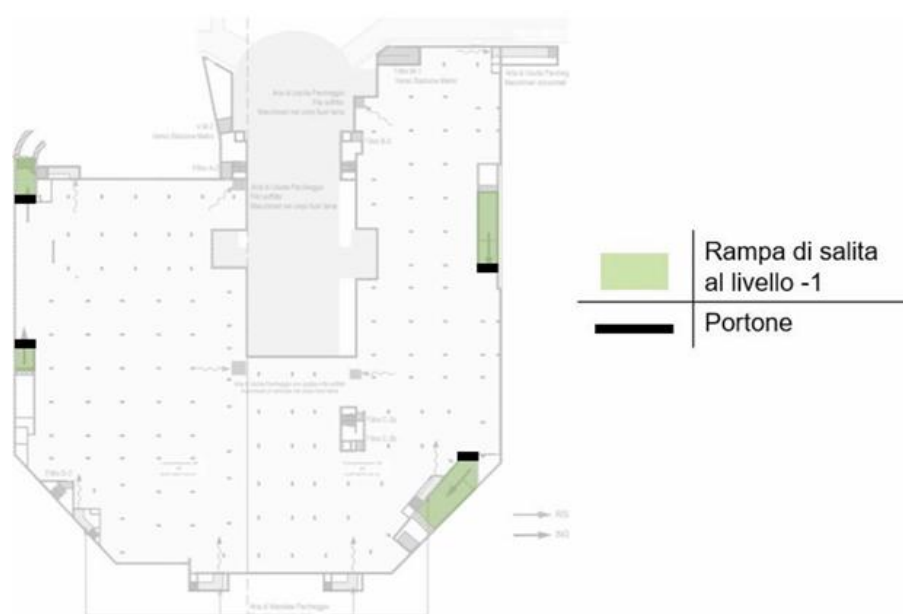


Figura 40: Planimetria livello -2 con evidenziazione dei portoni tagliafuoco

Ai sensi del D.M. 18/10/2019, l'estensione geometrica del compartimento a fumo è vincolata alla quota dei piani e al profilo di rischio dell'attività. In virtù della contemporanea presenza dell'impianto di spegnimento automatico sprinkler, ed in piena conformità ai criteri generali espressi nella Sezione G.3.2.1 del Codice, viene applicato il declassamento del rischio vita di una categoria ai soli fini della determinazione delle soglie geometriche di compartimentazione. Pertanto, mentre l'analisi d'esodo mantiene il profilo reale pari a $R_{vita} = B2$, la verifica dei limiti massimi della superficie del compartimento a fumo viene condotta assumendo un profilo ridotto pari a $R_{vita} = B1$.

Infine, l'architettura delle vie d'esodo si articola per ciascun livello in percorsi orizzontali, volti a incanalare i flussi degli occupanti verso i corpi scala d'emergenza protetti, i quali sono preceduti da filtri a prova di fumo mantenuti in sovrappressione. La configurazione finale dell'autorimessa conta un totale di cinque uscite di sicurezza per piano — le quali sono posizionate in modo speculare sui due livelli — caratterizzate da una larghezza standardizzata pari a 1,20m.



Figura 41: Posizione in pianta delle uscite di sicurezza (indicate dalle frecce verdi) per entrambi i livelli

8.2 - Criteri di accettabilità della strategia d'esodo e d'intervento

L'efficacia della strategia antincendio e del SEFFC a servizio dell'autorimessa di Piazza Bengasi è stata validata analiticamente attraverso il soddisfacimento di precisi obiettivi di sicurezza e l'analisi quantitativa dei parametri fluidodinamici ed evolutivi del fumo. In conformità ai principi della *Fire Safety Engineering*, gli obiettivi stabiliti per l'ambiente autorimessa si articolano nei seguenti punti:

- **Salvaguardia della vita umana:** garantire che gli occupanti dell'infrastruttura non entrino in contatto con i prodotti della combustione tossici e caldi fino al raggiungimento di un luogo sicuro;
- **Operatività dei soccorsi:** garantire che sia le squadre di emergenza interne (aziendali) sia le squadre di soccorso professionali dei Vigili del Fuoco possano intervenire in condizioni di sicurezza per completare le operazioni di spegnimento e l'eventuale assistenza;

Per ciascun obiettivo di sicurezza, il comportamento dell'incendio e le condizioni ambientali sono stati monitorati tramite i seguenti indicatori della FSE:

1. **Condizioni di vivibilità:** servono per verificare l'esposizione diretta degli occupanti e dei soccorritori a
 - Temperatura dei gas;
 - Visibilità lungo le vie d'esodo;
 - Concentrazione di monossido di carbonio (CO);
2. **Irraggiamento:** sulle superfici solide, sugli operatori ed occupanti.

Tutti questi parametri presentano delle soglie massime da dover rispettare — in conformità alle specifiche del D.M. 18/10/2019 e ai criteri metodologici della norma ISO 13571 — in modo da garantire che l'esodo degli utenti e l'azione dei soccorritori avvengano in condizioni di assoluta sicurezza. I relativi valori soglia adottati nell'analisi sono riassunti nella *Tabella 36*.

Tabella 36: Valori soglia per le condizioni ambientali forniti dal D.M. 18/10/2019

parametro	utenti	Squadre di soccorso interne (non professionali)	squadre di soccorso professionali - (VVF)
Temperatura	60°C	80°C	80°C
Visibilità	10m	5m	-
Gas tossici	FED = 0,1 3500ppm CO x min/RSET (min)	-	-
Irraggiamento	2.5 kW/m ²	3 kW/m ²	3 kW/m ²

Per quanto riguarda la modellazione dei gas tossici, l'analisi assume come indicatore primario la concentrazione emessa di monossido di carbonio C_{CO} . Il suo valore soglia viene quantificato attraverso il concetto di dose inalata e di *Fractional Effective Dose* (FED)⁶¹. La norma ISO 13571 stabilisce che la dose incapacitante di CO sia pari a $35000ppm \cdot min$. Siccome nel D.M. 18/10/2019 viene imposto cautelativamente un limite di FED per i gas tossici pari a 0,1, la dose inalata massima ammissibile per gli utenti dell'autorimessa di Piazza Bengasi assume un valore limite di $3500ppm \cdot min$. Ciò è dovuto al fatto che il valore limite di concentrazione di CO è strettamente legato al tempo di esposizione, di conseguenza la concentrazione massima ammissibile $C_{CO,lim}$ viene calcolata dividendo la dose inalata massima D_{max} per il tempo richiesto per l'esodo

⁶¹ **Dose inalata e FED:** si precisa che tali concetti sono spiegati al *Paragrafo 6.3.2*.

dell'utente, ovvero per il parametro RSET, espresso in minuti, secondo la seguente formula:

$$C_{CO,lim} = \frac{D_{max}}{RSET}$$

In merito ai limiti applicati alle squadre di soccorso interne (soccorritori aziendali non professionali), si è tenuto conto di quanto precisato nella Tabella del punto M.3.5 del Codice, la quale specifica che tali addetti devono essere opportunamente protetti, addestrati alla lotta antincendio e all'uso dei dispositivi di protezione delle vie aeree, nonché formati per operare in condizioni di scarsa visibilità, traendo ulteriori riferimenti tecnici dalle linee guida dell'*Australian Fire Authorities Council* (AFAC).

Per le squadre di soccorso professionali (VVF), i limiti di esposizione biologica e termica sono valutati assumendo un transitorio di intervento massimo pari a 10 minuti. A tale proposito, lo studio prestazionale opera a favore di sicurezza applicando la soglia di temperatura pari a 80°C imposta dal Codice, rinunciando cautelativamente all'adozione del limite più permissivo di 120°C previsto per le condizioni pericolose (*Hazardous Conditions*) dalle linee guida AFAC.

Criteri di accettabilità oggettiva della strategia d'esodo e d'intervento

La validazione della sicurezza per le tre categorie di soggetti che interagiscono con lo scenario emergenziale dell'opera ipogea segue differenti criteri di accettabilità temporali, differenziati come segue:

1. **Esodo degli utenti:** in accordo con le prescrizioni del D.M. 18/10/2019, il rispetto delle condizioni di tenibilità⁶² per i civili viene verificato attraverso il criterio $RSET < ASET$. Nel presente approccio prestazionale, l'accettabilità della soluzione è validata dal fatto che il margine calcolato soddisfa costantemente la condizione vincolante $t_{marg} \geq 10\% \cdot RSET$ senza mai scendere al di sotto del limite assoluto di salvaguardia pari a 30s;

⁶² **Condizioni di tenibilità:** si intende la capacità dell'ambiente di mantenere parametri chimico-fisici tali da non causare l'incapacitazione umana. I relativi criteri quantitativi — temperatura, irraggiamento, visibilità e gas tossici — sono prescritti dal Capitolo M.3 del D.M. 18/10/2019 e derivano dagli standard internazionali della norma ISO 13571.

2. **Intervento delle squadre antincendio interne (soccorritori aziendali):** è stato verificato che, per gli addetti alle emergenze aziendali — presenti in sito o tempestivamente attivati dalla Centrale di Controllo GTT — il tempo massimo disponibile entro cui è garantito il mantenimento dei parametri di tenibilità indicati nella *Tabella 36* è pari a $t = 660s$ dall'istante di innesco. Fino a tale limite temporale, indipendentemente dal posizionamento geometrico del focolaio d'incendio nei due livelli interrati, le squadre interne possono avvicinarsi all'area di innesco operando in un ambiente non incapacitante;
3. **Intervento delle squadre di soccorso esterne (Vigili del Fuoco):** in accordo con i criteri espressi nel D.M. 18/10/2019, le condizioni di tenibilità per le squadre di soccorso dei VVF devono essere verificate e mantenute per un intervallo minimo pari a $5min$ (ovvero $300s$) successivi al loro arrivo presso l'attività. Il tempo di riferimento per il tragitto e l'arrivo dei soccorritori sul posto è stato stimato sulla base dei dati statistici ufficiali riportati nell'Annuario Statistico del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco. Per la provincia di Torino, l'annuario riporta un valore medio del tempo di arrivo pari a $15,9min$ (ovvero $954s$). Di conseguenza, sommando il tempo di percorrenza logistica al tempo di operatività minima prescritta in sicurezza, si ottiene un tempo pari a

$$t_{end} = 954 + 300 = 1254s$$

il quale rappresenta l'intervallo temporale entro il quale le condizioni di tenibilità per le squadre di soccorso dei VVF devono essere garantite.

8.3 - Caratterizzazione del combustibile, dominio di calcolo e proprietà dei materiali

Al fine di garantire la precisione computazionale delle simulazioni fluidodinamiche CFD, i parametri chimico-fisici del combustibile, la struttura della griglia di calcolo e le proprietà termo-fisiche dei materiali di contorno sono stati impostati in stretta conformità alle prescrizioni del D.M. 18/10/2019 e agli standard internazionali di riferimento.

Caratterizzazione chimica del combustibile equivalente

La combustione all'interno dell'autorimessa è modellata mediante un combustibile equivalente generico, la cui reazione tiene conto della composizione elementare, della

resa in cenere (*soot yield*) e monossido di carbonio in condizioni di *pre-flashover*. I parametri introdotti nel modello sono riportati nella *Tabella 37*.

Tabella 37: Parametri chimico-fisici del combustibile equivalente

Sede dell'incendio	Autorimessa
Combustibile equivalente	Generico
C – H – O – N	1 – 2 – 0.5 – 0
Soot Yield	0.07 kg/kg
CO yield	0.1 kg/kg

Discretizzazione della griglia di calcolo (Mesh)

La corretta risoluzione spaziale del dominio tridimensionale è stata determinata analiticamente calcolando il diametro caratteristico del focolaio D secondo la metodologia definita nella *FDS User's Guide* (NIST, 2016):

$$D = \left(\frac{Q}{\rho_{\infty} \cdot c_p \cdot T_{\infty} \cdot \sqrt{g}} \right)^{2/5}$$

dove si ha che Q è la potenza di picco dell'incendio espressa in $[kW]$, ρ_{∞} rappresenta la densità della zona indisturbata dall'incendio espressa in $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$, c_p è il calore specifico dell'aria in $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$, T_{∞} è la temperatura della zona indisturbata dall'incendio espressa in $[K]$ e g è l'accelerazione gravitazionale in $\left[\frac{m}{s^2}\right]$.

Sulla base del valore calcolato $D = 1,79$ e per ottimizzare il compromesso tra l'accuratezza dei gradienti fluidodinamici e l'onere computazionale, è stata adottata una griglia di calcolo a risoluzione differenziata:

- **In prossimità dell'innescio: si ha una zona di mesh fine, con** celle cubiche aventi lato pari a $0,2m$ e quindi un volume di $(0,2 \cdot 0,2 \cdot 0,2)m^3$;
- **Lontano dall'innescio: si ha una zona di mesh grossolana, con** celle cubiche aventi lato pari a $0,4m$ e quindi volume di $(0,4 \cdot 0,4 \cdot 0,4)m^3$.

Proprietà termo-fisiche dei materiali e scambio termico

Le simulazioni tengono conto dello scambio termico tra i prodotti della combustione e le pareti dell'edificio. Nella *Tabella 38* sono riportate le caratteristiche termo-fisiche dei materiali, dati di input del modello di calcolo.

Tabella 38: Proprietà termo-fisiche dei materiali strutturali

Materiale	Densità [kg/m ³]	Conducibilità termica [W/ m K]	Calore specifico [kJ/kg K]	Emissività
Cemento	2300	1.4	0.88	0.9
Acciaio	7850	45.8	0.46	0.95

8.4.1 - Scenari d'incendio di progetto: individuazione e caratterizzazione

L'efficacia delle strategie antincendio e del Sistema di Evacuazione Forzata di Fumo e Calore (SEFFC) del parcheggio interrato di Piazza Bengasi è stata valutata analiticamente attraverso lo studio di diversi scenari d'incendio di progetto. Tali scenari sono stati selezionati in corrispondenza delle localizzazioni geometricamente e fluidodinamicamente più gravose, al fine di validare il raggiungimento — tramite approccio prestazionale — del Livello di Prestazione III per la misura antincendio S.8 (Controllo di fumi e calore), in piena conformità al D.M. 18/10/2019. Gli scenari presi in esame sono identificati in funzione di:

- **Piano interrato:** L1 per il Livello -1, L2 per il Livello -2;
- **Specifica posizione del focolaio d'innescò:** P1, P2, P3.

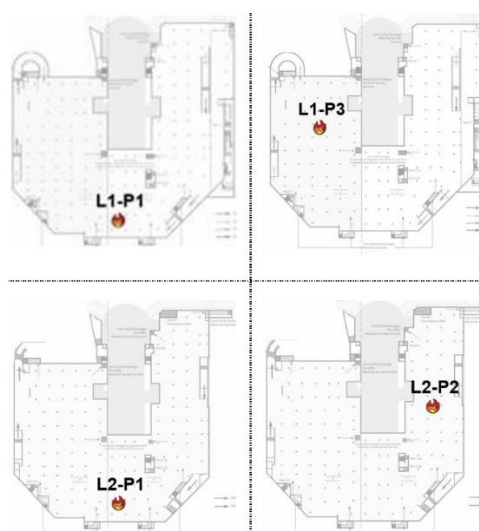


Figura 42: Localizzazione planimetrica dei focolai d'incendio di progetto

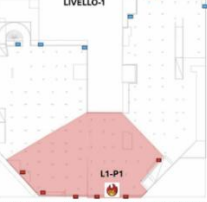
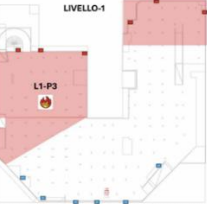
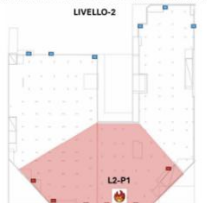
I criteri metodologici alla base della scelta di ciascuno scenario vengono sintetizzati nella Tabella 39.

Tabella 39: Criteri di scelta per gli scenari di incendio

	Criterio di scelta					
Scenario Fase di esercizio	Ambiente sede d'innescò	Relazione tra posizione d'innescò e obiettivo di sicurezza	Relazione tra posizione d'innescò e percorsi di esodo	Relazione tra posizione d'innescò e sistema/strategia di ventilazione	sorgente d'innescò	tipologia di combustibile
L1-P1	Livello -1 S = 8685 m² H = 2.65m	La forma a U dell'autorimessa rende difficoltosa la realizzazione di un deflusso uniforme di aria per il lavaggio e l'estrazione di fumi	Innescò in prossimità di una delle vie di esodo.	Innescò in prossimità del punto di estrazione. L'estrazione di fumi caldi determina una riduzione di efficienza della capacità di estrazione.	Accensione diretta (fiamma diretta, cortocircuito)	Materiale plastico
L1-P3				L'innescò è lontano dalle serrande di estrazione e in una posizione sfavorevole dal punto di vista della propagazione dei fumi.		
L2-P1	Livello -2 S = 7950m² H = 2.65m			Innescò in prossimità del punto di estrazione. L'estrazione di fumi caldi determina una riduzione di efficienza della capacità di estrazione.		
L2-P2				Innescò in prossimità del punto di estrazione. L'estrazione di fumi caldi determina una riduzione di efficienza della capacità di estrazione.		

Nella *Tabella 40* vengono indicati gli scenari d'incendio, nei quali si precisa che viene indicata in rosso la zona di rilevazione incendio.

Tabella 40: Scenari d'incendio

Scenario	Fase	Posizione d'innescò	Scenario di esodo
		 Posizione incendio  Estrazione meccanica  Immissione meccanica	
L1-P1 (livello -1)	Di esercizio		Es-L1-P1
L1-P3 (livello -1)			Es-L1-P3
L2-P1 (livello -2)			Es-L2-P1
L2-P2 (livello -2)			Es-L2-P2

Analisi quantitativa e curva $RHR(t)$ di progetto

La definizione quantitativa della potenza dell'incendio segue le prescrizioni della RTV V.6 per le autorimesse, assumendo come modello di riferimento l'incendio di una singola automobile. L'andamento temporale della curva di rilascio termico $RHR(t)$ tiene conto dell'azione mitigatrice ottenuta dall'impianto di spegnimento automatico SPK presente nell'infrastruttura. In accordo con le linee guida della RTV, l'attivazione del sistema sprinkler consente di:

- Escludere la propagazione dell'incendio ai veicoli adiacenti a quello iniziale;
- Ridurre cautelativamente del 50% la potenza massima di picco raggiungibile dall'incendio, mantenendo inalterato l'andamento temporale della curva.

L'istante di attivazione delle testine sprinkler, calcolato mediante una specifica simulazione fluidodinamica CFD preliminare, è risultato pari a $t = 140s$ dall'innesco. La risultante curva $RHR(t)$ di progetto ridotta viene rappresentata nella *Figura 43*.

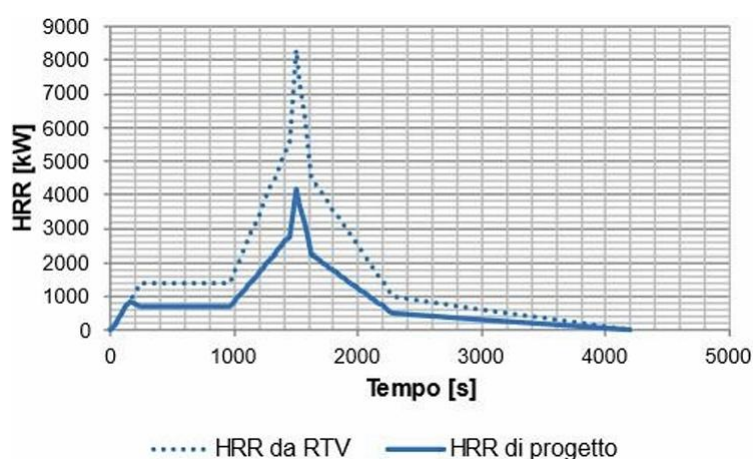


Figura 43: Curva RHR di progetto ridotta

La simulazione fluidodinamica complessiva dell'opera è stata eseguita implementando la cronologia degli eventi sequenziali illustrata nella *Figura 44*, includendo nel modello i ritardi di attivazione, i tempi di pre-movimento dell'esodo e l'entrata a regime del sistema di ventilazione meccanica forzata.

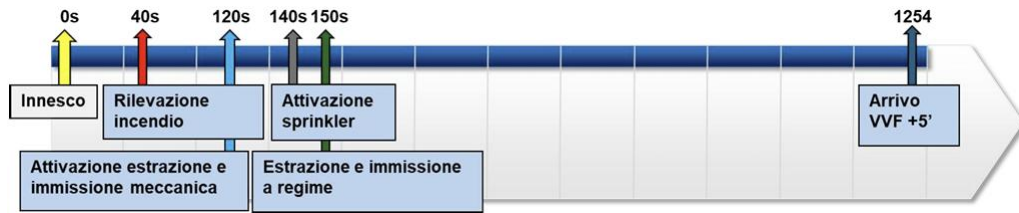


Figura 44: Cronologia degli eventi emergenziali utilizzata per l'analisi degli scenari d'incendio

Nello specifico, la seguente successione temporale degli eventi, considerata identica per tutti gli scenari analizzati, si basa sulle seguenti ipotesi assunte a favore della sicurezza:

1. **Tempo di rilevazione:** si assume che la rilevazione dell'incendio avvenga entro $t \leq 40s$ dall'istante di innesco. Tale tempistica risulta fortemente cautelativa poiché l'infrastruttura è dotata di un sistema di tipo ottico, progettato secondo una logica di attivazione che risponde tempestivamente alla sollecitazione del primo sensore interessato dai fumi;
2. **Attivazione del SEFFC:** l'avvio del sistema di ventilazione meccanica forzata è impostato con un ritardo $t = 80s$ dall'istante di rilevazione, di conseguenza si verifica dopo $t = 120s$ dall'istante di innesco;
3. **Fase di transitorio della ventilazione:** una volta avviato, il sistema impiega un transitorio di durata $t = 30s$ per andare a regime e raggiungere la portata volumetrica di progetto.

Coerentemente con la cronologia degli eventi sopra descritta, la durata complessiva della simulazione fluidodinamica CFD è stata impostata pari a $\Delta t = 1254s$. Questo intervallo temporale d'analisi garantisce la verifica dei parametri di tenibilità ambientale nell'autorimessa sia durante la fase di esodo degli utenti, sia per i primi cinque minuti di attività dei Vigili del Fuoco successivi al loro arrivo in loco.

8.4.2 - Scenari d'esodo di progetto: individuazione e caratterizzazione

Le simulazioni del flusso di evacuazione tengono conto di una popolazione caratterizzata da differenti capacità motorie e ingombri, in piena conformità alle prescrizioni dello standard ISO TR 16738:2009. I parametri geometrici e cinematici primari introdotti nel codice di calcolo sono i seguenti:

- **Velocità utenti:** uniformemente distribuita nell'intervallo $0,6 \div 1,2 \frac{m}{s}$;

- **Larghezza spalle:** uniformemente distribuita nell'intervallo $45 \div 55\text{cm}$;

Il valore di velocità assegnato agli utenti rappresenta la condizione in ambiente indisturbato, ovvero in assenza di fenomeni di congestione. Durante lo sviluppo della simulazione, il software riduce automaticamente tale parametro in funzione dei fenomeni di addensamento localizzato in corrispondenza dei filtri e dei varchi di uscita, e dell'interazione fisica delle persone con lo strato di fumo, calcolando il rallentamento indotto dalla progressiva riduzione della visibilità ambientale. Si precisa inoltre che il valore di velocità $0,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ viene assegnato agli utenti con ridotte capacità motorie, mentre il valore $1,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ viene assegnato ai soggetti in buone condizioni fisiche.

Per quanto riguarda il massimo affollamento, si ricorda che questo era già stato calcolato precedentemente e risultava pari a 1277 persone complessive, dato dalla somma di 618 persone al livello -1 e 659 persone al livello -

In merito all'analisi dell'esodo, questa si basa sulla scomposizione temporale delle fasi emergenziali, la cui successione sequenziale degli eventi che regolano il comportamento della popolazione nel modello utilizzato, è schematizzata nella *Figura 45*.

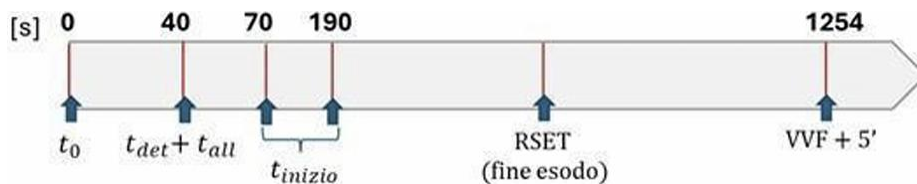


Figura 45: Cronologia dell'esodo

La cronologia operativa viene definita analiticamente tramite le seguenti ipotesi assunte a favore della sicurezza:

1. **Tempo di rivelazione t_{det} e tempo di allarme t_{all} ⁶³:** si ipotizza che questi due istanti temporali coincidono e viene assunto un valore fisso pari a 40s (quindi si ha che $t_{det} + t_{all} = 40\text{s}$ dall'istante di innesco del focolaio). Tale scelta è mutuata dalle linee guida dello standard ISO/TR 16738 per infrastrutture dotate di sistemi automatici di monitoraggio. Tale valore risulta fortemente cautelativo in virtù

⁶³ Si precisa che il tempo di allarme t_{all} è già stato approfondito nel *Paragrafo 6.3.3*; si evidenzia tuttavia che, all'interno delle normative e della letteratura internazionale di riferimento, tale parametro viene comunemente indicato con la sigla t_a .

della presenza di un sistema di rilevazione di tipo ottico, la cui logica di attivazione risponde tempestivamente alla sollecitazione del primo sensore interessato dai fumi;

2. **Tempo di pre-movimento t_{pre}** : in accordo con la norma ISO/TR 16738, si assume che sia distribuito uniformemente sull'intervallo $(30s \div 150s)$ a partire dall'istante $t_{det} + t_{all}$;

3. **Tempo di inizio esodo t_{inizio}** : il suo valore è ricavato dalla relazione

$$t_{inizio} = t_{all} + t_{pre}$$

di conseguenza, tale parametro si sviluppa uniformemente nell'intervallo $(70s \div 190s)$ dall'innesco dell'incendio. Tale parametro assume un valore specifico per ogni singolo individuo, tenendo così conto della variabilità statistica con cui gli individui percepiscono, riconoscono e reagiscono alla condizione di emergenza;

4. **Tempo di movimento t_{tra}** : tale valore viene calcolato direttamente attraverso la simulazione numerica *agent-based*.

Nella *Tabella 41* vengono illustrati gli scenari d'esodo considerati nelle simulazioni; all'interno della modellazione si assume che, nell'ipotesi di posizionamento del focolaio in configurazione P1, le uscite di sicurezza situate in prossimità dell'innesco — indicate nella *Tabella 41* dalle frecce rosse — non siano fruibili dagli utenti.

Tabella 41: Scenari d'esodo

Scenario	Vie di esodo disponibili (verde) e non disponibili (rosso)	Scenario d'incendio
Es-L1-P1	LIVELLO -1 	Fase esercizio L1-P1
Es-L1-P3	LIVELLO -1 	Fase esercizio L1-P3
Es-L2-P1	LIVELLO -2 	Fase esercizio L2-P1
Es-L2-P2	LIVELLO -2 	Fase esercizio L2-P2

8.4.3 - Parametri caratterizzanti dei quattro scenari d'incendio

Nell'ambito dell'approccio prestazionale, basato sulla *Fire Safety Engineering*, la verifica delle strategie di sicurezza si fonda sulla valutazione globale delle risposte strutturali e impiantistiche nei diversi scenari d'incendio analizzati. A tal fine, prima di procedere allo studio di approfondimento della specifica configurazione, viene presentato di seguito un quadro sinottico comparativo che riassume e mette a confronto i parametri fondamentali dell'esodo determinati per ciascuna delle quattro simulazioni condotte in modo indipendente in fase di esercizio. Per ciascuno scenario vengono messi a confronto il

tempo richiesto di esodo RSET, il tempo disponibile per l'evacuazione della popolazione ASET e il relativo margine di sicurezza t_{marg} , calcolato secondo la relazione seguente:

$$t_{\text{marg}} = \text{ASET} - \text{RSET}$$

Si precisa che il valore di RSET è stato determinato tramite simulazione e questo coincide con il tempo impiegato dagli utenti per raggiungere un luogo sicuro dall'istante di innesco dell'incendio.

Tabella 42: Parametri caratterizzanti dei quattro scenari d'incendio

Fase	Piano sede d'innesco	Scenario di esodo	RSET [s]	ASET (occupanti) [s]	t_marg [s]	Tempo simulato t_end [s]
Di esercizio	-1	Es-L1-P1	289	578	289	1254
		Es-L1-P3	240	480	240	1254
	-2	Es-L2-P1	273	546	273	1254
		Es-L2-P2	235	272	37	1254

Dai dati riportati nella *Tabella 42*, emerge una chiara convergenza dei risultati in termini di sicurezza globale. In tutti gli scenari esaminati, il sistema di ventilazione forzata (SEFFC) è in grado di confinare i fumi nella zona d'innesco; pertanto, l'esodo degli utenti avviene senza che questi entrino in contatto con i prodotti della combustione. Le simulazioni fluidodinamiche CFD⁶⁴ dimostrano che la strategia di ventilazione è pienamente efficace in ogni configurazione, mantenendo i fumi confinati all'interno della macro-area di rilevazione. Oltre a quanto detto si precisa che nelle simulazioni si è considerato che:

- Coerentemente con i criteri di accettabilità della FSE, l'ASET è definito come l'istante temporale in cui le condizioni di vivibilità non sono più al di sotto dei valori di soglie limite al di fuori della zona di rilevazione; tale verifica viene condotta esaminando l'evoluzione dei fumi su piani orizzontali posti a 1,8m dal

⁶⁴ Si precisa che, per ragioni di efficacia espositiva, la trattazione grafica dettagliata e i plot delle simulazioni fluidodinamiche CFD sono riportati per il solo scenario L2-P2 nel *Paragrafo 8.5.1*.

piano di calpestio del livello in cui si verifica l'innesco, assumendo come soglia limite prestazionale la riduzione della visibilità sotto la soglia critica di 10m;

- Il margine di sicurezza, in tutti i casi esaminati, risulta sempre essere $t_{marg} \geq 10\% \cdot RSET$, soddisfacendo i requisiti minimi di tutela per la vita umana;
- Sotto il profilo della tossicità ambientale, il valore limite di concentrazione di monossido di carbonio (CO) associato al tempo di esposizione RSET è stato monitorato per ciascuno scenario, assumendo come soglia di riferimento il valore di 600ppm; tale valore è stato trovato applicando la formula citata nel *Paragrafo 8.2* per la quale si ha che:

$$C_{CO,lim} = \frac{D_{max}}{RSET}$$

Si precisa che il valore della soglia di concentrazione limite $C_{CO,lim} = 600ppm$ è stato arrotondato a favore della sicurezza in quanto il massimo valore di RSET richiesto per l'esodo è quello dello scenario L1-P1 (avente $RSET = 289s \approx 4,82min$), mentre 3500ppm rappresenta la dose inalata massima ammissibile per gli utenti (con $FED = 0,1$); quindi, si può notare che il valore esatto di $C_{CO,lim}$ per questo scenario sarebbe pari a

$$C_{CO,lim} = \frac{D_{max}}{RSET} = \frac{3500}{4,82} \approx 726ppm$$

Tuttavia, tale valore scenderebbe — a favore della sicurezza — a 700ppm considerando un valore cautelativo $RSET = 5min$, ma è stato ulteriormente arrotondato a 600ppm per enfatizzare la sicurezza degli occupanti;

- In merito alla colonna che indica il tempo limite di verifica $t_{end} = 1254s$ ⁶⁵, siccome allo scadere di tale intervallo temporale i parametri termici (temperatura ed irraggiamento) si mantengono ovunque al di sotto delle soglie limite di danno fuori dal focolaio, la condizione $ASET_{VVF} > t_{end}$ risulta pienamente verificata, garantendo che l'intervento dei soccorritori venga effettuato in condizioni ambientali sostenibili anche in seguito a imprevisti logistici o ritardi sulla linea di risposta dei soccorsi esterni.

⁶⁵ t_{end} : si precisa che tale concetto è già stato spiegato nel dettaglio nel *Paragrafo 8.2*.

Sotto il profilo della dinamica d'esodo, i dati sinottici evidenziano una variabilità non trascurabile negli RSET, registrando uno scarto di circa 54s tra lo scenario più rapido (L2-P2 $RSET = 235s$) e quello cinematicamente più gravoso (L1-P1 con $RSET = 289s$). Questa fluttuazione dei valori di RSET, strettamente legata alla localizzazione geometrica del focolaio e alla parziale indisponibilità locale delle uscite di sicurezza investite dal fronte d'incendio originario, costituisce un ulteriore presupposto tecnico fondamentale che giustifica l'adozione di un sistema dinamico di tipo DPAS. La variabilità riscontrata dimostra infatti la necessità di implementare una segnaletica d'emergenza adattiva e intelligente, capace di rimodulare i percorsi d'esodo in tempo reale per ottimizzare l'evacuazione in funzione dell'evoluzione specifica dello scenario emergenziale.

Al fine di evitare una trattazione grafica ridondante su configurazioni che presentano una chiara convergenza dei risultati prestazionali, si procede all'analisi di dettaglio di un singolo scenario rappresentativo, individuato nello scenario L2-P2. Tale scelta risponde a un criterio tecnico esplicito basato sulla complessità topologica e geometrica dell'infrastruttura: trattandosi del piano interrato più profondo, esso costituisce il caso di studio più sensibile per l'analisi della stratificazione verticale dei fumi e per la verifica dei margini di sicurezza lungo le vie d'uscita, registrando inoltre la condizione in cui si ottiene il minor margine di sicurezza assoluto per la popolazione, infatti si ha $t_{marg} = 37s$.

L'approfondimento analitico dello scenario L2-P2 include, nel paragrafo seguente, i plot di visibilità, temperatura, concentrazione di CO e irraggiamento in corrispondenza di alcuni istanti caratteristici.

Per la fase di auto-evacuazione, per ogni plot di visibilità viene accoppiato il rispettivo plot che riporta la posizione dinamica degli utenti allo stesso istante. Le mappature grafiche che permettono di mettere a confronto diretto la visibilità e la posizione degli utenti sono riportate per diversi istanti caratteristici compresi nell'intervallo $[0s; RSET = 235s]$.

8.5.1 - Analisi prestazionale e cinematica d'esodo dello scenario L2-P2

L'analisi approfondita dello scenario L2-P2 permette di valutare l'interazione in tempo reale tra lo sviluppo dell'incendio, avente posizione del focolaio d'innescio in P2, e la

cinematica d'esodo degli occupanti al livello interrato più profondo della struttura, ovvero il livello L2. Quindi, viene di seguito riportata l'analisi dettagliata divisa in più sezioni.

Verifica criterio ASET > RSET e margini di sicurezza

Prima di analizzare l'evoluzione fluidodinamica, viene presentata la sintesi numerica della verifica delle condizioni di sicurezza per la salvaguardia della vita umana. I risultati della simulazione combinata esodo-incendio indicano che il tempo richiesto per l'evacuazione completa degli occupanti dal livello -2 (RSET) e il tempo disponibile per l'evacuazione (ASET) sono pari a:

$$RSET_{L2-P2} = 235s$$

$$ASET_{L2-P2} = 272s$$

Confrontando i due parametri appena citati, è possibile determinare il valore del margine di sicurezza t_{marg} :

$$t_{marg} = ASET_{L2-P2} - RSET_{L2-P2} = 272 - 235 = 37s$$

A questo punto è possibile calcolare il valore percentuale di t_{marg} rispetto a RSET:

$$t_{marg,\%} = \frac{t_{marg}}{RST} \cdot 100 = \frac{37}{235} \cdot 100 = 15,7\% \approx 16\%$$

I dati analitici sopra citati sono riassunti nella *Tabella 43*.

Tabella 43: Verifica del criterio ASET > RSET per lo scenario d'incendio L2-P2

Scenario	RSET [s]	ASET [s]	Margine di sicurezza	
			ASET/RSET	
			>30s	≥10%
Esercizio L2-P2	235	272	✓	✓

La verifica $ASET > RSET$ risulta pienamente soddisfatta. Il margine del 16% rispetta il requisito minimo del 10% previsto dai criteri prestazionali della *Fire Safety Engineering* e supera anche la soglia assoluta di salvaguardia 30s, garantendo una solida tutela della popolazione.

Analisi dei criteri di tenibilità e dell'azione della ventilazione (SEFFC)

L'azione del sistema di evacuazione forzata di fumo e calore (SEFFC) risulta determinante nel garantire i margini di sicurezza sopra descritti. La suddivisione del

Livello -2 in più zone logiche di rilevazione consente di massimizzare l'efficacia dell'estrazione meccanica dei fumi già nelle primissime fasi successive all'innesco. Infatti, grazie a tale configurazione impiantistica, i prodotti della combustione vengono confinati efficacemente all'interno della macro-area di rilevazione per l'intero arco temporale necessario al completamento dell'esodo.

Coerentemente con i criteri di tenibilità ambientale stabiliti dall'approccio prestazionale, la determinazione dell'ASET è legata al monitoraggio delle soglie limite al di fuori della zona d'innesco. Nel caso in esame, i parametri termici (temperatura ed irraggiamento) e quelli di tossicità (concentrazione di CO) si mantengono costantemente entro le soglie di danno per tutto il periodo di osservazione. L'unico parametro critico che raggiunge il limite massimo prestazionale è la visibilità, misurata alla quota di 1,8m dal piano di calpestio. Il collasso della visibilità sotto la soglia critica di 10m all'esterno della zona di rilevazione — il cui limite geometrico è identificato nei plot dalla linea gialla tratteggiata — si registra esattamente dopo $t = ASET_{L2-P2} = 272s$, istante che decreta la fine del tempo disponibile per gli occupanti, come mostrato nella *Figura 46*.

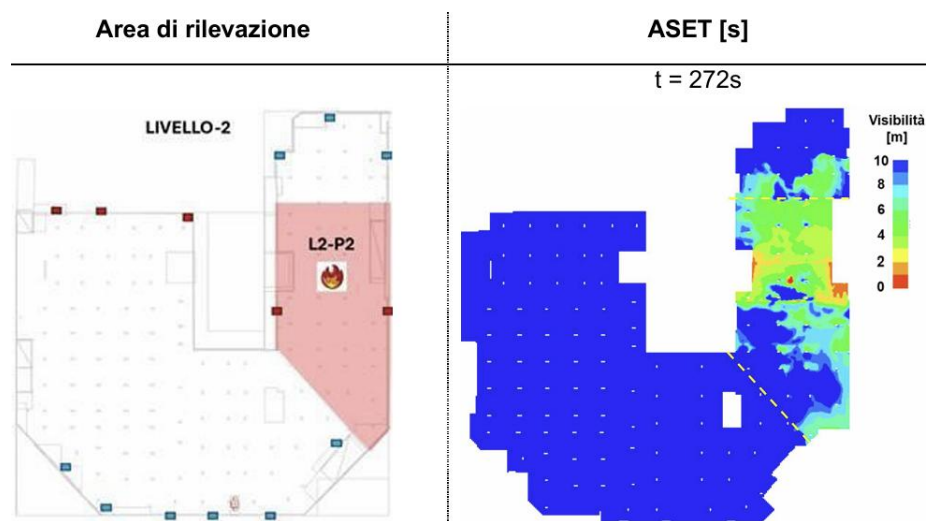


Figura 46: Area di rilevazione e plot di visibilità a quota 1,8m per lo scenario d'incendio L2-P2 all'istante $t = 272s$

Evoluzione dinamica dell'esodo e della visibilità nei plot temporali

L'analisi accoppiata dei successivi plot fluidodinamici e della cinematica degli occupanti evidenzia la totale assenza di interazione diretta tra gli utenti e i fumi caldi o tossici. L'evoluzione temporale dell'evacuazione viene analizzata attraverso i seguenti istanti caratteristici estratti dalle mappature grafiche:

1. **$t = 70s$** : fase iniziale di evacuazione generale verso le vie d'emergenza protette; i plot mostrano una visibilità ottimale lungo tutte le vie d'esodo;
2. **$t = 111s$** : istante fondamentale in cui si registra il totale svuotamento della zona in prossimità del focolaio d'innescio P2; a partire da questo momento, nessun utente si trova più esposto nelle immediate vicinanze dell'incendio;
3. **$t = 130s$ e $t = 190s$** : fasi di esodo avanzato; la popolazione residua si muove in aree dell'autorimessa strutturalmente sicure, mentre i prodotti della combustione rimangono saldamente confinati all'interno della macro-area logica dall'azione del sistema di estrazione;
4. **$t = RSET = 235s$** : completamento dell'evacuazione dal piano interrato; i plot mostrano come l'ultimo utente residuo raggiunga il luogo sicuro esterno, confermando il successo cinematico dell'esodo in totale sicurezza.

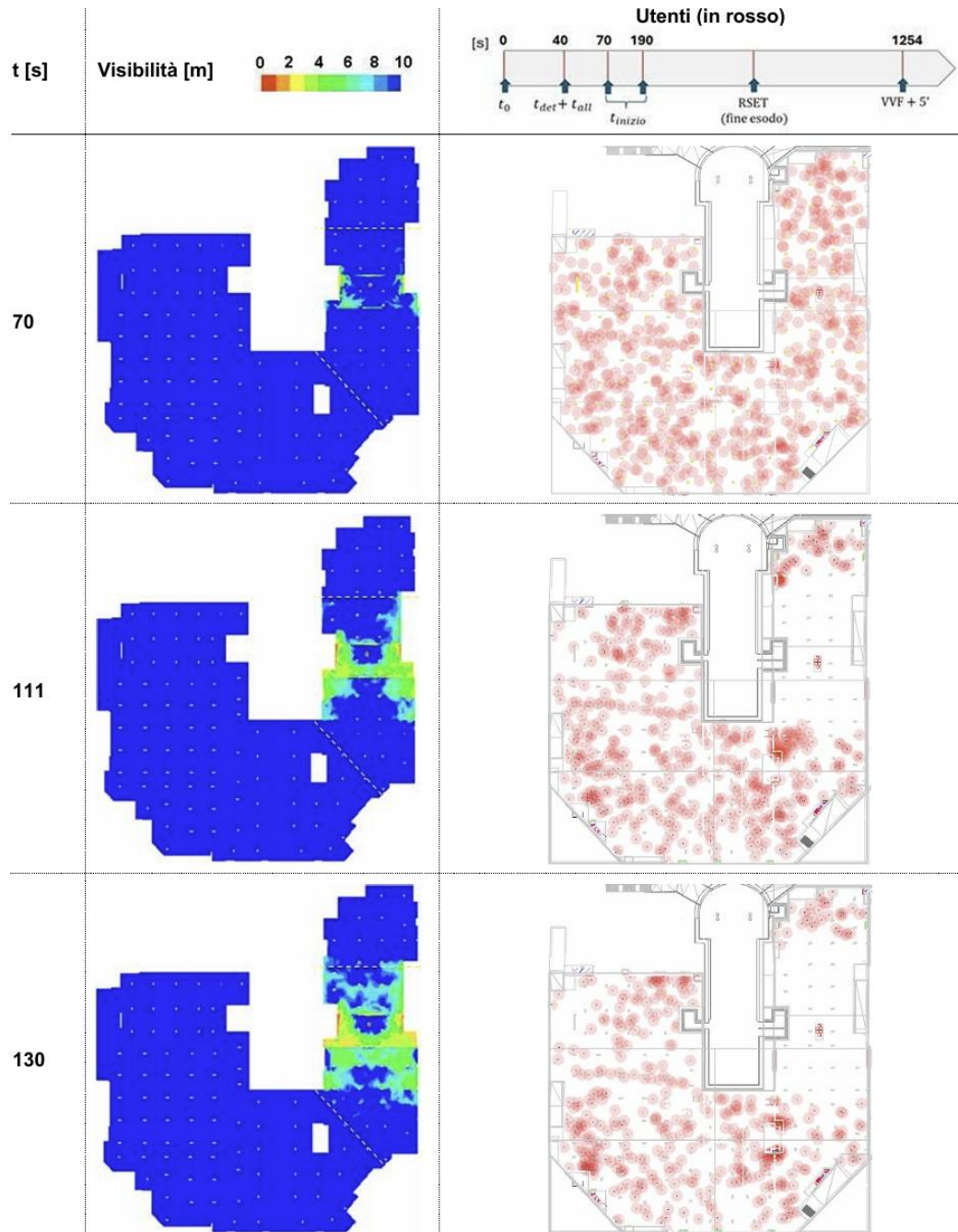


Figura 47: Analisi di dettaglio dello scenario L2-P2 con mappatura accoppiata dei profili di visibilità a quota uomo (a sinistra) e della cinematica d'esodo (a destra) per gli istanti caratteristici $t = 70s$, $t = 111s$ e $t = 130s$

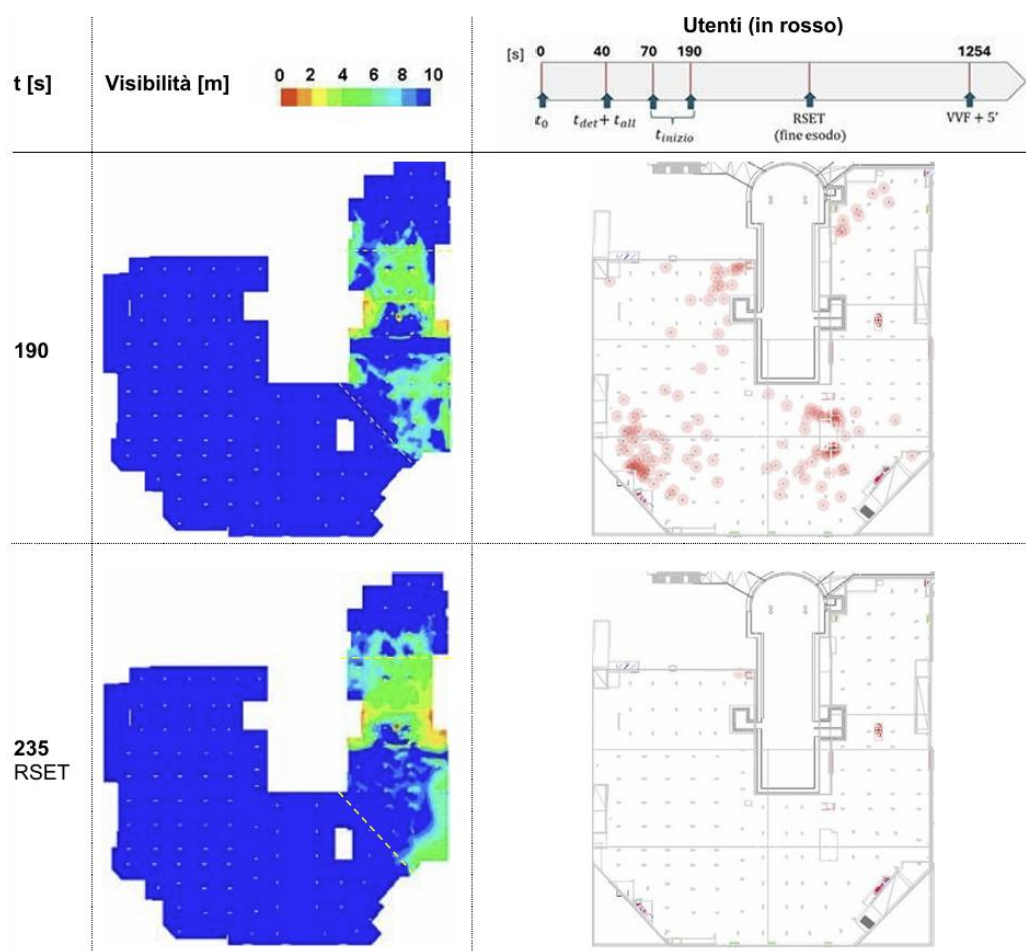


Figura 48: Analisi di dettaglio dello scenario L2-P2 con mappatura accoppiata dei profili di visibilità a quota uomo (a sinistra) e della cinematica d'esodo (a destra) per gli istanti caratteristici $t = 190s$ e $t = RSET = 235s$

Condizioni di tenibilità ambientale a lungo termine per le squadre di soccorso

Al termine della fase di auto-evacuazione della popolazione, ovvero per $t > 235s$, l'azione combinata della ventilazione forzata continua a operare per garantire la sicurezza del compartimento.

All'arrivo delle squadre di soccorso esterne dei Vigili del Fuoco, le condizioni di vivibilità e tenibilità ambientale all'interno dell'infrastruttura interrata si mantengono stabili e sotto controllo. Grazie all'impianto installato, la stratificazione e lo smaltimento dei fumi garantiscono condizioni visive e termiche idonee all'intervento dei VVF, preservando la tenibilità dell'ambiente anche a fronte di eventuali ritardi logistici nelle operazioni di soccorso. L'evoluzione complessiva dei parametri ambientali sul lungo termine, assieme all'andamento della curva di rilascio termico $RHR(t)$, vengono illustrate dettagliatamente nella *Figura 49*, *Figura 50* e *Figura 51*.

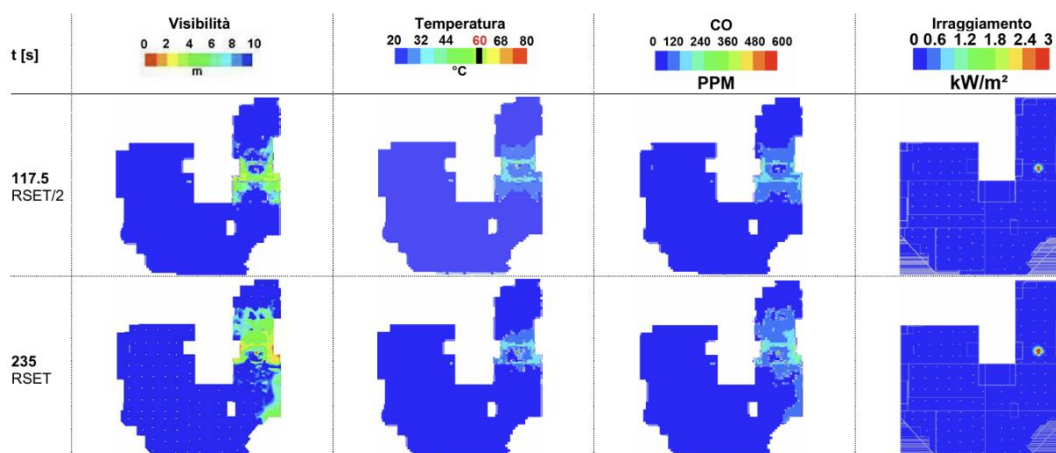


Figura 49: Analisi di dettaglio dello scenario d'incendio L2-P2 con mappatura dei parametri di tenibilità negli istanti temporali $t = \frac{RSET}{2}$ e $t = RSET$

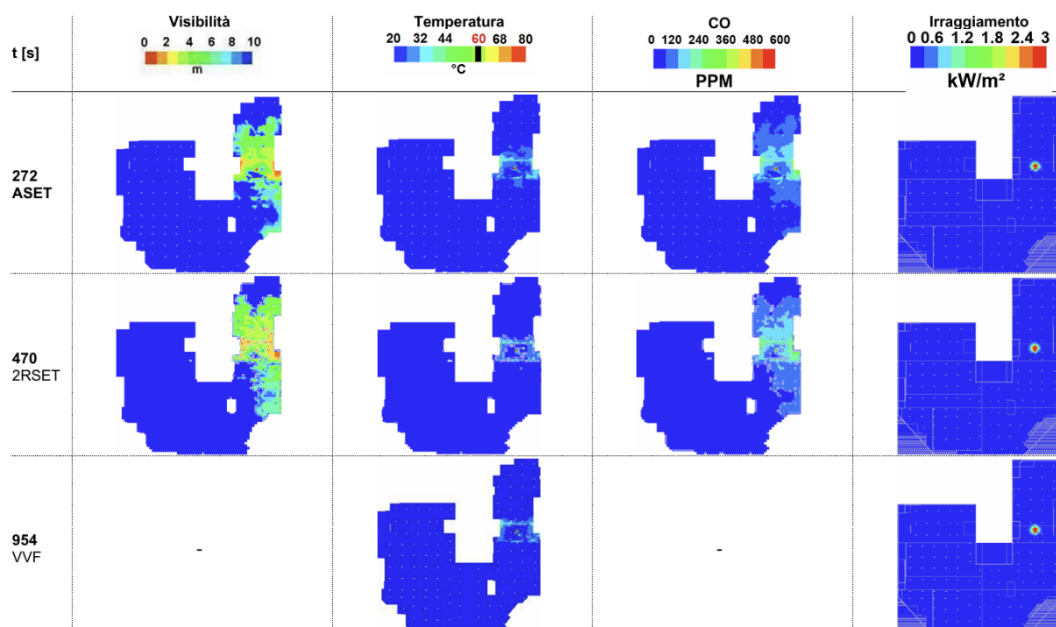


Figura 50: Analisi di dettaglio dello scenario d'incendio L2-P2 con mappatura dei parametri di tenibilità⁶⁶ negli istanti temporali $t = ASET = 272s$, $t = 2 \cdot RSET$ e $t = 954s$

⁶⁶ Si precisa che, in conformità con i criteri prestazionali stabiliti dal D.M. 03/08/2015, per l'operatività delle squadre di soccorso, l'analisi si concentra esclusivamente sui requisiti ambientali termici, quali temperatura e irraggiamento; la verifica dei parametri di visibilità e concentrazione di CO non risulta vincolante per il personale dei Vigili del Fuoco. Infatti, i soccorritori sono equipaggiati con specifici dispositivi di protezione individuale — quali gli Autorespiratori a protezione delle vie respiratorie (APVR) — e sono addestrati a operare in ambienti a visibilità totalmente compromessa tramite l'ausilio di termocamere per l'orientamento e la localizzazione del focolaio, rendendo così non necessario il controllo dei due parametri appena citati.

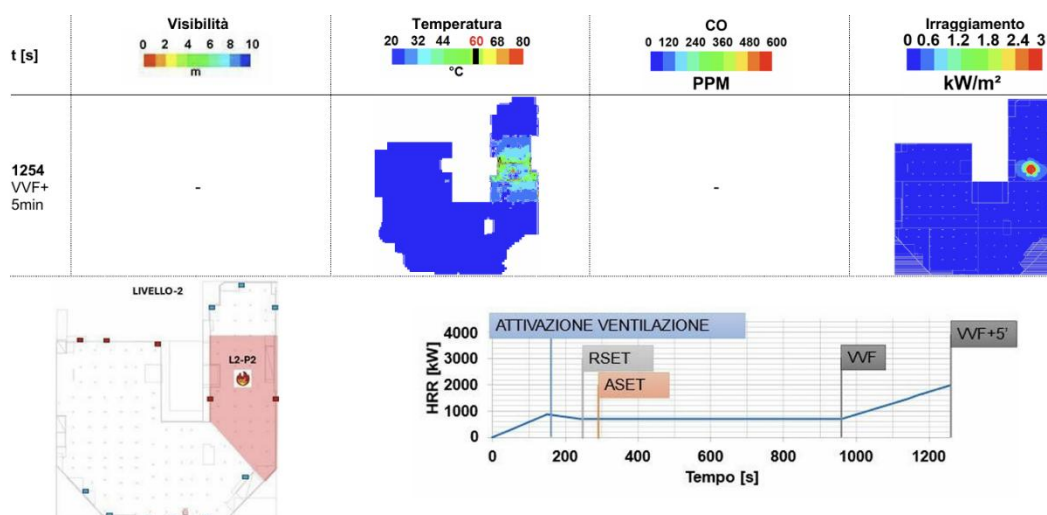


Figura 51: Analisi di dettaglio dello scenario d'incendio L2-P2 con mappatura dei parametri di tenibilità nell'istante temporale $t = t_{end}$ e andamento della curva $RHR(t)$

Verifica squadre antincendio interne (non professionali)

Per completezza di analisi e in piena conformità con i requisiti della misura gestionale S.5 (Gestione della sicurezza antincendio) del D.M. 03/08/2015, è stata condotta una specifica verifica fluidodinamica mirata all'azione delle squadre antincendio interne (personale non professionale).

Il tempo massimo disponibile per gli addetti alle emergenze aziendali, entro il quale è garantita la possibilità di operare in condizioni di sicurezza (i cui criteri sono sintetizzati nella *Tabella 36*), è stato calcolato tramite simulazione fluidodinamica ed è pari a 660s. Questo valore rappresenta l'istante temporale limite di sicurezza, calcolato adottando un approccio cautelativo a favore di sicurezza. Esso è stato ricavato individuando, tra tutti gli scenari d'incendio simulati, il caso più gravoso in cui la visibilità all'esterno della zona d'innesco assume per la prima volta il valore della soglia critica di 5m. Fino a questo preciso momento, le condizioni ambientali nei pressi del focolaio garantiscono la visibilità minima necessaria a permettere agli addetti un approccio sicuro per tentare l'estinzione localizzata dell'incendio.

Di seguito si riporta la mappatura della visibilità ad una quota di 1,8m dal piano di calpestio, all'istante $t = 660s$; la linea tratteggiata inserita nel plot grafico definisce il confine geometrico della zona di rilevazione considerata.

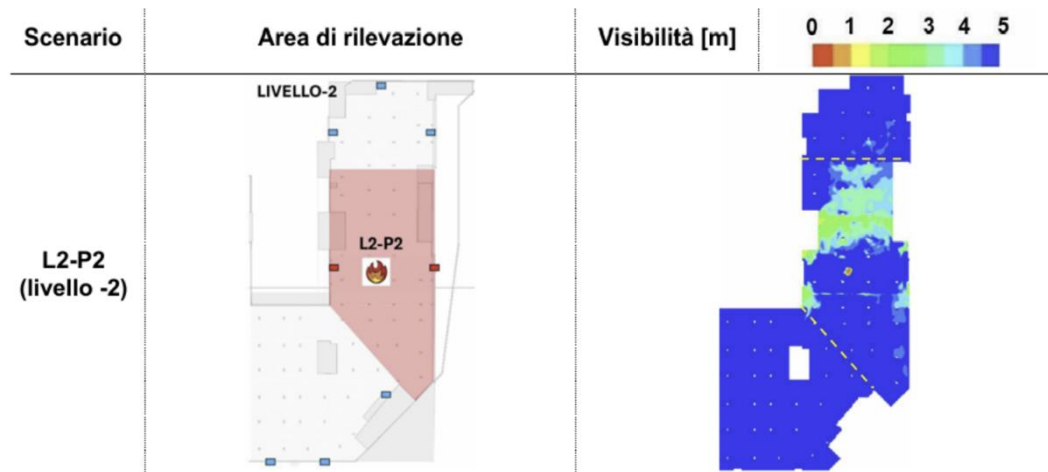


Figura 52: Area di rilevazione e plot di visibilità a quota 1,8m per lo scenario d'incendio L2-P2 all'istante $t = 660s$

8.5.2 - Codici di calcolo utilizzati e sensitività della mesh

Le simulazioni fluidodinamiche a supporto dell'approccio prestazionale sono state condotte impiegando il codice di calcolo FDS (*Fire Dynamics Simulator*), un software di modellazione di campo basato sulla fluidodinamica computazionale (CFD), sviluppato dalla *Fire Research Division* del *National Institute of Standards and Technology* (NIST).

Il codice risolve numericamente le equazioni di Navier-Stokes nella forma per fluidi incomprimibili a bassa velocità (aventi bassi numeri di Mach), nonché le equazioni di conservazione dell'energia e delle specie chimiche. Le equazioni differenziali che descrivono tali fenomeni fisici sono risolte mediante il metodo delle differenze finite su una griglia rettilinea, mentre il trasporto della radiazione termica è calcolato utilizzando la tecnica dei volumi finiti applicata sulla medesima griglia. Il post-processamento grafico dei risultati fluidodinamici è effettuato tramite il codice *Smokeview*, sviluppato anch'esso dal NIST.

La gestione complessiva del pre e post-processing dei dati fluidodinamici è stata affidata al software *Pyrosim*. Questa applicazione grafica permette l'importazione diretta delle geometrie strutturali dell'opera all'interno di un ambiente di modellazione avanzato, in cui il dominio tridimensionale viene discretizzato mediante opportune griglie di calcolo e dove vengono integrati i parametri operativi dei sistemi di estinzione attiva e dei sistemi di ventilazione forzata. Il modello così generato costituisce l'input testuale per il codice FDS.

Per la modellazione cinematica della popolazione è stato utilizzato il software *Pathfinder*, un simulatore specializzato per scenari di evacuazione in condizioni di emergenza, dotato di un'interfaccia utente integrata con uno strumento di visualizzazione tridimensionale dei risultati. *Pathfinder* utilizza un approccio di simulazione di tipo *agent-based*: ogni occupante all'interno della simulazione rappresenta un singolo individuo autonomo, caratterizzato da specifiche dimensioni, comportamenti e obiettivi di fuga. Gli agenti possono inoltre essere organizzati in gruppi logici (es: nuclei familiari), generando una dinamica di movimento fluida e realistica in uno spazio 3D. Ad ogni incremento temporale, ciascun agente esamina l'ambiente circostante e prende decisioni dinamiche in funzione delle condizioni locali in cui si trova (densità di affollamento, distanza reciproca rispetto agli altri utenti e layout delle vie d'esodo). Attraverso l'importazione diretta degli output fluidodinamici generati da FDS, *Pathfinder* è in grado di calcolare la riduzione della velocità di cammino degli occupanti in caso di interazione diretta con i fumi dell'incendio, applicando analiticamente le relazioni sperimentali tra velocità di esodo e visibilità residua.

A conclusione della fase di modellazione fluidodinamica e cinematica, è stata condotta una specifica analisi per la sensitività della griglia di calcolo al fine di garantire l'indipendenza dei risultati numerici e delle curve prestazionali ottenute dalla discretizzazione spaziale della mesh.

Tale verifica è stata effettuata tramite lo sviluppo di uno scenario di controllo aggiuntivo A1, derivato direttamente da uno scenario di riferimento A. La verifica è stata effettuata variando esclusivamente la dimensione della griglia di calcolo in prossimità della zona di incendio, adottando le seguenti geometrie:

- **Scenario A:** griglia di calcolo avente dimensioni pari a $(0,2 \times 0,2 \times 0,2)m$;
- **Scenario A1:** griglia di calcolo avente dimensioni pari a $(0,1 \times 0,1 \times 0,1)m$.

Il confronto quantitativo dei parametri di tenibilità estratti dalle simulazioni sui due scenari ha evidenziato un andamento del tutto analogo e sovrapponibile delle variabili di stato ambientali; tale riscontro numerico garantisce la piena convergenza della soluzione fluidodinamica e l'indipendenza dei risultati complessivi dalla dimensione della griglia adottata. Vengono di seguito messi a confronto i risultati estratti all'istante caratteristico di esodo $t = 325s$ mappati su un piano orizzontale posto alla quota standard di salvaguardia della vita umana pari a $1,8m$ dal piano di calpestio, in termini di:

- Visibilità espressa in [m];
- Temperatura espressa in [°C];
- Concentrazione di CO espressa in [ppm].

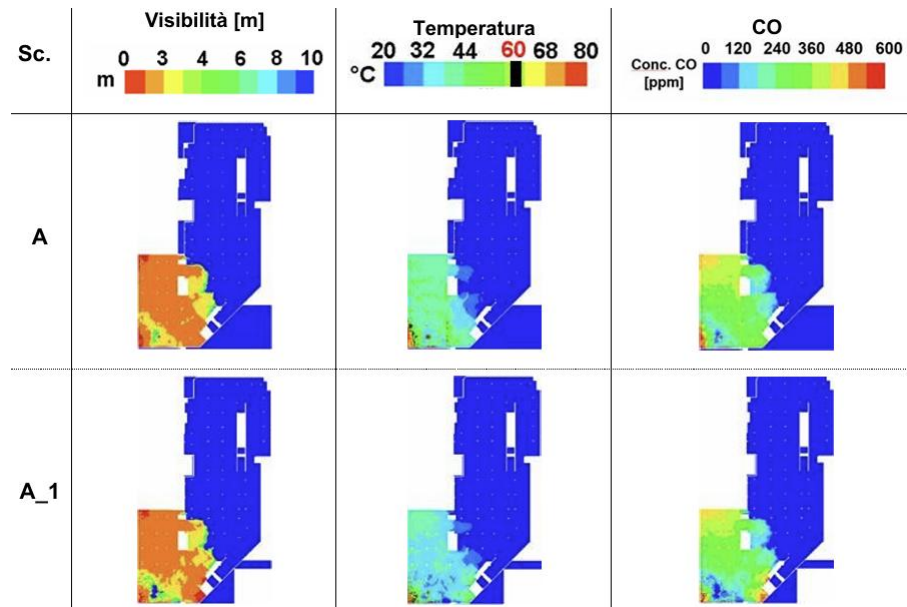


Figura 53: Mappatura di confronto dei profili di visibilità a quota 1,8m all'istante $t = 325s$ per l'analisi di sensitività della mesh

8.6 - Attività di collaudo e prove funzionali sul DPAS

In piena coerenza con l'impostazione metodologica generale dell'opera, la validazione finale del sistema DPAS installato presso l'autorimessa interrata di Piazza Bengasi richiede obbligatoriamente una rigorosa fase di collaudo funzionale e strumentale in cantiere. Tale attività costituisce la convergenza tra i profili fluidodinamici emersi in fase di modellazione e l'effettiva conferma dell'efficacia e dell'affidabilità dei sistemi di sicurezza. Dal punto di vista legislativo, trattandosi di un sistema altamente innovativo, adattivo e integrato, non esiste un'unica norma tecnica o un singolo decreto legislativo che ne definisca in modo univoco le procedure di collaudo. La sua validazione richiede quindi un approccio di sintesi, che consenta di ricondurre il sistema DPAS a tre pilastri normativi e legislativi fondamentali:

1. **D.M. 03/08/2015 e s.m.i. (Codice di Prevenzione Incendi):** definisce il quadro metodologico e i criteri di riferimento per l'approccio prestazionale; attraverso i

capitoli della Sezione G (Regole generali e gestione) e S.8 (Controllo di fumi e calore), impone l'obbligo assoluto di garantire l'affidabilità e la disponibilità nel tempo di questi sistemi, vincolando l'esito delle prove di collaudo svolte sul campo al soddisfacimento degli obiettivi di sicurezza e al mantenimento delle condizioni di tenibilità ambientale necessarie a garantire il tempo di esodo disponibile (ASET) calcolato in fase di modellazione fluidodinamica;

2. **D.M. 01/09/2021 (Decreto Controlli):** rappresenta il cardine dell'attuale quadro normativo relativo al controllo e alla manutenzione degli impianti antincendio; esso sancisce l'obbligatorietà dei controlli periodici, definendo le specifiche competenze dei tecnici manutentori e la documentazione ufficiale necessaria a comprovare la costante efficienza dei sistemi antincendio;
3. **D.M. 37/2008:** regola l'esecuzione a regola d'arte da parte di imprese abilitate; data la natura ibrida e complessa del DPAS, l'impianto si colloca necessariamente all'intersezione di due diverse categorie:
 - **Lettera A:** per quanto riguarda la parte logica, elettronica e di rivelazione (sistema IRAI e algoritmi adattivi);
 - **Lettera C:** per quanto riguarda la parte termo-meccanica di estrazione, canalizzazioni e serrande motorizzate;

Verifiche funzionali e prove prestazionali in cantiere

Al fine di dichiarare la piena operatività del sistema e soddisfare gli obblighi di verifica iniziale, le procedure di collaudo sul campo prevedono l'esecuzione di specifiche prove prestazionali condotte in conformità alle rispettive norme tecniche di settore, atte a validare l'azione del DPAS come "regolatore intelligente" dell'intero ecosistema antincendio basato sugli input forniti dal sistema IRAI. Tra le varie prove, quelle principali che vengono effettuate sono:

- **Prove funzionali sulle sequenze logiche "Zone-Based":** in conformità alla norma UNI 9795 — che disciplina la progettazione, l'installazione e l'esercizio dei sistemi di rivelazione fumi — si procede alla simulazione di un principio di incendio localizzato in una specifica macro-zona di compartimentazione (es: scenario L2-P2) tramite l'attivazione controllata dei sensori ottici. Il collaudo deve accertare che ogni singolo rivelatore invii correttamente il segnale e che la centrale

di gestione attivi le esatte matrici e uscite logiche del sistema DPAS, comandando la commutazione automatica dei flussi con l'avvio degli specifici ventilatori del settore interessato in modalità estrazione e dei ventilatori dei settori adiacenti in modalità immissione forzata;

- **Misura dei tempi di risposta del sistema e allineamento alla FSE:** siccome il DPAS è un sistema validato tramite i metodi prestazionali della FSE, la norma internazionale ISO 23932-1 impone che le prove di messa in servizio rispecchino fedelmente i parametri e i tempi operativi assunti nei modelli fluidodinamici (FDS). Viene pertanto eseguita una mappatura cronometrica per verificare che l'intera sequenza di attivazione automatica avvenga entro i limiti massimi ammessi dalla simulazione. Nello specifico, vengono quantificati i tempi di risposta dell'intera catena funzionale, misurando il ritardo complessivo che intercorre tra l'innescio iniziale dei rilevatori IRAI, l'elaborazione dell'allarme da parte della centrale, l'apertura delle serrande e il regime di funzionamento dei ventilatori del SEFFC;
- **Prove strumentali su scenari reali simulati e verifiche aerauliche:** seguendo le specifiche dettagliate della norma UNI 9494-3 per il controllo iniziale e la manutenzione dei sistemi di evacuazione forzata di fumo e calore (SEFFC), il collaudo prevede l'utilizzo di generatori di fumo freddo non distruttivi o di traccianti chimici idonei per riprodurre visivamente il percorso dei fumi all'interno dell'autorimessa. La prova è finalizzata a verificare che l'azione combinata di estrazione fumi e immissione aria crei l'effetto barriera desiderato, confinando i prodotti della combustione all'interno della macro-area di rilevazione interessata dall'incendio. Allo stesso tempo, si eseguono misure strumentali delle portate d'aria sui ventilatori e le verifiche della velocità dell'aria in corrispondenza delle serrande o delle sezioni di transito; viene anche verificato un controllo sulla corretta commutazione automatica dell'alimentazione elettrica di riserva assicurata dal gruppo elettrogeno;
- **Verifica delle interconnessioni con i sistemi IRAI, EVAC e SEFFC:** il collaudo deve certificare la perfetta comunicazione bidirezionale all'interno dell'intero ecosistema integrato. Oltre all'interfaccia IRAI-DPAS (invio del segnale da parte dell'IRAI e localizzazione dello scenario d'incendio da parte del DPAS) e

all'interfaccia DPAS-SEFFC (comando elettrico e meccanico inviato dal DPAS su serrande e ventilatori), particolare rilevanza assume l'interconnessione con l'impianto EVAC. Secondo i criteri delle norme UNI ISO 7240-19, UNI EN 54-16 e UNI CEN/TS 54-32, le procedure di cantiere devono verificare la perfetta sincronizzazione temporale tra l'instaurazione delle barriere dinamiche aerauliche e l'attivazione sincrona di messaggi EVAC, garantendo un esodo progressivo e guidato degli occupanti lontano dalle aree interessate dai fumi;

- **Verifica dei sistemi di alimentazione ausiliaria e di sicurezza:** viene eseguito un controllo strumentale dell'autonomia e dei tempi di commutazione automatica sulle sorgenti di alimentazione di emergenza — nello specifico, gruppi elettrogeni (GE) e gruppi di continuità (UPS) — al fine di garantire la continuità operativa del sistema DPAS e della centrale IRAI anche in condizioni di totale assenza dell'alimentazione elettrica di rete;
- **Prove di tenuta e isolamento delle serrande tagliafumo e tagliafuoco:** viene verificato il corretto posizionamento e la chiusura ermetica dei dispositivi sui condotti aeraulici; in particolare, tramite l'utilizzo di un micro-manometro differenziale, si accerta la tenuta delle serrande tagliafumo per impedire fenomeni di ricircolo, e l'isolamento delle serrande tagliafuoco per bloccare la propagazione dell'incendio verso i compartimenti sani dell'autorimessa;
- **Misura della sovrappressione nei filtri fumo:** vengono eseguiti rilievi strumentali mediante micro-manometro differenziale all'interno dei locali filtro a prova di fumo, accertando il mantenimento del gradiente di sovrappressione minimo richiesto da progetto per impedire l'ingresso dei fumi verso le vie d'esodo verticali.

Requisiti documentali e validazione prestazionale dell'impianto DPAS

Ai fini della presentazione della S.C.I.A. antincendio e della validazione legale del collaudo, l'impresa installatrice e il professionista abilitato devono raccogliere, verificare e allegare la documentazione tecnica propedeutica, finalizzata a comprovare la conformità dei singoli componenti e dell'intero impianto. Tra i vari documenti risultano imprescindibili i seguenti:

1. **Dichiarazione di Conformità (DiCo)⁶⁷:** redatta dall'impresa installatrice ai sensi del D.M. 37/08 e in conformità alle disposizioni del D.M. 07/08/2012, attesta la corretta posa in opera a regola d'arte di tutti i componenti elettrici, meccanici e speciali asserviti al sistema adattivo;
2. **Certificazioni dei componenti IRAI secondo la serie UNI EN 54:** documentazione attestante che tutti i dispositivi afferenti al sistema IRAI siano provvisti di marcatura CE e di Dichiarazione di Prestazione (DoP) in conformità alle specifiche Parti della serie normativa UNI EN 54. In particolare, tale requisito si applica alle centrali di controllo e segnalazione dotate di logiche di gestione dei guasti, ai rivelatori ottici di fumo e ai pannelli indicatori dinamici per l'esodo;
3. **Certificazioni dei componenti del SEFFC secondo la serie UNI EN 12101:** documentazione tecnica finalizzata ad attestare l'idoneità all'impiego e la classe di resistenza termo-meccanica alle alte temperature dei singoli elementi d'impianto. Nello specifico, la documentazione deve comprendere i certificati dei ventilatori assiali d'estrazione (ai sensi della UNI EN 12101-3) e delle serrande per il controllo dei fumi a comparto multiplo (certificate secondo la UNI EN 12101-8);
4. **Attestazioni antincendio:** compilazione e firma, da parte di un professionista iscritto negli elenchi del Ministero dell'Interno, del modello ministeriale CERT.IMP, il quale costituisce l'atto ufficiale di certificazione per la corretta installazione e il funzionamento degli impianti rilevanti ai fini della sicurezza antincendio. Tale atto formale, emesso a valle del riscontro positivo di tutte le prove di collaudo prestazionali e funzionali eseguite in campo, raccorda le risultanze dell'analisi fluidodinamica del caso studio all'impostazione legislativa e impiantistica dell'opera, validando l'efficacia e la sicurezza del sistema DPAS per l'autorimessa interrata.

⁶⁷ **Dichiarazione di Conformità:** tale argomento è trattato nel dettaglio nel *Paragrafo 1.4.3*.

CONCLUSIONI

L'attività di collaudo degli impianti elettrici nelle infrastrutture pubbliche rappresenta una fase critica e imprescindibile per garantire la sicurezza e la continuità del servizio dal momento in cui l'opera viene aperta al pubblico. Come analizzato nella prima parte dell'elaborato, il collaudo deve essere inteso come un processo sistematico di validazione delle prestazioni; è stato evidenziato come la corretta esecuzione delle verifiche strumentali (continuità, isolamento, verifica dei sistemi di protezione) costituisca la base necessaria su cui sviluppare le successive fasi di integrazione impiantistica, in conformità con gli standard di controllo e manutenzione imposti dalla normativa vigente.

L'analisi svolta ha dimostrato come, in infrastrutture ipogee di elevata complessità geometrica, l'adozione di un sistema IRAI tradizionale possa spesso risultare inadatta a garantire i livelli di sicurezza antincendio richiesti dal quadro normativo attuale. Il caso studio di Piazza Bengasi evidenzia la necessità di una transizione verso architetture di gestione dell'esodo di tipo dinamico o, più efficacemente, adattivo (DPAS), capaci di ricalibrare i percorsi di fuga in base all'evoluzione in tempo reale dell'incendio.

La validazione mediante la metodologia della *Fire Safety Engineering* ha permesso di quantificare il valore del margine di sicurezza t_{marg} attraverso il criterio $ASET > RSET$, dimostrando come l'efficacia del DPAS non risieda soltanto nella tecnologia innovativa dei dispositivi di segnalazione, ma anche nella loro integrazione logica con gli altri impianti di protezione attiva (SEFFC ed EVAC).

Il futuro della professione ingegneristica, nell'ambito della sicurezza antincendio, sarà sempre più orientato verso l'integrazione tra sistemi IRAI tradizionali e tecnologie adattive DPAS, garantendo che l'affidabilità dei singoli presidi sia preservata all'interno di un'infrastruttura dinamica e interconnessa. In tale contesto, l'attività di collaudo evolve da semplice verifica di conformità elettrica a complesso processo di validazione funzionale: è emerso chiaramente come le prove non debbano limitarsi alla sola verifica strumentale dei componenti, ma debbano necessariamente includere test su scenari simulati e la validazione rigorosa delle matrici logiche che governano l'intero sistema.

RINGRAZIAMENTI

Si conclude così, finalmente, il capitolo della mia vita dedicato al mondo universitario. Chi mi conosce davvero sa benissimo che non sono particolarmente propenso a esprimere i miei pensieri, ma, in questa occasione di così grande importanza, ci tengo a farlo con trasparenza.

Prima di citare le persone che hanno REALMENTE contribuito al raggiungimento di questo mio grande traguardo, desidero condividere alcuni concetti, per me fondamentali, che mi hanno guidato lungo tutto questo percorso. *“Quello che ottieni lo vedono tutti, ma solamente tu sai quanto ti è costato”*; ho riportato questa frase, volutamente senza alcun commento, come spunto di riflessione per chiunque leggerà questo testo. Con questo mi collego direttamente al secondo concetto chiave della mia persona: la volatilità del TEMPO. Sebbene mi fossi già interrogato a lungo su questo principio, ancor prima di intraprendere il mio percorso a Torino, l’esperienza che ho vissuto ne ha mutato radicalmente la percezione. Ho compreso che questo scorre con una sua ineluttabilità, come un automatismo silente che procede indipendentemente dalla nostra volontà e dalla nostra consapevolezza. Ricordo ancora quando, tre anni fa, guardavo al lontano traguardo di concludere il Politecnico, senza riuscire a vedere una fine concreta; eppure, quel tempo che credevo infinito, si è consumato in un soffio impercettibile, portandomi fino a qua.

Il primo ringraziamento lo riservo ai miei genitori, Elena e Pierpaolo, senza i quali non sarei mai riuscito ad arrivare dove sono oggi. Grazie a mio padre, per aver sostenuto il mio intero percorso con generosità, mettendo a disposizione tempo e risorse con costante dedizione, senza farmi mai mancare nulla; grazie a mia madre, per la sua continua e premurosa presenza e per l’interesse sincero che ha sempre rivolto verso i miei studi. Approfito anche per esprimere la mia gratitudine per tutti i sani valori che siete riusciti a trasmettermi negli anni, come il rispetto, il senso del dovere, la lealtà e soprattutto la RICONOSCENZA.

Il ricordo più autentico che porterò con me da questa esperienza torinese è l’incontro con Renato: da semplice coinquilino è diventato, giorno dopo giorno e con naturale spontaneità, uno dei miei più cari AMICI. Renato è stato la figura cardine del mio percorso lontano da Trieste ed è lui il protagonista di gran parte dei ricordi più belli e significativi che conservo di questo tempo.

Ho deciso di riservare uno spazio in questa sezione della mia tesi anche a Salvo: un amico che, nonostante la distanza imposta dai nostri rispettivi impegni, non ha MAI fatto mancare la sua presenza. Ci siamo sempre tenuti in contatto e ho davvero apprezzato il suo interesse nei confronti del mio percorso accademico, nonostante si trattasse di temi ben lontani dalla sua quotidianità.

Ritengo doveroso rivolgere un pensiero a mia nonna Marina. Anche se oggi non sei qui a sedere in prima fila, sono certo che hai assistito a ogni istante di questa cerimonia, guardandomi dal “posto più alto della sala” e gioendo assieme a me. Il traguardo raggiunto oggi, alla fin fine, è anche merito del ricordo tuo, che mi ha dato motivo di ambire sempre al massimo e che continuo a portare con me negli anni, a partire da quella cupa mattinata del gennaio 2020.

La persona che più devo ringraziare è il Simone di 21 anni, che nonostante l’inizio completamente avverso nel quale si è trovato a Torino, non si è lasciato intimorire, riuscendo ad ottenere il titolo di Ingegnere Elettrico magistrale con questi risultati. Mai riuscirò a scordare quell’orrenda sensazione, a me sconosciuta fino a quel giorno, alla mia prima lezione al Politecnico con il prof. Cavangino di Macchine Elettriche II, il 16 ottobre 2023: mi sentivo inadeguato all’ambiente in cui volevo inserirmi, come se stessi facendo la scelta sbagliata, completamente solo in una città grigia con la quale non avevo alcun legame. Nonostante questo inizio fortemente scoraggiante, però, la mia determinazione, ambizione e orgoglio hanno avuto la meglio, permettendomi così di raggiungere la luce in fondo al tunnel di un percorso interamente in salita.

Voglio concludere questa sezione della mia tesi dedicando un pensiero a mio fratello Carlo, che sta ultimando le superiori. Tieni presente che anche io, proprio come te, sono partito da semplice studente del liceo scientifico: uno come tanti, senza nemmeno essere il più bravo della classe. Eppure, con gli anni, guarda dove sono arrivato e con quali risultati. Ricordati sempre di credere in te stesso e di prediligere obiettivi più che ambiziosi, in quanto tra il loro conseguimento e la tua posizione attuale c’è di mezzo solamente la tua volontà e la tua determinazione nel raggiungere quel traguardo.

RIFERIMENTI NORMATIVI E LEGISLATIVI

Disposizioni Legislative (Leggi, Decreti, D.P.R.)

- **D.lgs. 9 aprile 2008, n. 81** – Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro
- **D.lgs. 36/2023** – Codice dei contratti pubblici
- **D.M. 37/2008** (D.M. 37/08) – Regolamento in materia di attività di installazione degli impianti
- **D.M. 03/08/2015** – Codice di prevenzione incendi
- **D.M. 18/10/2019** – Modifiche al Codice di prevenzione incendi
- **D.M. 01/09/2021** – Decreto Controlli
- **D.M. 20/12/2012** – Regola tecnica di prevenzione incendi per gli impianti di protezione attiva contro l'incendio
- **D.P.R. 380/2001** – Testo unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia edilizia
- **D.P.R. 462/01** – Regolamento di semplificazione del procedimento per la denuncia di installazioni e dispositivi di protezione contro le scariche atmosferiche
- **D.P.R. 151/2011** – Regolamento recante semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione degli incendi
- **Legge n. 186/1968** – Disposizioni relative alla sicurezza degli impianti elettrici

Norme Tecniche e Specifiche (UNI, CEI, ISO, ZVEI)

- **CEI 0-2:2022** – Guida per la definizione della documentazione di progetto degli impianti elettrici
- **CEI 20-105** – Cavi elettrici per impianti di segnalazione e allarme
- **CEI 64-8** – Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale < 1000V in AC
- **CEI EN 50200** – Metodo di prova per la resistenza al fuoco di piccoli cavi
- **CEI EN 61131** – Controllori programmabili

- **CEI EN 61557** – Sicurezza elettrica nei sistemi di distribuzione a bassa tensione
- **ISO 13571** – Linee guida per la stima dei tempi di sopravvivenza in caso di incendio
- **ISO/TR 16738:2009** – Calcolo dei tempi di esodo (FSE)
- **NTC 2018** – Norme Tecniche per le Costruzioni
- **prCEN/TS 12101-11** – Sistemi per il controllo di fumo e calore
- **UNI 9494-1** – Sistemi per il controllo di fumo e calore
- **UNI 9494-2** – Sistemi per il controllo di fumo e calore
- **UNI 9494-3** – Sistemi per il controllo di fumo e calore
- **UNI 9795:2021** – Sistemi fissi automatici di rivelazione e di segnalazione allarme incendio
- **UNI 10779** – Impianti di estinzione a idranti
- **UNI 11224** – Controllo iniziale e manutenzione dei sistemi di rivelazione incendio
- **UNI CEN/TS 54-32** – Sistemi di rivelazione e allarme incendio
- **UNI EN 54 (serie)** – Sistemi di rivelazione e di segnalazione allarme incendio
- **UNI EN 54-16** – Sistemi di allarme vocale
- **UNI EN 1155** – Dispositivi di apertura elettromagnetica per porte battenti
- **UNI EN 1838** – Illuminazione di emergenza
- **UNI EN 1991-1-2** – Azioni sulle strutture - Azioni in caso di incendio
- **UNI EN 12101-3** – Sistemi per il controllo di fumo e calore - Specifiche per i ventilatori
- **UNI EN 12101-6** – Sistemi per il controllo di fumo e calore - Sistemi a sovrappressione
- **UNI EN 12101-8** – Sistemi per il controllo di fumo e calore - Serrande
- **UNI EN 12845** – Sistemi automatici a sprinkler
- **UNI EN ISO 7010** – Segnali di sicurezza (inclusa la variante F007)
- **UNI ISO 16069:2019** – Sistemi di guida all'esodo (SWGS)

- **UNI ISO 23601** – Piani di emergenza ed evacuazione
- **UNI ISO 23932-1** – Ingegneria della sicurezza antincendio
- **UNI ISO 7240-19** – Sistemi di rivelazione e di allarme incendio
- **ZVEI 33013** – Explanatory Leaflet - Adaptive Escape Routing

SITOGRAFIA

- [1] <https://www.infobuild.it/approfondimenti/livelli-progettazione-appalti-pubblici-progetto-fattibilita-definitivo-esecutivo/>
- [2] <https://focu-safety.com/2023/12/17/quali-sono-le-tipologie-di-rivelazione-di-incendio/>
- [3] <https://buildings.honeywell.com/it/it/products/by-category/sensors/multi-criteria-sensors/o-so-optical-smoke-detector-iq8quad>
- [4] <https://www.setronicverona.com/principio-di-funzionamento-dei-rilevatori-lineari/>
- [5] https://www.fspsistemi.it/files/Manuale-ASD-ED4_R0-FSP.pdf
- [6] <https://zanocco.net/antincendio/>
- [7] <https://www.digitecsicurezza.com/rilevatore-termovelocimetrico/>
- [8] <https://www.siemens.com/it-it/products/fire-detection/flame-detectors/>
- [9] <https://riellofire.com/prodotto/rilevatore-di-gas-vapori-di-benzina-ip66-atex/>
- [10] <https://www.zvei.org/en/press-media/publications/adaptive-escape-routing>
- [11] <https://www.normattiva.it/>
- [12] <https://www.ceinorme.it/>
- [13] <https://www.uni.com/>
- [14] <https://inotec-licht.it/prodotti/sistema-dinamico-der/>
- [15] https://www.assil.it/wpcontent/uploads/2023/02/cooper_csa_srl_154160483_6_brochure_sistema_di_evacuazione_dinamica_ae_cu.pdf
- [16] https://www.inotec-licht.de/fileadmin/myview_assets_sync/pdf/CAT_EN-707022-D.E.R._Catalogue.pdf